

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 1(41)

2020

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
6. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
8. Зыкина Анна Владимировна – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
9. Каргапольцев Сергей Константинович – ректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
10. Косарев Александр Борисович – первый зам. генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
11. Лю Цзинькунь – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
12. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
13. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
14. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
15. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Подвижной состав» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
16. Файзибаев Шерзод Сабирович – зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» Ташкентского государственного транспортного университета, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
17. Харламов Виктор Васильевич – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор.

EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ilkham Islamovich – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Cheremisin Vasily Titovich – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
6. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
7. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
8. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Kargapolcev Sergey Konstantinovich – rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
10. Kosarev Alexander Borisovich – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
11. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
12. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
13. Paramonov Alexander Mikhailovich – professor of the department «Heat-power» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk).
14. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
15. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Rolling stock» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
16. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – head of the department «Wagons of Tashkent State Transport University, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
17. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Плаксин А. В. Пути повышения топливно-энергетической эффективности специального и маневрового подвижного состава при снегоуборке.....2
- Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Комякова Т. В. Обоснование внедрения двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа в системе электроснабжения метрополитена.....11
- Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю., Романовский А. И., Дивинец М. А. Основы проектирования промышленной установки для упрочнения полимерной изоляции магнитной системы тягового двигателя электровоза тепловым излучением.....20
- Рябенков Н. Л., Алексеева Т. Л., Астраханцев Л. А., Тихомиров В. А. Энергетическая эффективность тягового привода магистральных электровозов.....29
- Сидоров О. А., Смердин А. Н., Слатин А. И. Совершенствование методики диагностирования теплового разупрочнения токоприемников электроподвижного состава.....41
- Каптанов А. Л., Дмитриев А. Д. Методы выбора уставок срабатывания системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока.....50
- Утепбергенова С. М., Томилов В. В. Усовершенствованная математическая модель теплового состояния полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава постоянного тока.....58
- Кушнирук А. С. Система управления техническим состоянием локомотивного парка на основе искусственной нейронной сети прогнозирования72
- Мухамедова З. Г. Совершенствование принципов проектирования оборудования монтажной площадки автотоматрисы с учетом норм надежности и реального состояния...83
- Носков В. О., Белоглазов А. К., Белоглазова Н. А. Применение методики обобщенных технико-экономических показателей работы тепловозов в эксплуатации91
- Никифоров М. М. Совершенствование методики определения потерь электроэнергии на тягу поездов.....98

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Капустян М. Ф., Обрывалин А. В., Аверков К. В., Супчинский О. П. Способ исключения термомеханических повреждений поверхности катания вагонных колес при роспуске грузовых составов на немеханизированных сортировочных горках.....107

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

- Ляхметкина Н. Ю., Макарова А. М. Технологические решения управления грузными и порожними пробегами.....114

Электрические станции и электроэнергетические системы

- Геркусов А. А. Влияние температуры проводов воздушной линии электропередачи на их сопротивление и потери электроэнергии.....123

Энергетические системы и комплексы

- Гужов С. В. О прогнозировании спроса на электроэнергию энергосистемами регионов Российской Федерации с применением искусственных нейронных сетей133

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

УДК 629.4

А. В. Плаксин

Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Новосибирск, Российская Федерация

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПЕЦИАЛЬНОГО И МАНЕВРОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ СНЕГОУБОРКЕ

Аннотация. Внедренная на сети российских железных дорог система контроля загрузки снегоуборочных поездов позволила выявить случаи вывоза объема снежной массы значительно меньше возможной при очистке железнодорожных путей от снега, что приводит к недоиспользованию мощности снегоуборочных поездов и маневровых тепловозов и нерациональному использованию топливно-энергетических ресурсов на работу подвижного состава.

Цель работы – рассмотреть топливно-энергетическую эффективность снегоуборочных поездов и осуществляющих их перемещение маневровых тепловозов и определить пути снижения расхода топливно-энергетических ресурсов на выполнение работ по очистке путей от снега (в хозяйственном движении).

Для достижения указанной цели в одном из структурных подразделений ОАО «РЖД» был оценен объем вывоза снега снегоуборочными поездами, рассчитаны значения механической работы, выполняемой тепловозами на перемещение снегоуборочной техники и расход топлива снегоуборочными поездами и тепловозами на выполнение работ по очистке путей от снега. На основании проведенного сравнительного анализа сделан вывод об имеющихся резервах повышения топливно-энергетических показателей подвижного состава при очистке путей от снега и предложены методика, позволяющая оценить суммарный расход топлива на уборку снега снегоуборочными поездами и тяговыми единицами (локомотивами), и способы повышения топливно-энергетической эффективности снегоуборочных поездов и работающих с ними тяговых средств, такие как использование подвижного состава с рациональным значением массы и мощности в зависимости от погодных условий.

Ключевые слова: расход топлива, механическая работа, локомотив, снегоуборочный поезд, скорость движения, масса вагонов, тяговые единицы, объем убранного снега.

Alexey V. Plaksin

The West Siberian railway – branch of JSC «Russian Railways», Novosibirsk, the Russian Federation

WAYS TO IMPROVE THE FUEL AND ENERGY EFFICIENCY OF SPECIAL AND SHUNTING ROLLING STOCK DURING SNOW REMOVAL

Abstract. Introduced on the Russian Railways network monitoring system download the snow train has allowed to identify cases of export volume of the snow mass is much less possible when cleaning railway tracks from snow, which leads to the underutilization of capacity of the snow trains and shunting locomotives and irrational use of fuel and energy resources for operation of rolling stock.

The purpose of the work is to consider the fuel and energy efficiency of snow-removal trains and shunting locomotives carrying out their movement and to determine ways to reduce the consumption of fuel and energy resources for the performance of works on cleaning the tracks from snow (in economic traffic).

To achieve this goal, one of the structural divisions of JSC "Russian Railways" estimated the volume of snow removal by snow-removal trains, calculated the values of mechanical work performed by locomotives to move snow-removal equipment and fuel consumption by snow-removal trains and locomotives to perform work on clearing snow from the tracks. On the basis of the comparative analysis the conclusion is made on the available reserves of increase of fuel and energy performance of the rolling stock while clearing paths of snow and the technique allowing to estimate the total fuel consumption for snow removal snow plow trains and traction units (locomotives), and ways to improve the power efficiency of snow-removing trains and working with them traction means, such as the use of rolling stock with a rational value of mass and power depending on weather conditions.

Keywords: fuel consumption, mechanical work, locomotive, snow train, speed, mass of cars, traction units, volume of snow removed.

Снижение расхода топлива на железнодорожном транспорте является важной задачей, и данному вопросу уделяется повышенное внимание со стороны специалистов железнодорожного транспорта и многих ученых отраслевых вузов.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В настоящее время железнодорожный транспорт потребляет около 10 % от общего расхода дизельного топлива в стране, из которых 90 % приходится на тягу поездов [1]. Значительное количество топлива расходуется на хозяйственную работу, осуществляемую тепловозным парком, в том числе и на работу со снегоуборочными поездами (СП) в зимний период времени. Так, за февраль 2019 г. согласно данным автоматизированной системы централизованной обработки маршрутов машинистов (АС ЦОММ) расход на хозяйственное движение на Западно-Сибирской железной дороге составил 470,265 т дизельного топлива, из которых 222,871 т, или 47,4 %, израсходовано на работу со снегоуборочной техникой. Кроме этого согласно данным автоматизированной системы управления процессами эксплуатации и обслуживания специального подвижного состава (АСУ СПС) на работу СП было затрачено 156,626 т дизельного топлива.

Специалистами СГУПС под руководством профессора А. Д. Абрамова разработана и интегрирована в автоматизированную систему контроля за работой специального подвижного состава (АС КРСПС) система контроля загрузки снегоуборочных поездов [2], которая позволила объективно оценить объем убранного СП снега и выявить случаи вывоза количества снежной массы значительно меньше возможной. В таблице 1 приведен анализ работы СП марки СМ-2 в одном из подразделений ОАО «РЖД» за февраль 2019 г., выполненный по данным информационных систем АС КРСПС и АСУ СПС.

Таблица 1 – Анализ работы снегоуборочных поездов марки СМ-2 в структурном подразделении ОАО «РЖД» в феврале 2019 г.

№ п/п	Номер единицы техники	Число поездок	Объем убранного снега по данным АС КРСПС, м ³	Средний объем убранного за поездку снега, м ³	Расход топлива по данным АСУ СПС, кг	Удельный расход топлива, кг/м ³
1	СМ-2М № 1561	3	161,31	53,77	243,60	1,51
2	СМ-2 № 1352	7	876,04	125,15	730,80	0,83
3	СМ-2 № 1368	15	830,72	55,38	1315,44	1,58
4	СМ-2 № 1652	13	850,08	65,39	1306,20	1,54
5	СМ-2 № 1481	7	993,29	141,90	688,80	0,69
6	СМ-2 № 1843	4	187,29	46,82	243,60	1,30
7	СМ-2 № 1181	3	928,28	309,43	277,20	0,30
Итого по имеющейся технике		52	4827,01	92,83	4805,64	1,00

Как следует из данных таблицы 1, в феврале 2019 г. семью единицами снегоуборочной техники было совершено 52 поездки, за которые, по данным информационной системы АС КРСПС, было вывезено 4827,01 м³ снега (средней объем убранного одним СП снега за поездку составил 92,83 м³), при этом на работу данной техники было израсходовано 4805,64 кг дизельного топлива.

Помимо расхода топлива СП на уборку снега имеют место затраты топлива на работу тепловозов, которые осуществляют перемещение данной техники.

С целью оценки суммарного расхода топлива на очистку путей от снега, по данным информационных систем АС КРСПС, АСУ СПС и АС ЦОММ, был проведен анализ работы снегоуборочного поезда СМ-2 № 1652 и работающих с ним тепловозов за февраль 2019 г. Результаты этого анализа приведены в таблице 2.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Анализ работы снегоуборочного поезда СМ-2 № 1652 с тепловозами в феврале 2019 г.

№ п/п	Дата	Объем убранного снега по данным АС КРСПС, м³	Расход топлива СП по данным АСУ СПС, кг	Расход топлива тепловозом по данным АС ЦОММ, кг	Суммарный расход топлива, кг	Удельный расход топлива СП, кг/м³	Удельный расход топлива тепловозом, кг/м³	Удельный суммарный расход топлива, кг/м³
1	01.02.2019	118,1	117,6	147	264,6	1,00	1,24	2,24
2	03.02.2019	65,23	117,6	127,5	245,1	1,80	1,95	3,76
3	04.02.2019	11,05	84,0	131	215,0	7,60	11,86	19,46
4	04-05.02.2019	111,99	117,6	143	260,6	1,05	1,28	2,33
5	08.02.2019	41,51	100,8	153	253,8	2,43	3,69	6,11
6	11.02.2019	58,09	84,0	118	202,0	1,45	2,03	3,48
7	12.02.2019	121,65	100,8	146	246,8	0,83	1,20	2,03
8	13.02.2019	91,85	96,6	150	246,6	1,05	1,63	2,68
9	14.02.2019	36,39	92,4	85	177,4	2,54	2,34	4,87
10	19.02.2019	55,91	100,8	135	235,8	1,80	2,41	4,22
11	20.02.2019	8,48	96,6	34	223,6	11,39	14,98	26,37
12	22.02.2019	42,12	109,2	152	261,2	2,59	3,61	6,20
13	26.02.2019	87,71	100,8	85	185,8	1,15	0,97	2,12
	Итого	850,08	1318,8	1699,5	3018,3	1,55	2,00	3,55

Анализ работы, проведенный по одной единице снегоуборочной техники (см. таблицу 2), показал, что средний объем загруженного за смену снега составил 65,38 м³, в то время как СП из четырех вагонов (один головной, два промежуточных и один концевой) с максимальной наполняемостью вагонов 340 м³ [3] способен вывозить значительно больший объем снега за смену (например, 1000 м³ снежной массы и более).

Малый объем вывезенного за смену снега приводит к нерациональному использованию снегоуборочной техники, тепловозного парка и мощности тепловоза, что приводит к завышенному расходу дизельного топлива на работу СП и тепловозов и дополнительным издержкам ОАО «РЖД».

Рассмотрим возможные пути снижения расхода топлива на работу СП и работающих с ними тепловозов.

Расход топлива на работу СП определяется так [4]:

$$B_{\text{СП}} = b_p \cdot T_p + b_{\text{х.х}} \cdot T_{\text{х.х}}, \quad (1)$$

где b_p и $b_{\text{х.х}}$ – нормы удельного расхода топлива для СП в рабочем режиме и на холостом ходу, зависящие от марки двигателя;

T_p , $T_{\text{х.х}}$ – время работы СП в рабочем режиме и на холостом ходу.

Расход топлива на работу тепловоза обычно определяют по формуле [5]

$$E_{\text{т}} = \sum_1^n G \Delta t + g_{\text{х.х}} t_{\text{х.х}}, \quad (2)$$

где n – количество шагов, пройденных в режиме тяги;

G – расход топлива, соответствующий скорости движения при используемой позиции контроллера машиниста;

Δt – время работы дизеля, в пределах которого скорость движения поезда принята постоянной;

$g_{\text{х.х}}$ – расход топлива тяговыми силовыми установками тепловоза или дизель-поезда на холостом ходу;

$t_{\text{х.х}}$ – время движения поезда по участку на холостом ходу.

Величина G определяется по расходным (топливным) характеристикам тепловозов [5] в зависимости от позиции контроллера машиниста и скорости движения на шаге n , при этом указанные характеристики представлены в работе [5] не для всех тяговых средств. Кроме того, опытные поездки показали, что маневровые тепловозы ТЭМ18ДМ при работе с СП эксплуатируются, как правило, в режимах на 1-2 позициях контроллера машиниста с переходом на выбег и для определения расхода топлива тепловозами при работе с СП необходимо знать точное время движения на каждой позиции. Если же проводить сравнительный анализ с другими тяговыми единицами (например, которые не упоминаются в работе [5]), то сложно спрогнозировать, на каких характеристиках и с какой продолжительностью по времени они будут эксплуатироваться при выполнении заданного объема работ. Поэтому использование выражения (2) при сравнительном анализе эксплуатации СП с разными тяговыми средствами может привести к существенным погрешностям при расчете расхода топлива.

В то же время имеются рекомендации по определению потребления топлива через механическую работу локомотива. В работе [6] говорится о целесообразности определения расхода топлива маневровыми тепловозами на основе величины выполненной механической работы, а в статье [7] делается вывод о том, что расчеты потребления топлива маневровыми тепловозами от величины механической работы можно выполнять даже при отсутствии тяговых или топливных характеристик с достаточной точностью.

В связи с этим для определения расхода топлива маневровыми тепловозами при работе с СП и сравнительной оценки с другими тяговыми средствами представляется целесообразным воспользоваться приведенными в работах [6, 7] рекомендациями.

Расход топлива тепловозом через величину механической работы можно представить так [6, 7]:

$$E_{\tau} = \sum_1^n k_i \cdot R_{mi}, \quad (3)$$

где R_{mi} – механическая работа локомотива;

k_i – коэффициент перехода от механической работы локомотива к расходу топлива, который можно найти так [6, 7]:

$$k_i = 0,00002 \cdot V^2 - 0,003 \cdot V + 0,92, \quad (4)$$

где V – скорость движения тепловоза.

Механическую работу тепловоза по перемещению СП можно определить по формуле [6, 7]

$$R_{mi} = \sum_1^n P_k \cdot \Delta T = c \sum_1^n F_k \cdot \Delta S = c \sum_1^n F_k \cdot V \cdot \Delta T, \quad (5)$$

а формулу (3) привести к виду:

$$E_{\tau} = \sum_1^n k_i \cdot R_{mi} = c \sum_1^n k_i \cdot F_k \cdot \Delta S = c \sum_1^n k_i \cdot F_k \cdot V \cdot \Delta T, \quad (6)$$

где c – переводной коэффициент;

ΔS – интервал пути;

ΔT – интервал времени движения.

Расчетные значения силы тяги на ободе колес локомотива можно найти по формуле [8]

$$F_k = 9,81 \cdot (m_{\text{л}} \cdot (w_0' + w_i) + m_{\text{в}} \cdot (w_0'' + w_i)), \quad (7)$$

где $m_{\text{л}}$ и $m_{\text{в}}$ – массы локомотива и вагонов;

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

w'_0 и w''_0 – основные удельные сопротивления движению тепловоза и вагонов;

w_i – дополнительное удельное сопротивление движению от уклона.

Тогда согласно формулам (2) – (7) механическую работу тепловоза можно представить в виде:

$$R_{mi} = \sum_1^n P_k \cdot \Delta T = 9,81 \sum_1^n (m_{л} \cdot (w'_0 + w_i) + m_{в} \cdot (w''_0 + w_i)) \cdot V \cdot \Delta T, \quad (8)$$

а расход топлива тепловозом на выполнение данной работы так:

$$E_t = \sum_1^n k_i \cdot R_{mi} = 9,81 \cdot \sum_1^n k_i \cdot (m_{л} \cdot (w'_0 + w_i) + m_{в} \cdot (w''_0 + w_i)) \cdot V \cdot \Delta T. \quad (9)$$

На основании экспериментальных поездок было установлено, что примерно около 2 часов за смену (12 часов) тепловоз затрачивает на маневровую работу и около 10 часов на остальные виды работ, в том числе и на очистку путей от снега. Поэтому по формулам (8), (9) был произведен расчет расхода топлива тепловозом при работе с СП для максимальных скоростей движения при очистке путей от снега (10 км/ч [3]) в течение 10 часов и при транспортировке СП к местам работ и выгрузки (50 км/ч [3]) в течение 2 часов.

Основное удельное сопротивление движению вагонов СП рассчитывалось по данным, приведенным для грузовых четырехосных вагонов в работе [5], а дополнительное удельное сопротивление движению от уклона было принято равным нулю. При расчете механической работы масса СП была определена как сумма массы вагонов (195 т) [3] и половины максимально возможной их грузоподъемности (58 т) [3] и принята равной 253 т. Масса тепловоза принималась согласно данным, приведенным в источниках [5, 9]. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет расхода топлива тепловозом ТЭМ18ДМ при выполнении работ по перемещению снегоуборочных поездов

Скорость движения V , км/ч	Масса локомотива $m_{л(т)}$, т	Число вагонов СП, ед.	Масса СП $m_{в(сп)}$, т	Механическая работа на 1 км пути $R_{ми}$, ткм	Коэффициент перевода, K_i	Расход топлива тепловозом E_t , кг			
						на 1 км	за 1 час	за 10 / 2 часа	за смену (12 часов)
10	126	4	253	0,527	0,892	0,47	5,273	52,733	149,698
50				0,9697	0,82	0,795	48,483	96,965	

Анализ данных таблицы 3 показывает, что потребление топлива тепловозом за смену (10 часов эксплуатации в режиме очистки путей от снега со скоростью 10 км/ч и 2 часа в режиме маневров к местам работы и выгрузки снега со скоростью движения 50 км/ч) составляет около 150 кг дизельного топлива, что сопоставимо с расходом топлива по данным таблицы 2 и подтверждает приемлемость расчета затрат топлива на работу тепловозов при эксплуатации с СП по величине выполняемой механической работы.

Согласно выражениям (1), (8), (9) расход топлива тепловозом и СП определяется массой локомотивов и вагонов, скоростью движения и нормами расхода топлива СП, поэтому основными путями повышения топливно-энергетической эффективности подвижного состава при вывозе СП малого объема снега являются уменьшение общей массы вагонов СП за счет изменения их числа и использование для перевозки СП локомотивов меньшей массы и мощности.

Рассмотрим возможную эксплуатацию СП с неполным количеством вагонов (без одного промежуточного) с использованием для его перемещения локомотивов меньшей массы и мощности, в качестве которых можно рассмотреть такие тяговые единицы, как тепловозы ТГМ, тягово-энергетические секции (ТЭС), автомотрисы АДМ-4 или мотовозы МПТ-4 и

МПТ-6. Так, например, согласно техническим характеристикам [10] мотовоз МПТ-4 может перемещать составы массой 300 т, а масса СП без одного промежуточного вагона с двумя полностью груженными снегом вагонами составляет 229 т [3].

Оценим возможное снижение расхода топлива от реализации данных мероприятий.

Суммарный расход топлива на очистку железнодорожных путей от снега СП и тяговой единицей (тепловозом) можно представить так:

$$E = B_{СП} + E_T, \quad (10)$$

тогда разницу расходов топлива сравниваемых вариантов (например, при работе СП с различным числом вагонов и разными тяговыми единицами) можно определить так:

$$\Delta E(\%) = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \cdot 100 \% = \frac{E_{T1} + B_{СП1} - (E_{T2} + B_{СП2})}{E_{T1} + B_{СП1}} \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{E_{T2} + B_{СП2}}{E_{T1} + B_{СП1}}\right) \cdot 100 \%. \quad (11)$$

Формулу определения расхода топлива на работу СП (1) можно привести к виду:

$$B_{р.сп} = b_{р.сп} \cdot \Delta T, \quad (12)$$

где $b_{р.сп}$ – средняя норма удельного расхода топлива для СП.

С учетом формул (6), (12) выражение (11) можно преобразовать к виду:

$$\Delta E(\%) = \left(1 - \frac{k_i \cdot P_{к2} \cdot \Delta T + b_{р.сп2} \cdot \Delta T}{k_i \cdot P_{к1} \cdot \Delta T + b_{р.сп1} \cdot \Delta T}\right) \cdot 100 \% = \left(1 - \left(\frac{k_i \cdot F_{к2} \cdot V + b_{р.сп2}}{k_i \cdot F_{к1} \cdot V + b_{р.сп1}}\right) \frac{\Delta T}{\Delta T}\right) \cdot 100 \%. \quad (13)$$

Если по аналогии со статьей [11] представить разницу масс тяговых единиц как $\Delta m_T = m_{T1} - m_{T2}$ и разницу масс вагонов СП как $\Delta m_B = m_{B1} - m_{B2}$, то силы тяги тяговых единиц можно выразить уравнениями $F_{к1} = w_{01} \cdot (m_{T1} + m_{B1})$ и $F_{к2} = w_{02} \cdot (m_{T1} - \Delta m_T + m_{B1} - \Delta m_B)$, тогда значение $F_{к2}$ можно преобразовать как

$$F_{к2} = F_{к1} - \Delta F_{л} - \Delta F_B = F_{к1} - (w_0' \cdot \Delta m_T) - (w_0'' \cdot \Delta m_B),$$

а уравнение (13) привести к виду

$$\Delta E(\%) = \left(1 - \frac{k_i \cdot (F_{к1} - (w_0' + w_i) \cdot \Delta m_T - (w_0'' + w_i) \cdot \Delta m_B) \cdot V + b_{р.сп2}}{k_i \cdot F_{к1} \cdot V + b_{р.сп1}}\right) \cdot 100 \% \quad (14)$$

и представить его так:

$$\Delta E(\%) = \left(1 - \left(\frac{k_i \cdot (F_{к1} - \Delta F_{т.е.} - \Delta F_B) \cdot V + b_{р.сп2}}{k_i \cdot F_{к1} \cdot V + b_{р.сп1}}\right)\right) \cdot 100 \%, \quad (15)$$

где $\Delta F_{т.е.}$ и ΔF_B – разница сил тяги за счет изменения масс тяговых единиц и вагонов;

$b_{р.сп1}$ и $b_{р.сп2}$ – средние нормы удельных расходов топлива сравниваемых вариантов.

По формулам (8), (9), (15) был произведен расчет выполняемой тяговыми единицами механической работы и расхода топлива на очистку путей от снега при разном количестве вагонов СП с разной массой тяговых единиц для сравнения с исходным режимом (эксплуатация СП из четырех вагонов с тепловозом ТЭМ18ДМ) для следующих вариантов работы:

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

СП с тремя вагонами и тепловозом ТЭМ18ДМ (массой 126 т) [9];

СП с тремя вагонами при ведении его тепловозом ТГМ (массой 80 т) [9];

СП с тремя вагонами при его перемещении мотовозом МПТ-4 (массой 31 т) [10].

Согласно данным таблицы 2 средний расход дизельного топлива СП за смену составляет 100 кг, в связи с этим при расчете средняя удельная норма расхода топлива СП за час ($b_{p, \text{сп1}}$) была принята равной 8,33 кг/ч, а при работе СП из трех вагонов (без одного промежуточного) средняя удельная норма расхода топлива ($b_{p, \text{сп2}}$) была определена пропорционально мощностям СП с четырьмя вагонами (127 кВт) [3] и тремя вагонами (111 кВт) [3] и принята равной 7,28 кг/ч.

В таблице 4 приведены значения суммарного расхода топлива и величины его снижения при эксплуатации СП с разными тяговыми средствами и числом вагонов.

Таблица 4 – Анализ расхода топлива на выполнение работ по очистке путей от снега при эксплуатации снегоуборочных поездов с разными тяговыми средствами и числом вагонов за смену

Тяговое средство	Масса тяговой единицы $m_{т(л)}$, т	Число вагонов СП, ед.	Время работы T , ч	Скорость движения V , км/ч	Масса СП $m_{в(сп)}$, т	Механическая работа на 1 км $R_{м, i}$, ткм	Расход топлива тяговой единицей за смену, E_t , кг	Снижение расхода топлива на перемещение СП ΔE_t , %	Расход топлива СП за 12 часов $B_{сп}$, кг	Суммарный расход топлива E , кг	Суммарное снижение расхода топлива ΔE , %
ТЭМ18ДМ	126	4	10	10	253	0,5273	149,698	14,3	100	249,698	13,6
			2	50		0,9697					
ТЭМ18ДМ	126	3	10	10	193	0,4609	128,258		87,4	215,658	
			2	50		0,8217					
ТЭМ18ДМ	126	4	10	10	253	0,5273	149,698	29,6	100	249,698	22,7
			2	50		0,9697					
ТГМ	80	3	10	10	193	0,3687	105,58		87,4	168,825	
			2	50		0,6871					
ТЭМ18ДМ	126	4	10	10	253	0,5273	149,698	45,6	100	249,698	32,4
			2	50		0,9697					
МПТ-4	31	3	10	10	193	0,2705	81,423		87,4	168,825	
			2	50		0,5438					

Как следует из данных таблицы 4, уменьшением числа вагонов СП и масс тяговых единиц можно существенно снизить расход топлива на очистку железнодорожных путей от снега. Так, при уменьшении составности СП на один вагон общий расход топлива может быть снижен на 13 %, а при использовании для вождения неполновесных СП тяговых единиц меньшей массы (например, тепловозов ТГМ или мотовозов МПТ-4) расход топлива можно снизить на еще большую величину – до 30 % от суммарного расхода топлива, затрачиваемого в настоящее время, при этом затраты топлива на перемещение тяговыми единицами СП можно уменьшить на 45 % от имеющегося расхода. Еще больших значений экономии топлива на выполнение работ по очистке путей от снега можно достичь за счет уменьшения числа поездов тепловозов с СП, путем большей (полной) загрузки СП снегом, так как в рассмотренном случае (см. таблицы 1 и 2) средняя загрузка СП составляет менее 10 % от максимально возможной в смену.

В настоящее время необходимость отправления СП на снегоуборку определяют на основании проводимого специалистами предприятий службы пути анализа с учетом данных метеорологического обследования и климатических норм, а также при фактическом превышении снега над головками рельсов. В течение всего рассматриваемого периода работы снегоуборочной техники (февраль 2019 г.) средняя высота снежного покрова на узле по данным снегомерных съемок составила 43,4 см, что соответствует 198 % от климатической нормы (21,9 см). Как показали проведенные исследования, даже при двойном превышении высоты

снежного покрова над климатическими нормами имеется возможность эксплуатации неполновесных СП.

Согласно проведенному анализу можно заключить, что малый объем вывезенного СП снега при очистке железнодорожных путей приводит к нерациональному использованию снегоуборочной техники, тепловозного парка и, соответственно, топлива, что влечет за собой серьезные финансовые издержки для железных дорог и ОАО «РЖД» в целом.

В связи с этим можно сделать вывод о том, что на российских железных дорогах имеются резервы по повышению топливно-энергетической эффективности подвижного состава в хозяйственном движении в зимний период.

Следует отметить также, что полученные аналитические выражения по определению расхода топлива на работу СП и тяговых единиц, осуществляющих их перемещение, хотя и не учитывают возможные колебания объема выпавших осадков, протяженности очищенных участков и соответствующего изменения удельных норм расхода по СП и тепловозу, могут быть полезны инженерно-техническим работникам ОАО «РЖД» при формировании требуемого количества и составности СП и соответствующих им локомотивов, осуществляющих их перевозку, в зависимости от погодных условий и планируемого объема работ.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2016. – 76 с.
2. Повышение эффективности функционирования и организации работы путевых машинных комплексов на основе системы контроля качества выполняемых работ [Текст] / А. Л. Манаков, А. Д. Абрамов и др. // Вестник Сибирского гос. ун-та путей сообщения / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск. – 2018. – № 2 (45). – С. 5 – 10.
3. Поезд снегоуборочный СМ-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 0154.00.000 ТО [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 144 с.
4. Методика планирования расхода топлива для специального подвижного состава в ОАО «РЖД» [Текст]: Распоряжение ОАО «РЖД» от 28.12.2007 № 2464р / ОАО «РЖД». – М., 2007. – 28 с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов и др. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
6. Корженевич, И. П. Оценка расхода топлива или электроэнергии через механическую работу локомотива [Текст] / И. П. Корженевич // Наука та прогрес транспорту: Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного трансп. ім. академіка В. Лазаряна / Дніпропетровський нац. ун-т залізничного трансп. ім. академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ. – 2009. – № 29. – С. 88 – 90.
7. Демченко, Е. Б. Оценка расхода топлива маневровыми тепловозами при расформировании составов на сортировочных горках [Текст] / Е. Б. Демченко // Транспортні системи та технології перевезень: Збірник наукових праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного трансп. ім. академіка В. Лазаряна / Дніпропетровський нац. ун-т залізничного трансп. ім. академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ. – 2013. – № 6. – С. 39 – 46.
8. Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги: Учебник [Текст] / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – М.: Маршрут, 2005. – 448 с.
9. Маневровые тепловозы [Текст] / Под ред. Л. С. Назарова. – М.: Транспорт, 1977. – 408 с.
10. Мотовоз погрузочно-транспортный МПТ-4. Руководство по эксплуатации 77.020.1 – 00.00.000 – 04 РЭ [Текст] / ОАО «Тихорецкий машиностроительный завод им. В. В. Воровского». – М., 2003. – 100 с.
11. Плаксин, А. В. Пути снижения расхода электроэнергии при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках пути [Текст] / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 43 – 54.

References

1. *Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskiye zheleznnye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda* (The energy strategy of the Russian Railways holding company for the period up to 2020 and for the future until 2030), Moscow, JSC «Russian Railways», 2016, 76 p.
2. Manakov A. L., Abramov A. D., S. A. Bekher S. A., Kolarzh S. A. Increase of efficiency of functioning and organization of work of track machine complexes on the basis of quality control system of the performed works [Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya i organizatsii raboty putevyh mashinnyh kompleksov na osnove sistemy kontrolya kachestva vypolnyaemyh rabot]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – The Siberian transport university bulletin*, 2018, no. 2 (45), pp. 5 – 10.
3. *Poezd snegouborochnyj SM-2. Tekhnicheskoe opisaniye i instrukciya po ekspluatatsii 0154.00.000 TO* (Train snowplow SM-2. Technical description and operating instructions 0154.00.000 TO), Moscow, Transport, 1985, 144 p.
4. *Metodika planirovaniya raskhoda topliva dlya special'nogo podvizhnogo sostava v OAO «RZHD»* (Methods of planning fuel consumption for special rolling stock in JSC «Russian Railways»). Moscow, Discharge of Russian Railways, 2007, 28 p.
5. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* (Rules of traction calculations for train operation). Moscow: Transport, 1985, 287 p.
6. Korzhenevich I. P. Assessment of fuel consumption or electricity through the mechanical work of the locomotive [Ocenka raskhoda topliva ili elektroenergii cherez mekhanicheskuyu rabotu lokomotiva]. *Nauka i progress transporta: Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta imeni akademika V. Lazaryana – Science and Transport Progress: Science and progress of transport: Bulletin of the Dnepropetrovsk national University of railway transport named after academician V. Lazaryan*, 2009, no. 29, pp. 88 – 90.
7. Demchenko E. B. Estimation of fuel consumption by shunting locomotives during the disbandment of trains on sorting slides [Ocenka raskhoda topliva manevrovymi teplovozami pri rasformirovanii sostavov na sortirovochnykh gorkah]. *Transportnye sistemy i tekhnologii perevozok: Sbornik nauchnykh trudov Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta imeni akademika V. Lazaryana – Transport systems and transport technologies: Collection of scientific papers of the Dnepropetrovsk national University of railway transport named after academician V. Lazaryan*, 2013, no. 6, pp. 39 – 46.
8. Kuz'mich V. D. *Teoriya lokomotivnoi tiagi* (Locomotive traction theory). Moscow: Marshrut, 2005, 448 p.
9. Nazarov L. S. *Manevrovye teplovozy* (Shunting locomotives), Moscow, Transport, 1977, 408 p.
10. *Motovoz pogruzochno-transportnyj MPT-4. Rukovodstvo po ekspluatatsii 77.020.1 – 00.00.000 – 04 RE* (The vehicle loading and transport MPT-4. Operating manual of 77.020.1 – 00.00.000 – 04 RE), Moscow, JSC «V. V. Vorovsky Tikhoretsk Machine-Building Plant», 2003, 100 p.
11. Plaksin A. V., Shvecov S. V. Ways to improve energy efficiency in the operation of passenger electric locomotives on flat sections of Railways [Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti pri ekspluatatsii passazhirskix elektrovozov na ravninnykh uchastkakh zheleznykh dorog]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 3 (31), pp. 43 – 54.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Плаксин Алексей Владимирович

Западно-Сибирская железная дорога – филиал
ОАО «РЖД».

Вокзальная магистраль, д. 12, г. Новосибирск,
630004, Российская Федерация.

Ведущий инженер дорожного топливно-энер-
гетического центра.

Тел.: +7 (913) 746-38-71.

E-mail: Plaksin.av@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Plaksin Alexey Vladimirovich

The West Siberian railway – branch of JSC «RZD».

12, Vokzalnaya Magistral, Novosibirsk, 630004, the
Russian Federation.

Leading engineer of road fuel and energy centre.

Phone: +7-913-746-38-71.

E-mail: Plaksin.av@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Плаксин, А. В. Пути повышения топливно-энергетической эффективности специального и маневрового подвижного состава при снегоуборке [Текст] / А. В. Плаксин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 2 – 11.

Plaksin A. V. Ways to improve the fuel and energy efficiency of special and shunting rolling stock during snow removal. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 1 (41), pp. 2 – 11 (In Russian).

УДК 621.331:621.311.4:621.314

Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, Т. В. Комякова

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ДВЕНАДЦАТИПУЛЬСОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА

Аннотация. Применение двенадцатипульсовых выпрямителей взамен шестипульсовых приводит к повышению эффективности работы и экономичности тяговых подстанций метрополитена. На основе экспериментальных исследований и анализа схемных решений сделан вывод о преимуществе схемы двенадцатипульсового выпрямителя последовательного типа перед схемами параллельного типа. Применение выпрямителей со схемой параллельного типа возможно только при наличии уравнительного реактора, без которого снижаются технико-экономические показатели. Внедрение наиболее рациональных двенадцатипульсовых мостовых схем выпрямления последовательного типа может быть осуществлено путем модернизации установленного оборудования либо путем промышленного освоения предприятиями-изготовителями сухих трансформаторов типа ТРСЗП с различной типовой мощностью и выпрямителей с таблеточными лавинными вентилями с охладителями на базе тепловых труб.

Ключевые слова: метрополитен, тяговая подстанция, двенадцатипульсовые выпрямители, последовательное соединение мостов, энергетическая эффективность, улучшение технико-экономических показателей.

Evgeny J. Salita, Tatiana V. Kovaleva, Tatiana V. Komyakova

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

JUSTIFICATION FOR THE INTRODUCTION OF THE SEQUENTIAL TYPE TWELVE-PULSE RECTIFIERS IN THE UNDERGROUND POWER SUPPLY SYSTEM

Abstract. The use of twelve-pulse rectifiers instead of six-pulse rectifiers leads to increased efficiency and efficiency of traction substations of the underground. On the basis of experimental research and analysis of circuit solutions, the conclusion is made about the advantage of a twelve-pulse rectifier circuit of a serial type over parallel-type circuits. The use of rectifiers with a parallel type circuit is possible only if there is an equalization reactor, without which technical and economic indicators are reduced. The introduction of the most rational twelve-pulse bridge rectifier schemes of the sequential type can be carried out by upgrading the installed equipment, or by industrial development by manufacturers of dry transformers with different typical power and rectifiers with tablet avalanche valves with coolers based on heat pipes.

Keywords: underground, traction substation, twelve-pulse rectifiers, serial connection of bridges, energy efficiency, improvement of technical and economic indicators.

На тяговых подстанциях метрополитенов страны эксплуатируются выпрямители, собранные в основном по трехфазным шестипульсовым мостовым схемам [1]. Шестипульсовые мостовые схемы стали использовать вместо шестипульсовых нулевых параллельного типа при замене ртутных выпрямителей на полупроводниковые [2]. Все шестипульсовые выпрямители по своим

технико-экономическим показателям не соответствуют современному уровню техники и возрастающим требованиям к электросбережению и электромагнитной совместимости различных электротехнических устройств [3].

Шестипульсовые схемы выпрямления имеют существенные недостатки по сравнению с двенадцатипульсовыми: низкий коэффициент мощности, искаженную форму кривой потребляемого тока, большой наклон внешней характеристики, значительную долю переменной составляющей, а следовательно, высших гармоник в кривой выпрямленного напряжения.

Применение двенадцатипульсовых схем выпрямления взамен шестипульсовых приводит к повышению надежности работы и экономичности тяговых подстанций метрополитена. В этих схемах устраняются недостатки шестипульсовых выпрямителей в части повышения КПД на 0,05 %, коэффициента мощности на 0,04 – 0,06, качества напряжения в распределительных устройствах переменного напряжения, от которых питаются двигатели приводов эскалаторов и вентиляторов. При этом снижаются эксплуатационные расходы за счет повышения коэффициента мощности, электромагнитное влияние на смежные устройства и повышается пропускная способность участков метрополитена за счет стабилизации напряжения [4, 5]. Уровень мешающих влияний на системы обеспечения безопасности движения электропоездов снижается в среднем на 17 %, повышение уровня напряжения составляет 3 – 7 % и может обеспечить экономию энергии на тягу до 5 – 12 %, величина потребляемой из первичной системы реактивной мощности снижается на 4 – 18 % [6, 7]. Ожидаемая годовая экономия электроэнергии от замены шестипульсовых выпрямителей двенадцатипульсовыми при коэффициенте нагрузки тяговой подстанции 0,25 – 0,75 составляет 500 – 1720 тыс. кВт·ч [4].

Первый двенадцатипульсовый выпрямитель последовательного типа был введен в систему электроснабжения на Московском метрополитене [8]. Он был создан на базе выпрямительной установки УВКМ-2 и трехобмоточного трансформатора ТМНПВ-5000/10. Однако этот выпрямитель в дальнейшем не применялся вследствие завышенной типовой мощности трансформатора и сложности его конструкции. Переключающий механизм РПН с девятью ступенями регулирования напряжения под нагрузкой на стороне 10 кВ трансформатора усложнил его конструкцию и не нашел практического применения. Внутри бака трансформатора был установлен токоограничивающий реактор схемы регулирования. Указанные недостатки не позволили оценить преимущества двенадцатипульсовой схемы перед шестипульсовыми.

По инициативе ОмГУПС и муниципального предприятия «Новосибирский метрополитен» создан и установлен на тяговой под-

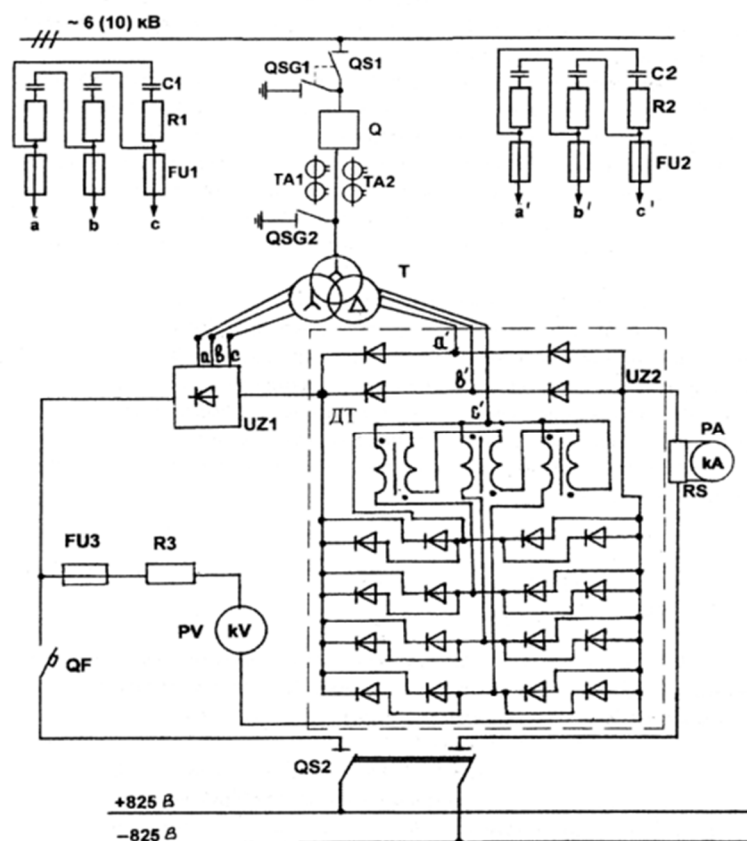


Рисунок 1 – Схема главных электрических соединений двенадцатипульсового выпрямителя последовательного типа с использованием выпрямительной установки УВКМ-6

станции «Заельцовская» двенадцатипульсовый выпрямитель последовательного типа, схема главных электрических соединений которого приведена на рисунке 1.

Внедрение двенадцатипульсовых выпрямителей на тяговых подстанциях метрополитена возможно двумя путями. Первый заключается в приобретении новых тяговых трансформаторов и выпрямительных установок. Второй путь, характеризующийся значительно меньшими затратами, заключается в модернизации ранее установленных выпрямительных трансформаторов и выпрямительных установок, предназначенных для шестипульсовых мостовых схем [8].

В схеме, приведенной на рисунке 1, использованы преобразовательный трансформатор типа ТСЗП-1600/10, реконструированный в электромеханических мастерских (ЭМАСТ) Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД), и выпрямительная установка типа УВКЭ-6, модернизированная сотрудниками Новосибирского метрополитена [9].

После ввода в эксплуатацию двенадцатипульсового выпрямителя были проведены экспериментальные исследования его основных характеристик, которые полностью подтвердили результаты теоретических проработок. Для сравнительной оценки использовались характеристики шести- и двенадцатипульсовых выпрямителей, установленных на одной тяговой подстанции [4, 5, 9].

Гармонический спектр сетевого тока шести- и двенадцатипульсового выпрямителей при сравнительно одинаковых нагрузках представлен на рисунке 2.

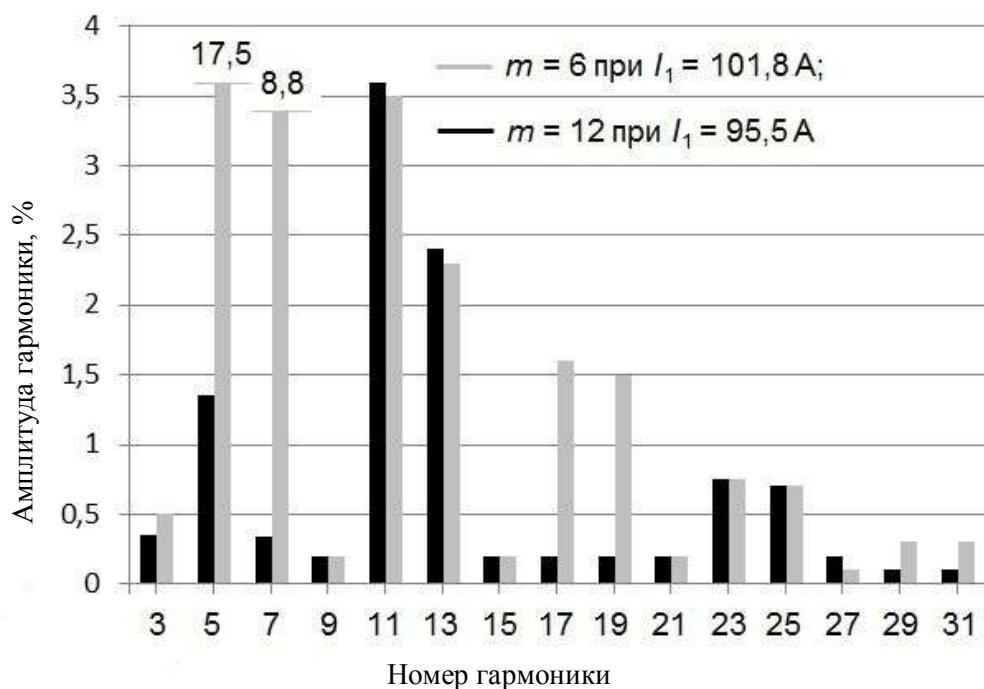


Рисунок 2 – Спектральные диаграммы сетевого тока шести- и двенадцатипульсового выпрямителей

Присутствие в кривой сетевого тока двенадцатипульсового выпрямителя неканонических гармоник (5, 7, 17, 19 и т. д.) вызвано несинусоидальностью питающего напряжения и конструктивной несимметрией секций вентильных обмоток тягового трансформатора. В сетевом токе шестипульсового выпрямителя преобладающими являются пятая и седьмая гармоники (соответственно 17,5 и 8,8 % от первой), а двенадцатипульсового – одиннадцатая и тринадцатая гармоники (соответственно 3,6 и 2,4 % от первой).

Экспериментальные зависимости коэффициента мощности шести- и двенадцатипульсового выпрямителя от тока нагрузки приведены на рисунке 3. Коэффициент мощности

у шестипульсового выпрямителя при рабочих токах составляет 0,92 – 0,94, у двенадцатипульсового – 0,97 – 0,98.

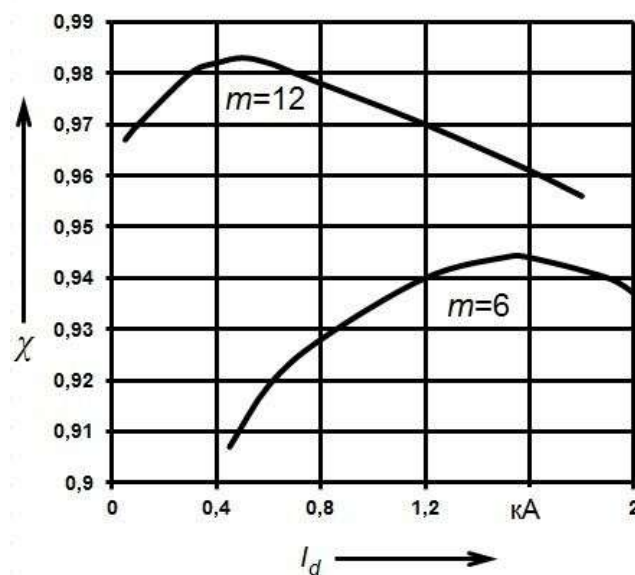


Рисунок 3 – Зависимости коэффициента мощности шести- и двенадцатипульсового выпрямителя от тока нагрузки

При проведении экспериментальных исследований отмечено улучшение качества выпрямленного напряжения у двенадцатипульсового выпрямителя по сравнению с шестипульсовым. Например, шестая гармоника снизилась примерно в 12 раз. Общее психометрическое напряжение снизилось на 60 – 70 %. Гармоники выпрямленного напряжения при несимметрии сопротивлений рельсовых цепей могут оказывать опасное влияние на устройства автоблокировки. Особенно это касается гармоник низкого порядка. При двенадцатипульсовой схеме гармоника частотой 100 Гц снизилась почти в два раза, частотой 200 Гц – практически отсутствует. Результаты измерений зависимостей напряжения на выходе выпрямителей от тока нагрузки подтвердили теоретические значения коэффициентов наклона внешних характеристик шести- и двенадцатипульсовых выпрямителей, которые равны 0,5 и 0,26 соответственно.

Перевод подстанции метрополитена на двенадцатипульсовую схему выпрямления не потребовал значительных капитальных затрат. Стоимость модернизации одного трансформатора типа ТСЗП-1600/10 на базе ЭМАСТ не превысила 30 % от стоимости нового оборудования. Модернизация выпрямительной установки типа УВКЭ-6 (с сохранением общего числа вентилях, предусмотренных конструкцией и прошедших диагностические испытания) не привела к существенным затратам, так как свелась к перераспределению числа вентилях в вентиляхных плечах и изменению ошиновки выпрямителя. Модернизация выпрямительной установки проводилась на месте силами работников ремонтно-ревизионного участка.

В ноябре 1997 г. на базе Екатеринбургского метрополитена состоялся семинар руководителей служб электроснабжения метрополитенов стран СНГ, участники которого рекомендовали внедрение двенадцатипульсовых преобразователей при новом строительстве и реконструкции действующих тяговых подстанций [5]. В проведенном анализе схемных решений и параметров выпрямительных агрегатов, в исследованиях и технико-экономических расчетах, изложенных в работах [3, 10], отмечено, что для тягового электроснабжения метрополитена рациональной является двенадцатипульсовая схема выпрямления с последовательным соединением трехфазных мостов.

При проектировании станции «Библиотека им. Пушкина» Омского метрополитена на тяговой подстанции планировался к внедрению двенадцатипульсовой мостовой выпрямитель

параллельного типа без уравнительного реактора (рисунок 4), который состоял из сухого преобразовательного трансформатора ТРСЗП-1600/10; $2 \times 0,67$ кВ, разработанного ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» совместно с ООО «Электрофизика» (г. Санкт-Петербург), и выпрямителя типа В-ТПЕД-12М-1,6к-825УХЛ4 на номинальный ток 1600 А с выходным напряжением 825 В, разработанного ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО». В выпрямителе использованы охладители силовых вентилях на основе тепловых труб, которые обеспечивают высокую перегрузочную способность выпрямителя при естественном охлаждении и уменьшении массы и габаритов.

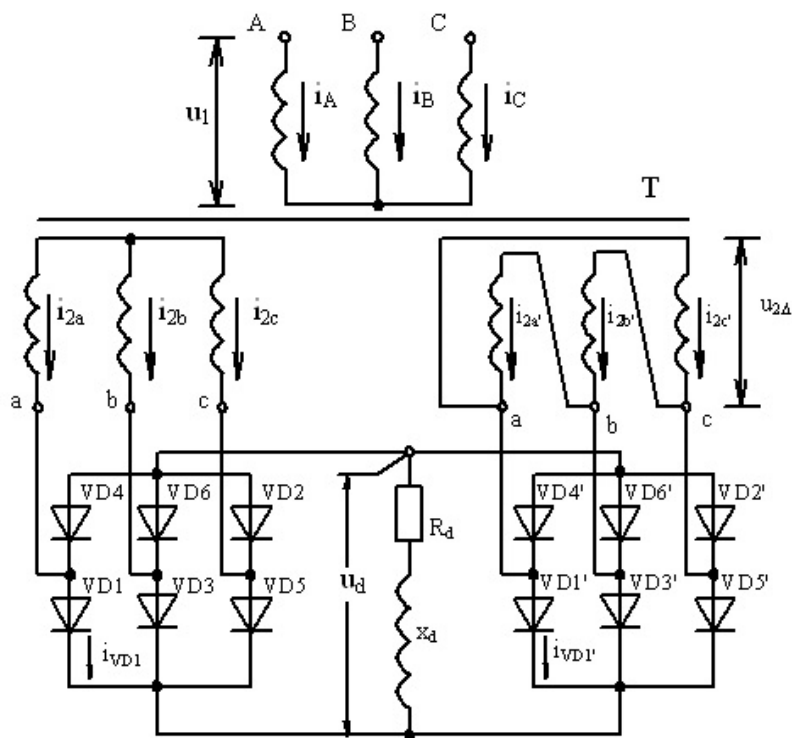


Рисунок 4 – Принципиальная схема двенадцатипульсового выпрямителя параллельного типа без уравнительного реактора

Как было отмечено выше, в схеме отсутствует уравнительный реактор (УР), предназначенный для равномерного распределения нагрузки между параллельно включенными мостами выпрямителя.

С целью использования двенадцатипульсовых выпрямителей параллельного типа без уравнительных реакторов АО «Уралэлектротяжмаш» были сконструированы и изготовлены два преобразовательных трансформатора типа ТРДП-12500 с поэтажным расположением секций вентильных обмоток взамен переплетенных вентильных обмоток. Они были установлены на одной из тяговых подстанций ЗСЖД. Однако проведенные экспериментальные исследования на реальном оборудовании и на физической модели подтвердили снижение технико-экономических показателей схемы параллельного типа без УР. В дальнейшем для этих выпрямителей были приобретены и установлены УР однофазные масляные типа УРОМ-1000.

В двенадцатипульсовых выпрямителях параллельного типа с УР и без него вентильные плечи открыты в течение одной трети периода. В схеме с УР вентильное плечо за это время коммутруется дважды, а в схеме без УР – четыре раза, что приводит к дополнительному снижению напряжения на выходе преобразователя и, как следствие, к снижению коэффициента наклона внешней характеристики ($A_{12} = 0,26$) до значения коэффициента наклона шести-пульсового выпрямителя ($A_6 = 0,5$). Зависимости тока вентильного плеча и обратного напря-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

жения на нем от времени в двенадцатипульсовой схеме параллельного типа, полученные на физической модели, которые аналогичны экспериментальным зависимостям, полученным на реальном оборудовании, приведены на рисунке 5.

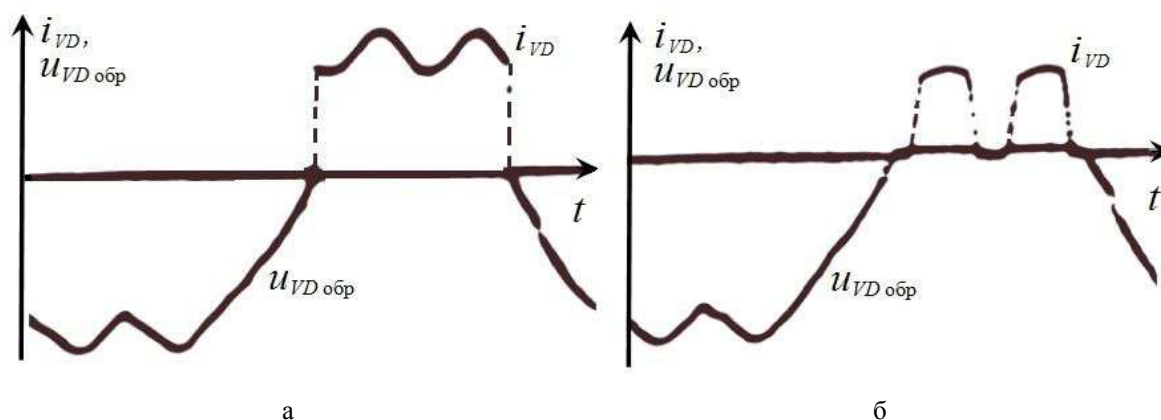


Рисунок 5 – Осциллограммы тока вентильного плеча и обратного напряжения в двенадцатипульсовой схеме параллельного типа: с уравнивающим реактором (а) и без него (б)

Внешние характеристики двенадцатипульсовых выпрямителей параллельного типа с УР и без него, полученные на физической модели, приведены на рисунке 6.

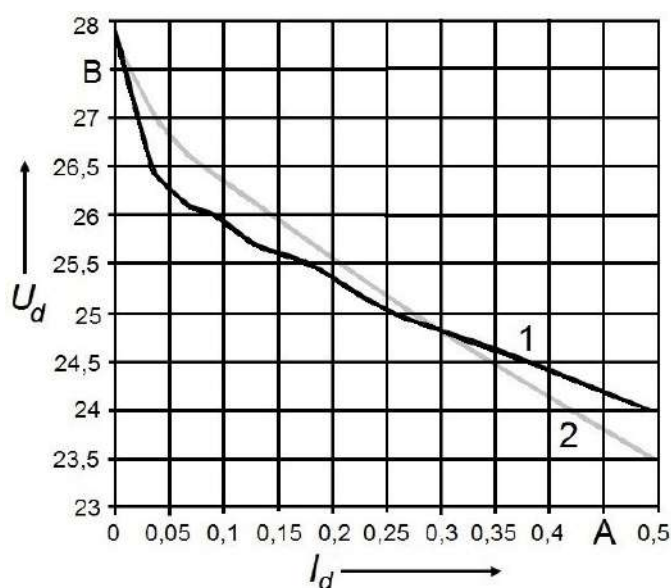


Рисунок 6 – Внешние характеристики двенадцатипульсового выпрямителя параллельного типа с уравнивающим реактором (1) и без него (2)

В настоящее время ведущими фирмами-производителями преобразовательных трансформаторов и выпрямителей являются АО «Уралэлектротяжмаш» (г. Екатеринбург) и ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» совместно с ООО «Электрофизика» (г. Санкт-Петербург).

ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» производит для метрополитена двенадцатипульсовые выпрямители типа В-МППД и В-МПЕД со схемой параллельного типа без УР на токи 1,6; 2,0; 2,5; 3,2 кА, имеющие естественную или принудительную систему охлаждения таблеточных вентилях нелавинного типа. ООО «Электрофизика» для этой же схемы производит сухие преобразовательные трансформаторы типа ТРСЗП-1600 с расщепленной вентильной обмоткой. АО «Уралэлектротяжмаш» выпускает шестипульсовые мостовые преобразователи, в

состав которых входят выпрямители типа ВД2М-1600 на таблеточных лавинных вентилях ДЛ173-4000-20 или ДЛ153-2500-20 и трансформаторы типа ТСЗП-1600 и ТСЗП-2500.

Преимущество схемы последовательного типа перед схемой параллельного типа состоит в отсутствии уравнительного реактора, что обуславливает снижение массогабаритных показателей трансформаторного оборудования и, как следствие, снижение его стоимости. Кроме того, в схеме параллельного типа при повышенной несинусоидальности напряжения питающей сети наблюдается небаланс токов, протекающих по параллельно включенным мостам.

В настоящее время на Московском метрополитене кроме внедрения двенадцатипульсовых преобразователей в качестве меры по модернизации системы электроснабжения осуществляется перевод питания тяговых подстанций с 10 на 20 кВ [11].

Таким образом, на основе анализа схемных решений и проведенных экспериментальных исследований на реальном оборудовании тяговых подстанций метрополитена и железнодорожного транспорта, а также на физических моделях можно сделать вывод о том, что двенадцатипульсовые схемы последовательного типа являются наиболее рациональными. Их применение позволяет улучшить качество электроэнергии и снизить ее потери в тяговой сети и питающей системе, уменьшить потребляемую реактивную мощность, улучшить электромагнитную совместимость со смежными устройствами [9, 10, 12].

Внедрение двенадцатипульсовых мостовых схем выпрямления последовательного типа может быть осуществлено путем модернизации установленного оборудования либо путем промышленного освоения предприятиями-изготовителями следующего оборудования: сухих трансформаторов типа ТРСЗП с различной типовой мощностью и выпрямителей с таблеточными лавинными вентилями с охладителями на базе тепловых труб.

Список литературы

1. Бурков, А. Т. Электроника и преобразовательная техника: Учебник: В 2 т. Т. 2: Электронная преобразовательная техника [Текст] / А. Т. Бурков / УМЦ ЖДТ. – М., 2015. – 307 с.
2. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / Б. С. Барковский, Г. С. Магай и др.; Под ред. М. Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
3. Салита, Е. Ю. Улучшение показателей энергетической эффективности многопульсовых выпрямителей тяговых подстанций [Текст] / Е. Ю. Салита, Т. В. Комякова, Т. В. Ковалева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 114 – 123.
4. Повышение технико-экономических показателей выпрямительных агрегатов тяговых подстанций метрополитена [Текст] / Н. П. Балаклеевский, Т. В. Комякова и др. // Метро. – 1996. – № 3. – С. 20, 21.
5. Пахомов, В. Я. Проблемы экономии электрической энергии на метрополитенах [Текст] / В. Я. Пахомов // Метро. – 1997. – № 1, 2. – С. 71 – 73.
6. Повышение качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена с использованием 12-пульсовых преобразовательных агрегатов [Текст] / М. П. Бадер, П. Ф. Бестемьянов и др. // Практическая силовая электроника. – 2016. – № 2 (62). – С. 38 – 43.
7. Оценка гармонических составляющих тягового тока в системе электроснабжения метрополитена при работе 12-пульсовых выпрямительных агрегатов [Текст] / М. П. Бадер, В. А. Гречишников и др. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 1. – С. 17 – 21.
8. Силовые преобразователи тяговых подстанций и электроподвижного состава [Текст]: Учебное пособие / Е. Ю. Салита, Г. С. Магай и др. Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – 131 с.
9. Двенадцатипульсовый выпрямитель для тяговых подстанций метрополитена [Текст] / Н. П. Балаклеевский, Б. С. Барковский и др. // Улучшение качества и снижение потерь элект-

рической энергии в системах электроснабжения железных дорог: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омская гос. акад. путей сообщения. – Омск, 1995. – С. 6 – 10.

10. Бадер, М. П. Повышение энергетической эффективности системы электроснабжения метрополитена [Текст] / М. П. Бадер // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте: Тезисы докладов пятого междунар. симпозиума «Eltrans'2009» / ПГУПС. – СПб, 2009. – С. 7 – 9.

11. Алиев, М. З. Анализ существующих средств повышения качества электрической энергии в тяговых сетях метрополитена [Текст] / М. З. Алиев // Федоровские чтения-2016: Сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. / Под общ. ред. Б. И. Кудрина, Ю. В. Матюниной / МЭИ. – М., 2016. – С. 204 – 209.

12. Бадер, М. П. Тенденции повышения энергоэффективности электротехнического оборудования метрополитена [Текст] / М. П. Бадер, В. В. Лобынцев, Н. Б. Сидоров // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 6. – С. 12 – 17.

References

1. Burkov A. T. *Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika. T 2. Elektronnaia preobrazovatel'naya tekhnika* (Electronics and conversion technology. V. 2: Electronic conversion technology). Moscow: FGBOU "Educational and methodological center for education on railway transport", 2015, 307 p.

2. Barkovsky B. S., Magay G. S., Matsenko V. P., Panfil L. S., Shalimov M. G. *Dvenadtsatipul'sovyye poluprovodnikovyye vypriamiteli tiagovykh podstantsii* (Twelve-pulse semiconductor rectifiers of traction substations). Moscow: Transport, 1990, 127 p.

3. Salita E.Yu., Komyakova T. V., Kovaleva T. V. Improvement of energy efficiency indicators of multi-pulse rectifiers of traction substations [Uluchshenie pokazatelei energeticheskoi effektivnosti mnogopul'sovykh vypriamitelei tiagovykh podstantsii]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 3 (31), pp. 114 – 123.

4. Balakleevsky N. P., Komyakova T. V., Magay G. S., Salita E.Yu. Increase of technical and economic indicators of rectifier units of traction substations of the underground [Povyshenie tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei vypriamitel'nykh agregatov tiagovykh podstantsii metropolitena]. *Metro – The Journal of Underground*, 1996, no. 3, pp. 20, 21.

5. Pakhomov V. Y. Issues of saving of electrical energy on subways [Problemy ekonomii elektricheskoi energii na metropolitenakh]. *Metro – The Journal of Underground*, 1997, no. 1, 2, pp. 71 – 73.

6. Bader M. P., Bestemyanov P. F., Grechishnikov V. A., Shevlyugin M. V., Dang V. F. Improving the quality of electric energy in the underground traction power supply system using 12-pulse Converter units [Povyshenie kachestva elektricheskoy energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya metropolitena s ispol'zovaniem 12-pul'sovykh preobrazovatel'nykh agregatov]. *Prakticheskaya silovaya elektronika – The Journal of Practical power electronics*, 2016, no. 2 (62), pp. 38 – 43.

7. Bader M. P., Grechishnikov V. A., Shevlyugin M. V., Dang V. F. Evaluation of the harmonic components of the traction current in the underground power supply system when operating 12-pulse rectifier units [Ocenka garmonicheskikh sostavlyayushchih tyagovogo toka v sisteme elektrosnabzheniya metropolitena pri rabote 12-pul'sovykh vypriamitel'nykh agregatov]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – The Journal of Transport electronics and electrical equipment*, 2016, no. 1, pp. 17 – 21.

8. Salita E.Yu., Magay G. S., Komyakova T. V., Kovaleva T. V., Shvetsov S. V. *Silovyye preobrazovateli tyagovykh podstantsij i ehlektropodvizhnogo sostava* (Power converters of electric traction substations and of the locomotive). Omsk: OSTU, 2013, 131 p.

9. Balakleevsky N. P., Barkovsky B. S., Komyakova T. V., Magay G. S., Nudnenko E. P., Paznikov Zh. D., Salita E.Yu., Shalimov M. G. Twelve-pulse rectifier for traction substations of the underground [Dvenadtsatipul'sovyyi vypriamitel dlia tiagovykh podstantsii metropolitena]. *Mezhvuzovskij tematicheskij sbornik nauchnykh trudov «Uluchshenie kachestva i snizhenie poter' elektrich-*

eskoj energii v sistemah elektrosnabzheniya zheleznih dorog» (Improving the quality and reducing the loss of electrical energy in the power supply systems of Railways). – Omsk, 1995, pp. 6 – 10.

10. Bader M. P. Improving the energy efficiency of the underground power supply system [Povyshenie energeticheskoi effektivnosti sistemy elektrosnabzheniya metropolitenov]. *Tezisy dokladov Pyatogo Mezhdunarodnogo simpoziuma Eltrans '2009 «Elektrifikaciya, innovacionnye tekhnologii, skorostnoe i vysokoskorostnoe dvizhenie na zheleznodorozhnom transporte»* (Abstracts of the Fifth international Symposium Eltrans ' 2009 «Electrification, innovative technologies, high-speed and high-speed traffic on railway transport»). – St. Petersburg, 2009, pp. 7 – 9.

11. Aliyev M. Z. Analysis of existing means of improving the quality of electric energy in the traction networks of the underground [Analiz sushchestvuyushchih sredstv povysheniya kachestva elektricheskoy energii v tyagovyh setyah metropolitena]. *Sbornik trudov konferencii "Fedorovskie chteniya – 2016. XLVI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya s elementami nauchnoj shkoly"* (Fedorov readings-2016. XLVI international scientific and practical conference with elements of a scientific school). – Moscow, Moscow energy Institute, 2016, pp. 204 – 209.

12. Bader M. P., Lobytsev V. V., Sidorov N. B. Trends in improving the energy efficiency of underground electrical equipment [Tendencii povysheniya energoeffektivnosti elektrotekhnicheskogo oborudovaniya metropolitena] *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – The Journal of Transport electronics and electrical equipment*, 2019, no. 6, pp. 12 – 17.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Салита Евгений Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-46.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Ковалева Татьяна Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Комякова Татьяна Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, проректор по учебной работе, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-00.

E-mail: t_komyakova@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Salita Evgeny Jurievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph.D. in Engineering, Associate Professor of the department «Power supply for railway transport», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-46.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Kovaleva Tatiana Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph.D. in Engineering, Associate Professor of the department «Theoretical electrical engineering»

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Komyakova Tatiana Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph.D. in Engineering, vice-rector of education, Associate Professor of the department «Power supply for railway transport», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-00.

E-mail: t_komyakova@mail.ru

Салита, Е. Ю. Обоснование внедрения двенадцати-типульсовых выпрямителей последовательного типа в системе электроснабжения метрополитена [Текст] / Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, Т. В. Комякова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 11 – 20.

Salita E. J., Kovaleva T. V., Komyakova T. V. Justification for the introduction of the sequential type twelve-pulse rectifiers in the underground power supply system. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 1 (41), pp. 11 – 20 (In Russian).

УДК 621.33

Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. И. Романовский, М. А. Дивинец

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ТЕПЛОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Аннотация. Постоянно проводимые исследования надежности электрического оборудования тягового подвижного состава показали, что наиболее уязвимым элементом являются изоляционные конструкции обмоток силового оборудования, особенно тяговых электродвигателей. Существующие методы и средства восстановления и ремонта изоляционных конструкций обмоток тяговых двигателей современных электровозов, основанные на сушке полимерной изоляции в конвективных электрических печах высокой мощности, являются энерго- и времязатратными. Данная технология не претерпевала значительных изменений уже более 50 лет. С целью продления ресурса полимерной изоляции электрических машин тягового подвижного состава была предложена технология сушки изоляции с использованием теплового излучения, сокращающая затраты электроэнергии на ремонт, повышающая скорость сушки за счет снижения теплопотерь. Статья посвящена вопросам проектирования нового устройства для сушки изоляции обмоток магнитной системы остова тягового двигателя электровоза вращающимся тепловым полем. Представлен анализ работ и выводов по результатам теоретических исследований, связанных с математическим моделированием. В качестве метода математического моделирования в работе использовался метод конечных элементов. Была создана упрощенная 3D модель обмотки магнитной системы остова с размещенными инфракрасными излучателями. По результатам конечно-элементного математического моделирования были получены температурные поля нагрева полимерной изоляции обмоток остова тягового двигателя. На основании данного расчета в работе были выбраны оптимальные параметры конструкции предлагаемого устройства, обеспечивающие минимальные затраты электроэнергии для различных габаритов остовов тяговых двигателей. На основании предлагаемого варианта устройства в настоящее время подана заявка на получение патента на полезную модель, а также на базе Улан-Удэнского локомотиворемонтного завода – филиала АО «Желдорреммаши» осуществляется сборка данного прототипа установки. Заданы новые направления для дальнейших исследований.

Ключевые слова: изоляция, тяговые электродвигатели, сушка изоляции, генератор, тепловое излучение, надежность, ИК-излучатели, электрические машины.

Evgeniy Yu. Dulsky, Pavel Yu. Ivanov, Alexander I. Romanovsky, Marina A. Divinets

Irkutsk State Transport University (IrSTU), Irkutsk, the Russian Federation

DESIGN OF INDUSTRIAL INSTALLATION FOR STRENGTHENING POLYMER INSULATION OF MAGNETIC SYSTEM OF ELECTRIC TRUCK MOTOR BY HEAT RADIATION

Abstract. Constantly conducted studies of the reliability of electric equipment of traction rolling stock have shown that the most vulnerable element is the insulation design of the windings of power equipment, especially traction motors. Existing methods and means of restoration and repair of insulating structures of windings of traction motors of modern electric locomotives, based on drying polymer insulation in convective high-power electric furnaces, are energy and time-consuming. This technology has not undergone significant changes for over 50 years. In order to extend the polymer insulation life of electric vehicles of traction rolling stock, an insulation drying technology using thermal radiation was proposed that reduces the cost of electricity for repairs and increases the drying speed by reducing heat loss. The article is devoted to the design of a new device for drying the insulation of the windings of the magnetic system of

the skeleton of the backbone of the electric locomotive traction engine by a rotating thermal field. The analysis of works and conclusions based on the results of theoretical studies related to mathematical modeling is presented. As a method of mathematical modeling, the finite element method was used in the work. A simplified 3D model of the winding of the core magnetic system with infrared emitters was created. According to the results of finite element mathematical modeling, temperature fields of heating the polymer insulation of the windings of the core of the traction motor were obtained. Based on this calculation, the work selected the optimal design parameters of the proposed device that provide the minimum energy costs for various sizes of the skeleton of the traction engines. Based on the proposed device variant, an application for a patent for a utility model has been filed, and this prototype is being assembled on the basis of the Ulan-Ude locomotive and car repair plant, a branch of Zheldorremmash JSC. New directions for further research are also set.

Keywords: insulation, traction motors, insulation drying, generator, heat radiation, reliability, IR emitters, electric machines.

Основным элементом, обеспечивающим функционирование железнодорожной отрасли, является электровозный парк. В список приоритетных задач компании ОАО «РЖД» входит осуществление высокой надежности работы электровозов.

Надежная работа электровозов зависит от многих факторов, основным из которых является бесперебойная работа силового оборудования.

Ежегодно проводимые анализы технического состояния силового оборудования электровозов указывают на то, что наиболее слабыми относительно надежности являются изоляционные конструкции обмоток данного оборудования. Соответственно проблемам их эксплуатации, обслуживания и ремонта уделяется внимание.

На базе Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) сотрудниками кафедры «Электроподвижной состав» (ЭПС) совместно с представителями группы компаний ООО «ЛокоТех» создана специализированная лаборатория «Эффективные методы и средства продления ресурса силового оборудования электровозов». В лаборатории ведутся научно-исследовательские работы по разработке автоматизированных программных комплексов по сушке изоляции электрооборудования локомотивов с использованием теплового излучения. Первый этап данных работ заключался в разработке опытных образцов данных комплексов по сушке изоляции якорей и остовов тяговых двигателей электровоза. В данной статье подробнее рассмотрим конструкцию и принцип работы прототипа установки для сушки изоляции магнитной системы остова тяговых двигателей электровозов переменного тока.

Одним из первых устройств, предлагаемых учеными ИрГУПС, было устройство для реализации инфракрасно-конвективно-низковакуумного способа сушки изоляции обмоток магнитной системы остова тяговой электрической машины [1, 2].

У данного устройства были недостатки, которые заключались в том, что оно имеет высокую мощность привода и ненадежность конструкции роликов, так как под действием массы остова они быстро выходят из строя.

В рамках выполнения государственного задания Росжелдора по научно-исследовательской работе №АААА-А19-119010990009-3 по теме «Повышение надежности силового оборудования тягового подвижного состава» было предложено новое устройство, реализующее данный способ, – устройство камерного типа для сушки полимерной изоляции остова тяговых электрических машин вращающимся тепловым полем.

Лучшие результаты в плане сушки у предлагаемого устройства достигаются тем, что сушка изоляции обмоток магнитной системы равномерно вращающегося остова ТЭМ осуществляется комбинацией трех способов сушки: за счет ИК-излучения, конвекции и вакуума.

Устройство камерного типа для сушки полимерной изоляции остова тяговых электрических машин вращающимся тепловым полем, нагрев и последующая сушка полимерной изоляции остова ТЭМ, над которой размещена герметичная сушильная камера с теплоизоляцией, происходит за счет электромагнитного теплового поля, создаваемого равномерным вращением генератора теплового излучения вокруг своей оси с помощью привода, а также вы-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

тяжного вентилятора, который создает в камере необходимый уровень разрежения воздуха (вакуумная сушка) и выравнивает температуру нагрева полимерной изоляции за счет конвективного потока воздуха.

Схема предлагаемого устройства изображена на рисунке 1.

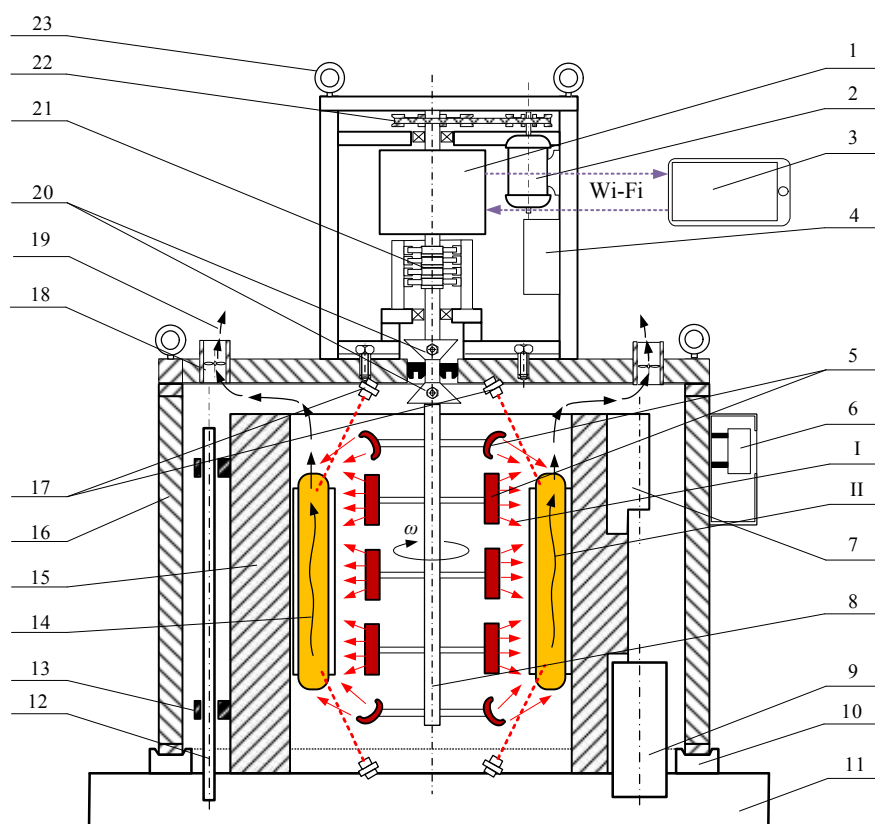


Рисунок 1 – Схема устройства камерного типа для сушки полимерной изоляции остова тяговых электрических машин: I – тепловое излучение, II – тепловой поток, 1 – блок управления; 2 – асинхронный трехфазный двигатель привода инфракрасного генератора; 3 – гаджет с автоматизированным рабочим местом (АРМом) оператора; 4 – частотный преобразователь питания привода инфракрасного генератора; 5 – ИК-излучатели; 6 – блок интерфейса частотного преобразователя; 7 – опоры моторно-осевых подшипников (выемка в остова под ось колесной пары); 8 – вал инфракрасного генератора; 9 – центрирующий цилиндр остова; 10 – установочный контур сушильной камеры; 11 – основание сушильной камеры; 12 – центрирующий стержень остова; 13 – технологические проушины тягового двигателя; 14 – обмотки магнитной системы остова тягового двигателя; 15 – остова тягового двигателя; 16 – корпус сушильной камеры с теплоизоляцией; 17 – стационарные пирометры; 18 – вытяжной вентилятор; 19 – пары растворителя; 20 – технологические разъемные муфты; 21 – блок силовых скользящих контактов, 22 – клино-ременная передача, 23 – рым-болт

Далее рассмотрим технологию сушки изоляции магнитной системы остовов тяговых электродвигателей на предлагаемом устройстве.

Остова 15 кран-балкой помещается на основание сушильной камеры 11. Точность позиционирования остова обеспечивается наличием центрирующих стержня 12 и цилиндра 9 остова (см. рисунок 1). Данные направляющие являются съемными. Осевая направляющая находится на одном месте для типов двигателей НБ-520, НБ-514 и НБ-418. Вспомогательная направляющая является съемной и место ее установки меняется в зависимости от типа двигателя. После размещения остова на основании его накрывают корпусом сушильной камеры 16 с помощью кран-балки и рым-болтов 23 (см. рисунок 1). Корпус сушильной камеры устанавливается в пазы 10, приваренные к основанию для четкой фиксации.

После размещения остова 15 на основании 11 подается питание на асинхронный трехфазный двигатель привода инфракрасного генератора 2, который через клиноременную

передачу 22 приводит во вращение вал генератора теплового излучения 8, скорость вращения (ω) которого задается частотным преобразователем 4. Далее блок управления 1 подает питание на ИК-излучатели 5 через твердотельные реле и блок силовых скользящих контактов 21. Равномерно вращающийся генератор теплового излучения создает тепловое поле, которое осуществляет нагрев полимерной изоляции обмотки магнитной системы остова 14 до необходимой температуры с последующей сушкой. Температура нагрева контролируется системой управления с помощью стационарных пирометров 17. Для удаления паров растворителя 19 из рабочего пространства сушильной камеры предусмотрен вытяжной вентилятор 18, который также создает в камере необходимый уровень разрежения воздуха (вакуумная сушка) для ускорения процесса сушки и выравнивает температуру нагрева полимерной изоляции обмотки магнитной системы остова 14 за счет конвективного потока.

Ниже будет представлено описание конструкции, подачи питания и порядка сборки генератора теплового излучения установки для упрочнения изоляции обмоток остовов тяговых двигателей электровозов.

Генератор теплового излучения (ГТИ) – один из главных элементов устройства, на котором установлены кронштейны с ИК-излучателями, предназначенные для сушки изоляции обмоток магнитной системы тягового электродвигателя.

Конструкция ГТИ представлена на рисунке 2.

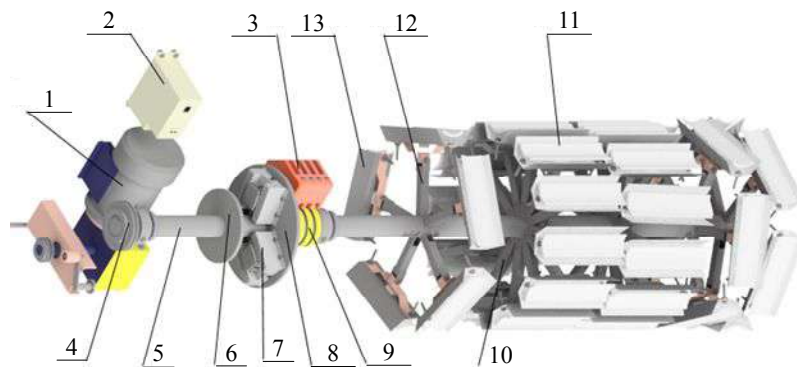


Рисунок 2 – Схема размещения основных элементов ГТИ: 1 – привод ГТИ; 2 – преобразователь; 3 – щеткодержатель; 4 – малый шкив клиноременной передачи; 5 – вал; 6 – дисковый щит размещения низковольтного оборудования; 7 – силовые регуляторы мощности; 8 – дисковый щит силовых регуляторов мощности; 9 – блок контактных колец; 10 – двенадцатилучевой кронштейн ГТИ; 11 – ИК-излучатель; 12 – пятилучевой кронштейн ГТИ; 13 – рефлектор

Для равномерного распределения теплового поля инфракрасный генератор находится в непрерывном вращении. Инфракрасный генератор подвешивается на раму верхнего модуля через подшипники и закрепляется на валу, который при помощи подобных муфт фиксируется относительно подшипника.

К оборудованию верхнего модуля, который связан с инфракрасным генератором, относятся блок термомониторинга, вай-фай-модуль, контроллер управления энергоподводом, регулятор энергоподвода на твердотельных реле и контактные кольца.

Связь инфракрасного генератора и верхнего модуля происходит с помощью вала, на котором расположен генератор теплового излучения.

Вал инфракрасного генератора проходит сквозь верхнюю крышку установки сушки остова и попадает большей частью в теплоизолированную камеру.

Излучатели делятся на три группы (см. рисунок 2): верхняя, средняя и нижняя. Группа излучателей, осуществляющих сушку полюсных наконечников, размещаются вертикально. Верхняя и нижняя группы осуществляют сушку торцевых витков изоляции главных полюсов и имеют горизонтальное размещение. Средняя группа содержит 24 излучателя, расположенных на двух подсистемах кронштейна. К верхней группе относятся пять излучателей, а в

нижнюю группу входят десять излучателей, находящихся на двух подсистемах кронштейна. Мощность излучателей верхней группы составляет 1 кВт, средняя группа состоит из излучателей мощностью 250 кВт и нижняя – из излучателей мощностью 1 кВт.

С целью выбора оптимальных режимов сушки изоляции и расположения излучателя относительно полимерной изоляции магнитной системы остова было проведено конечно-элементное математическое моделирование процесса нагрева инфракрасным излучением [3 – 7].

При проектировании генератора теплового излучения установки для упрочнения изоляции обмоток остовов тяговых двигателей электровозов использовались программные комплексы MSC Patran и MSC Sinda.

Первым этапом в моделировании процесса упрочнения изоляции обмоток остовов является создание геометрической 3D-модели. Данная модель была построена в программе Autodesk Inventor (рисунок 3) и состоит из упрощенной модели обмотки остова и инфракрасных излучателей, расположенных по центру.

Далее импортируем полученную 3D-модель в программный комплекс MSC Patran, предварительно выбрав в нем решатель тепловых задач MSC Sinda.

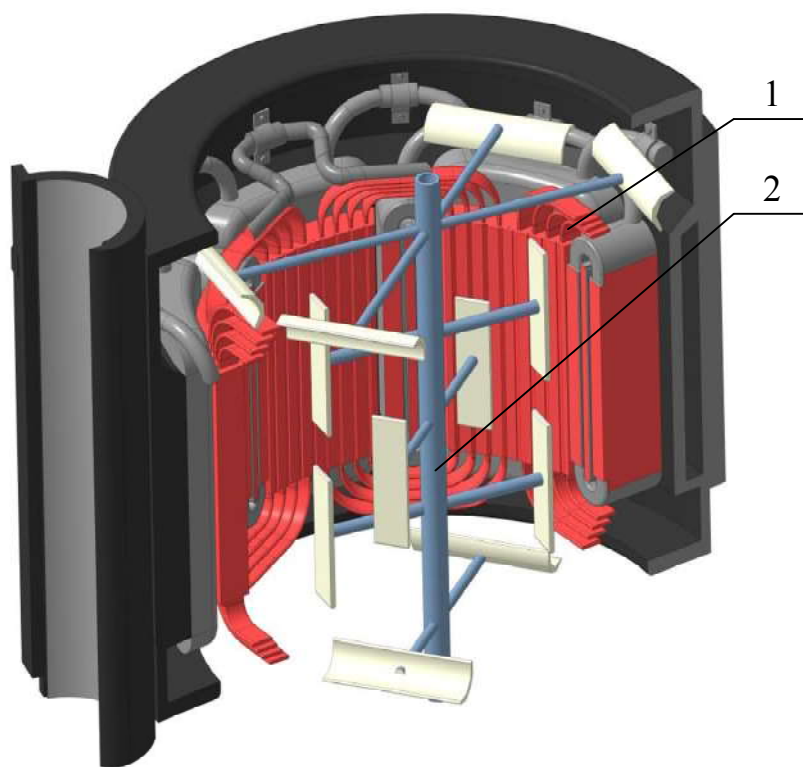


Рисунок 3 – 3D-модель остова ТЭД с размещенным ГТИ:
1 – обмотка магнитной системы остова ТЭД; 2 – ГТИ

После этого задаются нагрузки, которые воздействуют на тела модели (рисунок 4). К ним относятся температура излучателей, направленное инфракрасное излучение, тепловой контакт, естественная и искусственная конвекция. При задании инфракрасного излучения учитываются такие свойства, как излучательная и поглощающая способность материала.

После задания нагрузок на модель и условий окружающей среды задаются свойства материалов. К таким свойствам относятся теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность [6, 7].

Финальным этапом проектирования является анализ (расчет) заданной модели, заключающийся в определении температурных полей на поверхности обмотки магнитной системы

остова ТЭД. После этого результаты передаются в MSC Patran и визуализируются на экране. Рассмотрим основные законы теплообмена излучением, используемые при расчете. Расчет излучения происходит согласно закону Стефана – Больцмана по формуле [8 – 10]

$$dq_2 = E_1 \cdot dF_{\varphi 2} \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4. \quad (1)$$

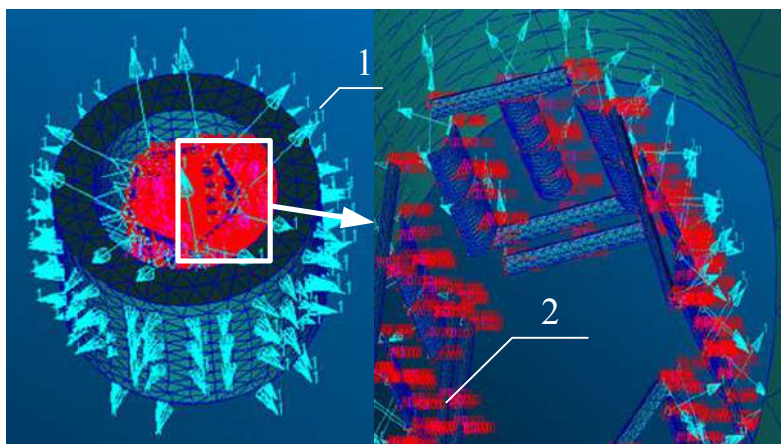


Рисунок 4 – Заданные значения направления лучей инфракрасного излучения:
1 – конвекция и тепловое излучение; 2 – температура нагрева излучателей

Расчет результирующего потока теплового излучения между поверхностью ИК-излучения и обмотками остова тягового электродвигателя производят по формуле

$$Q = q_{12} - q_{21} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot F_{\varphi 12} \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot F_{\varphi 12} \cdot A_2 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4). \quad (2)$$

Температура нагрева ИК-излучателя и длина волны определяются по закону смещения Вина – Голицина по формуле

$$\lambda_m \cdot T_1 = 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \cdot \text{К}. \quad (3)$$

На рисунке 5 показаны результаты расчета температурных полей на поверхности полимерной изоляции магнитной системы остова ТЭД типа НБ-514.

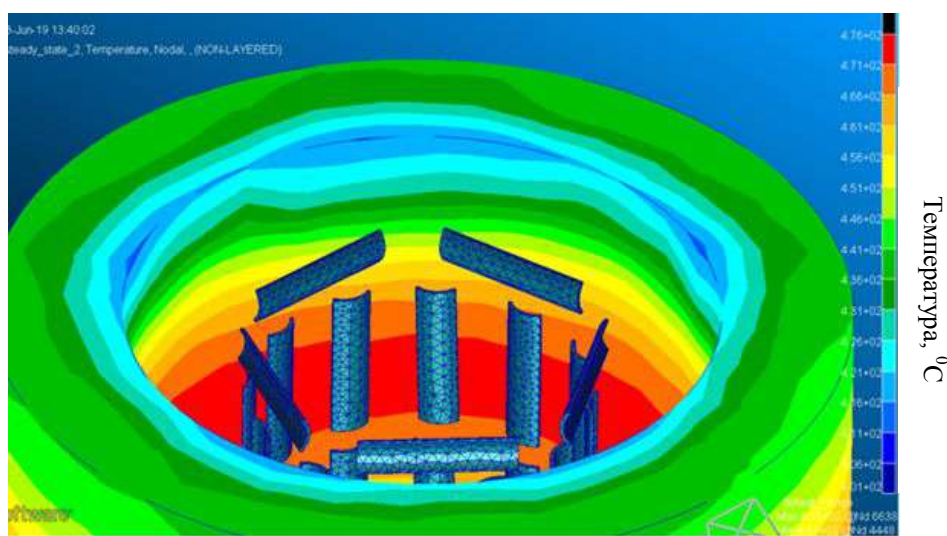


Рисунок 5 – Распределение температурных полей нагрева обмотки магнитной системы остова ТЭД типа НБ-514

Меняя в исходной модели различные значения параметров процесса сушки (температура нагрева ИК-излучателей, взаимное расположение ИК-излучателей и остова, время сушки, наименование пропитывающего состава (по свойствам материала – теплоемкость, теплопроводность, плотность, коэффициент излучения и поглощения), тип тягового электрического двигателя и т. д.), можно избежать трудоемких и продолжительных экспериментов при проектировании и изготовлении подобных установок по упрочнению изоляции обмоток остовов тяговых двигателей электровазов.

На основании расчетов были выбраны следующие параметры, которые обеспечивают необходимый нагрев поверхности изоляции 180 °С, обоснованный предельно допустимой температурой нагрева: количество излучателей: верхняя группа – 5, средняя группа – 24, нижняя группа – 10. Мощность излучателей соответственно составляет 1, 250 и 1 кВт, расстояние от излучателей до поверхности изоляции составило 50 мм.

По результатам проектирования и расчетов в настоящее время подана заявка на получение патента на полезную модель «Устройство камерного типа для сушки полимерной изоляции остова тяговых электрических машин вращающимся тепловым полем».

Общий вид итогового варианта прототипа установки для сушки полимерной изоляции магнитной системы остовов ТЭД представлен на рисунке 6. На основании представленной 3D-модели в настоящее время на базе Улан-Удэнского локомотивового вагоноремонтного завода – филиала АО «Желдорремаш» – осуществляется сборка данного прототипа установки (рисунок 7).

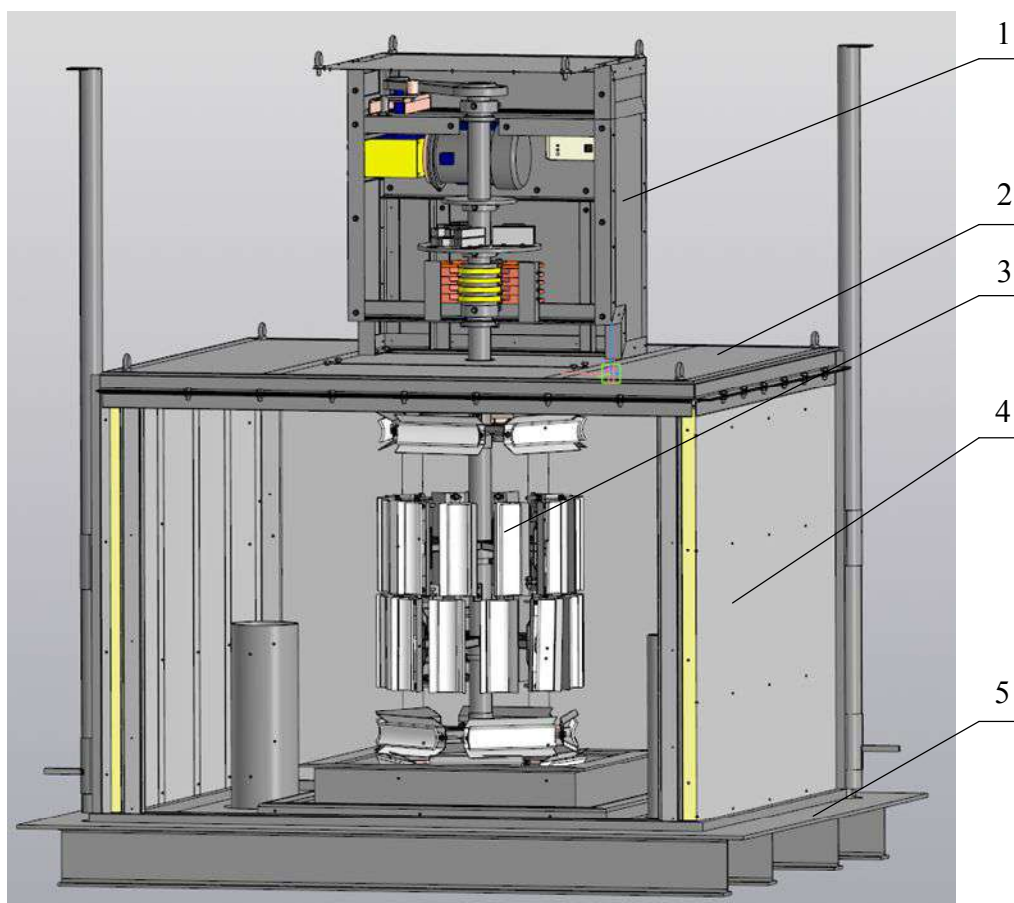


Рисунок 6 – Общий вид устройства:

1 – верхний модуль; 2 – крышка сушильной камеры;
3 – инфракрасный генератор; 4 – сушильная камера; 5 – основание



Рисунок 7 – Элементы прототипа устройства камерного типа для сушки полимерной изоляции остова ТЭД на УУЛВРЗ:
1 – основание; 2 – сушильная камера

Таким образом, спроектированное устройство позволяет обеспечивать равномерный нагрев полимерной изоляции магнитной системы остова ТЭД электровозов за счет вращающегося электромагнитного теплового поля, что в итоге обеспечит быстрое протекание процесса сушки в целом. Внедрение данного устройства позволит в значительной степени сократить затраты электроэнергии на ремонт и повысить скорость ремонтно-восстановительных операций, что, в свою очередь, приведет к повышению производительности в целом.

Список литературы

1. Пат. 2569337 Российской Федерации. МПК H02K 15/12. Инфракрасно-конвективно-вакуумный способ сушки изоляции обмоток магнитной системы остова тяговой электрической машины и устройство для его реализации [Текст] / Худоногов А. М., Лыткина Е. М., Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю., Гарев Н. Н., Выжимова В. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения». – № 2012145098/07; заявл. 23.10.2012; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.
2. Восстановление изоляционных свойств обмоток якоря тягового электродвигателя [Текст] / И. А. Худоногов, В. Н. Иванов и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета / Иркутский нац. исследоват. техн. ун-т. – Иркутск. – 2006. – № 4-1 (28). – С. 60 – 62.
3. Заяв. 95387 Российской Федерации. МПК H02K15/12. устройство камерного типа для сушки полимерной изоляции остова тяговых электрических машин вращающимся тепловым полем [Текст] / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. М. Худоногов, А. С. Ковшин, А. А. Хамнаева, И. О. Лобыцин, М. А. Дивинец, Н. И. Мануилов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения». № 2020105800; заявл. 06.02.2020.
4. Дульский, Е. Ю. Энергоаудит безразборной технологии ремонта магнитной системы тяговых двигателей электровозов [Текст] / Е. Ю. Дульский // Мир транспорта. – 2012. – Т. 10. – № 3 (41). – С. 168 – 171.
5. Иванов, П. Ю. Математическое моделирование процесса нагрева изоляции обмотки статора асинхронной вспомогательной машины электровоза [Текст] / П. Ю. Иванов, В. М. Агафонов, Е. Ю. Дульский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1 (49). – С. 183 – 189.

6. Александров, А. А. Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей: Дис... канд. техн. наук / Александров Андрей Алексеевич. – Иркутск, 2016. – 165 с.
7. Александров, А. А. Расчет термических остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов [Текст] / А. А. Александров, А. В. Лившиц, А. В. Рудых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1(49). – С. 52 – 56.
8. Зигель, Р. Теплообмен излучением [Текст]: Пер. с англ. / Р. Зигель, Дж. Хауэлл; – М.: Мир, 1975. – 934 с.
9. Бураковский, Т. Инфракрасные излучатели [Текст]: Пер. с польского / Т. Бураковский, Е. Гизинский, А. Саля. – Л.: Энергия, 1978. – 408 с.
10. Сутягин, В. М. Химия и физика полимеров [Текст]: Учебное пособие / В. М. Сутягин, Л. И. Бондалетова / Томский политехн. ун-т. – Томск, 2003. – 208 с.

References

1. Khudonogov A. M., Lytkina E. M., Dulsky E. Yu., Ivanov P. Yu., Garev N. N., Vyzhimova V. N.; *Patent RU 2569337*. IPC H02K 15/12, 20.11.2015.
2. Khudonogov I. A., Ivanov V. N., etc. Restoration of insulation properties of the armature windings of a traction motor [Vosstanovlenie izolyacionnyh svojstv obmotok yakorya tyagovogo elektrodvigatelya]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2006, no. 4 (28), vol. 1, pp. 60 – 62.
3. Application 95387 of the Russian Federation. IPC H02K 15/12. Dulsky, P.Yu. Ivanov, A.M. Khudonogov, A.S. Kovshin, A.A. Khamnaeva, I.O. Lobytsin, M.A. Divinets, N.I. declared 06.02.2020.
4. Dulsky E. Yu. Energy audit of non-selective repair technology for the magnetic system of electric locomotives traction engines [Energoaudit bezrazbornoj tekhnologii remonta magnitnoj sistemy tyagovyh dvigatelej elektrovozov]. *Mir transporta – World Of Transport*, 2012, vol. 10, no. 3 (41), pp. 168 – 171.
5. Ivanov P. Yu., Agafonov V. M., Dulsky E. Yu. Mathematical modeling of the process of heating the insulation of the stator winding of an asynchronous auxiliary machine of an electric locomotive [Matematicheskoe modelirovanie processa nagreva izolyacii obmotki statora asinhronnoj vspomogatel'noj mashiny elektrovoza]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2016. no. 1 (49), pp. 183 – 189.
6. Alexandrov A. A. *Modelirovanie termicheskikh ostatochnyh napryazhenij pri proizvodstve malozhestkih detalej* (Modeling of thermal residual stresses in the production of semi-rigid parts). Doctor's thesis, Irkutsk, ISTU, 2016, 165 p.
7. Aleksandrov A. A., Livshic A. V., Rudyh A. V. Calculation of thermal residual stresses in aluminum alloy workpieces [Raschet termicheskikh ostatochnyh napryazhenij v zagotovkah iz aluminievyh splavov]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2016, no. 1(49), pp 52 – 56.
8. Zigel', R. *Teploobmen izlucheniem* (Heat exchange by radiation). Moscow: Mir, 1975, 934 p.
9. Burakovskij, T., Gizin'skij E., Salya A. *Infrakrasnye izluchateli* (Infrared radiators). Leningrad: Energiia, 1978, 408 p.
10. Sutyagin V. M., Bondaletova L. I. *Himiya i fizika polimerov* (Polymer chemistry and physics). Tomsk: TPU, 2003, 208 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дульский Евгений Юрьевич

Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dulsky Evgeny Yuryevich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

st. Chernyshevsky, d. 15, Irkutsk, 664074, the
Russian Federation.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«ЭПС», ИрГУПС.
Тел.: +7 (983) 403-46-43.
E-mail: e.dulskiy@mail.ru

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the de-
partment « EPS», IrSTU.
Phone: +7 (983) 403-46-43.
E-mail: e.dulskiy@mail.ru

Иванов Павел Юрьевич

Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«ЭПС», ИрГУПС.

Ivanov Pavel Yuryevich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

st. Chernyshevsky, d. 15, Irkutsk, 664074, the
Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the de-
partment « EPS», IrSTU.

Романовский Александр Игоревич

Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«ЭПС», ИрГУПС.

Romanovsky Alexander Igorevich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

st. Chernyshevsky, d. 15, Irkutsk, 664074, the
Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the de-
partment « EPS», IrSTU.

Дивинец Марина Алексеевна

Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.

Студент кафедры «ЭПС», ИрГУПС

Divinets Marina Alekseevna

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

st. Chernyshevsky, d. 15, Irkutsk, 664074, the
Russian Federation.

Student of the department « EPS», IrSTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Основы проектирования промышленной установ-
ки для упрочнения полимерной изоляции магнитной
системы тягового двигателя электровоза тепловым
излучением [Текст] / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов и
др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей
сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 20 – 29.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Dulsky, E. Yu., P. Yu. Ivanov, Romanovsky A. I.,
M. A. Divinets. Bases of designing industrial installation
for strengthening polymer insulation of magnetic system of
electric truck motor by heat radiation. Journal of Transsib
Railway Studies, 2020, no. 1 (41), pp. 20 – 29
(In Russian).

УДК 621.333

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

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЯГОВОГО ПРИВОДА МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Аннотация. Предметом исследования является энергетическая эффективность системы тягового электроснабжения и тягового электропривода электровозов. Научное обоснование оценки энергетической эффективности взаимосвязанной системы электрической тяги поездов направлено на решение задач по снижению потерь напряжения в контактной сети, активной мощности в контактной сети и тяговом электроприводе электровозов за счет полного и непрерывного использования электрического потенциала системы электроснабжения. В основу методологии исследований положены закон сохранения энергии, математическое моделирование энергетического процесса и спектральный анализ напряжения и тока на токоприемнике электровоза. Аналитически и результатами расчета доказано, что значительные потери напряжения, активной мощности в контактной сети, тяговом электроприводе электровозов вызваны неудовлетворительной работой регуляторов мощности и несоответствием уровня напряжения в контактной сети мощности, которая необходима для реализации тягеловесного и скоростного вождения поездов. Для устранения отрицательного влияния индуктивного сопротивления тягового электроснабжения переменного тока на энергетическую

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

эффективность и скорость движения поездов предложено повышать напряжение в контактной сети постоянного тока и разрабатывать регуляторы мощности электровозов. Математической моделью системы электрической тяги постоянного тока показаны возможности снижения потерь электрической энергии и повышения скорости движения за счет применения электрического полупроводникового вариатора для согласования высокого напряжения в контактной сети с напряжением тяговых электродвигателей электровоза.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, преобразователь, напряжение, мощность, гармонические составляющие, поезд.

**Natalya L. Ryabchenok, Tatyana L. Alekseeva, Leonid A. Astrakhancev,
Vladimir A. Tikhomirov**

Irkutsk State Transport University (IrSTU), Irkutsk, the Russian Federation

ENERGY EFFICIENCY OF TRACTION DRIVE OF RAILWAY ROAD ELECTRIC LOCOMOTIVES

Abstract. The subject of the study is energy efficiency of traction power supply system and traction electric drive of electric locomotives. The article is scientifically based on the assessment of the energy efficiency of the mutually connected system of electric traction of trains. The study is aimed at solving problems on reduction of voltage losses in the contact system, active power in the contact system and traction electric drive of electric locomotives. This is possible due to the full and continuous use of the electrical potential of the power supply system. The research methodology is based on the law of energy preservation, mathematical modeling of the energy process and spectral analysis of voltage and current on the current collector of the electric locomotive. Analytically and by results of calculation it has been proved that significant losses of voltage, active power in the contact system, traction electric drive of electric locomotives are caused by unsatisfactory operation of power regulators and mismatch of voltage level in the contact power network, which is necessary for realization of heavy and high-speed driving of trains. In order to eliminate the negative effect of the inductive coupling of AC traction power supply on the energy efficiency and speed of trains, it is proposed to increase the voltage in the DC contact system and develop power regulators of electric locomotives. Mathematical model of DC electric traction system shows possibilities of reduction of electric energy losses and increase of movement speed due to application of electric semiconductor variator for matching of high voltage in contact system with voltage of traction electric motors of electric locomotive.

Keywords: energy efficiency, semiconductor devices, voltage, power, harmonious components, train.

Энергетическая эффективность электрической тяги поездов является ключевым показателем, от которого зависит возможность реализации скоростного, тяжеловесного вождения поездов и обеспечения планируемых показателей работы холдинга «Российские железные дороги». К настоящему времени разработаны различные направления научных [1, 2] и технических решений [3, 4] для улучшения энергетической эффективности и электромагнитной совместимости тягового привода электровоза и системы электроснабжения. Результаты опытной проверки вождения тяжеловесных, соединенных и скоростных поездов [5 – 8] свидетельствуют об ограниченных возможностях реализации поставленных задач с помощью современных локомотивов и систем тягового электроснабжения. Стремление ученых к повышению величины напряжения в контактных сетях постоянного и переменного тока [9–11] вызвано завышенными потерями напряжения, активной мощности в контактной сети и в тяговом приводе электровозов.

Коэффициент мощности тягового электропривода K_M электровоза переменного тока при импульсно-фазовом управлении силовыми полупроводниковыми приборами (СПП) выпрямителя с приемлемой для инженерных расчетов точностью можно вычислить по формуле

$$K_M = \cos \varphi_1 \cdot v = \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{4} \right) \cdot \frac{0,9 \cos \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}}, \quad (1)$$

где α – угол регулирования СПП выпрямителя;

γ_1, γ_2 – углы коммутации СПП выпрямителя;

$\cos \varphi_1$ – коэффициент сдвига;

v – коэффициент нелинейных искажений тока.

Для улучшения признаков качества энергетического процесса преобразования электрической энергии $\cos \varphi_1$, в научными работниками и специалистами разрабатываются устройства компенсации мощности сдвига, фильтры, устройства снижения углов коммутации СПП [12, 13]. Специалистами концерна *Siemens* разработан четырехквadrантный $4qS$ -преобразователь [14] с широтно-импульсной модуляцией управления СПП для обеспечения $\varphi_1 = 0$ в режиме потребления и $\varphi_1 = \pi$ в режиме рекуперации электроэнергии.

Выявить причины неудовлетворительной работы устройств электрической тяги и устранить их для повышения ее производительности и энергетической эффективности позволяют теория энергетических процессов, учитывающая продолжительность использования электрического потенциала контактной сети для тяги поезда [15, 16], и анализ спектра гармонических составляющих несинусоидального напряжения и тока на токоприемнике электровоза. Энергетические характеристики электропривода получены на основании второго закона Кирхгофа с использованием спектрального анализа несинусоидального действующего напряжения U и тока I_{tp} на входе.

Расчет и измерение составляющих предложенного баланса мощностей (2) на входе преобразователя электропривода можно выполнять с применением преобразования Фурье, аналитических расчетов, математического моделирования и контрольно-измерительных приборов на практике.

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

где S_G – полная мощность на входе полупроводникового регулятора тягового электропривода;

ΔS – часть полной мощности S_G на входе полупроводникового регулятора электропривода, которая не используется для необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии и для энергообмена в системе электроснабжения электропривода;

P – суммарная активная мощность гармонических составляющих напряжения и тока на входе полупроводникового регулятора мощности (ПРМ) тягового электропривода;

Q – суммарная реактивная мощность гармонических составляющих напряжения и тока на входе ПРМ тягового электропривода.

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

где U_k, I_k – действующее значение напряжения k -й составляющей, тока k -й составляющей ряда Фурье несинусоидального напряжения, тока на входе ПРМ;

U, I_{tp} – действующие значения несинусоидального напряжения и тока на входе ПРМ;

k – номер гармонической составляющей;

n – номер последней учитываемой гармоники.

Для расчета мощности ΔS , которая образуется на входе регулятора, учитывается электрический потенциал источника энергии во время непроводящего состояния СПП регулятора:

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{pk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U_p \cdot I_{tp}, \quad (4)$$

где U_{pk} – действующее напряжение k -й гармонической составляющей на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП;

U_p – действующее напряжение на входе ПРМ во время непроводящего состояния СПП.

Активная мощность на входе регулятора характеризует часть электрической энергии, которая необратимо преобразована в иной вид энергии в тяговых электродвигателях (ТЭД) и в тепловые потери энергии в электроприводе:

$$P = U_{c0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k, \quad (5)$$

где U_{c0} – постоянная составляющая напряжения на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП;

U_{ck} – действующее напряжение k -й гармонической составляющей на входе ПРМ во время проводящего состояния СПП;

I_0 – постоянная составляющая тока на входе ПРМ;

φ_k – угол сдвига по фазе k -й гармоники тока относительно одноименной k -й гармоники напряжения на входе ПРМ.

Реактивная мощность на входе регулятора, которая характеризует часть электрической энергии, расходуемой на энергообмен между источником энергии и реактивными элементами электропривода,

$$Q = \pm \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{ck}^2 \cdot I_k^2 \cdot \sin^2 \varphi_k}. \quad (6)$$

Аргумент полной мощности и входного электрического сопротивления регулятора мощности тягового электропривода

$$\varphi_{\Sigma} = \arctg \left[\frac{\pm \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{ck}^2 \cdot I_k^2 \cdot \sin^2 \varphi_k}}{U_{c0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k} \right]. \quad (7)$$

Зависимость действующего тока на входе полупроводниковых преобразователей от эффективности использования электрического потенциала на входе можно получить, подставив выражения (3), (4) в (2):

$$I_{\text{вп}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_P^2}}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что для энергосбережения при увеличении веса и скорости движения поездов необходимо повышать напряжение на токоприемнике электровозов и снижать электрический потенциал тягового электроснабжения преобразователями ($U_P = 0$).

Оценка эффективности современной системы тягового электроснабжения и тягового электропривода выполнена с помощью формул (1) – (7), математического моделирования работы трехсекционного грузового электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИПами) при минимальном угле регулирования тиристорами α и коллекторными ТЭД НБ-514Б в среде *Simulink* программы *MATLAB*. Электровоз работает в середине фидерной зоны контактной сети с двухсторонним питанием и по системе 2×25 кВ (рисунок 1) при моменте сопротивления на валу ТЭД 7772 Н·м.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

С помощью блока *powergui* выполнен ФФТ-анализ несинусоидального напряжения и тока (рисунок 2) на токоприемнике электровоза и рассчитаны составляющие баланса мощностей (2) – (7). $S_G = 11481,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

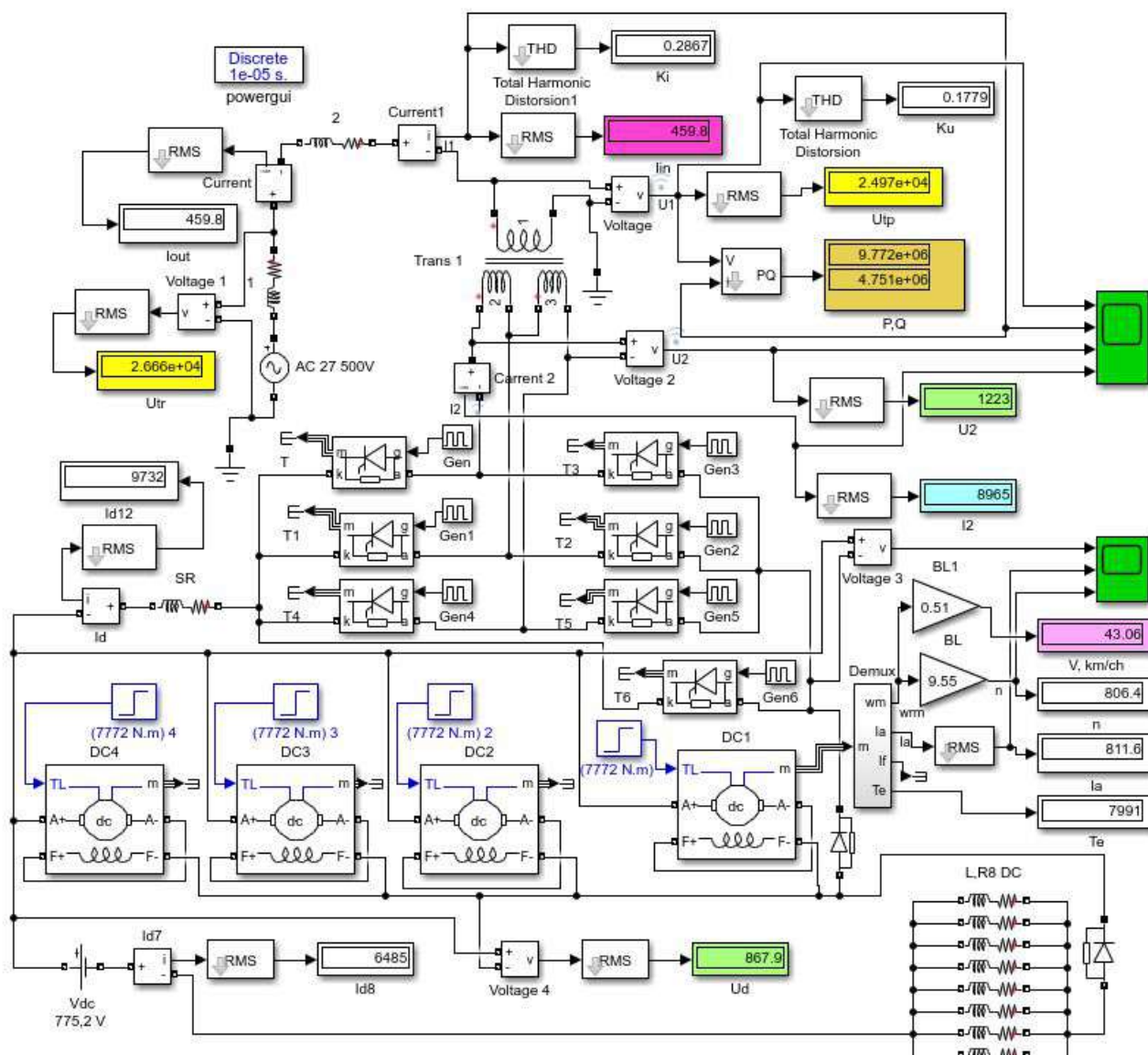


Рисунок 1 – Математическая модель тягового электропривода трехсекционного грузового электровоза с системой тягового электроснабжения $2 \times 25 \text{ кВ}$

Активные мощности гармонических составляющих: $P_1 = 9773,1 \text{ кВт}$; $P_3 = 98,4$; $P_5 = 44,4$; $P_{11} = 2,9$; $P_{15} = 1,14$; $P_{19} = 1,16 \text{ кВт}$. Суммарная активная мощность учитываемых гармоник на входе электропривода $P = 9921,1 \text{ кВт}$. Активная мощность 7-й, 9-й, 13-й, 17-й гармоник находится в пределах погрешности измерений и расчетов.

Реактивная мощность намагничивания гармонических составляющих тягового трансформатора электровоза $Q_1 = 4745,6 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$; $Q_3 = 350,6$; $Q_5 = -86,7$; $Q_7 = 15,7$; $Q_9 = -6,7$; $Q_{11} = 5,2$; $Q_{13} = -3,3$; $Q_{15} = 1,2$; $Q_{17} = -0,24$; $Q_{19} = 0,022 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$. Суммарная реактивная мощность намагничивания учитываемых гармоник тягового трансформатора $Q = 4759,3 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$.

Из-за активно-индуктивного сопротивления системы тягового электроснабжения переменного тока и тяговых трансформаторов электровоза процесс переключения тока с одной пары тиристоров ВИПов на другую пару тиристоров выполняется в течение $\gamma = 54$ электрических градусов (см. рисунок 2). В это время по первичной обмотке трансформатора и в кон-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

тактной сети протекает повышенный ток во время короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора тиристорами ВИПа, а напряжение на первичной обмотке снижается до $U_{к.3} = 10366$ В.

Действующее напряжение на первичной обмотке тяговых трансформаторов во время коммутации тириستоров ВИПа $U_p = 6963,9$ В можно приближенно рассчитать по формуле

$$U_p = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\gamma} U_{к.3}^2 \cdot \sin^2 \omega t d(\omega t)} = U_{к.3} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\gamma + \frac{\sin 2\gamma}{2} \right)}. \quad (9)$$

Мощность на входе ВИПа (4) во время коммутации тиристоров $\Delta S = 3202$ кВ·А.

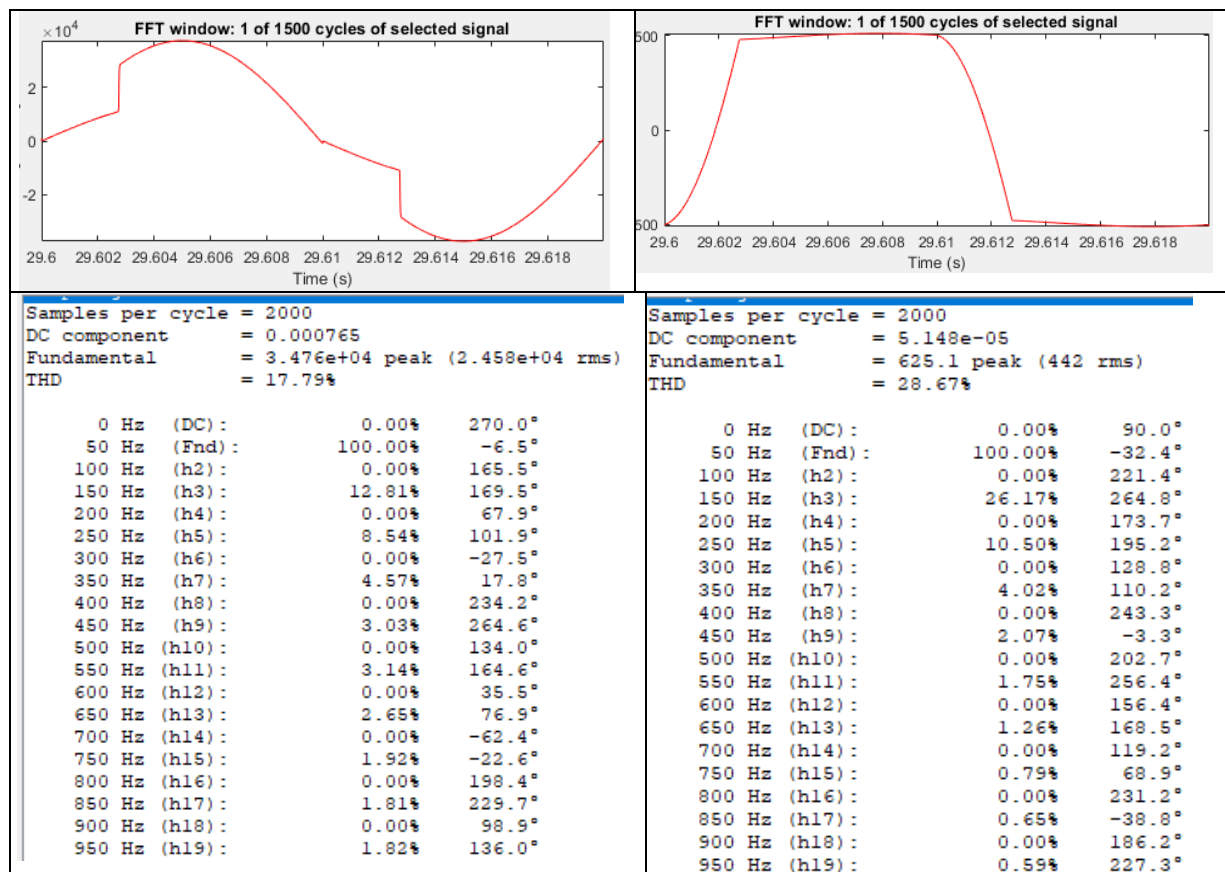


Рисунок 2 – Результаты спектрального ФФТ-анализа напряжения и тока на входе ВИПа

Баланс мощностей на входе ВИПа тягового электропривода грузового электровоза:

$$\sqrt{11481,2^2 - 3202^2} = \sqrt{9921,1^2 + 4759,3^2}.$$

Погрешность расчета составляет 0,2 %.

Действующее напряжение на токоприемнике электровоза ниже номинального, поэтому скорость движения поезда 43 км/ч. Тяговый трансформатор электровоза за время более 31 % от периода переменного напряжения работает в режиме короткого замыкания вторичной обмотки тиристорами ВИПа из-за индуктивного сопротивления системы электроснабжения и тягового трансформатора электровоза. Коэффициент полезного действия ТЭД 93,2 %, а КПД ВИПа и тягового трансформатора электровоза – 85,1 %. Потери активной мощности в ВИПе и тяговом трансформаторе электровоза на 40 % больше потерь активной мощности в контактной сети. Стрела провеса контактного провода может увеличиваться до недопустимых

размеров из-за потребляемого электровозом завышенного тока (8), что подтверждается результатами опытного вождения соединенных поездов. Коэффициент мощности с использованием формул (3), (5) $K_M = 0,86$. Для повышения энергетической эффективности электрической тяги поездов следует комплексно модернизировать систему тягового электроснабжения и регулятор мощности тягового электропривода электровоза.

Коэффициент мощности, рассчитанный по известной формуле (1) $K_M = 0,87$, а для его повышения следует из формулы компенсировать мощность сдвига и мощность искажения с помощью дополнительного оборудования.

В работах [17, 18] предложен регулятор мощности вместо ВИПа, который увеличивает продолжительность использования электрического потенциала контактной сети переменного тока для тяги, а на этапах пуска, трогания и разгона поезда значительно улучшает динамику, энергетические показатели электровоза. При работе электровоза переменного тока в номинальном режиме однофазный мостовой выпрямитель на тиристорах ВИПа и выпрямитель на диодах в предложенном регуляторе ухудшают энергетические показатели и электромагнитную совместимость электропривода электровоза с системой электроснабжения переменного тока.

Предложенный регулятор обеспечивает работу электровоза с электроснабжением от контактной сети постоянного тока. Математическая модель тягового электропривода электровоза постоянного тока в режиме пуска, трогания и разгона (рисунок 3) с номинальным напряжением 12 кВ и электрическим полупроводниковым вариатором ESV для регулирования мощности 12 ТЭД трехсекционного грузового электровоза свидетельствует о возможности повышения провозной и пропускной способности железной дороги.

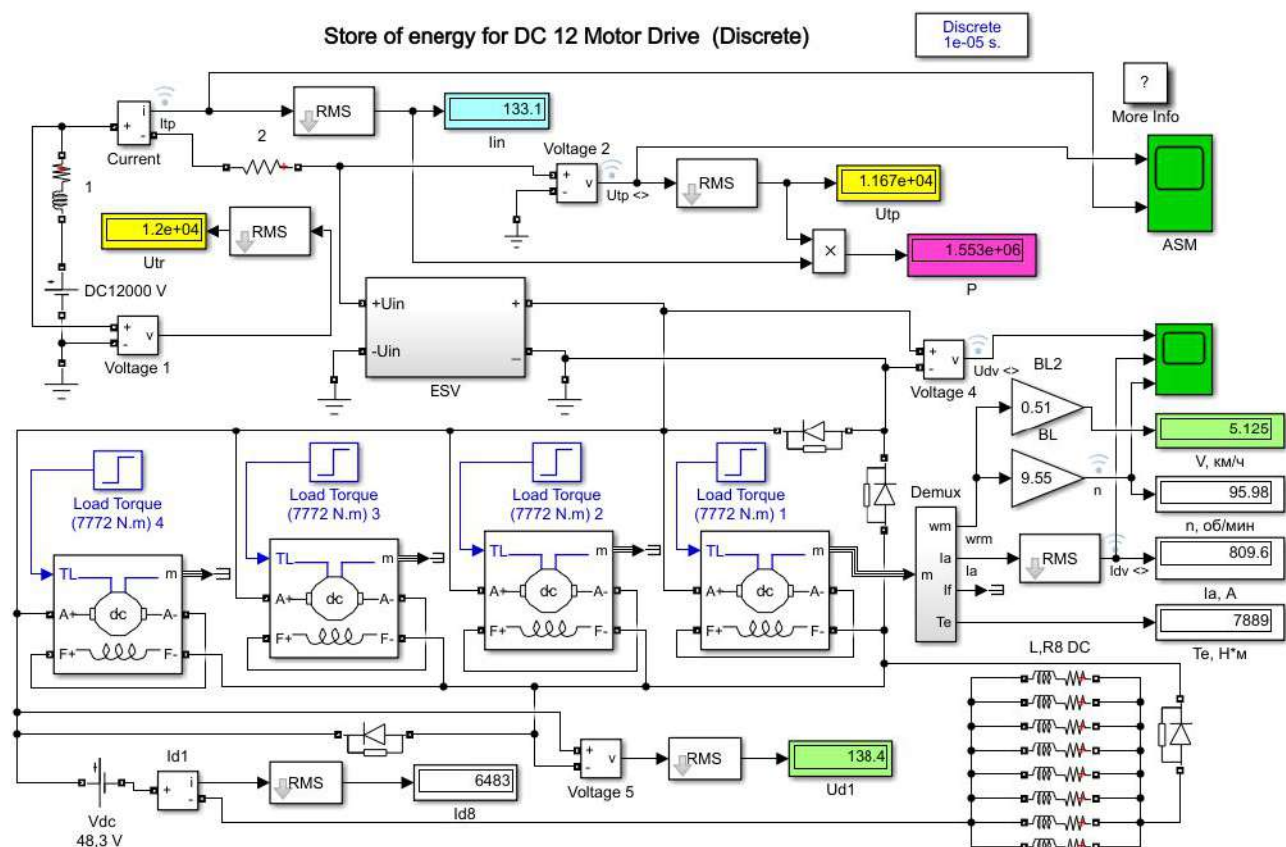


Рисунок 3 – Математическая модель тягового электропривода трехсекционного грузового электровоза в режиме пуска до $V = 5$ км/ч и системы тягового электроснабжения постоянного тока 12 кВ

К выходным выводам ESV присоединены параллельно ТЭД. При установившейся скорости движения электровоза $V = 5$ км/ч за счет полного использования электрического потен-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

циала на токоприемнике электровоза $U_{tp} = 11670$ В из контактной сети потребляется ток $I_{tp} = 133,1$ А. К обмоткам электродвигателей прикладывается напряжение 138,4 В, по обмоткам ТЭД протекает суммарный ток 9721 А, что свидетельствует о том, что регулятор имеет свойство электрического полупроводникового вариатора. В данном режиме работы коэффициент полезного действия ESV составляет 86,6 %, а КПД электродвигателей – 69,7 %. Потери мощности в контактной сети 44 кВт, потери мощности в регуляторе электровоза 208 кВт. Из осциллограмм (рисунок 4) напряжения на токоприемнике U_{tp} , на обмотках ТЭД U_{dv} , тока в токоприемнике I_{tp} , в обмотке ТЭД I_{dv} и скорости вращения вала ТЭД n следует, что при максимальном пусковом токе в каждом ТЭД 1500 А электровоз потребляет из контактной сети 130 А.

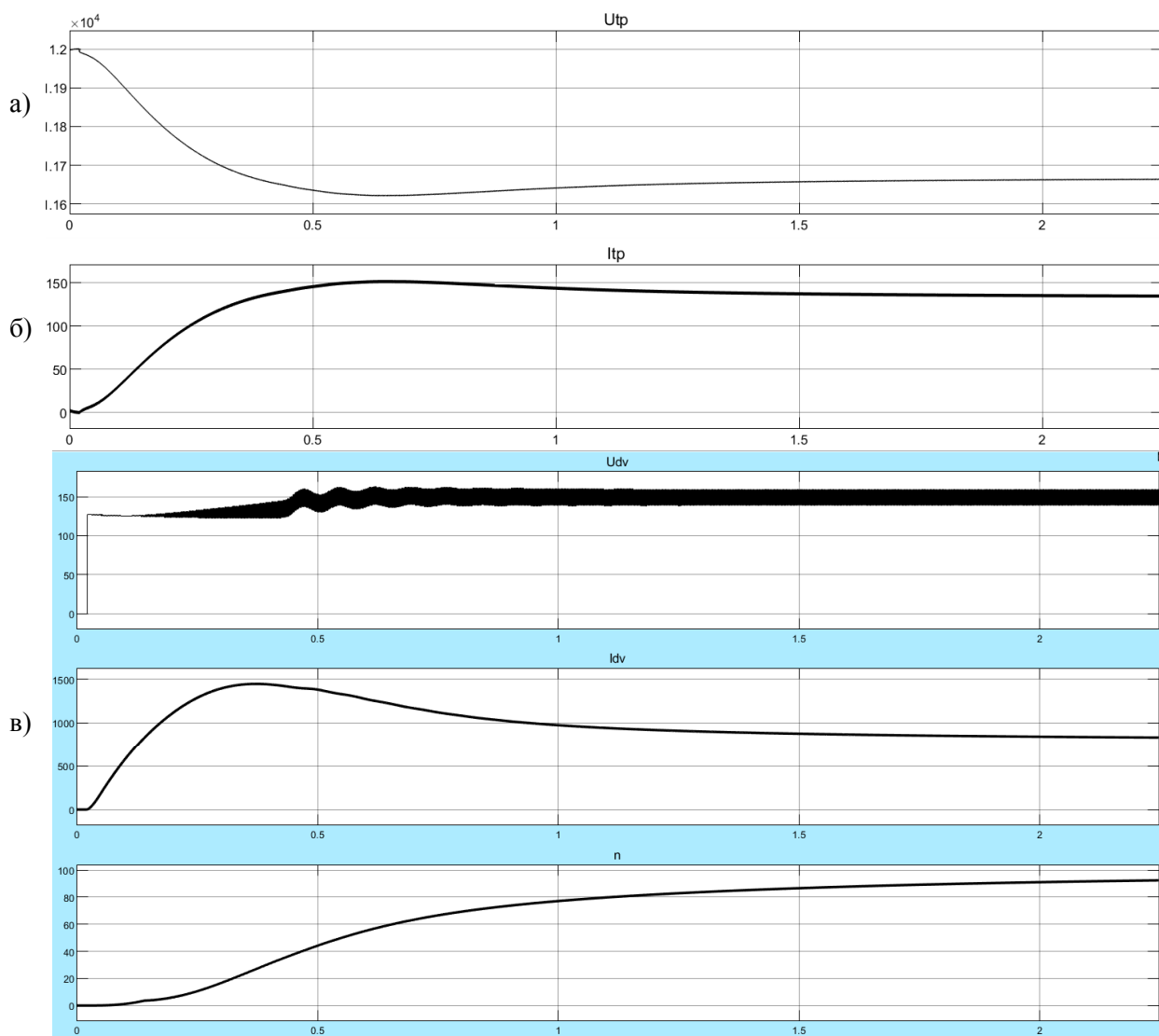


Рисунок 4 – Осциллограммы напряжений (а), токов (б), частоты вращения вала электродвигателя (в)

Исследованием работы тягового электропривода при номинальном моменте сопротивления на валах ТЭД 7772 Н·м (рисунок 5) в середине фидерной зоны контактной сети постоянного тока с напряжением 12 кВ установлено, что электровоз развивает скорость 50 км/ч. Напряжение на токоприемнике 9221 В при потребляемом токе из контактной сети 1111 А. Коэффициент полезного действия ESV $\eta_{ESV} = 94,3$ %, КПД ТЭД $\eta_{ТЭД} = 94,3$ %. Потери активной мощности в контактной сети $\Delta P_{КС} = 84,2$ %, в регуляторе мощности ESV электровоза $\Delta P_{ESV} = 15,8$ % от суммарных потерь 3664 кВт в данных узлах электропривода. Уровень напряжения и величина тока на токоприемнике электровоза свидетельствуют о возможности

пропускать поезда пакетом, составные и скоростные поезда в межподстанционной зоне железной дороги – с номинальной скоростью. Для снижения потерь активной мощности в контактной сети постоянного тока напряжением 12 кВ целесообразно (8) увеличивать напряжение. При работе эксплуатируемых трехсекционных электровозов постоянного тока в номинальном режиме и напряжением в контактной сети $U_H = 3$ кВ потери активной мощности в семь раз больше, чем в рассмотренном примере.

Ранее были выполнены на практике исследования электрической тяги [6] с применением системы постоянного тока напряжением 12 кВ. В данной работе регулирование мощности выполняется электрическим полупроводниковым вариатором ESV при параллельном соединении обмоток ТЭД, исключая применение группировки и последовательного соединения.

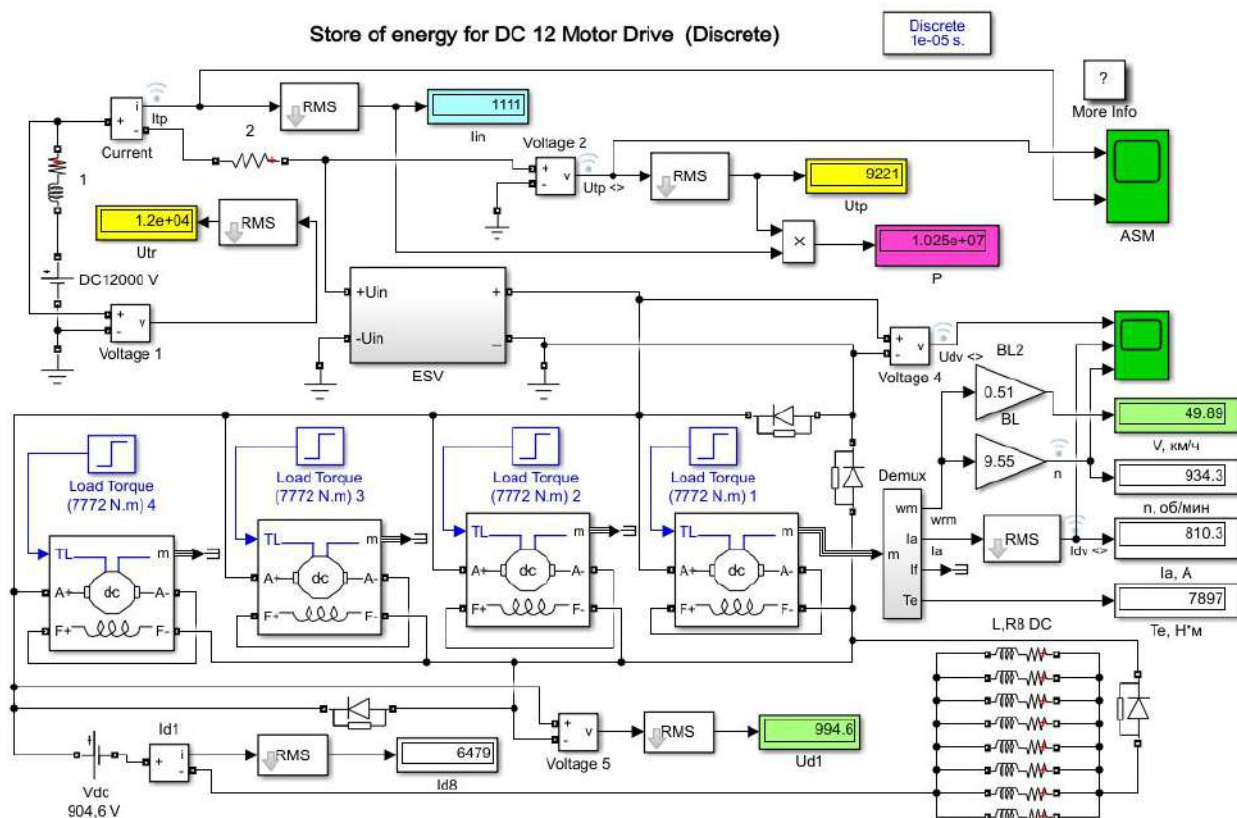


Рисунок 5 – Математическая модель системы тягового электроснабжения постоянного тока 12 кВ и тягового электропривода трехсекционного грузового электровоза при $V = 50$ км/ч

С помощью ESV можно выполнять корректировку напряжения на обмотках ТЭД, кроме того, с помощью регуляторов тока в обмотках возбуждения, разработанных авторами, можно распределять силу тяги за счет поосного, потележного и посекционного выравнивания мощности ТЭД. Применение системы постоянного тока напряжением 12 кВ позволит проверить работу оборудования на практике и приобрести опыт изготовления, эксплуатации нового оборудования.

В дальнейшем можно повысить пропускную и провозную способность железной дороги с сокращением потерь электрической энергии в контактной сети, если укомплектовать тяговые подстанции переменного тока с трехфазным линейным напряжением 27,5 кВ трехфазными 12-пульсовыми выпрямителями, применить предложенные регуляторы мощности на подстанциях для стабилизации напряжения и на электровозах для регулирования мощности. Повышение напряжения в контактной сети постоянного тока до 37,1 кВ с распределением тока нагрузки на 12 плеч выпрямителя подстанции позволит снизить отрицательное влияние коммутации тока силовыми полупроводниковыми приборами однофазных выпрямителей

электровозов переменного тока на энергетическую эффективность электрической тяги поездов.

Таким образом, с помощью уточненного закона сохранения энергии, спектрального анализа и разработанной теории энергетических процессов в электрической цепи выявлена причина неудовлетворительной энергетической эффективности системы тягового электроснабжения, тягового электропривода электровозов переменного и постоянного тока. Потери напряжения, активной мощности в современных системах тягового электроснабжения и в тяговом электроприводе электровозов сдерживают реализацию тяжеловесного вождения поездов и скоростного движения на железной дороге.

Для снижения тока, потребляемого электровозами из контактной сети с увеличением их мощности, необходимо увеличивать напряжение на токоприемнике (8), применять на тяговых подстанциях, на электровозах регуляторы мощности с полным и непрерывным использованием электрического потенциала системы электроснабжения и устранять отрицательное влияние индуктивности контактной сети переменного тока, тяговых трансформаторов электровозов переменного тока на энергетическую эффективность электрической тяги.

Список литературы

1. Бурков, А. Т. Электроника и преобразовательная техника: В 2 т. [Текст] / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 2015. – Т. 2. – 307 с.
2. Akagi, H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. – New-York: Wiley, 2007. – 379 p.
3. Бозе, Б. К. Современная силовая электроника и преобразователи переменного тока [Текст] / Б. К. Бозе // Prentice Hall PTR. – 2002. – 738 с.
4. Преобразователь выпрямительно-инверторный ВИП-1000-У1: Руководство по эксплуатации ИЕАЛ.435411.046 РЭ [Текст] / ОАО «Электровыпрямитель». – Саранск, 2008. – 35 с.
5. Копанев, А. С. Испытания системы компенсации реактивной мощности на электровозе ЗЭС5К [Текст] / А. С. Копанев, П. А. Хрипков, В. М. Волков // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения / ВЭЛНИИ. – Новочеркасск. – 2010. – Т. 2 (60). – С. 14 – 36.
6. Аржанников, Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов: Монография [Текст] / Б. А. Аржанников / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2012. – 207 с.
7. Отчет № ТЭЛ.094-14-2014 тягово-энергетических испытаний по оценке тяговых свойств электровоза серии 2ЭС5 с асинхронным тяговым приводом на участке Тайшет – Токсимо, установления критической нормы массы поезда для серии 2ЭС5 [Текст] / Дирекция тяги ВСЖД филиала ОАО «РЖД». – Иркутск, 2014. – 348 с.
8. Отчет о научно-исследовательской работе «Тягово-энергетические испытания электровоза 2ЭС7 в условиях Восточно-Сибирской железной дороги филиала ОАО «РЖД» [Текст] / АО ВНИИЖТ. – М., 2016. – 143 с.
9. Черемисин, В. Т. Организация контроля предельных режимов работы тяговой сети в условиях скоростного и тяжеловесного движения / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, В. Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 83 – 90.
10. Марикин, А. Н. Повышение эффективности тягового электроснабжения при пропуске скоростных и тяжеловесных поездов [Текст] / А. Н. Марикин // Электрификация и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте: Сб. докл. второго междунар. симпозиума «Элтранс-2003» / ПГУПС. – СПб, 2003. – С. 297 – 306.
11. Косарев, А. Б. Проблемы развития скоростного движения [Текст] / А. Б. Косарев, О. Н. Назаров // Материалы второго междунар. симпозиума eltrans «Электрификация и науч-

но-технический прогресс на железнодорожном транспорте» / ПГУПС. – СПб., 2003. – С. 42 – 54.

12. Широченко, Н. Н. Улучшение энергетики электровозов переменного тока [Текст] / Н. Н. Широченко, В. А. Татарников, З. Г. Бибинеишвили // Железнодорожный транспорт. – 1988. – № 7. – С. 33 – 37.

13. Пат. 2212086 Российская Федерация, МПК В60L 9/12 (2006.1) Устройство для компенсации реактивной мощности [Текст] / Кулинич Ю. М, Савоськин А. Н.; заявитель и патентообладатель ООО «ЭЛМЕХтранс А». – № 2001127970/09; заявл. 16.10.2001; опубл. 10.09.2003, Бюл. № 24.

14. Тайгелькеттер, И. Мощный преобразователь на IGBT-транзисторах для применения на железнодорожном подвижном составе [Текст] / И. Тайгелькеттер, Д. Ширенгер. – Мюнхен: Siemens AG, 2000.

15. Эффективность электроэнергетической системы [Текст] / Т. Л. Алексеева, Н. Л. Рябченко и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 3 (47). – С. 181 – 186.

16. Alekseeva T. Technology of electric power efficient use in transport / T. Alekseeva, N. Ryabchyonok, L. Astrakhantsev // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2018. – vol. 692. – Pp. 120 – 133.

17. Пат. 2388136 Российская Федерация, МПК H02P 27/08 (2006.01) Способ регулирования мощности и устройство преобразователя сопротивления для электрических машин переменного тока [Текст] / Алексеева Т. Л., Астраханцев Л. А., Рябченко К. П.; заявитель и патентообладатель авторы. – № 2008100829/09; заявл. 09.01.2008; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.

18. Электрические полупроводниковые вариаторы для управления мощностью тяговых коллекторных и асинхронных машин [Текст] / Н. Л. Рябченко, Т. Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев // Инновационный транспорт-2016: специализация железных дорог: Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2017. – С. 277 – 282.

References

1. Burkov A.T. *Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika* (Electronics and Converter Technology). Moscow, UMTs ZhDT, Vol. 1, 2015, 307 p.

2. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering. New York: Handbook, Wiley, 2007, 379 p.

3. Boze B. K. *Sovremennaja silovaja jelektronika i preobrazovateli peremennogo toka* (Modern power electronics and AC converters), Prentice Hall PTR, 2002, 738 p.

4. *Preobrazovatel' vypryamitel'no-invertornyj VIP-1000-U1: Rukovodstvo po ekspluatatsii IEAL.435411.046* (Rectifier-inverter VIP-1000-U1 converter: Operating Manual IEAL.435411.046 RE). Saransk: JSC Electric rectifier, 2008, 35 p.

5. Kopanев A. S., Khripkov P.A., Volkov V. M. Ispytaniya sistemy kompensatsii reaktivnoi moshchnosti na elektrovoze 3ES5K [Tests of a system of compensation of jet power on an electric locomotive 3ES5K]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostroyeniya – Messenger of the All-Russian research and design institute of an elektrovostroyeniye*, vol. 2 (60), pp. 14 – 36.

6. Arzhannikov B. A. *Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhe- loves-nogo dvizheniya poezdov: Monografiya* (Traction DC power supply for high-speed and heavy-duty train traffic: Monography). Yekaterinburg: USURT, 2012, 207 p.

7. *Otchet № TEL.094-14-2014 Tyagovo-energeticheskikh ispytaniy po otsenke tyagovykh svoystv elektrovoza serii 2ES5 s asinkhronnym tyagovym privodom na uchastke Taishet-Toksimo, ustanovleniya kriticheskoi normy massy poezda dlya serii 2ES5* (Report No. TEL.094-14-2014 Traction-energy tests on evaluation of traction properties of electric locomotive series 2ES5 with asynchronous traction drive on the Taishet-Toksimo section, establishment of critical standard of train

mass for series 2ES5), Traction management of VZhD branch of JSC "Russian Railways", Irkutsk, 2014, 348 p.

8. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote «Tyagovo-energeticheskie ispytaniya elektrovoza 2ES7 v usloviyakh Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi filiala OAO «RZhD»* (Report on the research work "Traction and energy tests of the electric locomotive" in the 2ES7 of the East Siberian railway of the branch of JSC "Russian Railways"), JSC VNII, Moskva, 2016, 143 p.

9. Cheremisin V. T., Kashtanov A. L., Nezevak V. L. Organization of control of limit working hours of traction network in conditions of the high-speed and heavy movement [Organizatsiya kontrolya predel'nykh rezhimov raboty tyagovoi seti v uslo-viyakh skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1 (29), pp. 83 – 90.

10. Marikin A.N. Povyshenie effektivnosti tyagovogo elektrosnabzheniya pri propuske skorostnykh i tyazhelovesnykh poezdov [Improving the efficiency of traction power supply when passing fast and heavy trains]. *Sb. dokl. vtorogo mezhdunarodnogo sim-poziuma Eltrans-2003: Elektrifikatsiya i nauchno-tekhnicheskii progress na zheleznodorozhnom transporte* (Compilation of Reports of the Second International SIM Eltrans-2003: Electrification and Scientific and Technical Progress in Railway Transport). – St. Petersburg, 2003, pp. 297 – 306.

11. Kosarev A. B., Nazarov N. Problemy razvitiya skorostnogo dvizheniya [Problems of development of high-speed traffic]. *Materialy vtorogo mezhdunar. simpoziuma eltrans «Elektrifikatsiya i nauchno-tekhnicheskii progress na zheleznodorozhnom transporte»* (Materials of the second international symposium eltrans "Electrification and scientific and technological progress in railway transport"). – St. Petersburg, 2003, pp. 42 – 54.

12. Shirochenko N. N., Tatarnikov V. A., Bibineishvili Z. G. Uluchshenie energetiki elect-rovozo- peremennogo toka [Improvement of energy of AC electric locomotives]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport*, 1988, no. 7, pp. 33 – 37.

13. Kulinich Yu. M., Savos'kin A. N. *Patent RU 2212086 C2*, 10.09.2003.

14. Taigel'ketter I., Shirenger D. *Moshchnyi preobrazovatel' na IGBT-tranzistorakh dlya primeneniya na zhe-leznodorozhnom podvizhnom sostave* (Powerful converter on IGBT-transistors for application on a cross-line rolling stock). Munich: Siemens AG, 2000.

15. Alekseeva T. L., Ryabchenok N. L., Astrakhantseva N. M., Astrakhantsev L. A. Effectiveness of an electrical power system [Effektivnost' elektroenergeticheskoi sistemy]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2015, no. 3 (47), pp. 181 – 186.

16. Alekseeva T. L., Ryabchyonok N. L., Astrakhantsev L. A. Technology of electric power efficient use in transport, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, no. 692, pp. 120 – 133.

17. Alekseeva T. L., Astrakhantsev L. A., Ryabchyonok N. L. *Patent RU 2388136 C2*, 27.04.2010.

18. Ryabchenok N. L., Alekseeva T. L., Astrakhantsev L. A. Electric semiconductor variators for power control of traction and induction machines [Elektricheskie poluprovodnikovye variatory dlya upravleniya moshchnost'yu tyagovykh kollektornykh i asinkhronnykh mashin]. *Innovatsionnyi transport – 2016: spetsializatsiya zheleznykh dorog: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (Innovative transport – 2016: railway specialization: Materials of the International Scientific and Technical Conference). – Ekaterinburg, 2017, pp. 277 – 282.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рябченко Наталья Леонидовна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Математика», ИрГУПС.

Тел.: +7-914-009-90-19.

E-mail: astranal@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ryabchenok Natalya Leonidovna

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

15, Chernishevskogo st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Matematical», IrSTU.

Phone: +7-914-009-90-19.

E-mail: astranal@mail.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Алексеева Татьяна Леонидовна

Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Математика», ИрГУПС.

Тел.: +7-902-516-78-43.

E-mail: talecseeva843@gmail.com

Alekseeva Tatyana Leonidovna

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

15, Chernishevskogo st., Irkutsk, 664074, the
Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the
department «Matemtical», IrSTU.

Phone: +7-902-516-78-43.

E-mail: talecseeva843@gmail.com

Астраханцев Леонид Алексеевич

Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Тел.: +7-950-113-43-60.

E-mail: astrahancev1943@mail.ru

Astrakhancev Leonid Alekseevich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

15, Chernishevskogo st., Irkutsk, 664074, the
Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the de-
partment «Transport power industry», IrSTU.

Phone: +7-950-113-43-60.

E-mail: astrahancev1943@mail.ru

Тихомиров Владимир Александрович

Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, заведую-
щий кафедрой «Электроэнергетика транспорта»,
ИрГУПС.

Тел.: +7-924-603-45-82.

E-mail: svat_irk@mail.ru

Tikhomirov Vladimir Aleksandrovich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

15, Chernishevskogo st., Irkutsk, 664074, the
Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the
department «Transport power industry», IrSTU.

Phone: +7-924-603-45-82.

E-mail: svat_irk@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Энергетическая эффективность тягового привода
магистральных электропоездов [Текст] / Н. Л. Рябченко,
Т. Л. Алексеева и др. // Известия Транссиба /
Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. –
№ 1 (41). – С. 29 – 41.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ryabchenok N. L., Alekseeva T. L., Astrakhancev L. A.,
Tikhomirov V. A. Energy efficiency of traction drive of rail-
way road electric locomotives. Journal of Transsib Railway
Studies, 2020, no. 1 (41), pp. 29 – 41 (In Russian).

УДК 621.336.2

О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, А. И. Слатин

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РАЗУПРОЧНЕНИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В статье проведен анализ изменения прочностных свойств конструкционных материалов, ис-
пользуемых при производстве токоприемников электроподвижного состава, предложена методика расчета
снижения ресурсных показателей элементов системы подвижных рам токоприемников электроподвижного со-
става, изготовленных из упрочненных алюминиевых сплавов, в результате теплового воздействия протекающего
тока. Рассмотрены особенности нагрева рычагов токоприемника в ходе лабораторных испытаний. Установлены

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

наиболее теплонапряженные узлы и элементы, несущие механическую нагрузку. Определена зависимость тепловой деградации рычагов системы подвижных рам при различных значениях температуры. Рассчитана функция нелинейного преобразования для расчета интегрального значения теплового износа. Предложен способ повышения надежности и работоспособности токоприемников, базирующийся на применении перманентного контроля температуры его ключевых элементов.

Ключевые слова: токоприемник, упрочнение, механические свойства, переходный процесс.

Oleg A. Sidorov, Alexander N. Smerdin, Anatoly I. Slatin

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

IMPROVEMENT OF ROLLING STOCKS PANTOGRAPHS THERMAL DEGRADATION DIAGNOSIS METHODIC

Abstract. The article analyzes the change in the strength properties of structural materials used in the production of current collectors of electric rolling stock, proposes a method for calculating the reduction of resource indicators of elements of a system of moving frames of electric current collectors made of hardened aluminum alloys as a result of the thermal effect of the flowing current. The features of heating the levers of the current collector during laboratory tests are considered. The most heat-stressed units and elements bearing a mechanical load are installed. The dependence of the thermal degradation of the levers of a system of moving frames at various temperatures is determined. The nonlinear conversion function is calculated for calculating the integral value of thermal wear. A method is proposed to increase the reliability and performance of current collectors, based on the use of permanent temperature control of its key elements.

Keywords: current collector, hardening, mechanical properties, transient.

В связи с повышением токовых нагрузок, действующих на систему токосъема на линиях постоянного тока магистральных электрических железных дорог [9], токоприемники электроподвижного состава должны быть способны в течение длительного времени выдерживать протекание тягового тока, не теряя во время эксплуатации своих механических и электрических свойств.

Современные тенденции развития системы токосъема на магистральных железных дорогах накладывают серьезные ограничения на количество одновременно поднятых токоприемников, особенно при использовании локомотивной тяги [2].

Системы подвижных рам токоприемников, используемых на современном электроподвижном составе, как правило, выполнены из алюминиевых упрочненных деформируемых сплавов. Деформационные и термические способы упрочнения позволяют повысить механические свойства некоторых алюминиевых сплавов на 100 – 300 % [5, 11].

С учетом деформационного упрочнения и последующей термообработки данные материалы имеют механические показатели, позволяющие значительно снизить сечения рычагов системы подвижных рам без потери несущей способности, уменьшить расход материалов, вес и приведенную массу, что благотворно сказывается на эксплуатационных характеристиках системы токосъема [10].

В ходе многочисленных исследований [4, 8] было установлено, что термически и деформационно-упрочненные алюминиевые сплавы с течением времени теряют свои механические свойства. Данный процесс наиболее скоротечен при высокой температуре, что с учетом длительного срока службы токоприемников может приводить к преждевременной потере их несущей способности (рисунок 1). Нужно отметить, что внешние проявления теплового разупрочнения практически отсутствуют и сложны для диагностики неразрушающими дистанционными способами, поэтому исследование теплового износа механически нагруженных узлов и элементов токоприемников является актуальной задачей.

В условиях эксплуатации токоприемники нередко снимают ток до 3000 А при разгоне и при движении электровоза по сложному профилю. При этом скорость набегающего потока воздуха незначительна, особенно при попутном ветре. В результате токоведущие части нагреваются до высокой температуры.

В конструкции токоприемника можно выделить несколько основных узлов, имеющих повышенный нагрев: нижний рычаг системы подвижных рам и части основания, располо-

женные вдоль пути протекания тока (рисунок 2). Из-за особенностей конструкции крышевого оборудования указанные части находятся в аэродинамической тени и движение воздуха вокруг них малоинтенсивное. В соответствии с современными тенденциями развития электроподвижного состава ужесточение требований в части материалоемкости, массы, аэродинамического сопротивления приводит к необходимости снижения сечений элементов силовых конструкций токоприемников, тщательного обоснования запаса несущей способности при безусловном соответствии показателей назначения токоприемников требованиям отраслевых, национальных и международных стандартов.

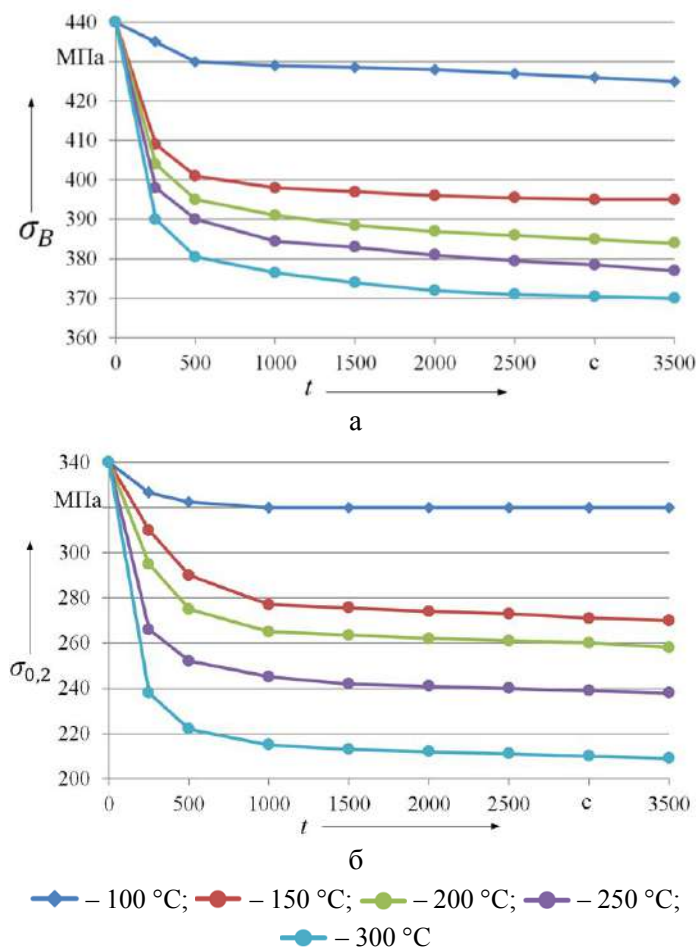


Рисунок 1 – Изменение предела прочности (а) и предела текучести (б) упрочненного образца АМг6 в зависимости от температуры и времени выдержки

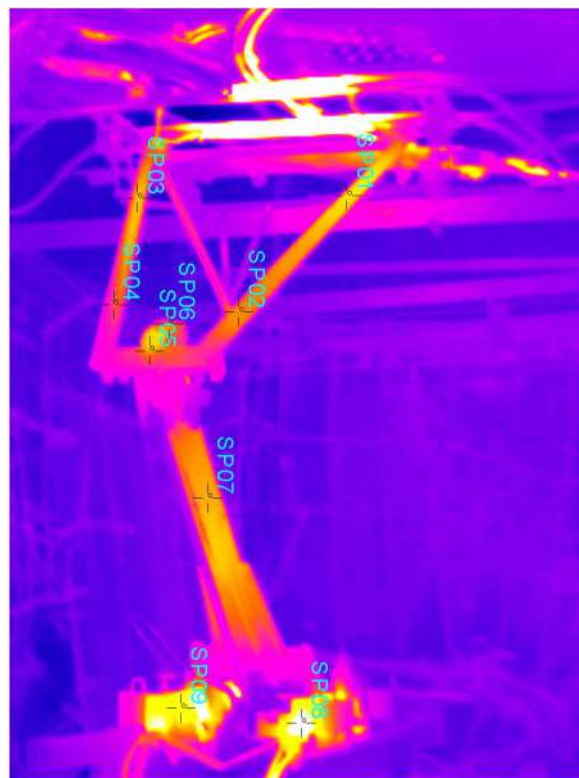


Рисунок 2 – Термограмма токоприемника при протекании номинального тока при движении

Учет теплового режима токоприемника позволяет уточнить механические и ресурсные показатели, обоснованно назначать ремонт и срок службы.

Экспериментальные исследования, проведенные в лаборатории «Контактные сети и линии электропередачи» ОмГУПС [6, 7], подтвердили высокую скорость нарастания температуры токоведущих частей даже при наличии обдува набегающим потоком воздуха (рисунок 3).

Анализ повреждений токоприемников электроподвижного состава [1] позволил сделать предположение о потере механической прочности системы подвижных рам вследствие теплового износа. На основании изученных закономерностей разупрочнения в течение времени можно представить данный процесс как переходный между состоянием начальной

повышенной прочности ($\sigma_{\max}$), достигнутой в результате механической и (или) тепловой обработки, и разупрочненным состоянием (рисунок 4).

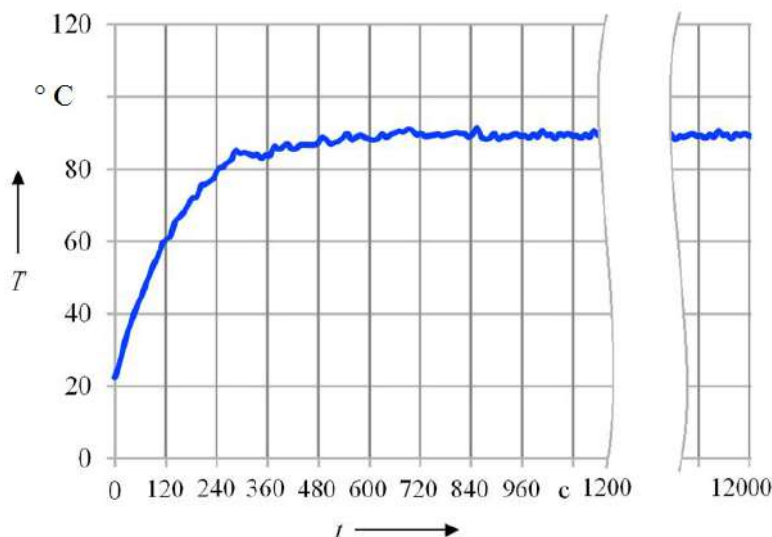


Рисунок 3 – График нагрева нижнего рычага системы подвижных рам

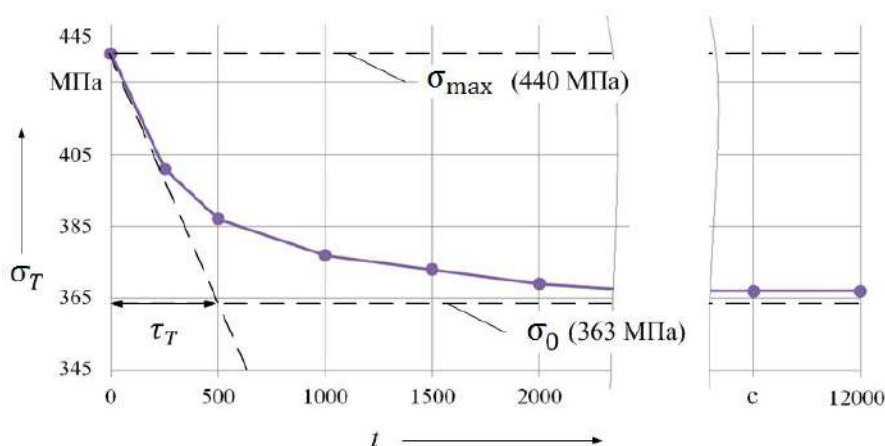


Рисунок 4 – Определение постоянной времени процесса разупрочнения

В зависимости от температуры переходный процесс может либо длиться дольше, либо ускоряться. В соответствии с принятой математической моделью переходного процесса скорость разупрочнения характеризуется постоянной времени (τ_T), по истечении которой материал потеряет $1 - 1/e$ ($\approx 62\%$) от своего запаса прочности, полученного в результате упрочнения:

$$\sigma_T(t) = \sigma_0(1 - e^{-t/\tau_T}) + \sigma_{\max} \cdot e^{-t/\tau_T}, \quad (1)$$

где σ_0 – прочность материала в отожженном состоянии; $\sigma_{\max}$ – прочность в упрочненном состоянии; t – время от начала переходного процесса.

Выражение (1) применимо с допущением о том, что режим изменения температуры задан как функция Хэвисайда [3].

Так как в ходе эксплуатации температура деталей токоприемника варьируется в широких пределах, предлагается на основании полученных значений постоянной времени разупрочнения ввести коэффициент теплового износа K_T , численно равный отношению заявленного паспортного срока службы токоприемника $t_{\text{сл. п}}$ к постоянной времени разупрочнения при заданной температуре.

$$K_T = \frac{t_{\text{сл. п}}}{\tau_T}, \quad (2)$$

где $t_{\text{сл. п}}$ – паспортный срок службы, с.

Выполненные расчеты показали, что при заявленном паспортном сроке службы магистрального токоприемника 25 лет ($\approx 7,884e + 08$ с) коэффициент теплового износа может варьироваться в широких пределах в зависимости от температуры (рисунок 5).

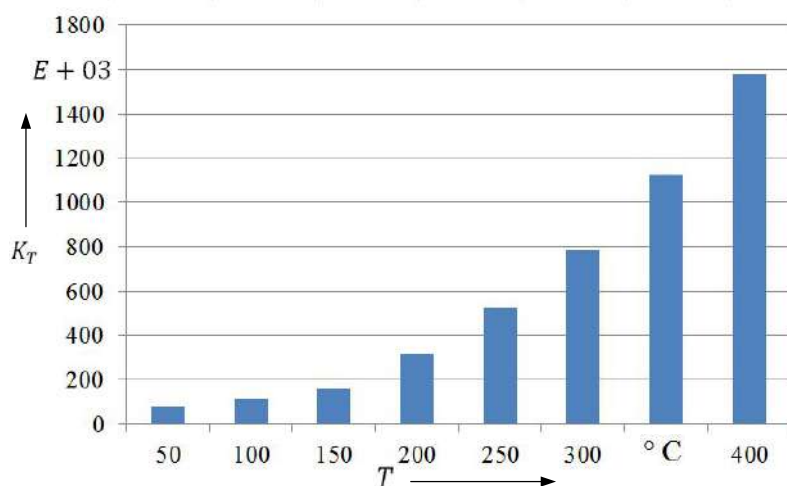


Рисунок 5 – Изменение коэффициента теплового износа системы подвижных рам токоприемника при повышении температуры

Совокупность коэффициентов, полученных для различных значений температуры, предлагается аппроксимировать с помощью степенного полинома второй степени:

$$K_T(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c, \quad (3)$$

где $c = K_T(T_0)$ – коэффициент теплового износа, соответствующий паспортному значению срока службы токоприемника; T_0 – температура, при которой определено паспортное значение срока службы токоприемника, °C; T – температура эксплуатации токоприемника, °C; a, b – параметрические коэффициенты, определяемые в соответствии с методом наименьших квадратов для полиномиальной функции.

В качестве исходных данных для поиска параметрических коэффициентов используются экспериментально установленные значения $K_T(T)$ и соответствующие им значения T :

$$\begin{cases} a \cdot 200^2 + b \cdot 200 + c = 315E + 03; \\ a \cdot 250^2 + b \cdot 250 + c = 525E + 03; \\ a \cdot 300^2 + b \cdot 300 + c = 788E + 03; \\ a \cdot 350^2 + b \cdot 350 + c = 1126E + 03; \\ a \cdot 400^2 + b \cdot 400 + c = 1577E + 03. \end{cases} \quad (4)$$

Для поиска параметрических коэффициентов уравнения параболы, наилучшим образом описывающей всю совокупность имеющихся данных, необходимо найти минимум функции трех переменных:

$$F(a; b; c) = \sum_{i=1}^n \left(K_T(T_i) - (aT_i^2 + bT_i + c) \right)^2. \quad (5)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Решение данной задачи с помощью частных производных

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial b} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial c} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a \sum T_i^4 + b \sum T_i^3 + c \sum T_i^2 = \sum T_i^2 K_T(T_i); \\ a \sum T_i^3 + b \sum T_i^2 + c \sum T_i = \sum T_i K_T(T_i); \\ a \sum T_i^2 + b \sum T_i + c \cdot n = \sum K_T(T_i) \end{cases} \quad (6)$$

позволяет составить систему уравнений для токоприемников, система подвижных рам которых изготовлена из алюминиевого сплава АМг6:

$$\begin{cases} a \cdot 5,421E + 10 + b \cdot 1,575E + 08 + c \cdot 4,750E + 05 = 5,0668E + 11; \\ a \cdot 1,575E + 08 + b \cdot 4,750E + 05 + c \cdot 1,5E + 03 = 1,456E + 09; \\ a \cdot 4,750E + 05 + b \cdot 1,500E + 03 + c \cdot 5,0 = 4,333E + 06. \end{cases} \quad (7)$$

Решение системы уравнений по методу подстановки дает следующие расчетные значения для параметрических коэффициентов: $a = 11,85$; $b = -860,685$; $c = 23$.

Для рычагов системы подвижных рам рассматриваемых токоприемников аппроксимирующее выражение примет следующий вид:

$$K_T(T) = 11,85 \cdot T^2 - 860,685 \cdot T + 23. \quad (8)$$

Полученное выражение (8) используется в качестве функции нелинейного преобразования для расчета интегрального значения теплового износа (рисунок 6).

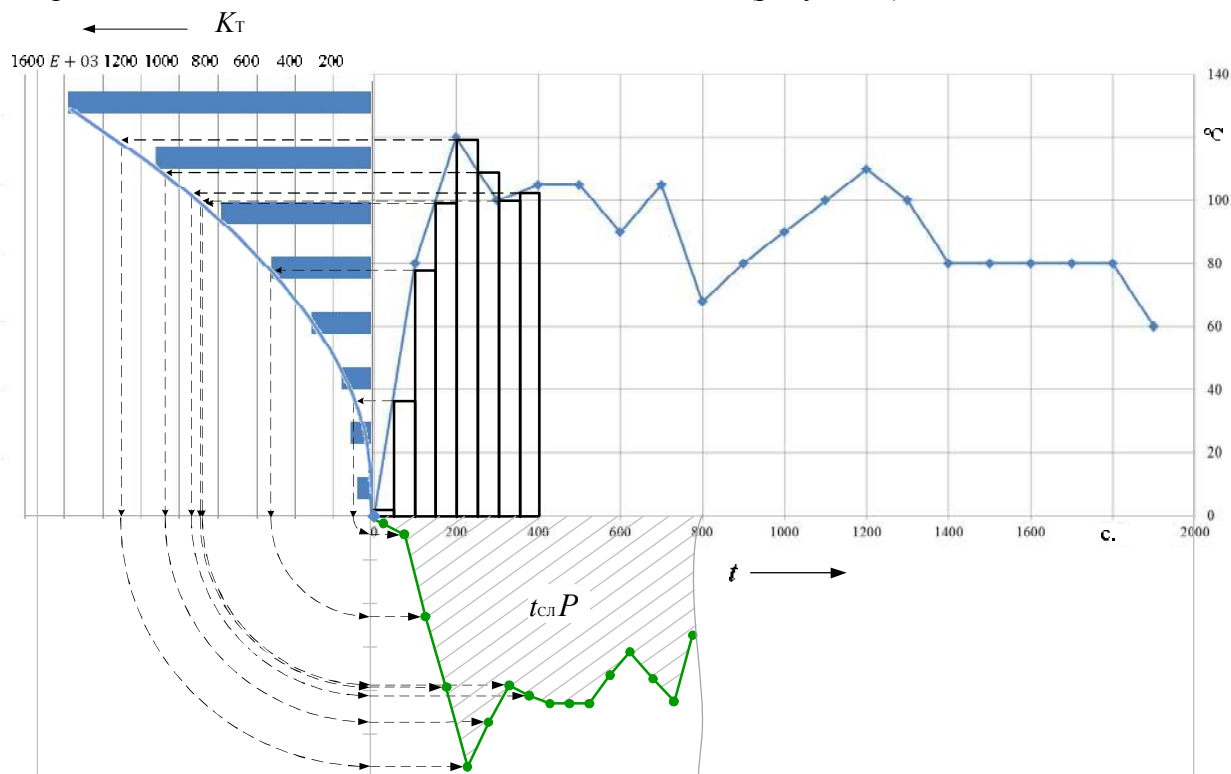


Рисунок 6 – Графическое представление расчета остаточного ресурса с помощью нелинейного преобразования

Расчет теплового износа (уменьшение срока службы) выполняется численными методами с учетом частоты дискретизации измерения температуры. Вычисление определенного интеграла получившейся кусочно-линейной зависимости по методу трапеций позволяет установить сокращение срока службы токоприемника за счет теплового износа:

$$\sum t_{\text{сл. п}}(t_i) = \int_a^b t_{\text{сл. п}}(t) dt \approx$$
$$\approx h \cdot \left[\frac{t_{\text{сл. п}}(t_0) + t_{\text{сл. п}}(t_n)}{2} + t_{\text{сл. п}}(t_1) + t_{\text{сл. п}}(t_2) + \dots + t_{\text{сл. п}}(t_{n-1}) \right], \quad (9)$$

где $t_{\text{сл. п}}(t_i)$ – уменьшение ресурса, определенное с помощью численных методов за время, соответствующее шагу отсчета h ; n – номер отсчета, соответствующий времени определения остаточного срока службы.

Остаточный срок службы в таком случае будет определяться как разность между паспортным сроком службы и его сокращением за счет теплового износа:

$$t_{\text{сл}} = t_{\text{сл. п}} - \sum t_{\text{сл. п}}(t_i). \quad (10)$$

После снижения остаточного ресурса $t_{\text{сл}}$ до нуля необходимо предусмотреть замену либо восстановление прочностных характеристик силовых элементов токоприемника.

Предлагаемый подход осуществим при наличии исчерпывающей информации о температурном состоянии токоприемника в любой момент времени. Это условие может быть выполнено благодаря установке специализированной системы слежения за температурой наиболее ответственных узлов и элементов с автоматизированной регистрацией значений в базе данных.

В лаборатории «Контактные сети и линии электропередачи» Омского государственного университета путей сообщения в настоящее время ведется разработка автономного малогабаритного устройства для регистрации температуры рычагов системы подвижных рам токоприемников, предназначенных для тяжеловесного движения.

Список литературы

1. Применение байесовских сетей для совершенствования систем диагностики устройств электроснабжения железных дорог / А. С. Голубков, А. Н. Смердин и др. // Фундаментальные основы, теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: Материалы 18-й междунар. молодежной науч.-практ. конф. / Южно-Российский гос. политехнический ун-т им. М. И. Платова. – Новочеркасск, 2017. – С. 173 – 182.
2. Инструкция о порядке использования токоприемников электроподвижного состава при различных условиях эксплуатации ЦТ-ЦЭ/844 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://scbist.com/wiki/18656-ct-ce-844-a.html>, дата обращения: 30.01.2020.
3. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления: Учебник / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2004. – Т. 1. – 656 с.
4. Уточнение теории возврата механических свойств применительно к сплаву АМг6 / Д. А. Мирзаев, Ю. Д. Корягин и др. // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. – Челябинск. – 2002. – № 2. – С. 31 – 40.
5. Конструкционные материалы в самолетостроении / А. Г. Моляр, А. А. Коцюба и др. / ООО «КВИЦ». – Киев, 2015. – 400 с.
6. Исследования токовой нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава / В. М. Павлов, О. А. Сидоров и др. // Вестник научно-

исследовательского института железнодорожного транспорта / ВНИИЖТ. – М. – 2015. – № 4. – С. 19 – 24.

7. Проверка токовой нагрузочной способности токоприемников ТАС 24 и ЛАС 25 / В. М. Павлов, П. В. Попов и др. // Вестник ВЭЛНИИ / ВЭЛНИИ. – М. – 2015. – № 2 (70). – С. 33 – 43.

8. Исследование процессов возврата в деформационно-упрочненном сплаве Al–Mg–Mn–Fe–Si / Н. Б. Пугачева, Д. И. Вичужанин и др. // Физика металлов и металловедение. – М. – 2016. – Т. 117. – № 9. – С. 952 – 958.

9. Сидоров, О. А. Исследование температуры нагрева полоза токоприемника и способы ее снижения / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. В. Томилов // Известия Транссиба. Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4 (32). – С. 25 – 34.

10. Пат. 187592 Российская Федерация, МПК В60L 5/00 (2006.01), СПК В60L 5/00 (2018.08). Токоприемник электроподвижного состава [Текст] / Смердин А. Н., Чертков И. Е. и др.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2018139666; заявл. 08.11.18; опубл. 12.03.19, Бюл. № 8.

11. Механические свойства микрокристаллического алюминиевого сплава АМг6 / В. Н. Чувильдеев, М. Ю. Грязнов и др. // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского / Нижегородский ун-т им. Н. И. Лобачевского. – Нижний Новгород. – 2008. – № 4. – С. 35 – 42.

References

1. Golubkov A. S., Smerdin A. N., Ermachkov G. R., Ryzhkov A. V. The use of Bayesian networks for improving the diagnostic systems for railway power supply devices [Primeneniye bayyesovskikh setey dlya sovershenstvovaniya sistem diagnostiki ustroystv elektrosnabzheniya zheleznikh dorog]. *Fundamental'nye osnovy, teoriya, metody i sredstva izmerenij, monitoringa i diagnostiki: materialy 18-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* (Fundamentals, Theory, Methods and Means of Measurement, Monitoring and Diagnostics: Materials of the 18th International Youth Scientific and Practical Conference). – Novocherkassk, 2017, pp. 173 – 182.

2. *Instruktsiya o poryadke ispol'zovaniya tokopriyemnikov elektropodvizhnogo sostava pri razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii TST-TSE/844* (Instructions on the use of current collectors of electric rolling stock under various operating conditions of TsT-TsE/844). URL: <http://scbist.com/wiki/18656-ct-ce-844-a.html>.

3. Pupkov K. A., Egupov N. D. and others. *Matematicheskiye modeli, dinamicheskkiye kharakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya, T. 1* (Mathematical models, dynamic characteristics and analysis of automatic control systems, V. 1). Moscow: MSTU of N. E. Bauman, 2004, 656 p.

4. Mirzaev D. A., Koryagin Yu. D., Dobrynina Ya. S., Zvonkov A. A. Refinement of the theory of the return of mechanical properties as applied to the AMg6 alloy [Utochneniye teorii vozvrata mekhanicheskikh svoystv primenitel'no k splavu AMg6]. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra UrO RAN – Bulletin of the Chelyabinsk Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2002, no. 2, pp. 31 – 40.

5. Molar A. G., Kotsyuba A. A., Bychkov A. S., Nechiporenko O. Yu. *Konstruktsionnyye materialy v samoletostroyenii* (Structural materials in aircraft construction). Kiev: CVIC, 2015, 400 p.

6. Pavlov V. M., Sidorov O. A., Smerdin A. N., etc. Research of the current load capacity of the current collector of the main electric rolling stock [Issledovaniya tokovoy nagruzochnoy sposobnosti tokopriyemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Railway Transport Research Institute*, 2015, no. 4, pp. 19 – 24.

7. Pavlov V. M., Popov P. V., Sidorov O. A., etc. Continuous current-carrying capacity test of TAs 24 and LAs 25 current-collectors [Proverka tokovoy nagruzochnoy sposobnosti tokopriyemnikov TAs 24 i LAs 25]. *Vestnik VEINII – Bulletin of the All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Engineering*, 2015, no. 2 (70), pp. 33 – 43.

8. Pugacheva N. B., Vichujanin D. I., Kalashnikov S. T., etc. Study of the recovery processes in the strain-hardened Al – Mg – Mn – Fe – Si alloy [Issledovaniye protsessov vozvrata v deformatsionno-uprochnennom splave Al–Mg–Mn–Fe–Si]. *Fizika metallov i metallovedenie – Metal Physics and metal science*, 2016, Vol. 117, no. 9, pp. 952 – 958.

9. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Tomilov V. V. Investigation of the heating temperature of the current collector skid and methods for its reduction [Issledovaniye temperatury nagreva poloza tokopriyemnika i sposoby yeye snizheniya]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 4 (32), pp. 25 – 34.

10. Smerdin A. N., Chertkov I. E., Butenko E. A., Ryzhkov A. V. *Patent RU 187592*, 11.08.2018.

11. Chuvildeev V. N., Gryaznov M. Yu., Kopylov V. I., etc. Mechanical properties of microcrystalline aluminum alloy AMg6 [Mekhanicheskiye svoystva mikrokristallicheskogo alyuminiyevogo splava AMg6]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo – Vestnik Of Lobachevsky State University Of Nizhni Novgorod*, 2008, no. 4, pp. 35 – 42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: egt@omgups.ru

Смердин Александр Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (904) 588-40-48.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Слатин Анатолий Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7-3812-31-34-46.

E-mail: slatin_omgups@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидоров, О. А. Совершенствование методики диагностирования теплового разупрочнения токоприемников электроподвижного состава [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, А. И. Слатин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 41 – 49.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the department «Electricity supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: egt@omgups.ru

Smerdin Alexander Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the department « Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (904) 588-40-48.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Slatin Anatoly Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7-3812-31-34-46.

E-mail: slatin_omgups@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sidorov O. A., Smerdin A. N., Slatin A. I. Improvement of rolling stocks pantographs thermal degradation diagnosis methodic. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no.1(41), pp. 41 – 49 (In Russian).

МЕТОДЫ ВЫБОРА УСТАВОК СРАБАТЫВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. В статье рассмотрены различные подходы при оценке токовых уставок на включение и отключение второго преобразовательного агрегата при внедрении систем резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока. Рассмотрены преимущества и недостатки существующих методов. Предложен видоизмененный алгоритм расчета токовых уставок срабатывания режимной автоматики преобразовательных агрегатов. Сравнительный анализ токов срабатывания автоматики преобразовательного агрегата выполнен на примере тяговых подстанций действующего участка Западно-Сибирской железной дороги.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, преобразовательный агрегат, режимная автоматика, энергоэффективность.

Alexey L. Kashtanov, Aleksandr D. Dmitriev

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

METHODS FOR SELECTING SETTINGS RESERVE POWER SYSTEM OF DC TRACTION SUBSTATIONS

Abstract. The article discusses methods in evaluating the current settings for turning on and off the second converter unit when introducing power backup systems for DC traction substations. The analysis of the advantages and disadvantages of existing methods. The algorithm for calculating the current settings. A comparative analysis of the operating currents of the automation of the converter unit is carried out on the example of traction substations of the current section of the West Siberian Railway.

Keywords: traction power supply system, traction substation, converting unit, automatic mode, energy efficiency.

В связи с повышением тяговой нагрузки, связанной с увеличением весовых параметров и размеров движения поездов, появляется задача введения резервной мощности тяговых подстанций [1], решаемая на участках железных дорог постоянного тока, как правило, за счет подключения второго или третьего резервного преобразовательного агрегата (ПА). В свою очередь это приводит к росту технических потерь электрической энергии в результате увеличения потерь холостого хода в моменты времени незначительной или полного отсутствия тяговой нагрузки.

Самым целесообразным режимом работы тяговой подстанции будет являться тот, который будет обеспечивать условие равенства мощности тяговой подстанции и мощности, потребляемой электровозами, с учетом минимизации потерь электрической энергии в ПА. При этом оптимальное управление осуществляется за счет различных режимов работы ПА: одиночного, поочередного и параллельного [2].

Реализовать оптимальные режимы работы резервных ПА, обеспечивающих снижение технологических потерь электроэнергии в оборудовании тяговых подстанций, позволяет внедрение систем автоматического резервирования мощности (АВОР), принцип работы которых основан на управлении выключателями вводов преобразовательных трансформаторов на основании анализа установленных значений токовых нагрузок в тяговой сети [3 – 5].

Таким образом, система АВОР должна обеспечить следующее:

минимизацию потерь электрической энергии в ПА за счет выбора оптимального режима их работы;

надежность работы выпрямителей, недопущение токовой, а впоследствии и их тепловой перегрузки;

ограничение числа коммутаций выключателей, влияющих на их ресурс.

Основной задачей для выбора оптимального режима работы ПА с точки зрения как энергоэффективности, так и надежности работы системы тягового электроснабжения является выбор токовых и временных уставок включения и отключения АВОР. Например, завышение уставок на включение второго трансформатора в параллельный режим работы приводит к повышению уровня нагрузочных потерь, снижению напряжения в контактной сети, но при этом снижается частота переключений коммутационных аппаратов (выключателей и разъединителей) преобразовательных трансформаторов (в соответствии с требованиями нормативных документов рекомендуемое количество переключений в сутки составляет 6 – 8 раз). Кроме того, снижение токовых уставок на включение исключает возможный перегрев вентиля и выход их из строя вследствие токовой нагрузки, что особенно актуально при фактическом значительном износе выпрямителей тяговых подстанций [6, 7]. Аналогично на режим работы тяговой подстанции влияет и выбор уставки на отключение второго преобразовательного трансформатора. Например, уменьшение уставки на отключение второго ПА увеличивает продолжительность параллельной работы ПА.

Расчет токовых и определение уставок по времени режимной автоматики преобразовательных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока состоит из следующих этапов:

- сбор необходимых исходных данных (параметры оборудования тяговых подстанций);
- расчет оптимального значения тока тяговой нагрузки, при котором целесообразно переходить на режим работы тяговой подстанции с двумя параллельно работающими ПА;
- расчет токов включения (первой и второй ступеней) и отключения системы АВОР;
- выбор уставок по времени включения и отключения ступеней системы АВОР.

В настоящее время расчет уставок срабатывания режимной автоматики АВОР возможен на основании двух разработанных и утвержденных в ОАО «РЖД» нормативных документов, а именно в соответствии с методикой выбора уставок режимной автоматики преобразовательных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока [8] и разработанным на основе нее СТО «РЖД» 07.021.2-2015 [9].

Наиболее простым способом является выбор токовых уставок и выдержек времени с применением стандарта [9]. В данном случае требуемые параметры определяются по приведенным в документе таблицам, при этом в качестве исходных данных принимаются только количество ступеней трансформации (одноступенчатая или двухступенчатая), мощность понижающего трансформатора и тип преобразовательного трансформатора. Основным недостатком данного способа является то, что при выборе уставок не учитываются фактические характеристики оборудования тяговых подстанций, которые в процессе эксплуатации могут значительно отличаться от справочных, принятых при разработке стандарта.

Более точным является подход расчета уставок с применением методики [8]. Подробный порядок расчета представлен на рисунке 1 в виде алгоритма. Данный подход более трудоемкий, при этом в расчете принимается во внимание фактическое состояние оборудования тяговой подстанции, что в свою очередь позволяет повысить надежность работы как самой системы АВОР, так и системы тягового электроснабжения в целом.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

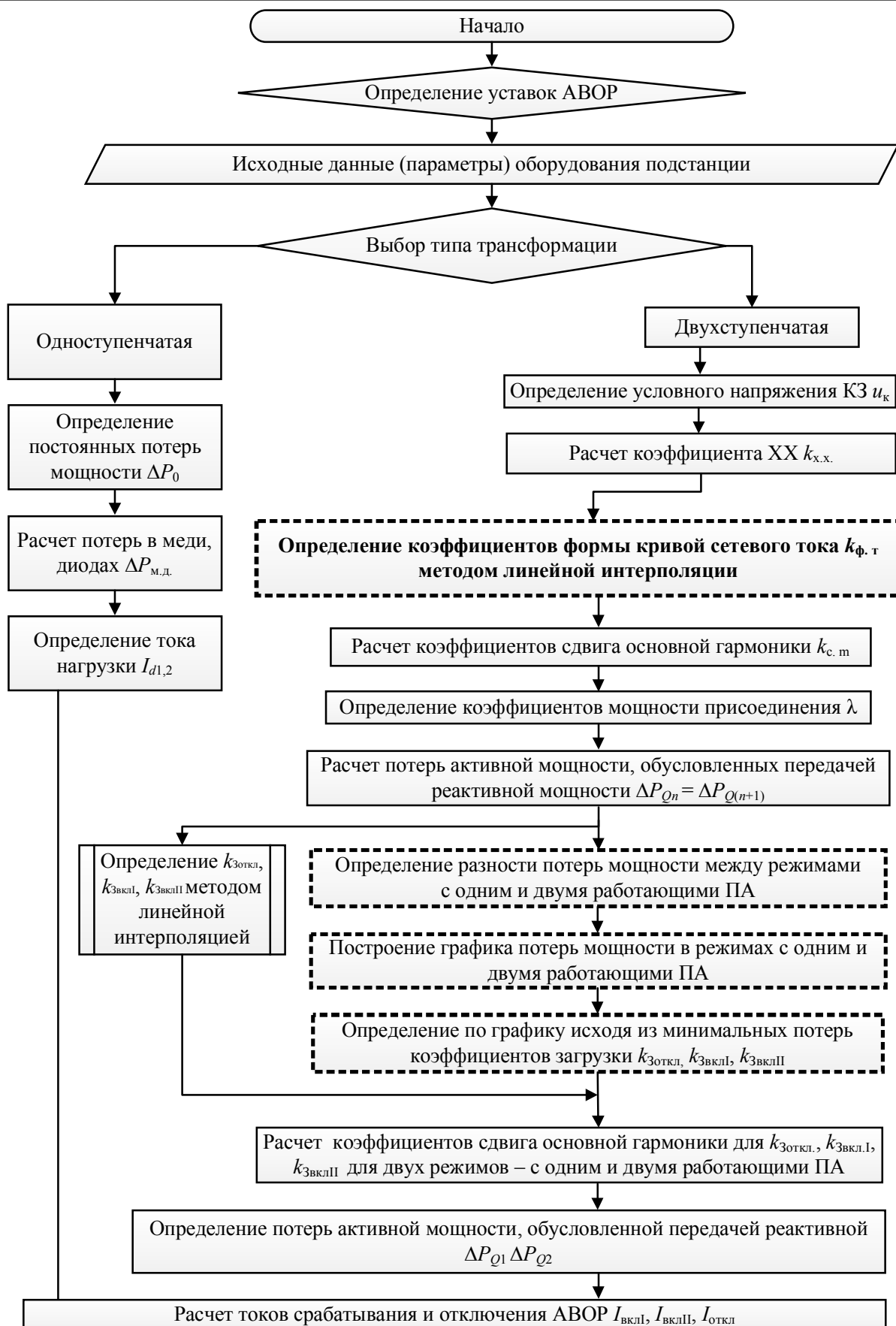


Рисунок 1 – Алгоритм расчета токовых уставок срабатывания режимной автоматики АВОР

Снизить трудозатраты на расчет параметров режимной автоматики АВОР можно за счет его автоматизации в соответствии с представленным алгоритмом. Для того чтобы полностью автоматизировать процесс расчета, в частности коэффициент формы кривой сетевого тока $k_{ф.т}$ должен определяться не табличным (усредненным) значением (как указано в методике [6]), а по выражению [10]:

$$k_{ф.т} = \frac{\frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \left(1 - k_3 u_k \sin \frac{\pi}{m} \right)}{\cos \left(\frac{2}{3} \cdot \arccos \left(1 - 2k_3 u_k \sin \frac{\pi}{m} \right) \right)} \times \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4}{15\pi} m \sin^2 \left(\frac{\pi}{m} \right) \cdot \arccos \left(1 - 2k_3 u_k \sin \frac{\pi}{m} \right)}}, \quad (1)$$

где u_k – напряжение короткого замыкания преобразовательного и понизительного трансформаторов, о. е. [8, формула (11)];

k_3 – коэффициент загрузки преобразовательного трансформатора в диапазоне от 0 до 1,5 (с рекомендуемым шагом дискретизации 0,01);

m – число пульсаций выпрямителя ПА.

Еще одним отличием видоизмененной методики является отсутствие необходимости построения графика зависимости потерь активной мощности от коэффициента загрузки. При этом коэффициент загрузки преобразовательного трансформатора рассчитывается на основе задаваемых значений разности потерь мощности при одном и двух работающих ПА методом линейной интерполяции.

Рассмотрим пример расчета токовых уставок срабатывания режимной автоматики АВОР на примере шести тяговых подстанций. Основные исходные данные для расчетов приведены в таблице 1.

Расчет токовых уставок АВОР, как оговаривалось выше, выполнен тремя методами:

вариант 1 – в соответствии с положениями СТО «РЖД» 07.021.2-2015;

вариант 2 – в соответствии с методикой [8];

вариант 3 – с учетом применения выражения (1).

Результаты расчетов представлены в таблице 2. Как видно из полученных результатов, значения, рассчитанные по вариантам 1 и 2, совпадают, что подтверждает адекватность определения $k_{ф.т}$ на основе данных, приведенных в таблице 4 работы [8], и по выражению (1). При этом значения уставок, выбранные в соответствии с СТО «РЖД», могут отличаться как в большую, так и в меньшую сторону.

Для большей наглядности результаты расчета уставок срабатывания режимной автоматики АВОР для трех тяговых подстанций (на примере трансформаторов Т1) приведены на рисунке 2, где за единицу (базовое значение) приняты значения, определенные на основе стандарта. Расхождение расчетных значений уставок различными методами составило от 2 до 11 %.

Таблица 1 – Характеристики оборудования тяговых подстанций

Тяговая подстанция	Номер ввода	Тип трансформатора	Тип выпрямителя	Тип диодов	Схема выпрямления	Пороговое напряжение диодов, В	Характеристики преобразователя трансформатора	
							мощность холостого хода, кВт	мощность короткого замыкания, кВт
ТП1	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	ТПЕД-3150-3,3кУ1	ДЛ133-500	12-пульс. паралл.	0,85	15,0	70,1
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1	ТПЕД-3150-3,3кУ1	ДЛ133-500	12-пульс. послед.	0,85	16,5	68,5
ТП2	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	ПВЭ-5У1	ВЛ-200-12	12-пульс. паралл.	1,12	14,2	69,6
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1	ТПЕД-3150-3,3кУ1	ДЛ133-500	12-пульс. паралл.	0,85	14,2	69,6
ТП3	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	ПВЭ-3	ВЛ-200	12-пульс. паралл.	1,12	15,7	71,2
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1	БСЕ-1 4ВД5-Д5	Д453-2000	12-пульс. паралл.	0,8	15,7	71,2
ТП4	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	ПВЭ-5У1	ВЛ-200	12-пульс. паралл.	1,12	15,8	67,7
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1	БСЕ-1 4ВД5-Д5	Д453-2000	12-пульс. паралл.	0,8	15,7	72,4
ТП5	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	ПВЭ-5У1	ВЛ-200	12-пульс. паралл.	1,12	15,0	69,1
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1	БСЕ-1 4ВД5-Д5	Д453-2000	12-пульс. паралл.	0,8	16,5	71,4
ТП6	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	ТПЕД-3150-3,3кУ1	ДЛ133-500	12-пульс. паралл.	0,85	15,0	68,1
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1	ПВЭ-3	ВЛ-200	12-пульс. паралл.	1,12	15,0	67,6

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Результаты расчетов токов срабатывания и отключения режимной автоматики АВОР

Наименование тяговой подстанции	Ток включения первой ступени АВОР, $I_{\text{вкл I}}, \text{А}$			Ток включения второй сту- пени АВОР, $I_{\text{вкл II}}, \text{А}$			Ток отключения АВОР, $I_{\text{откл}}, \text{А}$		
	вариант 1	вариант 2	вариант 3	вариант 1	вариант 2	вариант 3	вариант 1	вариант 2	вариант 3
ТП1 (Т1)	2350	2415	2415	3500	3520	3521	1600	1748	1748
ТП1 (Т2)		2410	2391		3574	3580		1693	1648
ТП2 (Т1)	2300	2258	2257	3400	3301	3304	1600	1614	1605
ТП2 (Т2)		2258	2257		3301	3304		1614	1605
ТП3 (Т1)	2350	2415	2414	3500	3499	3504	1600	1768	1768
ТП3 (Т2)		2415	2414		3499	3504		1768	1768
ТП4 (Т1)	2350	2392	2392	3500	3372	3393	1600	1782	1783
ТП4 (Т2)		2498	2499		3607	3615		1836	1836
ТП5 (Т1)	2350	2449	2450	3500	3573	3579	1600	1772	1772
ТП5 (Т2)		2449	2450		3573	3579		1772	1772
ТП6 (Т1)	2350	2439	2440	3500	3552	3554	1600	1766	1765
ТП6 (Т2)		2439	2440		3552	3554		1766	1765

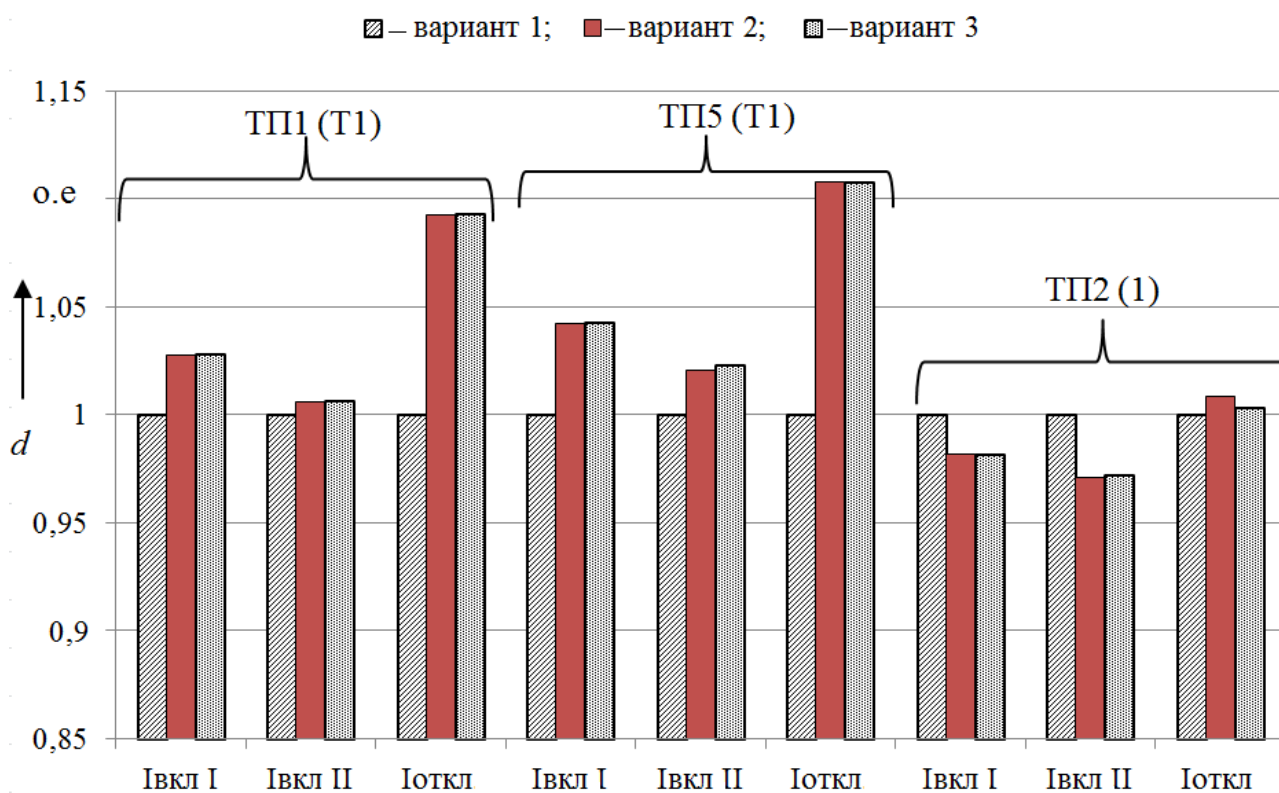


Рисунок 2 – Соотношение токовых уставок срабатывания АВОР в зависимости от методов их расчета (вариант 1 принят за «базовый» – 1 о. е.)

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Определение токовых уставок АВОР с применением СТО «РЖД» больше подходит для экспресс-оценки, так как не учитывает фактическое состояние оборудования тяговых подстанций и загруженность тяговой подстанции. Для того чтобы добиться более эффективной и надежной работы системы АВОР, необходимо руководствоваться положениями существующих методических указаний по расчету уставок режимной автоматики преобразовательных агрегатов. Расхождение расчетных значений уставок с применением стандарта и методики может достигать около 11 %. Значения выбранных уставок во многом определяют уровень потерь электрической энергии в преобразовательных агрегатах, что является задачей дальнейшего исследования.

2. Применение видоизмененной методики за счет определения коэффициента формы кривой сетевого тока $k_{ф.т}$ по выражению (1) позволяет полностью автоматизировать процесс расчета токовых уставок срабатывания режимной автоматики АВОР.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2017. – 76 с.
2. Тяговые подстанции [Текст] / Ю. М. Бей, Р. Р. Мамошин и др. – М.: Транспорт, 1986. – 320 с.
3. Карабанов, М. А. Снижение влияния коммутации преобразовательных агрегатов на электропитание нетяговых потребителей электрических железных дорог [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Карабанов Максим Александрович. – Омск, 2011. – 175 с.
4. Каштанов, А. Л. Интеллектуальная система резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока [Текст] / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2020. – С. 370 – 376.
5. Пат. 108233 РФ, МПК H02H9/02 (2006.01). Устройство для снижения бросков тока при включении трансформатора [Текст] / Кващук В. А., Лапенко Н. М., Карабанов М. А.; заявитель и патентообладатель ОАО «РЖД». – № 20111108012/07; заявл. 02.03.2011; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25.
6. Техническое указание ЦЭ №П-151-82 Главного управления электрификации и энергетического хозяйства МПС СССР «Об организации теплового контроля и режимов работы выпрямителей тяговых подстанций» [Текст] / МПС СССР. – М., 1982. – 4 с.
7. Лукацкая, И. А. Исследование коммутационного ресурса вакуумных дугогасительных камер [Текст] / И. А. Лукацкая // Электротехника. – 1998. – № 1. – С. 36 – 38.
8. Методика выбора уставок режимной автоматики преобразовательных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 21.12.2012 № 2649р [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2013. – 31 с.
9. СТО РЖД 07.021.2-2015 «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выдержек времени автоматики в системе тягового электроснабжения». Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 27.05.2015 № 1351р [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2016. – 11 с.
10. Шалимов, М. Г. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / М. Г. Шалимов. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.

References

1. *Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniem OAO «RZHD» ot 14 dekabrya 2016*

g. № 2537r (The energy strategy of «Russian Railways» holding for the period until 2020 and for the future until 2030. Approved by the decree of JSC Russian Railways on December 14, 2016, No. 2537p). Moscow, 2017, 76 p.

2. Bei Yu. M. *Tyagovyye podstantsii* (Traction substations). Moscow: Transport, 1986, 320 p.

3. Karabanov M. A. *Snizheniye vliyaniya kommutatsii preobrazovatel'nykh agregatov na elektropitaniye netyagovykh potrebiteley elektricheskikh zheleznykh dorog* (Reducing the impact of switching converter units on the power supply of non-traction consumers of electric railways). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2011, 175 p.

4. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Plotnikov Yu. V. Intelligent power reserving system for dc traction substations [Intellectual'naya sistema rezervirovaniya moshchnosti tyagovykh podstantsiy postoyannogo toka]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii «Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Abstracts of the Int. conference «Innovative projects and technologies in education, industry and transport»). – Omsk, 2020, pp. 370 – 376.

5. Kvashchuk V. A., Lapenko N. M., Karabanov M. A. Patent RU 2011108012/07, 10.09.2011.

6. *Tekhnicheskoye ukazaniye TSE №P-151-82 Glavnogo upravleniya elektrifikatsii i energeticheskogo khozyaystva MPS SSSR «Ob organizatsii teplovogo kontrolya i rezhimov raboty vypriamiteley tyagovykh podstantsiy»* (Technical Directive CE No.P-151-82 of the Main Directorate of Electrification and Energy Economy of the Ministry of Railways of the USSR «On the organization of thermal control and operating modes of traction substation rectifiers»), Moscow, 1982, 4 p.

7. Lukatskaya I. A. Study of the switching resource of vacuum interrupter chambers [Issledovaniye kommutatsionnogo resursa vakuumnykh dugogasil'nykh kamer]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 1998, no. 1, pp. 36 – 38.

8. *Metodika vybora ustavok rezhimnoy avtomatiki preobrazovatel'nykh agregatov tyagovykh podstantsiy postoyannogo toka* (Methods for selecting the settings of the operating automation of converting units of DC traction substations). Moscow, JSC Russian Railways, 2012, 31 p.

9. *STO RZD 07.021.2-2015 «Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh замыканий i peregruzki. Chast' 2. Metodika vybora algoritmov deystviya, ustavok blokirovok i vyderzhek vremeni avtomatiki v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya»* (STO RZD 07.021.2-2015 «Protection of railway power supply systems from short circuits and overload. Part 2. Method of selecting algorithms of action, setpoints of locks and time delays of automation in the traction power supply system»), Moscow, 2015, 11 p.

10. Shalimov M. G. *Dvenadtsatipul'sovyye poluprovodnikovyye vypriamiteli tyagovykh podstantsiy* (Twelve-pulse semiconductor rectifiers of traction substations). Moscow: Transport, 1990, 127 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каштанов Алексей Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосбережение и энергоэффективность на железнодорожном транспорте», доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kashtanov Alexey Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand. Tech. Sci., Head of Research and Production Laboratory «Energy saving and energy efficiency on the railway Transport», The Senior Lecturer Of Chair «Theoretical Electrical Engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Дмитриев Александр Дмитриевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.

Студент Омского государственного университета
путей сообщения

Тел.: +7 (908) 117-96-71.

E-mail: alexandrorado@mail.ru

Dmitriev Aleksandr Dmitrievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Student of Omsk State Transport University

Phone: +7 (908) 117-96-71.

E-mail: alexandrorado@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Каштанов, А. Л. Методы выбора уставок срабаты-
вания системы резервирования мощности тяговых
подстанций постоянного тока [Текст] /
А. Л. Каштанов, А. Д. Дмитриев // Известия Транссиба /
Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. –
№ 1 (41). – С. 50 – 58.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kashtanov A. L., Dmitriev A. D. Methods for select-
ing settings reserve power system of DC traction substa-
tions. Journal of Transsib Railway Studies, 2020,
no. 1 (41), pp. 50 – 58 (In Russian).

УДК 621.336.3

С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОЗА ТОКОПРИЕМНИКА МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. В статье приведена усовершенствованная математическая модель теплового состояния полоза токоприемника для расчета распределения его температуры при взаимодействии с различными подвесками, в том числе с двойным контактным проводом. Модель учитывает неравномерность контактного нажатия токоприемника на провода вдоль пролета подвески и между ними, позволяет использовать базы данных вагона-лаборатории испытания контактной сети, рассчитывать тепловые режимы полоза на различных участках электрифицированных железных дорог, включая переходные процессы между ними. В работе приведены графики плотности распределения зигзага контактного провода высокоскоростной линии Москва – Санкт-Петербург, определены переходные и установившиеся тепловые состояния полоза при взаимодействии токоприемника с контактным проводом.

Ключевые слова: токоприемник, полоз, нагрузочная характеристика, моделирование, электроподвижной состав, температура, плотность распределения, зигзаг.

Sandugash M. Utepbergenova, Valerii V. Tomilov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

IMPROVED MATHEMATICAL MODEL THERMAL STATE OF THE PANTOGRAPH HEAD OF THE MAGISTRAL ELECTRIC ROLLING STOCK OF DIRECT CURRENT

Abstract. The article presents an improved mathematical model of the thermal state of the pantograph head for calculating the temperature distribution when interacting with different catenary with a double contact wire. The model takes into account the unevenness of the pantograph contact pressure on the wires along the suspension span and between them, allows using the databases of the car-laboratory for testing the contact network, calculating the thermal conditions of the skid on various sections of electrified Railways, including transients between them. The paper presents graphs of the zigzag distribution density of the contact wire of the Moscow – Saint Petersburg high-speed line, and defines the transient and steady state thermal states of the pantograph head when the pantograph interacts with them.

Keywords: pantograph, pantograph head, load characteristic, modeling, electric rolling stock, temperature, distribution density, stagger.

Особенностью контактной сети постоянного тока, применяемой на сети дорог России и Казахстана, является наличие двойного провода в контактной подвеске. Необходимость его применения вызвана повышенным значением тягового тока, передаваемого по контактной подвеске к токоприемнику. Суммарное сечение, реализованное в двух контактных проводах, обеспечивает передачу необходимой электрической энергии для грузового движения с тяжеловесными длинносоставными поездами, а также высокоскоростного, например, электропоезда Сапсан на линии Москва – Санкт-Петербург. Применение одиночного контактного провода повышенного сечения вызывает трудности в его монтаже и регулировке. Эксплуатация и ремонт такого провода весьма затруднительны.

Два контактных провода в совокупности образуют разнесенную точку контакта в виде двух параллельных электрических цепей. При этом контактные провода располагаются на расстоянии 40 – 60 мм [1]. Например, на линии Москва – Санкт-Петербург расстояние 40 мм фиксируется струновыми зажимами и скобой. Контактное нажатие токоприемника на двойной контактный провод регламентируется ГОСТом [2] по отношению к контактной подвеске. В реальных условиях нажатие между проводами неодинаково, что приводит к неравномерности электрического сопротивления в точках контакта, а следовательно, к разнице тяговых токов, передаваемых через первый и второй контактные провода соответственно.

Пространственные контактные подвески имеют более удаленные друг от друга контактные провода, например, как в ромбической или ромбовидной подвесках. Разнесенные от центра полоза провода в таких подвесках испытывают более равномерное контактное нажатие, чем в обычной контактной подвеске.

Кроме того, современный токоприемник имеет два полоза, нажатие между ними на контактные провода также неодинаково, таким образом, в совокупности двойной контактный провод и два полоза токоприемника образуют четыре параллельные электрические цепи с переменными сопротивлениями во время движения, определяемыми неравномерностью нажатия, которая, в свою очередь, определяет величины тяговых токов через пятна контакта.

Преимуществом двойного контактного провода является шунтирование электрического контакта одним из оставшихся во взаимодействии с ползком проводом в случае кратковременного отрыва второго без образования электрической дуги при неудовлетворительном токосъеме. Однако именно в эти моменты наблюдается кратковременная перегрузка по току от одного контактного провода, приводящая к быстрому возрастанию температуры вставки полоза. Деление электрического тока между проводами и ползками является эффективным способом снижения токовой нагрузки полоза токоприемника. Однако неравномерность нажатия по проводам и ползкам может вызывать значительные перегревы и недопустимые тепловые режимы как полоза, так и контактной подвески, приводя к значительным электрическим потерям, возможным разрушениям контактных материалов и всего полоза. Поэтому исследование данной проблемы и разработка тепловой математической модели полоза, взаимодействующего с двойным контактным проводом, является весьма актуальной задачей.

Недостатком математической модели теплового состояния токоприемника [3], разработанной на основе метода эквивалентных тепловых схем замещения, является расчет средней температуры всей конструкции полоза, неравномерность нагрева которого в реальных условиях значительна и требует дискретной оценки ГОСТом [2], например, верхней площадки контактной вставки шириной не менее 30 мм (рисунок 1, б). Усовершенствованная математическая модель теплового состояния полоза с учетом положений контактного провода в плане [4], в которой последний представляется плотностью распределения зигзага [5], позволяет учитывать наличие двух контактных проводов (рисунок 1, а, 1, в) и неравномерность распределения токов между ними и по ползкам токоприемника.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

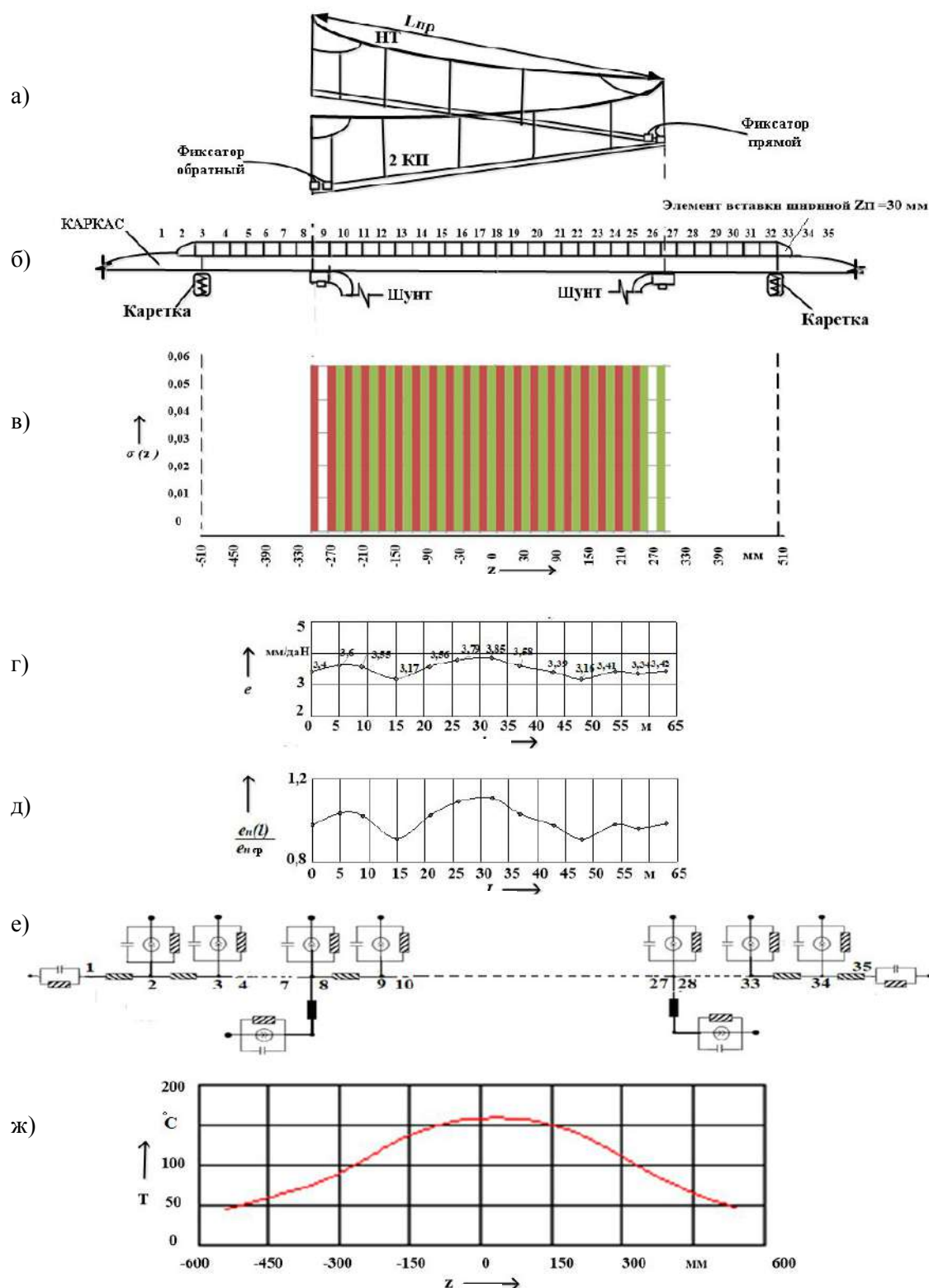


Рисунок 1 – Расчетная схема влияния распределения зигзага контактных проводов на нагрев полоза токоприемника: а – схема двух пролетов контактной подвески; б – схема каркасного полоза токоприемника; в – плотность распределения зигзага контактного провода (равномерный закон); г – график эластичности контактной подвески; д – график отношения текущей эластичности к ее средней величине в пролете; е – электрическая схема замещения тепловых процессов полоза; ж – график распределения температуры полоза

В отличие от модели теплового состояния полоза токоприемника, приведенной в работе [4], величина мощности джоулева нагрева в точке контакта на площадке i -го элемента (см.

рисунок 1, б) шириной $\Delta z = 30$ мм складывается из суммы мощностей от двух контактных проводов:

$$P_{\text{кт } i} = P_{\text{кт1 } i} + P_{\text{кт2 } i}. \quad (1)$$

Тяговый ток полоза

$$I = I_1 + I_2, \quad (2)$$

где I_1 и I_2 – токи в контакте левого и правого проводов соответственно.

Тогда мощность в контакте на площадке i -го элемента полоза с n -м проводом

$$P_{\text{кт } n i} = I_n^2 \cdot R_{\text{перех } n}(z_i) \cdot f_n(z_i), \quad (3)$$

где $f_n(z_i)$ – доля времени контакта n -го провода с i -м элементом вставки, определяемая плотностью распределения зигзага $\sigma(z)$ (см. рисунок 1, в);

$R_{\text{перех } n}(z)$ – функция сопротивления в контакте «полоз – n -й провод», которая может быть принятой пропорционально эластичности подвески (рисунок 1, д), отнесенной к n -му проводу, и определяться выражением

$$R_{\text{перех } n}(z) = R_{\text{перех}} \cdot \frac{e_n(z)}{e_{n \text{ ср}}}, \quad (4)$$

где $e_n(z) = e_n(l)$ – функция эластичности подвески в пролете l для n -го провода (рисунок 1, г);

$e_{n \text{ ср}}$ – средняя эластичность подвески в пролете, равная ее среднеарифметическому значению для n -го провода;

$R_{\text{перех}}$ – сопротивление «вставка – контактный провод» согласно паспортным данным производителя.

Функция $R_{\text{перех } n}(z)$ может быть задана другим способом и принимать дискретные значения, соответствующие положению провода на площадке i -го элемента полоза.

На рисунке 1, г приведен график эластичности контактной подвески постоянного тока КС-200 экспериментального участка Лихославль – Калашниково Октябрьской железной дороги [6], который был принят в качестве исходных данных для расчета величины переходного сопротивления (см. рисунок 1, д) согласно формуле (4).

Доля тягового тока в контакте полоза с n -м проводом пропорциональна сопротивлению, определяемому выражением (4). Схема расположения двойного контактного провода с мерной струной на полозе и ее электрическая схема приведены на рисунках 2, а и 2, б соответственно.

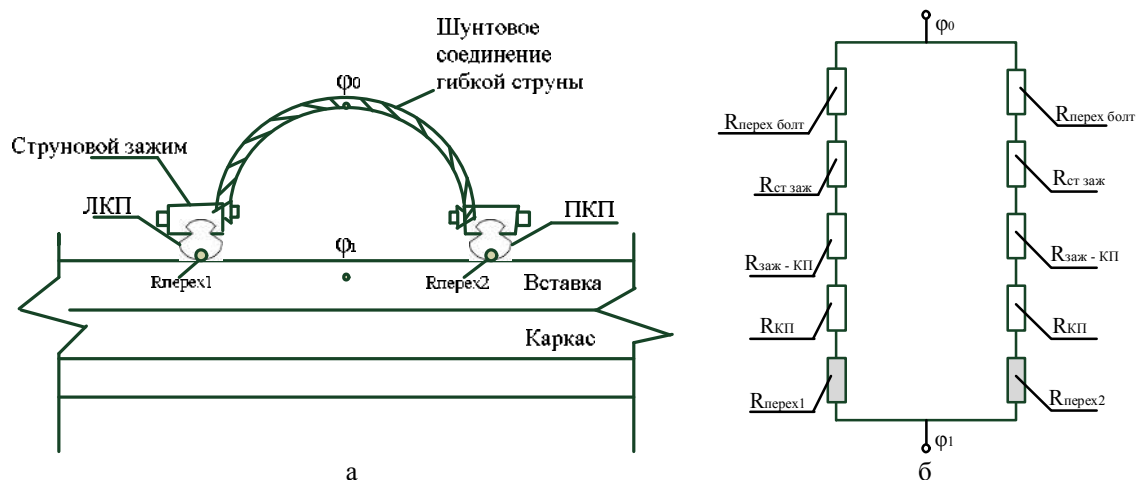


Рисунок 2 – Расположение двойного контактного провода на вставке полоза:
а – принципиальная схема; б – электрическая схема замещения

Последовательные сопротивления элементов (см. рисунок 2, б) в виде струнового зажима $R_{\text{ст. заж}}$ и его болтового соединения со струной $R_{\text{перех болт}}$, сопротивления «струновой зажим – контактный провод» $R_{\text{заж - КП}}$ при затяжке болтов, соответствующих нормативным величинам, значительно меньше сопротивления в контакте [7]. С учетом допущения

$$R_{\text{перех } n} \gg R_{\text{перех болт}} + R_{\text{ст. заж}} + R_{\text{заж - КП}} \quad (5)$$

падение напряжения в контакте может быть описано выражением

$$\varphi_1 - \varphi_0 = \Delta U_{\text{кт}} = I_1 \cdot R_{\text{перех } 1}(z) = I_2 \cdot R_{\text{перех } 2}(z), \quad (6)$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{\text{перех } 1}(z)}{R_{\text{перех } 2}(z)} = k_{\Delta R_{\text{кт}}}, \quad (7)$$

где $k_{\Delta R_{\text{кт}}}$ – коэффициент неравномерности переходного сопротивления двойного контактного провода, вызванной разницей их эластичности и особенностью динамики взаимодействия с ползком. Настоящий коэффициент авторы статьи вводят для возможности оценки влияния разности составляющих I_1 и I_2 тягового тока I , протекающего в двух параллельных точках. $k_{\Delta R_{\text{кт}}}$, по умолчанию может быть принят равным единице. Оценка величины этого коэффициента является перспективной темой исследования.

С учетом уравнения (7)

$$I_1 = I_2 \cdot k_{\Delta R_{\text{кт}}}; \quad I_2 = \frac{I_1}{k_{\Delta R_{\text{кт}}}}, \quad (8)$$

$$R_{\text{перех } 1}(z) = R_{\text{перех } 2}(z) \cdot k_{\Delta R_{\text{кт}}}; \quad R_{\text{перех } 2}(z) = \frac{R_{\text{перех } 1}(z)}{k_{\Delta R_{\text{кт}}}}. \quad (9)$$

Выражение (2) с учетом (8) принимает вид:

$$I = I_1 + \frac{I_1}{k_{\Delta R_{\text{кт}}}} = I_1 \left(1 + \frac{1}{k_{\Delta R_{\text{кт}}}} \right),$$

откуда

$$I_1 = \frac{I}{1 + \frac{1}{k_{\Delta R_{\text{кт}}}}}. \quad (10)$$

Выразим аналогичным образом I_2 через I :

$$I = I_2 \cdot k_{\Delta R_{\text{кт}}} + I_2 = I_2 (1 + k_{\Delta R_{\text{кт}}}),$$

$$I_2 = \frac{I}{1 + k_{\Delta R_{\text{кт}}}}. \quad (11)$$

С учетом формул (3), (10) и (11) выражение (1) принимает вид:

$$P_{\text{кт } i} = \left(\frac{I}{1 + \frac{1}{k_{\Delta R_{\text{кт}}}}} \right)^2 \cdot R_{\text{перех } 1}(z_i) \cdot f_1(z_i) + \left(\frac{I}{1 + k_{\Delta R_{\text{кт}}}} \right)^2 \cdot R_{\text{перех } 2}(z_i) \cdot f_2(z_i). \quad (12)$$

С учетом допущения (4) выражение (12) имеет вид:

$$P_{\text{кт } i} = \left(\frac{I}{1 + \frac{1}{k_{\Delta R_{\text{кт}}}}} \right)^2 \cdot R_{\text{перех}} \cdot \frac{e_1(z_i)}{e_{1 \text{ ср}}} \cdot f_1(z_i) + \left(\frac{I}{1 + k_{\Delta R_{\text{кт}}}} \right)^2 \cdot R_{\text{перех}} \cdot \frac{e_2(z_i)}{e_{2 \text{ ср}}} \cdot f_2(z_i). \quad (13)$$

После вынесения за скобки общих сомножителей формула определения мощности нагрева полоза в i -й точке контакта принимает вид:

$$P_{\text{кт } i} = I^2 \cdot R_{\text{перех}} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{k_{\Delta R \text{ кт}}}\right)^2} \cdot \frac{e_1(z_i)}{e_{1 \text{ ср}}} \cdot f_1(z_i) + \frac{1}{(1 + k_{\Delta R \text{ кт}})^2} \cdot \frac{e_2(z_i)}{e_{2 \text{ ср}}} \cdot f_2(z_i) \right]. \quad (14)$$

Тепловая схема замещения полоза с самонесущей углеграфитовой вставкой (см. [рисунок 1, е](#)) разработана на основе усовершенствованной математической модели теплового состояния токоприемника [4] с применением метода эквивалентных тепловых схем замещения [8]. Количество расчетных элементов полоза токоприемника с источниками тепла, мощность которых определена выражением (14), соответствует 35 элементам на схеме, представленной на [рисунке 1, б](#).

Тепловое состояние каждого i -го элемента в переходном режиме описывается дифференциальным уравнением теплового баланса:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\sum_{j=1}^{q(j \neq i)} \lambda_{ji} (T_j - T_i) + \sum P_i}{C_i}, \quad (15)$$

где T_i – температура i -го элемента;

T_j – температура одного из соседних элементов j ;

q – количество тел, связанных в тепловом отношении с рассматриваемым элементом i ;

λ_{ji} – теплоотдача от одного из соседних элементов j к данному элементу i ;

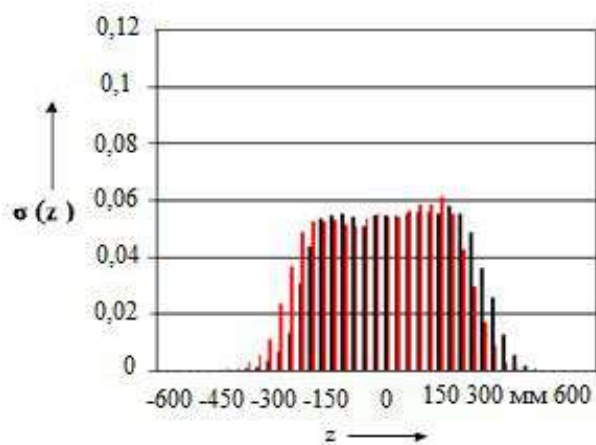
$\sum P_i$ – потери мощности в данном элементе i , включающие $P_{\text{кт } i}$ согласно выражению (14);

C_i – теплоемкость i -го элемента полоза.

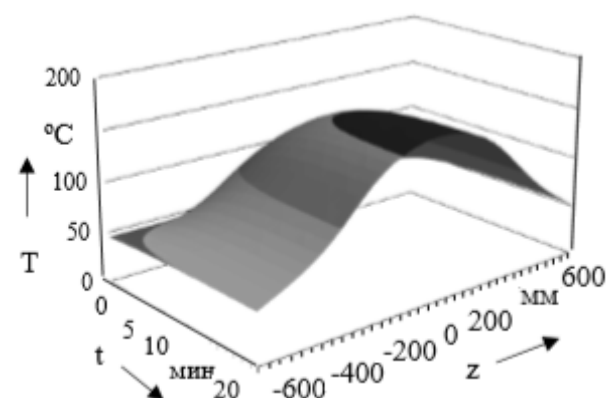
Для полученной модели теплового состояния токоприемника основными допущениями являются усредненная температура элементов полоза, приведенная к его верхней поверхности, отсутствие влияния трения в контакте и электродугового нагрева. Результат расчета температуры полоза, снимающего нагрузку по току 1500 А, приведен на [рисунке 1, ж](#). Полученный график распределения температуры имеет максимум нагрева центральной части полоза, что согласуется с результатами экспериментальных исследований ВНИИЖТа [9] и ОмГУПСа [10 – 13]. Сходимость результатов теоретических и экспериментальных данных для различных режимов не превышает 7 %. Распределение установившейся температуры внутри вставки можно оценить с помощью трехмерного моделирования стационарного режима [14].

По условию выполненного расчета плотность распределения зигзага двойного контактного провода соответствуют равномерному закону (см. [рисунок 1, в](#)). Анализ данных вагона-лаборатории испытания контактной сети (ВИКСа) и скоростной лаборатории (СВИКСа) отечественных железных дорог ОАО «РЖД», а также данных работы [5] немецких DB и испанских RENFE железных дорог указывают на отсутствие такой закономерности. На [рисунках 3 – 8](#) приведены графики плотности распределения $\sigma(z)$ различных участков Октябрьской железной дороги, электрифицированной на постоянном токе контактной сетью КС-200, по данным на 2008 г. [15, 16].

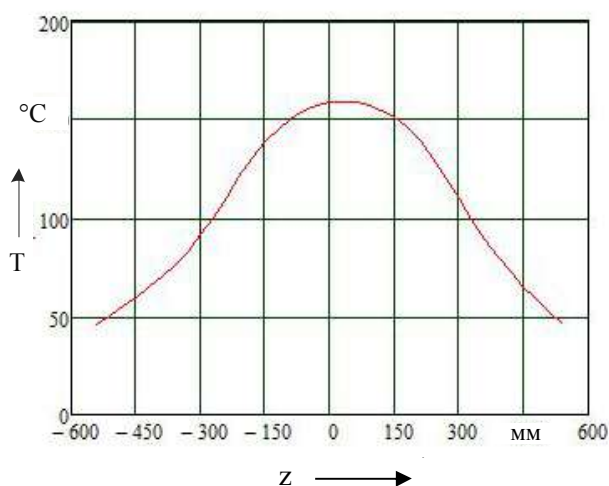
Графики переходного процесса нагрева полоза токоприемника тяговым током 1500 А и графики температуры его установившегося режима для конкретного участка контактной сети рассчитаны в программе Mathcad согласно выражениям (1) – (15) при условии равноэластичности подвески $e_n(z) / e_{n \text{ ср}} = 1$ и равномерности распределения тягового тока по проводам $k_{\Delta R \text{ кт}} = 1$.



а

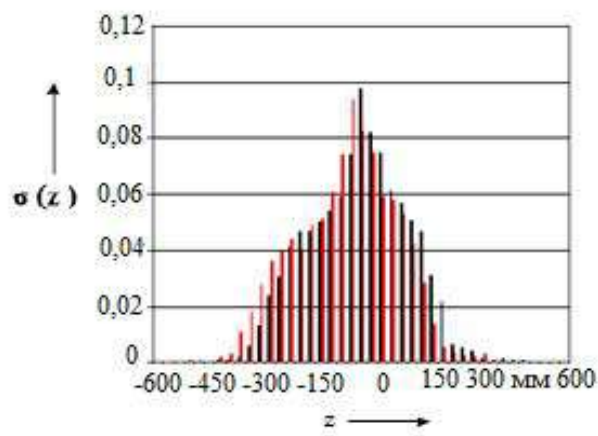


б

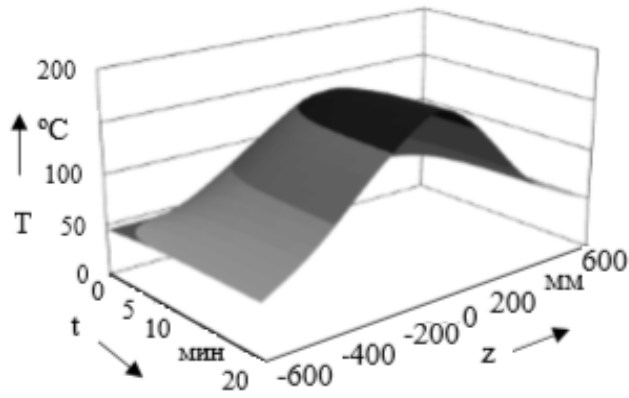


в

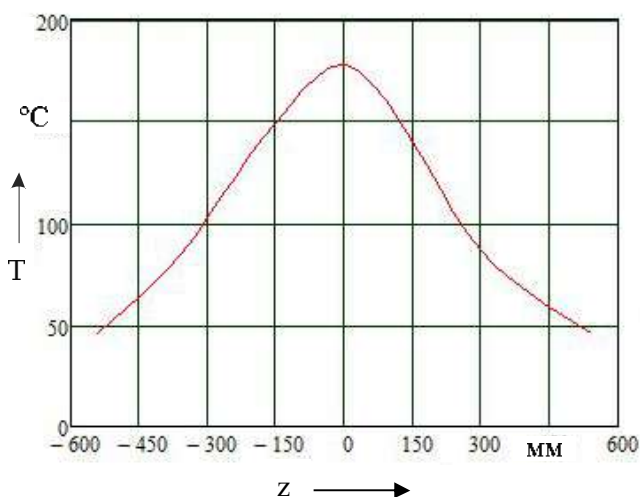
Рисунок 3 – Расчет влияния плотности распределения зигзага контактного провода (а) высокоскоростной магистрали Москва – Санкт-Петербург на температуру полоза токоприемника в переходном (б) и установившемся (в) режимах



а



б



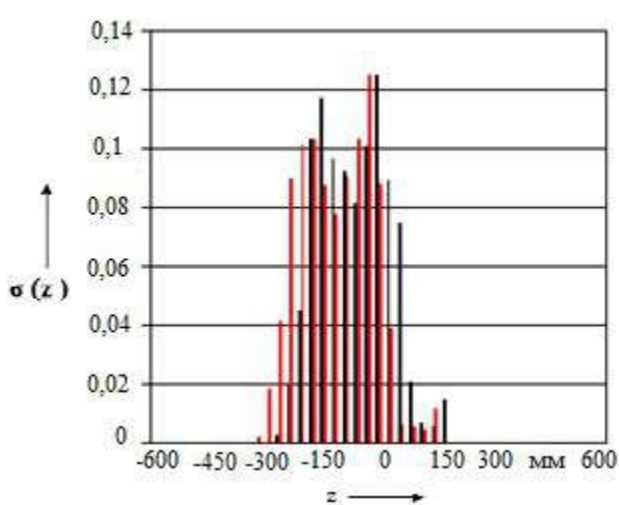
в

Рисунок 4 – Расчет влияния плотности распределения зигзага контактного провода перегона с прямым участком пути (а) на температуру полоза токоприемника в переходном (б) и установившемся (в) режимах

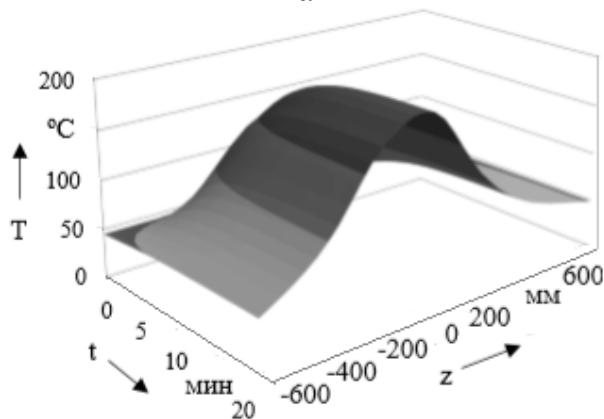
Оценка плотности распределения зигзага контактного провода $\sigma(z)$ (рисунок 3, а) осуществлена по главным путям высокоскоростной магистрали (ВСМ) Москва – Санкт-Петербург в прямом и обратном направлениях, включая перегоны и станции, прямые и кри-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

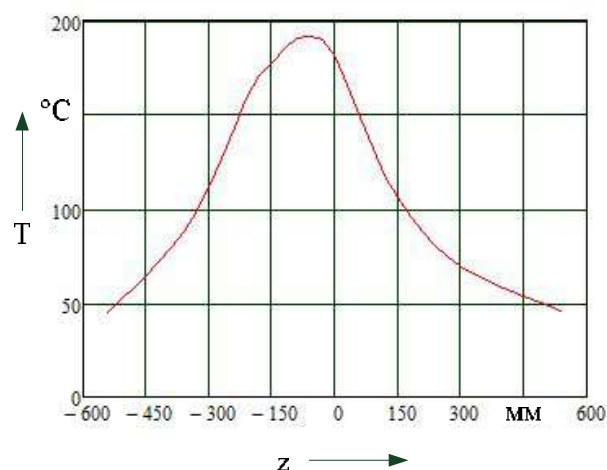
вые участки пути, искусственные сооружения и участки с пространственными контактными подвесками.



а

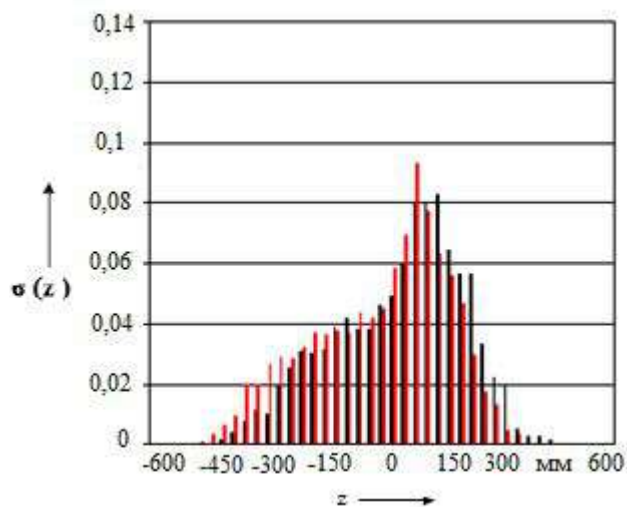


б

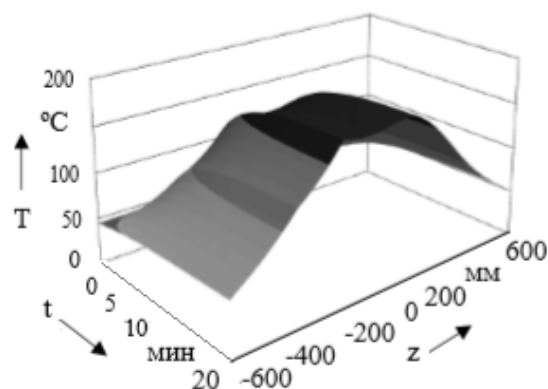


в

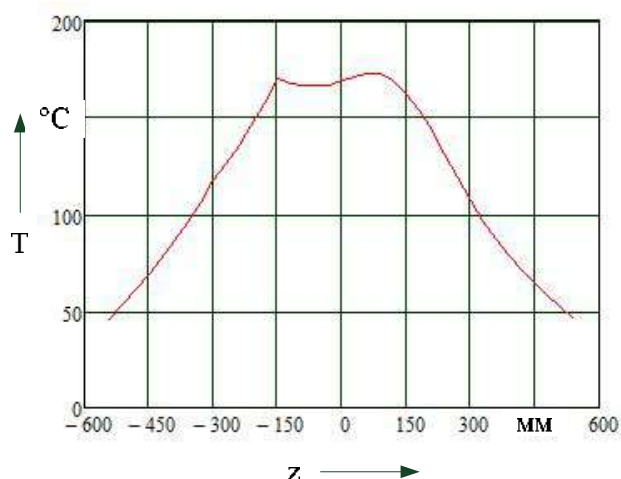
Рисунок 5 – Расчет влияния плотности распределения зигзага контактного провода (а) кривой участка пути с центром слева на перегоне ВСМ Москва – Санкт-Петербург на температуру полоза токоприемника в переходном (б) и установившемся (в) режимах



а



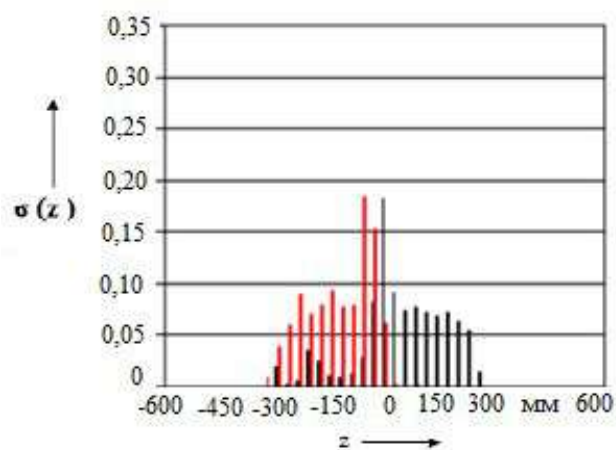
б



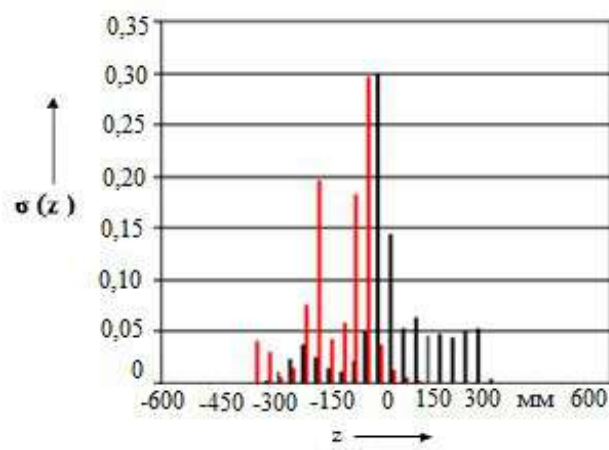
в

Рисунок 6 – Расчет влияния плотности распределения зигзага контактного провода (а) станции ВСМ Москва – Санкт-Петербург с кривой участка пути с центром справа на температуру полоза токоприемника в переходном (б) и установившемся (в) режимах

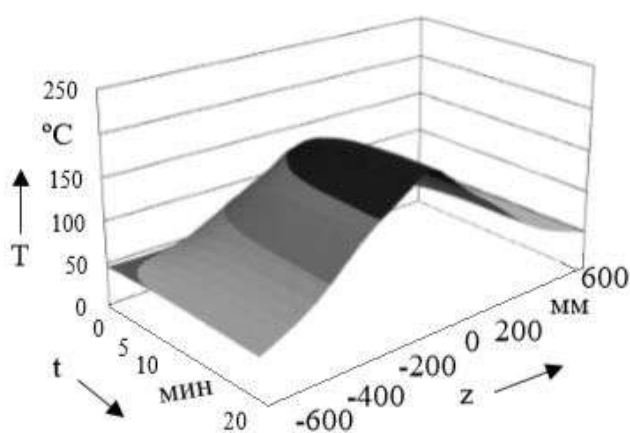
Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



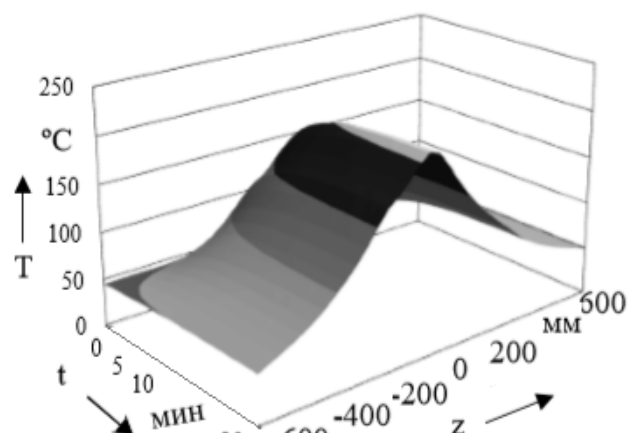
а



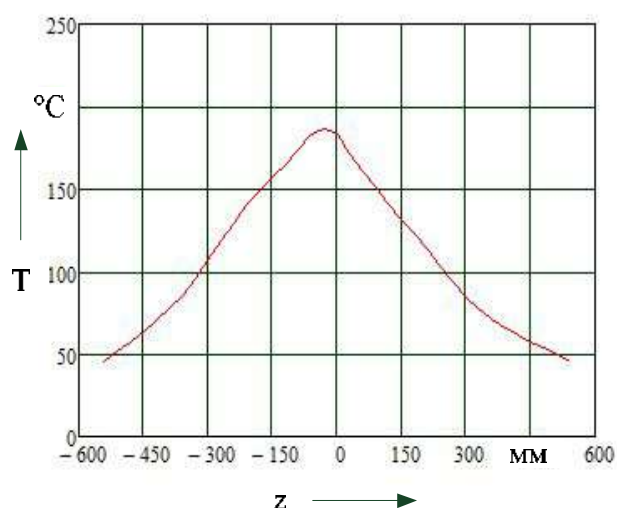
а



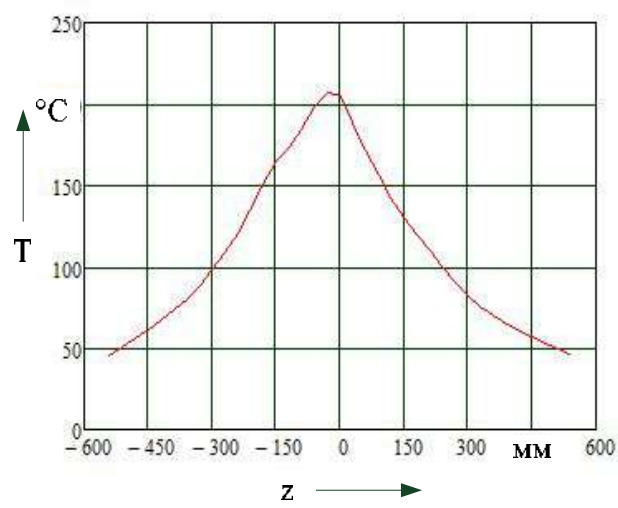
б



б



в



в

Рисунок 7 – Расчет влияния плотности распределения зигзага контактного провода (а) ромбической подвески на мосту ВСМ Москва – Санкт-Петербург на температуру полоза токоприемника в переходном (б) и установившемся (в) режимах

Рисунок 8 – Расчет влияния плотности распределения разрегулированного зигзага контактного провода (а) ромбической подвески на мосту ВСМ Москва – Санкт-Петербург на температуру полоза токоприемника в переходном (б) и установившемся (в) режимах

На [рисунке 4](#) приведен результат определения $\sigma(z)$ на перегоне с прямым участком пути с высоким качеством регулировки зигзага контактного провода. В отличие от всей ВСМ (см. [рисунк 3](#)) график $\sigma(z)$ перегона указывает на частое расположение провода в центре, что при одинаковой эластичности подвесок обуславливает повышенный нагрев центральной части полоза (см. [рисунк 4, в](#)). В реальных условиях разрегулировка зигзага, как правило, сопровождается неравномерностью эластичности подвески, что приводит к повышенному нагреву из-за увеличенного переходного сопротивления в контакте.

Оценка влияния зигзага хордовой подвески в кривой участка пути с центром слева и справа приведена на [рисунках 5 и 6](#) соответственно. Расположение кривой влияет на смещение экстремума графика $\sigma(z)$ и максимума температуры нагрева полоза. Необходимо учесть, что кривые участка пути не являются, как правило, продолжительными и в реальных условиях к значительному перегреву приводить не должны по условию отсутствия достижения установившегося значения температуры.

Влияние зигзага объемной трехпроводной контактной подвески И. И. Власова на мостах на температуру полоза токоприемника приведено на [рисунках 7 и 8](#). Разрегулированная ромбическая подвеска (см. [рисунк 8](#)), у которой максимум $\sigma(z)$ выше ромбической с высоким качеством регулировки (см. [рисунк 7](#)), приводит к значительному перегреву полоза.

Считается, что кратковременное потребление тока свыше максимально допустимого значения не приводит к перегреву полоза токоприемника [17]. Однако это утверждение справедливо в том случае, если в момент начала съема сверхнормативного значения нагрузки токоприемник имеет температуру, например, окружающей среды или незначительно выше. На практике нагрев полоза токоприемника в процессе движения в результате увеличения потребления тока начинается не с температуры окружающей среды, ползоз предварительно нагрет предыдущим режимом эксплуатации ([рисунк 9](#)) и распределение температуры по ползозу неравномерно.

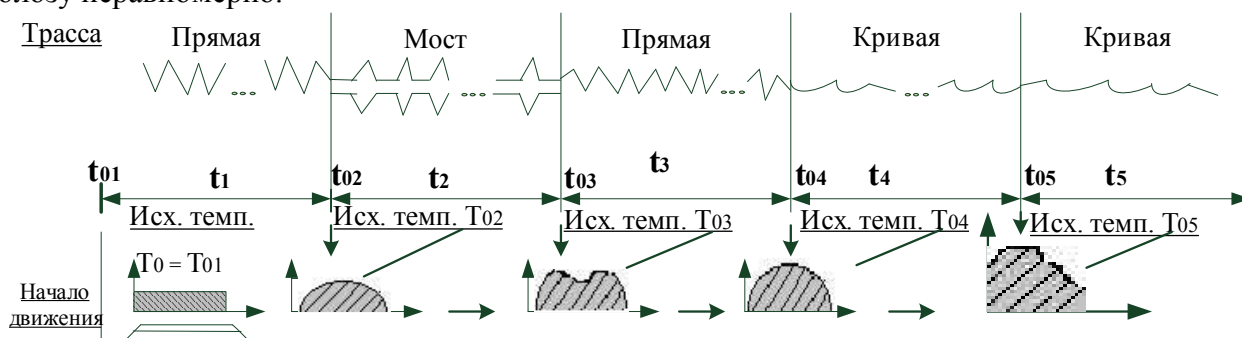


Рисунок 9 – Иллюстрация последовательности условий работы токоприемника и подвески, определяющих тепловой режим работы полоза

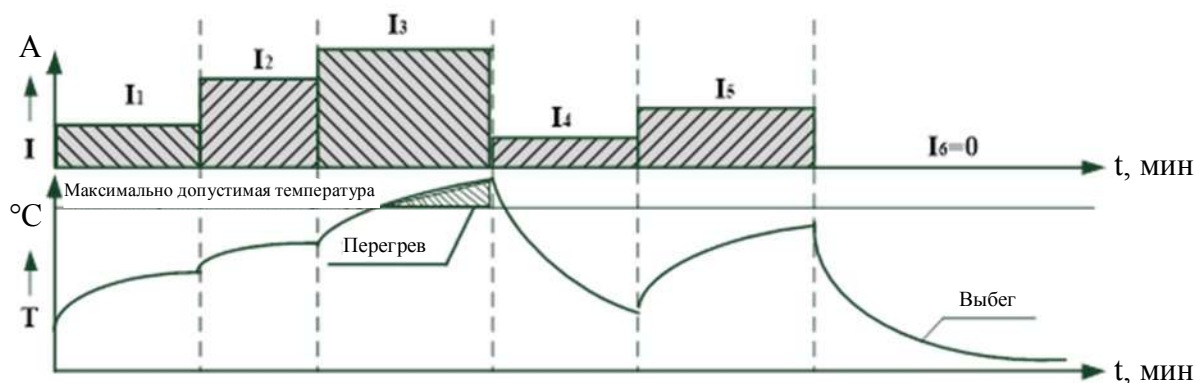


Рисунок 10 – График изменения максимальной температуры полоза при различных тяговых режимах

Время достижения установившегося режима зависит от предыдущего режима (рисунк 10), условия работы которых могут различаться. Поэтому даже кратковременное увеличение тока может привести к недопустимому перегреву и стать фактором риска разрушения контактных элементов.

Усовершенствованная математическая модель теплового состояния полоза токоприемника позволяет учесть неравномерность его нагрева предыдущим режимом работы. В программе Mathcad в матрице исходного состояния температуры полоза для исследуемого режима используются данные предыдущего режима в заданный момент времени. Результат расчета температуры полоза для последовательных трех режимов, различающихся величиной тягового тока, приведен на рисунке 11.

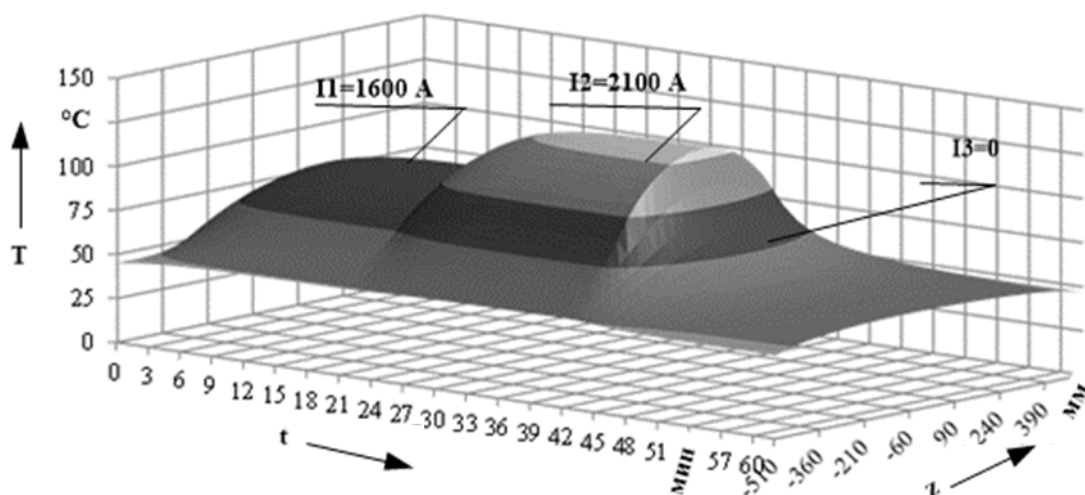


Рисунок 11 – График температуры полоза токоприемника при последовательном прохождении трех режимов потребления тягового тока

Представленная модель теплового состояния полоза позволяет рассчитывать его температуру для любых участков железной дороги с различными контактными подвесками, например, по данным лент ВИКСа (СВИКСа), разделяя их на «характерные» законы плотности разделения зигзага [4] с учетом величины тягового тока и скорости движения подвижного состава.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Усовершенствованная математическая модель теплового состояния полоза токоприемника, реализованная в программе Mathcad, позволяет рассчитать температуру с учетом неравномерности

положения одинарного или двойного контактного провода в плане, определяемого плотностью распределения их зигзага;

нажатия по полозам токоприемника;

нажатия полоза в пролете, вызванного отсутствием равноэластичности подвески, обуславливающего изменение электрического сопротивления скользящего контакта;

нажатия полоза токоприемника по проводам в подвеске с двойным контактным проводом.

С помощью представленной модели можно рассчитать изменение температуры полоза при проходе токоприемника с одного типа подвески на другой.

Математическая модель позволяет оценить переходный процесс нагрева полоза с учетом его температуры, обусловленной предыдущим тяговым режимом. Количество режимов потребления тока будет соответствовать числу циклов расчета на заданном стационарном участке зигзага.

Положительным свойством рассмотренной математической модели является возможность применения баз данных ВИКСа (СВИКСа), содержащих результаты измерения зигзага контактных проводов и контактного нажатия. Таким образом, тепловой режим полоза может быть рассчитан для любого действующего участка контактной сети с заданными значениями скорости движения электроподвижного состава и потребляемого тока.

Список литературы

1. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети [Текст] / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М. Транспорт, 1991. – 335 с.
2. ГОСТ 32204-2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 24 с.
3. Томилов, В. В. Особенности теплового расчета токоприемников магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. В. Томилов, А. В. Тарасенко, А. Н. Куткин // Материалы шестого междунар. симпозиума «Eltrans'2011» / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2013. – С. 526 – 536.
4. Утепбергенова, С. М. Методика расчета теплового состояния полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава с учетом изменения положения контактного провода в плане [Текст] / С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов, О. А. Сидоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 43 – 53.
5. Contact lines for Electric Railways [Текст] / F. Kiessling, R. Pushman, A. Shmieder, E. Schneider – Берлин, Мюнхен: Siemens AG, 2009. – 994 p.
6. Дербилов, Е. М. Особенности имитационного моделирования взаимодействия токоприемников и контактных подвесок на сопряжениях [Текст] / Е. М. Дербилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 4 (8). – С. 10 – 16.
7. Берент, В. Я. Перспективность применения металл-углеродных контактных вставок для токосъема на железных дорогах России [Текст] / В. Я. Берент // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2017. – № 3. – С. 174 – 180.
8. Теплотехника: Учебник для вузов [Текст] / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров и др. – М.: Высшая школа, 1999. – 671 с.
9. Тартынский, Д. В. Исследование износа контактных токосъемных элементов на основе моделирования токораспределения в полозе токоприемника [Текст] / Д. В. Тартынский, М. Н. Емельянова, А. Т. Тибилов // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2015. – № 2. – С. 53 – 56.
10. Смердин, А. Н. Совершенствование методики определения нагрузочных показателей токоприемников магистрального электроподвижного состава [Текст] / А. Н. Смердин, В. В. Томилов, В. М. Павлов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 99 – 110.
11. Сидоров, О. А. Исследование температуры нагрева полоза токоприемника и способы ее снижения [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. В. Томилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4 (32). – С. 25 – 34.
12. Проверка токовой нагрузочной способности токоприемников ТАС 24 и ЛАС 25 [Текст] / В. М. Павлов, П. В. Попов и др. // Вестник ВЭЛНИИ / ВЭЛНИИ. – Новочеркасск. – 2015. – № 2 (70). – С. 33 – 43.
13. Исследования токовой нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. М. Павлов, О. А. Сидоров и др. // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2015. – № 4. – С. 19 – 24.
14. Утепбергенова, С. М. Исследование систем охлаждения полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава [Текст] / С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов, О. А. Сидоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 2 (38). – С. 66 – 75.

15. Токосяем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: Сб. науч. тр. / ОАО «ВНИИЖТ». – М.: Интекс, 2010. – 192 с.
16. Сидоров, О. А. Методика оценки функциональной готовности системы токосяема скоростных участков магистральных железных дорог [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2012. – № 1. – С. 27 – 32.
17. Купцов, Ю. Е. Беседы о токосяеме, его надежности, экономичности и о путях совершенствования [Текст] / Ю. Е. Купцов. – М.: Модерн-А, 2001. – 256 с.

References

1. Frayfeld A. V. *Proyektirovaniye kontaktnoy seti* (Design of a contact network). Moscow: Transport Publ., 1991, 335 p.
2. *Tokopriemniki zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviia, GOST 32204-2013* (Current collectors of railway electric rolling stock. General specification, State Standard 32204-2013). Moscow, Standarty, 2013, 24 p.
3. Tomilov V.V. Features of thermal calculation of current collectors of main electric rolling stock [Osobennosti teplovogo rascheta tokopriyemnikov magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava]. *Materialy Shestogo Mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans'2011»* (Materials of the Sixth International Symposium «Eltrans'2011»). – S. Petersburg, 2013, pp. 526 – 536.
4. Utepbergenova S. M., Tomilov V.V., Sidorov O. A. Method for the heat state calculating of pantograph head of a mainline electric rolling stock taking account the contact wire stagger [Metodika rascheta teplovogo sostoyaniya poloza tokopriyemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava s uchetom izmeneniya polozheniya kontaktnogo provoda v plane]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 4 (40), pp. 43 – 53.
5. Kiessling F., Pushman R., Shmieder A., Schneider E. *Contact lines for Electric Railways*. Berlin, Munich: Siemens AG Publ., 2009, 994 p.
6. Derbilov E. M., Particularities of simulate modeling of the interaction between pantograph and overhead contact systems interfacing [Osobennosti imitatsionnogo modelirovaniya vzaimodeystviya tokopriyemnikov i kontaktnykh podvesok na sopryazheniyakh]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 4 (8), pp. 10 – 16.
7. Berent V. Y. Prospects of application of the metal-carbon contact inserts current collector on the Railways of Russia [Perspektivnost' primeneniya metallokeramicheskikh kontaktnykh vstavok dlya tokos"yemki na zheleznykh dorogakh Rossii]. *Vestnik VNIIZHT – The journal of of All-Russian research Institute of railway transport*, 2017, no. 3, pp. 174 – 180.
8. Lukanin V. N., Shatrov M. G., Camfer G. M. *Heat engineering textbook for universities* (Теплотехника: Учебник для вузов). Moscow: Graduate School Publ., 1999, 671 p.
9. Tartinsky, D. V., Emelyanova M. N., Tibilov A. T. Research of wear of contact current-collecting elements on the basis of modeling of current distribution in the current collector's slide [Issledovaniye iznosa kontaktnykh tokos"yemnykh elementov na osnove modelirovaniya tokoraspredeleniya v poloze tokopriyemnika]. *Vestnik VNIIZHT – The journal of of All-Russian research Institute of railway transport*, 2015, no. 2, pp. 53 – 56.
10. Smerdin, A. N., Tomilov V. V., Pavlov V. M. Improvement of the method for determining load indicators of current collectors of main electric rolling stock [Sovershenstvovaniye metodiki opredeleniya nagruzochnykh pokazateley tokopriyemnikov magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 3 (39), pp. 99 – 110.
11. Sidorov O. A., Tomilov V. V. Research of temperature distribution inequality of a panhead and its reduction methods [Issledovaniye temperatury nagrevy poloza tokopriyemnika i sposoby yeye snizheniya]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 4 (32), pp. 25 – 34.

12. Pavlov V. M., Popov P. V., Sidorov O. A., Smerdin A. N., Tomilov V. V. Continuous current-carrying capacity test of TAs 24 and LAs 25 current-collectors [Proverka tokovoi nagruzochnoi sposobnosti tokopriemnikov TAs 24 i LAs 25]. *Vestnik VELNII – The journal of the Railway Research Institute*, 2015, no. 2 (70), pp. 33 – 43.

13. Pavlov V. M., Sidorov O. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S., Tartynskiy D. V., Tomilov V. V. Current-Loading Capacity Investigations of Current Collector Operated with Main-line Electric Motive Power [Issledovaniia tokovoi nagruzochnoi sposobnosti tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava]. *Vestnik VNIIZHT – The journal of of All-Russian research Institute of railway transport*, 2015, no. 4, pp. 19 – 24.

14. Utepbergenova S. M., Tomilov V. V., Sidorov O. A. Research of cooling system for pantograph head of electric train [Issledovaniye sistem okhlazhdeniya poloza tokopriyomnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 2 (38), pp. 66 – 75.

15. Tokos'yem i tyagovoye elektrosnabzheniye pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoyannom toke: sbornik nauchnykh trudov OAO «VNIIZHT» (The current collection and traction power supply during high-speed driving at a constant current collection of scientific papers of JSC "VNIIZHT"). Moscow: Intex Publ., 2010, 192 p.

16. Sidorov, O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. Method for assessing the functional readiness of the current collection system for high-speed sections of main Railways [Metodika otsenki funktsional'noy gotovnosti sistemy tokos'yema skorostnykh uchastkov magistral'nykh zheleznnykh dorog]. *Vestnik VNIIZHT – The journal of of All-Russian research Institute of railway transport*, 2012, no. 1, pp. 27 – 32.

17. Kuptsov Y. E. *Besedy o tokos'yeme, ego nadezhnosti, ekonomichnosti i o putyakh sovershenstvovaniya* (Conversations about current collection, its reliability, cost-effectiveness, and ways to improve it). Moscow: Modern A Publ., 2001, 256 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Утепбергенова Сандугаш Мырзабековна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирантка кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (904) 070-09-86.

E-mail: sandee86@mail.ru

Томилов Валерий Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (913) 610-62-67.

E-mail: tomilov_omsk@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Utepbergenova Sandugash Myrzabekovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Graduate student of the Department « Power supply of railway transport », OSTU.

Phone: +7 (904) 070-09-86

E-mail: sandee86@mail.ru

Tomilov Valery Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (913) 610-62-67

E-mail: tomilov_omsk@mail.ru

Утепбергенова, С. М. Усовершенствованная математическая модель теплового состояния полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава постоянного тока [Текст] / С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 58 – 72.

Utepbergenova S. M., Tomilov V. V. Improved mathematical model thermal state of the pantograph head of the magistral electric rolling stock of direct current. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 1 (41), pp. 58 – 72 (In Russian).

УДК 629.4.053.2

А. С. Кушнирук

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск,
Российская Федерация

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКА НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Аннотация. Целью исследования является разработка синхронно-реплицированной модели оценки технического состояния локомотива как технической системы для снижения возникновения отказов при эксплуатации, и как следствие снижения простоев в ремонте. При проведении исследования использовались следующие междисциплинарные и математические методы: системный анализ, компьютерное и математическое моделирование, методы теории искусственного интеллекта, математический анализ. В результате проведенного исследования получена математическая синхронно-реплицированная модель оценки технического состояния локомотива на основе искусственной многослойной нейронной сети прогнозирования. Разработанная модель может быть использована в системах мониторинга, контроля, диагностирования технического состояния локомотивного парка. Оригинальными особенностями разработанной модели являются низкий период дискретизации между опросом средств мониторинга, универсальность, адаптивность, оперативность. На основе разработанной модели построен обобщенный алгоритм управления техническим состоянием локомотивного парка. Предложенная модель и алгоритм решают круг задач, описанных в концепции развития ОАО «РЖД», связанных с реализацией фактической системы ремонта по текущему техническому состоянию локомотива и с цифровизацией передовых направлений компании.

Ключевые слова: локомотивный парк, техническое состояние, управление, нейронная сеть, период дискретизации.

Alexey S. Kushniruk

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

SYSTEM FOR MANAGING THE TECHNICAL CONDITION OF A LOCOMOTIVE FLEET ON THE BASIS OF AN ARTIFICIAL NEURAL FORECASTING NETWORK

Abstract. The goal of the research is to development of a synchronous-replicated model for the assessment of the technical state of a locomotive as a technical system to reduce the occurrence of failures during operation, and as a result, reduce downtime in repairs. When performing the research, the following interdisciplinary and mathematical methods were used: system analysis, computer and mathematical modeling, methods of the theory of artificial neural networks, mathematical analysis. As a result of the research, a mathematical synchronously replicated model for assessing the technical condition of a locomotive based on an artificial multilayer forecasting neural network was obtained. The developed model can be used in monitoring systems, control, diagnosing the technical condition of the locomotive fleet. The original features of the developed model are a low sampling period between polling monitoring tools, versatility, adaptability, efficiency. Based on the developed model, a generalized algorithm for managing the technical condition of the locomotive fleet is built. The proposed model and algorithm solves the ranges of tasks described in the development concept of Russian Railways OJSC related to the implementation of the actual repair system according to the current technical condition of the locomotive, as well as the digitalization of the company's advanced areas.

Keywords: locomotive fleet, technical condition, managing, neural network, sampling period.

Объектом исследования является система технического мониторинга локомотивного парка, которая реализует процессы регистрации, передачи, обработки, хранения данных и принятия решения относительно технического состояния.

Целью исследования является сокращение потерь в эксплуатации – простоев локомотивов в ремонте, вызванных возникновением неплановых ремонтов.

К задачам исследования относятся такие:

системный анализ происхождения неплановых ремонтов в области планово-предупредительной системы обслуживания и ремонта локомотивного парка;

выбор методов и разработка синхронно-реплицированной модели оценки технического состояния узлов локомотивов;

создание методики управления техническим состоянием на основе предложенных методов и модели.

Научная новизна работы включает в себя

формализацию объектов технического мониторинга на основе теории нейронных сетей;

разработку универсальной синхронно-реплицированной нейронной модели оценки состояния технических систем;

создание методики управления техническим состоянием локомотивного парка.

Практическая значимость работы связана с развитием цифровизации железнодорожного транспорта, в частности, таких проектов, как «Цифровая железная дорога», «Умный локомотив» и др. Данные проекты относятся к системе управления надежностью локомотивным парком АСУНТ, основой которой являются единая база данных технического состояния локомотивов ЕСМТ, функционирующая посредством учетно-отчетных форм системы управления локомотивным хозяйством АСУТ, сетевой график АСУ СГ локомотиворемонтных заводов АСУ ЖДРМ и дирекции по ремонту тягового подвижного состава АСУ ЦТР, которые наполняют «Электронный паспорт локомотива» и в режиме работы которого необходимо использовать рассматриваемые в работе методы и модель.

Во время эксплуатации локомотива на элементы его узлов влияют внешние и внутренние воздействия, обусловленные особенностями рабочего процесса. Данные воздействия характеризуются факторами, отрицательное влияние которых в конечном счете приводит к отказу конкретного элемента, к параллельным неисправностям, снижению эффективности работы локомотива или в отдельных случаях к остановке перевозочного процесса (рисунок 1).

Поддержание показателей надежности, в частности, ремонтпригодности, на железнодорожном транспорте осуществляет система технического мониторинга, которая на основании регистрируемых выходных параметров производит выявление инцидентов (ситуаций, отличных от нормальных), оценивает показатель технического состояния (обеспечивает поддержку принятия решения) и в соответствии с достижением его определенного уровня принимает соответствующие меры по воздействию на факторы с целью поддержания технического состояния и снижения вероятности отказа – данный процесс называется управлением техническим состоянием.

В условиях работы железнодорожного транспорта данная тема является актуальной, так как рассматривает важнейшее свойство основного объекта инфраструктуры перевозочного процесса.

Особенностью рассматриваемой системы являются повышенные требования к периоду дискретизации получения данных о техническом состоянии для своевременного выявления инцидентов и принятия соответствующих решений. Так, при значительном периоде дискретизации между проведением мониторинга технического состояния объекта вследствие внешних и внутренних воздействий имеется возможность возникновения отказа, которую невозможно учесть, что в конечном счете сводится к снижению показателей надежности и возникновению неплановых ремонтов.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Данный факт обуславливает необходимость постоянного непрерывного отслеживания показателей технического состояния с целью поддержания показателей надежности локомотивного парка на допустимом уровне.

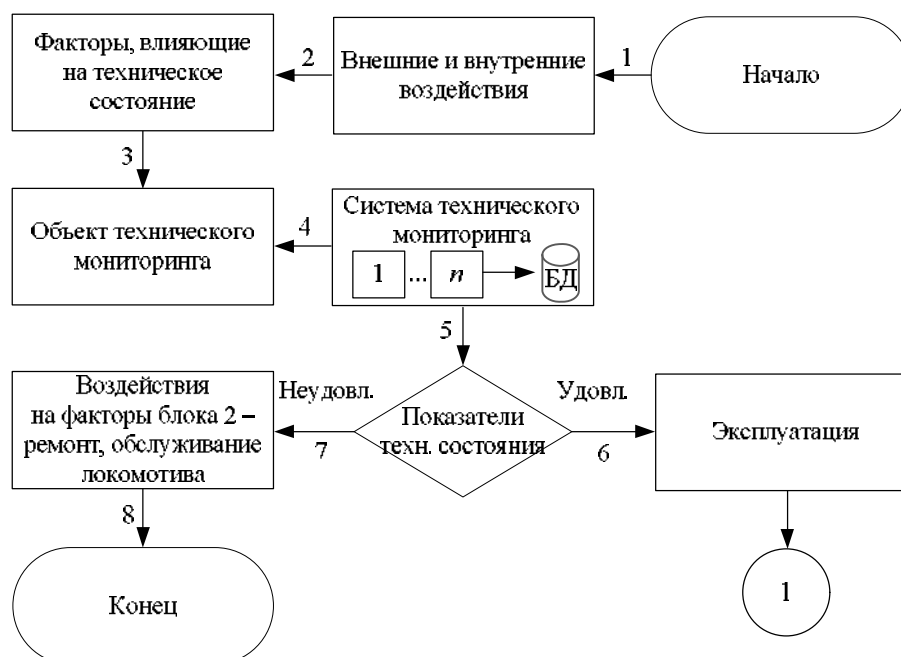


Рисунок 1 – Структура управления техническим состоянием локомотивного парка, где n – выходные параметры объекта контроля или диагностирования; БД – база данных значений выходных параметров

В исследованиях проблем надежности локомотивного парка, связанных с организацией ремонта и эксплуатацией локомотивов, в том числе с применением диагностических комплексов, систем технического мониторинга, информационных систем, значительных результатов достигли ученые, представленные в таблице.

Известные ученые в области исследования надежности локомотивного парка

Методы	Ученые
Статистические методы	Гателюк О. В., Марюхненко В. С., Мишин А. И., Молчанов В. В., Овчаренко С. М., Пультяков А. В., Сиряк П. А., Усманов Ю. А., Четвергов В. А., Шантаренко С. Г.
Методы теории принятия решения	Бочаров В. М., Вайсбурд А. С., Головаш А. Н., Наговицын В. С., Чаплинский С. И., Шахов В. Г.
Методы теории искусственного интеллекта и нечетких множеств	Бабков Ю. В., Гапанович В. А., Грачев В. В., Грищенко А. В., Давыдов Ю. А., Лакин И. К., Перфильев К. С., Пляскин А. К., Хамидов О. Р., Харламов В. В.

Известны работы ученых, связанные с разработкой методов управления техническим состоянием локомотивов на основе теории нечетких множеств, а также алгоритмов управления рисками (рисунок 2) [1].

Теория нечетких множеств рассматривает риск R как значение функции принадлежности μ . Функцией принадлежности является зависимость степени принадлежности от рассматриваемой величины. К примеру, понятие «тяжеловесный поезд» массой 6000 т не позволяет управлять рисками при массе поезда 5990 т, также не поддаются четкой логике понятие минимально допустимой скорости на расчетном подъеме, проследование расчетного подъема и т. д. На основании полученных функций принадлежности рассчитывается риск отказа исходя из представленного примера по формуле (1):

$$R = \mu(m) \wedge \mu(v) \wedge \mu(s). \quad (1)$$

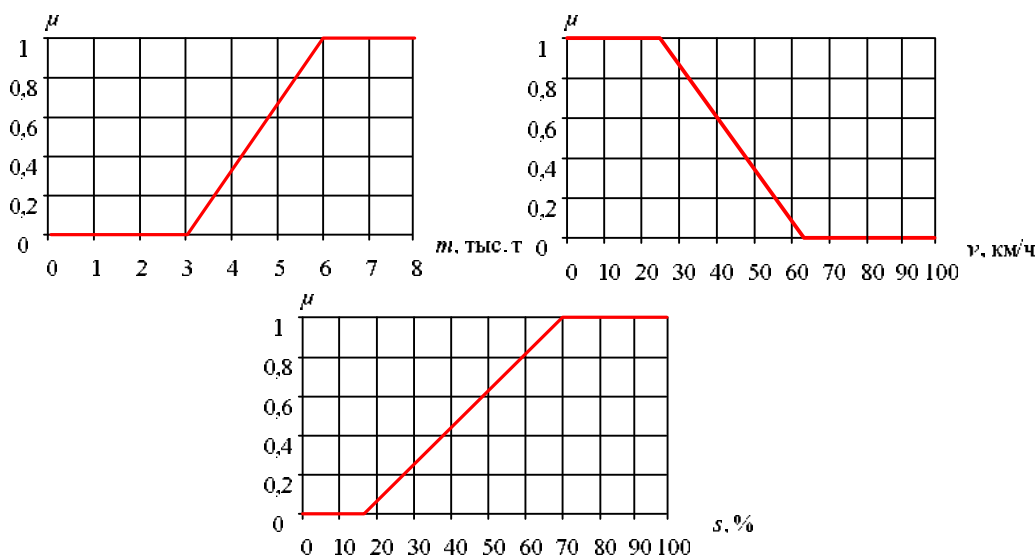


Рисунок 2 – Функции принадлежности отказа тяговых электродвигателей локомотива в зависимости от изменения влияющих параметров: m – масса поезда, тыс. т; v – скорость движения поезда, км/ч; s – проследование поезда, %

Исходя из полученных рисков строится модель управления с соответствующими вариантами решений по сложившейся ситуации. При этом значениям рисков задаются аргументы исходя из экспертных оценок, статистических данных либо на основании регламентирующей документации.

Построение функций принадлежности отказов дает только показательную составляющую оценки технического состояния ввиду того, что аргументы риска задаются на основании статичных требований технической документации, скептических экспертных оценок или нестабильных статистических данных. При этом не рассматривается задача прогнозирования конкретного выходного параметра рассматриваемого узла от влияющих переменных, характеризующих физическую природу протекания рабочего процесса.

Универсальной теорией, которая занимается вопросами аппроксимации и прогнозирования значений функций от нескольких переменных, является теория искусственного интеллекта – раздел «нейронные сети» [2 – 5].

Моделью прогнозирования в области искусственного интеллекта является нейронная сеть прогнозирования [6]. Нейронная сеть представляет собой систему уравнений, включающую в себя весовые коэффициенты, которые преобразуют функцию таким образом, чтобы ее значение от рассматриваемых переменных принимало аргумент выходного параметра. Процесс моделирования нейронной сети (прогнозирования выходного параметра) осуществляется путем выбора и решения уравнения системы в зависимости от текущих значений входных переменных:

$$a_{in} \rightarrow y_{inj} = \begin{cases} \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot ((w_{x_1 1j} \cdot x_{11}) + (w_{x_2 1j} \cdot x_{21}) + \dots + (w_{x_i 1j} \cdot x_{in})))}; \\ \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot ((w_{x_1 (n+1)j} \cdot x_{1(n+1)}) + (w_{x_2 (n+1)j} \cdot x_{2(n+1)}) + \dots + (w_{x_i (n+1)j} \cdot x_{i(n+1)})))}, & x_i = x, \\ \dots \\ \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot ((w_{x_1 mj} \cdot x_{1m}) + (w_{x_2 mj} \cdot x_{2m}) + \dots + (w_{x_i mj} \cdot x_{im})))} \end{cases} \quad (2)$$

где i – номер входного (выходного) параметра слоя нейронной сети;

n – номер персептрона (нейронной связи);

j – номер итерации (эпохи) обучения;

w – значение весового коэффициента соответствующего входного параметра x_i , изменение значения которого осуществляется на каждой итерации (эпохи) обучения j с целью минимизации отклонения между ответом нейронной сети по значению выходного параметра y_{inj} и фактическим значением выходного параметра обучающей выборки a_{in} ;

x – значение переменной (входного параметра), физически влияющей на выходной параметр y_{inj} ;

m – количество персептронов (нейронных связей) слоя нейронной сети.

В формуле (2) представлен процесс моделирования нейронной сети с сигмовидной функцией активации:

$$y_{\sigma} = \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot x)}, \quad (3)$$

где β – коэффициент усиления сигнала.

Применение сигмовидной функции активации обусловливается усилением слабых сигналов и исключением насыщения мощных, характеризующихся отклонением ответа y_{inj} от фактического значения выходного параметра обучающей выборки a_{in} . Выбор функции активации зависит от характера изменения входных и выходных параметров, области и задачи применения нейронной сети. Однако практика показывает, что в области прогнозирования сигмовидная функция активации позволяет эффективно определять весовые значения в соответствии со значением выходного параметра даже в сложных системах с высоким уровнем регрессии (коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,96 \div 0,97$) [7, 8].

Процесс обучения нейронной сети сводится к задаче минимизации функции. Наиболее эффективным методом обучения нейронной сети, предназначенной для прогноза выходных параметров, является алгоритм минимизации Левенберга – Марквардта. Данный алгоритм основан на синтезе двух методов минимизации функции – на алгоритме наискорейшего спуска и методе Гаусса – Ньютона, которые в отдельности имеют свои положительные стороны и недостатки [9 – 11].

Первым шагом при проведении минимизации функции является выбор произвольных значений весов, далее относительно рассматриваемых весов производится нахождение частных производных функции от весов с целью определения градиента [4]:

$$\nabla y_{inj} = \begin{vmatrix} \frac{\partial(1 + \exp(-\beta \cdot ((w_{x_1 nj} \cdot x_{1n}) + (w_{x_2 nj} \cdot x_{2n}) + \dots + (w_{x_i nj} \cdot x_{in}))))^{-1}}{\partial w_{x_1 1j}} \\ \frac{\partial(1 + \exp(-\beta \cdot ((w_{x_1 nj} \cdot x_{1n}) + (w_{x_2 nj} \cdot x_{2n}) + \dots + (w_{x_i nj} \cdot x_{in}))))^{-1}}{\partial w_{x_2 nj}} \\ \dots \\ \frac{\partial(1 + \exp(-\beta \cdot ((w_{x_1 nj} \cdot x_{1n}) + (w_{x_2 nj} \cdot x_{2n}) + \dots + (w_{x_i nj} \cdot x_{in}))))^{-1}}{\partial w_{x_{ij}}} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

После определения градиента ∇y_{inj} осуществляется проверка останова минимизации функции на рассматриваемых весах:

$$\left(\frac{\partial(1 + \exp(-\beta \cdot ((w_{x_1nj} \cdot x_{1n}) + (w_{x_2nj} \cdot x_{2n}) + \dots + (w_{x_inj} \cdot x_{in}))))^{-1}}{\partial w_{x_1nj}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial(1 + \exp(-\beta \cdot ((w_{x_1nj} \cdot x_{1n}) + (w_{x_2nj} \cdot x_{2n}) + \dots + (w_{x_inj} \cdot x_{in}))))^{-1}}{\partial w_{x_inj}} \right)^2 > (<) \varepsilon, \quad (5)$$

где ε – предел минимизации функции.

Если значение рассматриваемого выражения больше (меньше) необходимого предела минимизации, то процесс обучения продолжается, при этом новые значения весов рассчитываются на основании определения шага минимизации:

$$y_{in2} = y_{in1} - \lambda_1 \cdot \nabla y_{inj}. \quad (6)$$

При достижении минимума функции ошибки согласно методу наискорейшего спуска минимизация функции сводится к методу Гаусса – Ньютона. Суть данного метода заключается в поиске минимума ошибки целевого значения сети путем дифференцирования функции аналогично системе (4) и определения значения последней в исходной точке. В данном случае оптимизации значения весов в следующей точке обучения рассчитываются согласно выражению

$$y_{in2} = y_{in1} - \frac{y_{in1}}{\nabla y_{in1}}. \quad (7)$$

После произведенных операций цикл повторяется до момента необходимой минимизации функции ошибки сети.

По окончании процесса минимизации функции вследствие снижения эффективности обучения нейронной сети или достижения допустимого предела минимизации функции проводится регрессионный линейный анализ слоя, при этом в выходном слое используют линейную функцию активации с целью дальнейшего определения коэффициента корреляции и детерминации нейронной сети. При достижении высоких значений коэффициента детерминации обученная нейронная сеть позволяет спрогнозировать значения диагностического параметра в зависимости от входных данных в рамках аппроксимированной выборки, а значит, рассматриваемая модель способна к комплексному контролю технического состояния различных узлов технических систем, что доказывает универсальность подхода контроля и диагностики при использовании рассматриваемой модели.

Рассмотрим процесс создания системы оценки технического состояния на примере моторно-осевых подшипников (МОПов) колесно-моторного блока (КМБ) локомотива, основой которой является нейронная сеть прогнозирования выходных параметров. Выходным параметром МОПа, по которому наиболее адекватно можно определить техническое состояние, является температура $y_{T\text{МОП}}$. При этом наиболее значимыми влияющими параметрами будут являться температура окружающей среды (воздуха) $x_{Tв}$ и скорость движения $x_{Vд}$.

Для задач прогнозирования и аппроксимации нелинейных функций используются сети прямого распространения, которые имеют односторонние соединения от входных до выходных слоев.

Обучение нейронной сети прогнозирования производилось согласно данным технического мониторинга, который проводился в рамках научно-исследовательской работы на по-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

лигоне Новочеркасск – Хабаровск. Целью научно-исследовательской работы являлась организация автономного непрерывного мониторинга фактического состояния моторно-осевых подшипников колесно-моторных блоков электровозов серии 3ЭС5К. По результатам проведенного мониторинга получена значительная выборка диагностических данных – 1,73 млн. точек регистрации параметров – температуры вкладышей моторно-осевых подшипников, температуры условий эксплуатации, скорости движения.

Процесс обучения нейронной сети выполнялся в пакете *Neural Network Training* программы *Matlab*. В качестве обучаемой сети используется однонаправленная многослойная нейронная сеть с одним скрытым слоем с функциями активации – сигмовидная и линейная соответственно. В качестве функции обучения используется алгоритм Левенберга – Марквардта.

На основании проведенных экспериментальных выборок обучения сети определено оптимальное количество персептронов – 56 и число итераций – 215000.

Результаты обучения нейронной сети прогнозирования в пакете *Neural Network Training* программы *Matlab* представлены на рисунке 3:

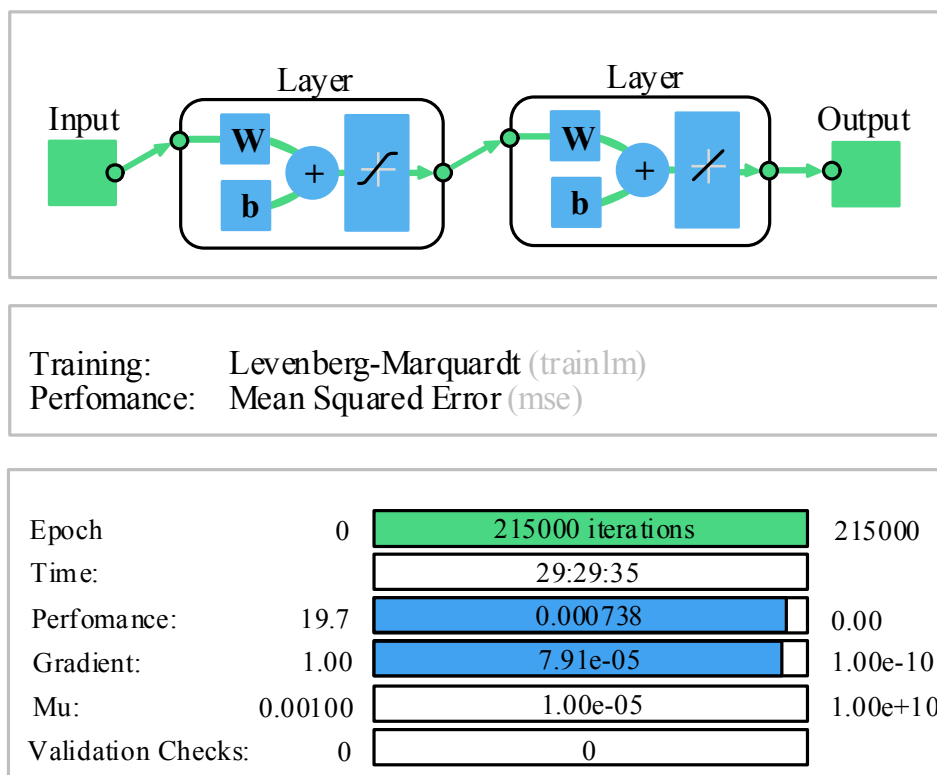


Рисунок 3 – Результаты обучения нейронной сети прогнозирования

Посредством обучения нейронной сети прогнозирования по выборке входных (*Input*) и выходных (*Output*) данных с применением входного и выходного скрытого слоев (*Layer*), посредством алгоритма минимизации функции (*Training*) Левенберга – Марквардта (*Levenberg – Marquardt*) получена нейросетевая модель прогнозирования технического состояния моторно-осевых подшипников с минимальным средним квадратическим отклонением (*Perfomance – Mean Squared Error*) между выходным параметром обученной сети и выходным параметром обучающей выборки, равным 0,000738, и минимальным значением градиента, равным 0,0000791.

По результатам проведенного линейного регрессионного анализа разработанной модели установлено, что система уравнений обученной нейронной сети имеет коэффициент корреляции $R = 0,98$ и соответственно коэффициент детерминации $R^2 \approx 0,97$, что свидетельствует о

высоком уровне сходимости ряда ответа нейронной сети и значений выходных диагностических параметров обучающей выборки.

Результаты линейного регрессионного анализа представлены на рисунке 4:

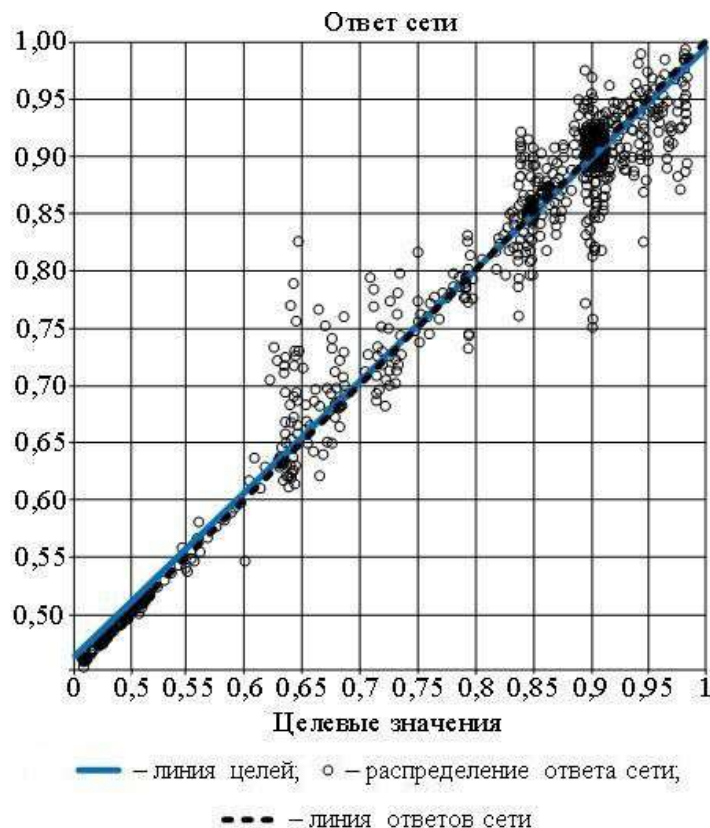


Рисунок 4 – Результаты линейного регрессионного анализа нейросетевой модели

Так как коэффициент детерминации искусственной нейронной сети прогнозирования характеризуется высоким уровнем регрессии, разработанная модель оценки технического состояния моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов способна к комплексному контролю выходных диагностических параметров, прогнозированию их значений, а значит, и возможности диагностирования конкретных отказов.

На основе полученной имитационной модели реализован алгоритм управления техническим состоянием узлов локомотива (рисунок 5).

Работа алгоритма состоит в применении средств непрерывного мониторинга входных и выходных параметров технической системы. Обученная нейронная сеть принимает входные сигналы от средств мониторинга и рассчитывает выходные. Путем сравнения рассчитанных значений выходных параметров y_j с фактическими a осуществляется показательная оценка технического состояния, помимо этого осуществляется диагностирование отказов по ранее полученным (обученным) дефектным нейронным сетям конкретных неисправностей, при этом ведется контроль по предельному значению выходного параметра $a_{кр}$, которое обуславливается требованиями к технической системе, узлу или элементу. Если фактическое значение выходного параметра выше или ниже предельного значения $a_{кр}$, то отказ является явным и требует незамедлительного устранения, т. е. постановки локомотива на неплановый ремонт. Если же значение фактического выходного параметра находится между предельным и эталонным значениями, то необходимо проведение стационарных диагностических работ с целью подтверждения ответа нейронной сети и в случае ошибки осуществление переобучения сети в зависимости от соответствующего условия – если при проведении диагностических работ были выявлены дефекты, то ведется обучение дефектной сети y_{jd} по соответствующему факту, в случае ошибочного выявления отказа нейронной сетью производится пере-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

обучение последней под промежуточное состояние. В случае выявления отказа, подтвержденного диагностическими работами, производится обучение сети по параметрам дефекта, если таковые имеются, с целью абсолютной цифровизации диагностической номенклатуры узлов, деталей, элементов и систем локомотивного парка.

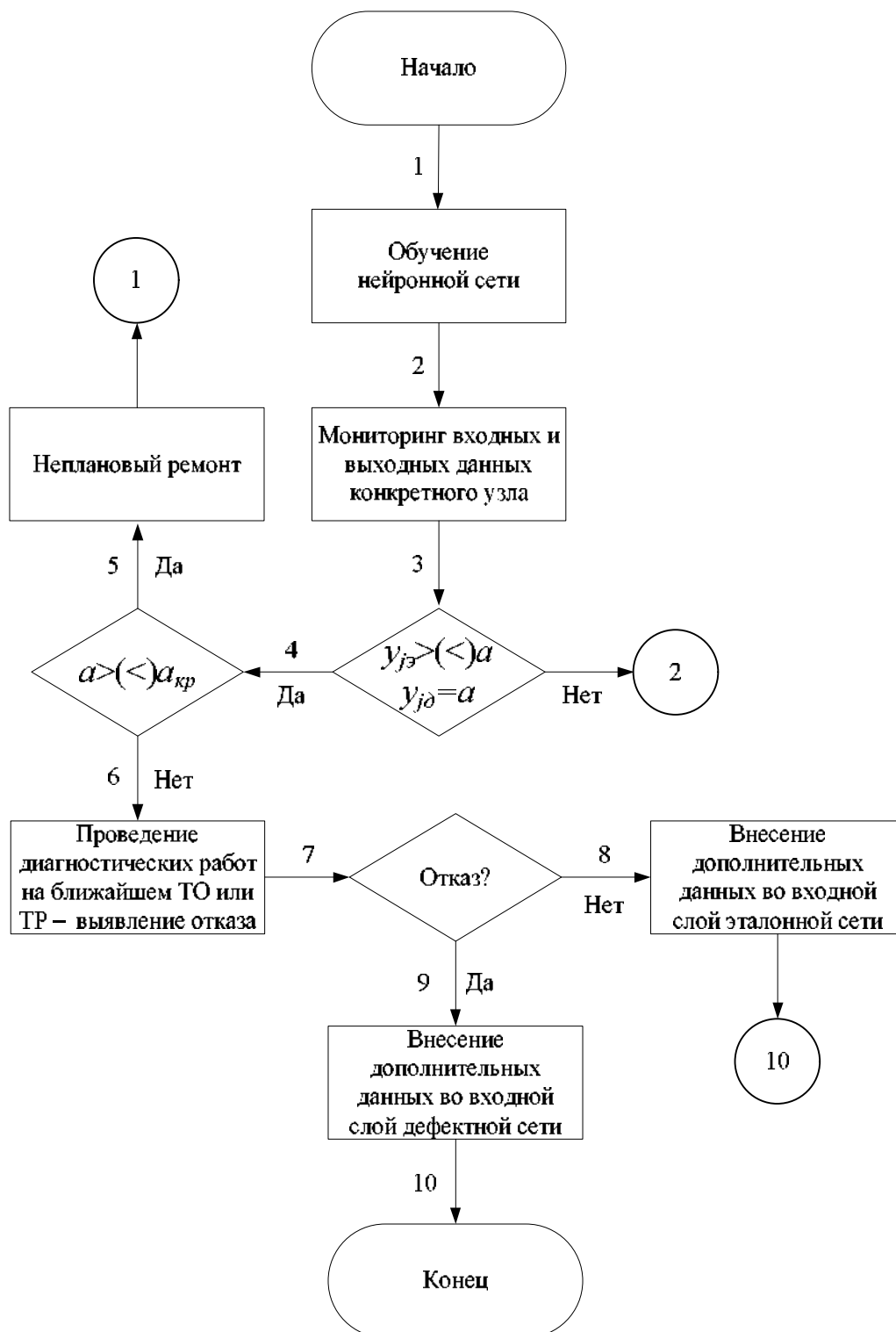


Рисунок 5 – Обобщенный алгоритм управления техническим состоянием локомотивного парка

В результате выполнения задач исследования

установлено, что причиной происхождения неплановых ремонтов в сфере планово-предупредительной системы обслуживания и ремонта локомотивного парка является асинхронно-реплицированная концепция реализации технического мониторинга, которая

характеризуется значительными периодами дискретизации проведения диагностических работ, в условиях которых невозможно управлять показателями надежности;

разработана синхронно-реплицированная имитационная нейронная модель оценки технического состояния с элементами контроля и диагностирования. В рамках данной модели получена оригинальная универсальная методика диагностирования технических систем, которая формализует объекты технического мониторинга посредством теории нейронных сетей.

На основе предложенной модели разработан обобщенный алгоритм управления техническим состоянием локомотивного парка для комбинированной и фактической систем обслуживания и ремонта.

Список литературы

1. Лакин, И. К. Модель управления рисками отказов локомотивов [Текст] / И. К. Лакин, А. А. Аболмасов, В. А. Мельников // Мир транспорта / Российский университет транспорта. – М. – 2013. – № 4. – с. 130 – 136.
2. Голубев, Ю. Ф. Нейронные сети в мехатронике [Текст] / Ю. Ф. Голубев // Фундаментальная и прикладная математика / Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – М. – 2005. – № 8. – С. 81 – 103.
3. Андрейченко, Д. К. Обучение нейросетевых регуляторов для стабилизации комбинированных динамических систем [Текст] / Д. К. Андрейченко, Ф. М. Жадаев // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер.: Математика. Механика. Информатика / Саратовский нац. исследоват. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – Саратов. – 2018. – № 3. – С. 354 – 360.
4. Узенцова, Н. С. Об одновременном приближении алгебраических многочленов и их производных нейронными сетями прямого распространения сигнала с одним скрытым слоем [Текст] / Н. С. Узенцова, С. П. Сидоров // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер.: Математика. Механика. Информатика / Саратовский нац. исследоват. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – Саратов. – 2013. – № 2. – С. 78 – 82.
5. Руанет, В. В. Использование искусственных нейронных сетей в цитогенетических исследованиях [Текст] / В. В. Руанет, А. К. Хетагурова, Е. Д. Бадаева // Биомедицинская химия / Научно-исследовательский институт биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича. – М. – 2004. – № 1 (50). – С. 163 – 171.
6. Айзикович, А. А. Применение персептрона в цифровой фильтрации сигналов [Текст] / А. А. Айзикович, А. Ю. Усынин // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета / Удмуртский гос. ун-т. – Ижевск. – 2006. – № 2. – С. 109 – 112.
7. Ухоботов, В. И. О сравнении нечетких чисел в задачах принятия решений [Текст] / В. И. Ухоботов, Е. С. Михайлова // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки / Удмуртский гос. ун-т. – Ижевск. – 2016. – № 1. – С. 87 – 94.
8. Apicella A., Isgro F., Prevete R. A simple and efficient architecture for trainable activation functions, *Neurocomputing*, Elsevier BV, Amsterdam, 2019, no. 370, pp. 1 – 15.
9. Diene O., Bhaya A. Conjugate gradient and steepest descent constant modulus algorithms applied to a blind adaptive array, *Signal Processing*, Elsevier BV, Amsterdam, 2010, no. 90, pp. 2835 – 2841.
10. Chen J., Li W. Convergence of Gauss-Newton's method and uniqueness of the solution, *Applied Mathematics and Computation*, Elsevier BV, Amsterdam, 2005, no. 170, pp. 686 – 705.
11. Maric, I. Optimization of self-organizing polynomial neural networks, *Experts systems with applications*, Elsevier BV, Amsterdam, 2013, no. 40, pp. 4528 – 4538.

References

1. Lakin I. K. Risk management model to prevent locomotive malfunction [Model' upravleniya riskami otkazov lokomotivov]. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, 2013, no. 4 (11), pp. 130 – 136.
2. Golubev Yu. F. Neural networks in mechatronics [Nejronnye seti v mekhatronike]. *Fundamental'naya i prikladnaya matematika – Fundamental and Applied Mathematics*, 2005, no. 8 (11), pp. 81–103.
3. Andrejchenko D. K., Zhadaev F. M. Training of neural network regulators for stabilization of combined dynamic systems [Obuchenie nejrosetevykh regulyatorov dlya stabilizacii kombinirovannykh dinamicheskikh sistem]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika – Journal of Saratov University Studies. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science*, 2018, no. 3 (18), pp. 354 – 360.
4. Uzencova N. S., Sidorov S. P. On the simultaneous approximation of algebraic polynomials and their derivatives by neural networks of direct signal propagation with one hidden layer [Ob odnovremennom priblizhenii algebraicheskikh mnogochlenov i ih proizvodnykh nejronnymi setyami pryamogo rasprostraneniya signala s odnim skryтым sloem]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika – Journal of Saratov University Studies. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science*, 2013, no. 2 (13), pp. 78 – 82.
5. Ruanet V. V., Hetagurova A. K., Badaeva E. D. The use of artificial neural networks in cytogenetic studies [Ispol'zovanie iskusstvennykh nejronnykh setej v citogeneticheskikh issledovaniyakh]. *Biomeditsinskaya himiya – Biomedical Chemistry*, 2004, no. 1 (50), pp. 163 – 171.
6. Ajzikovich A. A., Usynin A. Yu. Application of the perceptron in digital signal filtering [Primenenie perseptrona v cifrovoj fil'tracii signalov]. *Izvestiya Instituta matematiki i informatiki Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta – Journal of the Institute of Mathematics and Computer Science Studies of Udmurt State University*, 2006, no. 2 (36), pp. 109 – 112.
7. Uhobotov V. I., Mihajlova E. S. On the comparison of fuzzy numbers in decision-making problems [O sravnenii nechetkikh chisel v zadachah prinyatiya reshenij]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye nauki – Bulletin of the Udmurt University Studies. Mathematics. Mechanics. Computer science*, 2016, no. 1 (26), pp. 87 – 94.
8. Apicella A., Isgro F., Prevete R. A simple and efficient architecture for trainable activation functions, *Neurocomputing*, Elsevier BV, Amsterdam, 2019, no. 370, pp. 1 – 15.
9. Diene O., Bhaya A. Conjugate gradient and steepest descent constant modulus algorithms applied to a blind adaptive array, *Signal Processing*, Elsevier BV, Amsterdam, 2010, no. 90, pp. 2835 – 2841.
10. Chen J., Li W. Convergence of Gauss-Newton's method and uniqueness of the solution, *Applied Mathematics and Computation*, Elsevier BV, Amsterdam, 2005, no. 170, pp. 686 – 705.
11. Maric, I. Optimization of self-organizing polynomial neural networks, *Experts systems with applications*, Elsevier BV, Amsterdam, 2013, no. 40, pp. 4528 – 4538.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кушнирук Алексей Сергеевич

Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021,
Российская Федерация.

Аспирант, преподаватель кафедры «Транспорт
железных дорог», ДВГУПС.

Тел.: +7 (924) 212-21-38.

E-mail: alexey.kushniruk@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kushniruk Alexey Sergeevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian
Federation.

Postgraduate student, lecturer of the department
«Transport of railways», FESTU.

Phone: +7 (924) 212-21-38.

E-mail: alexey.kushniruk@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кушнирук, А. С. Система управления техническим состоянием локомотивного парка на основе искусственной нейронной сети прогнозирования [Текст] / А. С. Кушнирук // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 72 – 83.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kushniruk A. S. System for managing the technical condition of a locomotive fleet on the basis of an artificial neural forecasting network. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 1 (41), pp. 72 – 83 (In Russian).

УДК 629.4.023; 621.008.2

З. Г. Мухамедова

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашиИТ), г. Ташкент,
Республика Узбекистан

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ МОНТАЖНОЙ ПЛОЩАДКИ АВТОМОТРИСЫ С УЧЕТОМ НОРМ НАДЕЖНОСТИ И РЕАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

Аннотация. Освещены факторы, влияющие на эксплуатационную надежность площадки монтажной автомотрисы, обслуживающей ремонт и монтаж на железной дороге. Произведены оценка и анализ системы количественных показателей надежности, описаны методы их раздельного определения по механическому, гидро- и электрооборудованию. Рассмотрена стратегия технического обслуживания и ремонта с применением методов и средств современной системы диагностирования, обеспечивающая оценку надежности объекта при проектировании, при его эксплуатации и при ремонте.

Ключевые слова: монтажная площадка автомотрисы, эксплуатационная надежность, оценка точечных показателей надежности, вероятность, ресурсы, диагностика, стратегия технического обслуживания и ремонта.

Ziyoda G. Mukhamedova

Tashkent Institute of Engineers of Railway Transport (TIERT), Tashkent, Uzbekistan

IMPROVING THE DESIGN CONCEPTS OF EQUIPMENT FOR THE ASSEMBLY PLATFORM OF A RAIL SERVICE CAR CONSIDERING RELIABILITY RATES AND REAL STATE

Abstract. The factors affecting the operational reliability of the assembly platform of a rail service car maintaining the repair and installation on the railways are considered in the paper. An assessment and analysis of a system of quantitative indices of reliability is performed, the methods for their separate determination by mechanical equipment and hydro and electrical equipment is described. The strategy of maintenance and repair combined with the use of methods and means of a modern diagnostic system is considered; it ensures the estimation of the object reliability during its design, operation and repair.

Keywords: assembly platform of a rail service car, operational reliability, assessment of point indices of reliability, resource probability, diagnostics, maintenance and repair strategy.

Эффективность функционирования электрифицированного железнодорожного транспорта во многом зависит и от того, насколько разрешен вопрос бесперебойной работы автомотрис и автодрезин, конечным результатом этой работы являются обеспечение графика движения поездов при оптимальных экономических показателях, определяемых повышенными показателями надежности при их проектировании, создание системы эксплуатации, обеспечивающей повышение исправности и работоспособности указанных механизмов, а также прогнозирование их состояния в заданных условиях эксплуатации.

На практике наиболее широко применяются автомотрисы типа АДМ различной модификации, выпускаемые с 1960 – 70 гг. Тихорецким машиностроительным заводом им. В. В. Воровского, используемые при строительстве, монтаже, обслуживании и ремонте устройств контактной сети, устройств СЦБ и связи [1].

Длительный опыт эксплуатации автомотрис и автодрезин показывает, что основными причинами отказов и потери работоспособности являются появление трещин в местах сварных швов, деформации, погнутостей в металлоконструкциях рам и рычагов в результате механических перегрузок, вибраций и усталостных явлений ≈ 13 %; работа гидроцилиндров рывками, недержание составных частей монтажной площадки (МП) в рабочем положении ≈ 11 %; нагрев червячного редуктора ≈ 5 %; заедание роликов в опорно-поворотном устройстве ≈ 3 %; перегорание и короткое замыкание обмоток исполнительных электродвигателей в результате перегрузок и электродинамических явлений и вибраций ≈ 15 %; повреждения системы управления приводами, изоляции электрооборудования и электропроводки ≈ 6 % и пр.

Несмотря на то, что в настоящее время в машиностроении появились новые конструкции, выдерживающие большие механические перегрузки, имеющие повышенные несущие способности при колебаниях температуры и вибрации, предложены современные виды гидрооборудования, выдерживающие ударные перегрузки давления, а также электропрочные электромеханические узлы. В то же время за длительное время в процессе эксплуатации подвижные объекты типа МП, состоящие из сборочных единиц совокупности механических, гидравлических и электрических узлов, подвергаются воздействию множества случайных факторов, по-разному влияющих на их техническое состояние. Многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на МП приводит к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации даже однотипные узлы имеют различные технические состояния [1, 2, 5]. В связи с этим существующая система наработки или календарный срок службы не могут характеризовать однозначное состояние каждого узла МП. Надежность МП еще не отвечает полностью современным требованиям, что нередко приводит к срыву монтажных и ремонтных работ.

По состоянию на 2019 г. расходы на техническое обслуживание и ремонт самоходного подвижного состава (ССПС) АО «O'zbekiston temir yollari» составляют более 11 % эксплуатационных расходов. Известно, что средства, затрачиваемые на ремонт и восстановление ССПС, в течение срока его службы значительно больше его первоначальной стоимости [6, 7]. Поэтому исследования, направленные на совершенствование методов повышения качества проектирования, изготовления и эксплуатационной надежности путем применения новой системы технического обслуживания и ремонта, совмещаемой с функциональным диагностированием, являются важными и актуальными. Таким образом, чтобы обеспечить принцип соответствия процесса эксплуатации монтажной площадки его техническому состоянию, необходим системный подход раздельной оценки надежности каждого вида оборудования и соответственно системы технического обслуживания и ремонта с учетом результатов использования методов и средств диагностирования.

Такая стратегия эксплуатации самоходного подвижного состава позволит поддерживать надежность монтажной площадки на уровне новых жестких требований к устанавливаемым показателям при существенном снижении затрат.

Приведем примеры расчета и сопоставительной оценки надежности составных узлов механического и отдельно гидравлического оборудования монтажной площадки, приводимых в движение исполнительным трехфазным асинхронным электродвигателем, питание которого осуществляется синхронным генератором [2, 3, 8].

Работа по определению оценок показателей надежности выполнялась по согласованию с головной организацией в лице отдела механизации работ технического обслуживания и ремонта «O'zbekiston temir yollari» в течение 2018 – 2020 гг. в соответствии с ГОСТ 17510-72 и ГОСТ 17509-72. План наблюдения выбран $[N, U, L_0]$, монтажных площадок $N = 50$.

После отказа изделия новыми не заменялись. Общий пробег автотомтрис составляет $L_0 = 200 \cdot 10^3$ км. За рабочий пробег отказали верхние и нижние рамы, червячное колесо редуктора, появились трещины в металлоконструкции $d_p = 12$; по системе гидро- и электрооборудования наблюдались неудержание составных частей площадки в рабочем положении, повреждение электродвигателя поворота площадки, электрических проводов в местах заделки, выход из строя изоляции электродвигателя насоса гидравлики, всего $d_{21-эл} = 23$. Нарботки пробегов сварочным узлом по механическому, гидро- и электрооборудованию соответственно приведены в таблице.

Нарботки пробегов сварочным узлом по различным видам оборудования

Нарботки пробегов по механическому оборудованию, км	140,3; 82;80; 104;94; 98; 110; 142; 101; 168,6; 170,4; 181,7	$\Sigma t = 1472$
Нарботки пробегов по гидро- и электрооборудованию, км	51;78; 93; 101; 103; 111; 121; 127; 131; 132; 148; 151; 157; 163; 171; 174; 178; 180; 182; 193; 195; 197	$\Sigma t = 3267$

Учитывая, что наработки до отказа подчинены экспоненциальному закону распределения согласно ГОСТ 17509-72 [3], определим отдельно для сборочных единиц механического оборудования L_{cp} – среднюю наработку до отказа; $P(l)$ – вероятность безотказной работы при $l = 400 \cdot 10^3$ км; интенсивность отказа $\lambda(l)$, гамма-процентные ресурсы для $\gamma = 90$.

Найдем оценку параметра распределения $\hat{\lambda}$, 1/км. Поскольку для экспоненциального закона $\hat{\lambda} = \lambda = \text{const}$, это будет также интенсивность отказов. По данным таблицы 1 приложения 1 к ГОСТ 17509-72 [3] для плана $[N, U, L_0]$ при $d = d_p$

$$\hat{\lambda} = \frac{d}{\sum_{i=1}^d l_i + (N - d)L_0}; \quad (1)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{12}{[1472 + (50 - 12) \cdot 200] \cdot 10^3} = 1,32 \cdot 10^{-6} \text{ 1/км}.$$

Определим двусторонние доверительные границы для $\hat{\lambda}$ с доверительной вероятностью $\beta = 0,9$. Для плана $[N, U, L_0]$ по формулам таблицы 1 приложения 1 к ГОСТ 17509-72 имеем: нижняя граница –

$$\lambda_n = \frac{\hat{\lambda} N \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2d}^2}{d \left(2N - d + \frac{1}{2} \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2d}^2 \right)}; \quad (2)$$

$$\lambda_n = \frac{1,32 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10,9}{12(2 \cdot 50 - 12 + \frac{1}{2} \cdot 10,9)} = \frac{719,4 \cdot 10^{-6}}{1121,4} = 0,642 \cdot 10^{-6} \text{ 1/км}.$$

верхняя граница –

$$\lambda_b = \frac{\hat{\lambda} N \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2d}^2}{d \left(2N - d + \frac{1}{2} \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2d}^2 \right)}; \quad (3)$$

$$\lambda_b = \frac{1,32 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 31,4}{12(2 \cdot 50 - 12 + \frac{1}{2} \cdot 31,4)} = \frac{2072,4 \cdot 10^{-6}}{1244,4} = 1,665 \cdot 10^{-6} \text{ 1/км}.$$

где значение $\chi^2_{\frac{1-\beta}{2}, 2d} = 10,9$ и $\chi^2_{\frac{1+\beta}{2}, 2d} = 31,4$ находим из работы [5].

Получаем $\lambda_n = 0,642 \cdot 10^{-6}$ и $\lambda_b = 1,665 \cdot 10^{-6} \text{ 1/км}$, т. е. с вероятностью 0,9 интервал $(0,642 \cdot 10^{-6}; 1,665 \cdot 10^{-6} \text{ 1/км})$ покрывает истинные значения параметра $\hat{\lambda}$.

Расчет точечной оценки среднего значения наработки до отказа осуществляется по формулам таблицы 1 приложения 2 к ГОСТ 17509-72 [3]:

$$L_{cp} = \frac{1}{\hat{\lambda}}; \quad (4)$$

$$L_{cp} = \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{1,32 \cdot 10^{-6}} = 7,57 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

Нижний и верхний доверительные пределы средней наработки до отказа:

$$L_{cp.n.} = \frac{1}{\lambda_g}; \quad (5)$$

$$L_{cp.n.} = \frac{1}{1,665 \cdot 10^{-6}} = 0,600 \cdot 10^{-3} \text{ км;}$$

$$L_{cp.b.} = \frac{1}{\lambda_n}; \quad (6)$$

$$L_{cp.b.} = \frac{1}{\lambda_n} = \frac{1}{0,642 \cdot 10^{-6}} = 1,557 \cdot 10^{-3} \text{ км.}$$

Определим вероятность безотказной работы за пробег $l = 400 \cdot 10^3$ по формулам таблицы 1 приложения 2 к ГОСТ 15709-72 [3]:

$$P(l) = e^{-\hat{\lambda}l}; \quad (7)$$

$$P(l) = e^{-1,32 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 10^3} = 0,58.$$

Двусторонние доверительные границы для $P(l)$ можно определить, используя найденные значения λ_b и λ_n :

$$P(l)_g = e^{-\lambda_n l} = e^{-0,600 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 10^3} = 0,78,$$

$$P(l)_n = e^{-\lambda_g l} = e^{-1,557 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 10^3} = 0,53.$$

Определим 90 %-ный ресурс ($\gamma = 90 \%$), по формуле таблицы 1 приложения 2 к ГОСТ 15709-72:

$$L_\gamma = \frac{1}{\hat{\lambda}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right), \quad (8)$$

$$L_\gamma = \frac{1}{1,82 \cdot 10^{-6}} \left(-\ln \frac{90}{100} \right) = 79,8 \cdot 10^3 \text{ км}$$

т. е. 90 % рам имеют ресурс не менее $79,8 \cdot 10^3$ км.

Двусторонние доверительные границы 90 %-ного ресурса:

$$L_{\gamma_n} = \frac{1}{\lambda_b} (-\ln 0,9) = \frac{1}{1,665 \cdot 10^{-6}} (-\ln 0,9) = 63,3 \text{ км,}$$

$$L_{\gamma_b} = \frac{1}{\lambda_n} (-\ln 0,9) = \frac{1}{0,642 \cdot 10^{-6}} (-\ln 0,9) = 164,1 \text{ км.}$$

Далее осуществим расчет и оценку показателей надежности гидро- и электрического оборудования (ТЭО) МП по данным таблицы.

Интенсивность отказа, при $d' = d_{21-эл}$:

$$\hat{\lambda}' = \frac{d'}{\sum_{i=1}^d l_i + (N - d')L_0}, \quad (9)$$

$$\hat{\lambda}' = \frac{23}{[3267 + (50 - 23)200] \cdot 10^3} = 2,65 \cdot 10^{-6} \text{ 1/км.}$$

Двусторонние доверительные границы для $\hat{\lambda}'$ с доверительной вероятностью $\beta = 0,9$ по гидро- и электрическому оборудованию МП:

нижняя граница –

$$\lambda'_n = \frac{\lambda' N \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2d}^2}{d \left(2N - d' + \frac{1}{2} \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2d}^2 \right)}, \quad (10)$$

$$\lambda'_n = \frac{2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10,9}{23(2 \cdot 50 - 23 + \frac{1}{2} \cdot 10,9)} = 0,762 \cdot 10^{-6} \text{ 1/км.}$$

верхняя граница –

$$\lambda'_b = \frac{\lambda' N \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2d}^2}{d \left(2N - d' + \frac{1}{2} \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2d}^2 \right)}, \quad (11)$$

$$\lambda'_b = \frac{2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 31,4}{23(2 \cdot 50 - 23 + \frac{1}{2} \cdot 31,4)} = 1,951 \cdot 10^{-6} \text{ 1/км.}$$

Рассчитанные $\lambda'_n = 0,762 \cdot 10^{-6}$ и $\lambda'_b = 1,951 \cdot 10^{-6}$ покрывают истинные значения параметра $\hat{\lambda}'$ с вероятностью $\gamma = 0,9$, неизвестный параметр $\hat{\lambda}'$.

Точечная оценка среднего значения наработки ГЭО МП до отказа определяется по таблице 1 приложения 2 к ГОСТ 17509-72 [3]:

$$L'_{cp} = \frac{1}{\hat{\lambda}'}, \quad (12)$$

$$L'_{cp} = \frac{1}{2,65 \cdot 10^{-6}} = 377 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

Доверительные пределы средней наработки:

нижний –

$$L'_{cp.n} = \frac{1}{\lambda'_n} = \frac{1}{0,762 \cdot 10^{-6}} = 1312 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

верхний –

$$L'_{\text{ср.в}} = \frac{1}{\lambda'_{\text{н}}} = \frac{1}{0,762 \cdot 10^{-6}} = 1312 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

Вероятность безотказной работы ГЭО МП за пробег $l = 400 \cdot 10^3 \text{ км}$ определяем по формулам таблицы 1 приложения 2 к ГОСТ 15709-72 [3]:

$$P'(l) = e^{-\hat{\lambda}'l} = e^{-2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 10^3} = 0,998.$$

По найденным выше значениям $\lambda_{\text{в}}$, $\lambda_{\text{н}}$ найдем соответственно двусторонние доверительные границы для $P'(l)$:

$$P'(l)_{\text{в}} = e^{-\hat{\lambda}'_{\text{н}}l} = e^{-0,762 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 10^3} = 0,737;$$

$$P'(l)_{\text{н}} = e^{-\hat{\lambda}'_{\text{в}}l} = e^{-1,951 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 10^3} = 0,458.$$

Определим 90 %-ный ресурс ($\gamma = 90\%$) для ГЭО МП по формулам таблицы 1 приложения 2 к ГОСТ 15709-72:

$$L'_{\gamma} = \frac{1}{\hat{\lambda}'_{\text{н}}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right) = \frac{1}{2,65 \cdot 10^{-6}} \left(-\ln \frac{90}{100} \right) = 39,7 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

Двусторонние доверительные границы 90 %-ного ресурса:

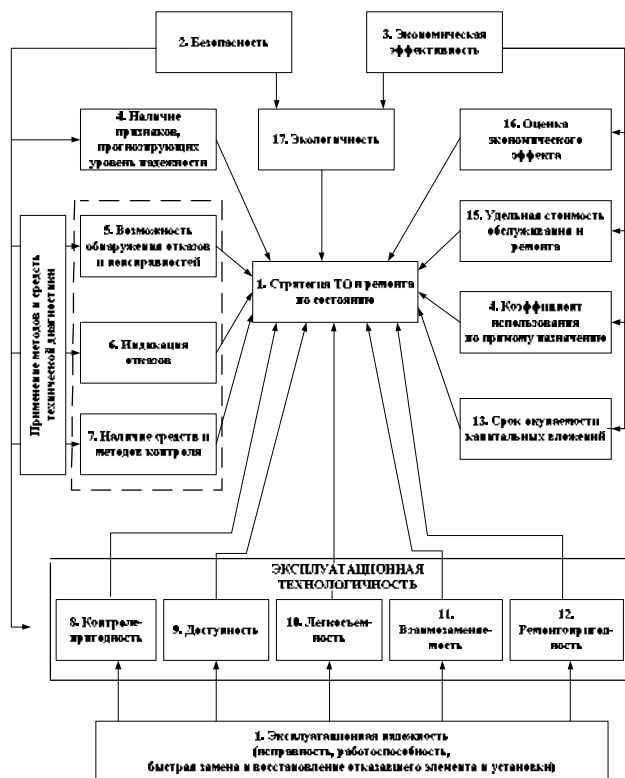
$$L'_{\gamma_{\text{н}}} = \frac{1}{\hat{\lambda}'_{\text{в}}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right) = \frac{1}{1,951 \cdot 10^{-6}} \left(-\ln \frac{90}{100} \right) = 54 \cdot 10^3 \text{ км};$$

$$L'_{\gamma_{\text{в}}} = \frac{1}{\hat{\lambda}'_{\text{н}}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right) = \frac{1}{0,762 \cdot 10^{-6}} \left(-\ln \frac{90}{100} \right) = 138 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

Сравнительная оценка и анализ показателей надежности механических и гидро- и электрических агрегатов МП показывает, что их различие обуславливается различными техническими ресурсами, свойствами материалов и условиями эксплуатации. Следовательно, целесообразно с целью снижения расходов на техническое обслуживание и ремонт ТОР проведение более совершенной диагностики [9].

Схема стратегии ТОР по реальному состоянию автотомотрисы вообще и МП в частности приведена на рисунке. Приведенная схема позволяет повысить надежность, безопасность при выполнении ремонтных работ и экономическую эффективность.

Взаимосвязи, указанные на рисунке, должны быть гарантированы в первую очередь эксплуатационной технологичностью, реализуемой путем выполнения условий 8 – 12, обеспечивающей более высокую безопасность выполняемых работ под высоким напряжением контактного провода, в стесненных условиях и дефиците времени.



Условия реализации стратегии технического обслуживания и ремонта автотомотрис с учетом норм надежности и реального состояния

Естественно, предложенную стратегию легче внедрить при обслуживании и ремонте контактной сети, у которой предусмотрено выполнение условий 4 – 12 на стадии проектирования заводского изготовления или при реконструкции.

Осуществление показателей 13 – 16 будет обеспечивать экономический эффект, связанный с оптимальной частотой проводимых профилактических осмотров. Естественно, высокая технологичность выполняемых работ при ТОР зависит и от применения системы технической диагностики [10, 11].

Заметим, что отдельные элементы диагностики давно нашли применение для контроля за состоянием наиболее уязвимых элементов автомотрис. Однако длительная эксплуатация и существующая система ТОР показывает необходимость применения методов и технической диагностики в системе проектирования, закладываемой практически в каждую схему управления гидро- и электроустановками с сохранением ТОР планово-предупредительного типа. Широкое внедрение диагностических методов и средств даст возможность вместо календарного планирования ТОР применять планирование диагностических проверок по состоянию МП [12, 13].

Изложенный выше материал может служить методологической основой составления планов совершенствования проектных и эксплуатационных работ [14] основного оборудования вообще автомотрис и монтажных площадок в частности. Обеспечить надежное функционирование как ССПС, так и его основного агрегата МП можно, используя комбинацию трех групп методов: обеспечение надежности при проектировании, при его эксплуатации и при ремонте.

Список литературы

1. Площадка монтажная автомотрисы АДМ-1: Руководство по эксплуатации 77.020-35.00.000 [Текст] / ОАО «Тихорецкий машиностроительный завод им. В. В. Воровского». – М., 2003. – 31 с.
2. ГОСТ 28001-83. Система технического обслуживания и ремонта техники. Основные положения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 23 с.
3. ГОСТ 17509-72. Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Методы определения точечных оценок показателей надежности по результатам наблюдений [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 53 с.
4. ГОСТ 27.002.-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 32 с.
5. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования [Текст] / Под ред. Ф. Л. Когана. – М.: ОРГРЭС, 1999. – 428 с.
6. Mukhamedova, Z. G. Modelling of fluctuations in the main bearing frame of a railcar / *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, Vol. VIII, no. 2, pp. 48 – 53.
7. Ilesaliev D., Merganov A. Research package efficiency general cargo, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2019, Vol. 9, Issue 1, pp. 6880 – 6884.
8. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике [Текст] / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
9. ГОСТ 27518-87. Диагностирование изделий. Общие требования [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 43 с.
10. Руководство по эксплуатации АС-АОГ-01М [Текст] / ООО Научно-производственный комплекс «Автоматизированные системы». – Ростов-на-Дону, 2014. – 23 с.
11. Воронин, А. А. Иерархические структуры [Текст] / А. А. Воронин, С. П. Мишин / ИПУ РАН. – М., 2003. – 210 с.
12. Овчаров, В. В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В. В. Овчаров. – Киев: Изд-во УСХА, 1990. – 168 с.

13. Курицкий, Б. Я. Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0 [Текст] / Б. Я. Курицкий. – СПб: BHV – Санкт-Петербург, 1997 – 384 с.

14. Anderson R., Elkins J. & Brickle B. Rail Vehicle Dynamics for the 21st Century. eds. Aref H. & Phillips J., *Mechanics for a New Millennium*, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 113 – 126.

References

1. *Rukovodstvo po ekspluatatsii 77.020-35.00.000. Plosh'adka montajnaya avtomotrisi' ADM-1* (Mounting platform for a rail service car ADM-1. Operating Instructions 77.020-35.00.000), Russia, OJSC Tikhoretsk Machine-Building Plant, 2003, 31 p.

2. *Sistema texnicheskogo obslujivaniya i remonta texniki. Osnovni'e polozeniya, GOST 28001-83* (System of equipment maintenance and repair. Basic provisions, State Standart 28001-83). Moscow, Publishing House of Standards, 1983, 23 p.

3. *Nadejnost izdeliy mashinostroeniya. Sistema sbora i obrabotki informatsii. Metodi' opredeleniya tochechni'x otsenok pokazateley nadejnosti po rezul'tatam nablyudeniya, GOST 17509-72* (Reliability of engineering products. A system for information collecting and processing, methods for determining point estimates of reliability indices based on observation results, State Standart 17509-72). Moscow: Publishing house of Standards, 1983, 53 p.

4. *Nadejnost v texnike. Osnovni'e ponyatiya. Termini' i opredeleniya, GOST 27.002.-89* (Reliability in technology. Basic concepts. Terms and definitions, State Standart 27.002.-89). Moscow: Publishing House of Standards, 1990, 32 p.

5. A collection of teaching aids for the control of electrical equipment. JSC Firm ORGRES edited by F.L. Kogan, 1999, 428 p.

6. Mukhamedova, Z. G. Modelling of fluctuations in the main bearing frame of a railcar / *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, Vol. VIII, no. 2, pp. 48 – 53.

7. Ilesaliev D., Merganov A. Research package efficiency general cargo, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2019, Vol. 9, Issue 1, pp. 6880 – 6884.

8. Hook Yu. B. *Teoriya nadejnosti v elektroenergetike* (Reliability theory in the electric power industry). Leningrad: Energoatomizdat, 1990, 208 p.

9. *Diagnostirovanie izdeliy. Obsh'ie trebovaniya., GOST 27518-87* (Diagnostics of products. General requirements, State Standart 27518-87). Moscow, Publishing House of Standards, 1988, 43 p.

10. *Rukovodstvo po ekspluatatsii AS-AOG-01M. Nauchno-proizvoditelni'y kompleks «Avtomatizirovanni'e sistemi'»* (Operation manual AC-AOG-01M. Research and Production Complex «Automated Systems»), Rostov-on-Don, 2014, 23 p.

11. Voronin A. A., Mishin S. P. *Ierarxicheskie strukturi'* (Hierarchical structures). Moscow: IPU RAS, 2003, 210 p.

12. Ovcharov V. V. *Ekspluatatsionni'e rejimi' raboti' i nepreri'vnaya diagnostika elektricheskix mashin v sel'skohozyajstvennom proizvodstve* (Exploitation modes of operation and continuous diagnostics of electrical machines in agricultural production). Kiev: USHA publ., 1990, 168 p.

13. Kurickij B. Ya. *Poisk optimalni'x resheniy sredstvami EXCEL 7.0* (Search for optimal solutions using EXCEL 7.0). Saint-Petersburg: BHV, 1997, 192 p.

14. Anderson R., Elkins J. & Brickle B. Rail Vehicle Dynamics for the 21st Century. eds. Aref H. & Phillips J., *Mechanics for a New Millennium*, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 113 – 126.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мухамедова Зиёда Гафурджановна

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашиИТ).

Мирабадский район, ул. Адилходжаева, д. 1, г. Ташкент, 100067, Республика Узбекистан.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Mukhamedova Ziyoda Gafurdjanovna

Tashkent Institute of Engineers of Railway Transport (TIERT).

Mirabad district, Adilhodjaev st., 1, Tashkent, 100067, Uzbekistan.

Кандидат технических наук, докторант кафедры
«Транспортная логистика и сервис», ТашИИТ.
Тел.: +9989 (90) 329-83-00.
E-mail: mziyoda@mail.ru

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the de-
partment «Transport Logistic and Service», TIERT.
Phone: +9989 (90) 329-83-00.
E-mail: mziyoda@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Мухамедова, З. Г. Совершенствование принци-
пов проектирования оборудования монтажной пло-
щадки автотранспорта с учетом норм надежности и
реального состояния / З. Г. Мухамедова // Известия
Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. –
Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 83 – 91.

Mukhamedova Z. G. Improving the design concepts
of equipment for the assembly platform of a rail service
car considering reliability rates and real state. Journal of
Transsib Railway Studies, 2020, no. 1 (41), pp. 83 – 91
(In Russian).

УДК 629.4.016

В. О. Носков, А. К. Белоглазов, Н. А. Белоглазова

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск,
Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ОБОБЩЕННЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ТЕПЛОВОЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. В статье речь идет о технико-экономических показателях работы грузовых тепловозов на полигонах ОАО «РЖД». В большей степени уделено внимание таким показателям, как масса поезда, расход топлива, техническая и участковая скорости. Анализ технико-экономических показателей представлен за период с 2010 по 2019 г. В статье на основе анализа технико-экономических показателей в режиме реальной эксплуатации грузовых тепловозов представлен расчет безразмерных коэффициентов массы поезда, эффективного использования топлива, участковой и технической скоростей. Представленный расчет полно характеризует как степень использования технико-экономических характеристик тепловозов по мощности и по времени, так и эффективность системы организации их эксплуатации. Знание режимов работы дизель-генераторных установок тепловозов в поездной работе является исходным материалом для анализа технических характеристик силового оборудования локомотивов и выработки рекомендаций по их оптимизации применительно к условиям эксплуатации.

Ключевые слова: масса поезда, расход топлива, коэффициент участковой скорости, коэффициент технической скорости, показатели использования тепловозов.

Vitaly O. Noskov, Anatoliy K. Beloglazov, Nataliya A. Beloglazova

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

APPLICATION OF METHODOLOGY OF GENERALIZED TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF DIESELS WORK IN OPERATION

Abstract. This article is about technical and economic indicators of the operation of freight locomotives at the ranges of Russian Railways. The most attention is paid to such indicators as train mass, fuel consumption, technical and district speed. There is an analysis of technical and economic indicators during the period from 2010 till 2019. Based on the analysis of technical and economic indicators in the real mode of operation of freight diesel locomotives it's presented calculation of dimensionless train mass coefficients, fuel efficient use, district and technical speeds. The presented calculation fully characterizes as well using degree of technical and economic characteristics of diesel locomotives in of power and time as the effectiveness of system organization in their operation. To know the operating modes of diesel-generator sets of diesel locomotives in train work is source material for the analysis of technical characteristics of locomotive power equipment and making recommendations on their optimization in relation to operating conditions

Keywords: Train weight, fuel consumption, district speed coefficient, technical speed coefficient, diesel locomotive utilization indicators

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Процесс технической эксплуатации тепловозов характеризуется большим числом факторов и показателей различной значимости: массой поезда Q ; расходом топлива B_e ; участковой и технической скоростями $V_{уч}$, $V_{техн}$; среднесуточным пробегом S ; бюджетом времени работы локомотива $T_{л}$; нагрузкой на ось вагона q ; расчетным подъемом i_p и др. [1].

Для оценки технико-экономических показателей работы тепловозов наибольший интерес представляют величины Q , B_e , $V_{уч}$, $V_{техн}$, учитывающие как технические характеристики тепловозов и вагонов, так и условия их эксплуатации [2].

Достигнутые показатели использования тепловозов подвергались статистической обработке на полигоне, включающем в себя Свердловскую, Южно-Уральскую, Западно-Сибирскую, Восточно-Сибирскую, Забайкальскую железные дороги и северные участки железной дороги Казахстана АО «Национальная компания «Казахстан темир жолы» (АО «НК«КТЖ»), примыкающие к участкам Южно-Уральской и Западно-Сибирской железных дорог.

Результаты обработки большого объема информации [3] о показателях работы тепловозов в грузовом движении в относительных единицах приведены в таблице 1. Статистическая оценка обобщенных показателей использования тепловозов 2ТЭ116У, 2ТЭ10МК, 2ТЭ25 [4 – 6] в условиях реальной эксплуатации на исследуемых железных дорогах проведена за 2010 г., принятый в качестве базового за 100 %.

По приведенным абсолютным значениям показателей оценить имеющиеся резервы их повышения, эффективность работы различных серий тепловозов на разных железных дорогах из-за неидентичности условий эксплуатации, неэквивалентности нормирующих величин довольно сложно и не всегда объективно.

Сравнительный анализ интенсивности и эффективности использования различных серий тепловозов на обширном полигоне железных дорог требует сопоставления как достигнутых показателей, так и нормативных, поскольку последние рассчитываются и устанавливаются с учетом реальных условий эксплуатации на конкретных участках железных дорог.

Таблица 1 – Показатели работы тепловозов

Год	Значения показателей, %				
	S	Q	$V_{техн}$	$V_{уч}$	g_e
2010	100	100	100	100	100
2011	98,6	99,9	100,6	99,4	101,5
2012	96,4	99,3	100,2	99,5	101,9
2013	93,8	101,1	97,9	96,7	104,3
2014	88,2	99,9	96,6	94,6	104,9
2015	87,1	99,1	95,8	93,1	105,3
2016	86,4	98,3	97,2	93,7	109,9
2017	85,6	98,8	95,8	91,5	110,5
2018	85,4	99,7	95,7	88,3	108,4
2019	85,7	100,1	96,3	89,4	106,7

Для количественного и объективного анализа удобнее использовать обобщенные комплексные относительные показатели работы тепловозов, которые соотносят достигнутые величины с возможными или расчетными. В качестве относительных безразмерных показателей для сравнения эффективности тепловозов приняты коэффициент массы поезда K_Q , коэффициент эффективного использования топлива K_{B_e} и коэффициенты технической и участковой скоростей $K_v^{(техн)}$ и $K_v^{(уч)}$ [7].

Коэффициент массы поезда определяется как отношение средней массы поезда $\bar{Q}$, рассчитанной за определенный период эксплуатации для заданного участка обслуживания отдельно в четном и нечетном направлениях по отчетным документам депо, к расчетной массе Q_p , полученной по результатам тяговых расчетов:

$$K_Q = \frac{\bar{Q}}{Q_p}. \quad (1)$$

Очевидно, параметр $\bar{Q}$ характеризует достигнутый уровень перевозочного процесса при эксплуатации локомотивов, а параметр Q_p устанавливается с учетом паспортной мощности локомотива, плана и профиля пути, установленных скоростей движения и т. д. Таким образом, можно утверждать, что коэффициент K_Q характеризует степень использования касательной мощности тепловоза с учетом условий эксплуатации и принятой на исследуемом полигоне организации перевозочного процесса.

Под коэффициентом эффективного использования топлива следует понимать отношение расхода топлива тепловозом в режиме нагрузки (режиме тяги) $B_e^{(н)}$ к суммарному расходу топлива за поездку:

$$K_{B_e} = \frac{B_e^{(н)}}{B_e^{(н)} + B_e^{(х.х)}}, \quad (2)$$

где $B_e^{(н)}$, $B_e^{(х.х)}$ – расход топлива тепловозом, достигнутый за определенный период в режиме тяги и в режиме холостого хода соответственно.

Коэффициент участковой скорости представляет собой отношение участковой скорости $v_{уч}$ к технической скорости $v_{техн}$ за тот же период и характеризует интенсивность использования тепловозов во времени при выполнении поездной работы:

$$K_v^{(уч)} = \frac{v_{уч}}{v_{техн}}. \quad (3)$$

В свою очередь, коэффициент технической скорости определяется как отношение выполненной технической скорости к графиковой скорости $v_{гр}$, установленной на участке, и характеризует в основном технические характеристики тепловозов и условия пропуска поездов на участке:

$$K_v^{(техн)} = \frac{v_{техн}}{v_{гр}}. \quad (4)$$

Таким образом, выбранные обобщенные показатели K_Q , K_{B_e} , $K_v^{(уч)}$, $K_v^{(техн)}$ [8] достаточно полно характеризуют как степень использования технико-экономических характеристик тепловозов по мощности и по времени, так и эффективность системы организации их эксплуатации.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Динамика относительных показателей за девять лет приведена на рисунке 1, из анализа которой следует, что в последние годы относительные показатели имели тенденцию к снижению, а в 2018 г. наметилась положительная динамика.

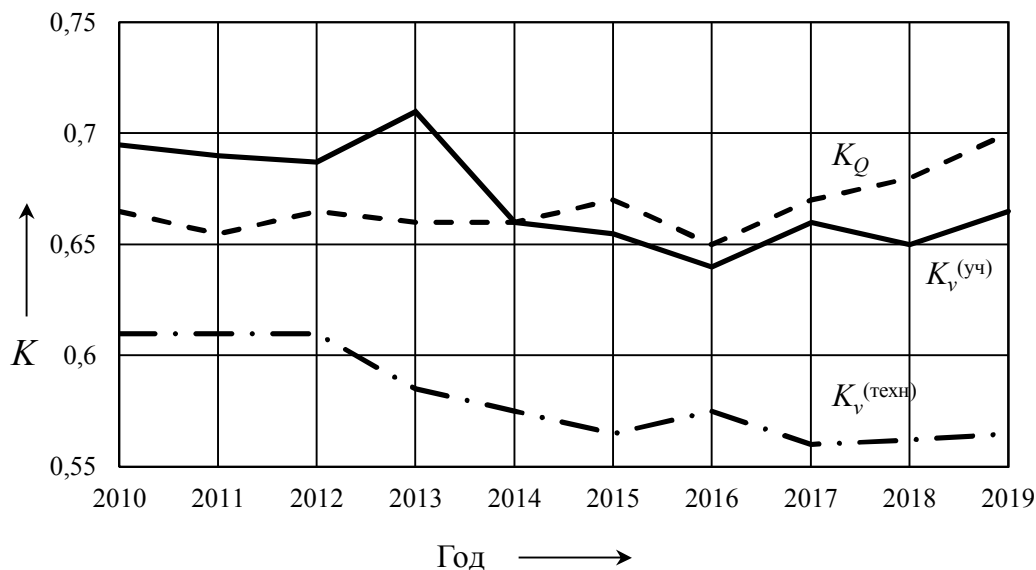


Рисунок 1 – Изменение относительных показателей использования тепловозов на исследуемом полигоне железных дорог

Определены зависимости удельного расхода топлива g_e тепловозами от коэффициентов массы поезда K_Q (рисунок 2) и участковой скорости $K_v^{(уч)}$ (рисунок 3).

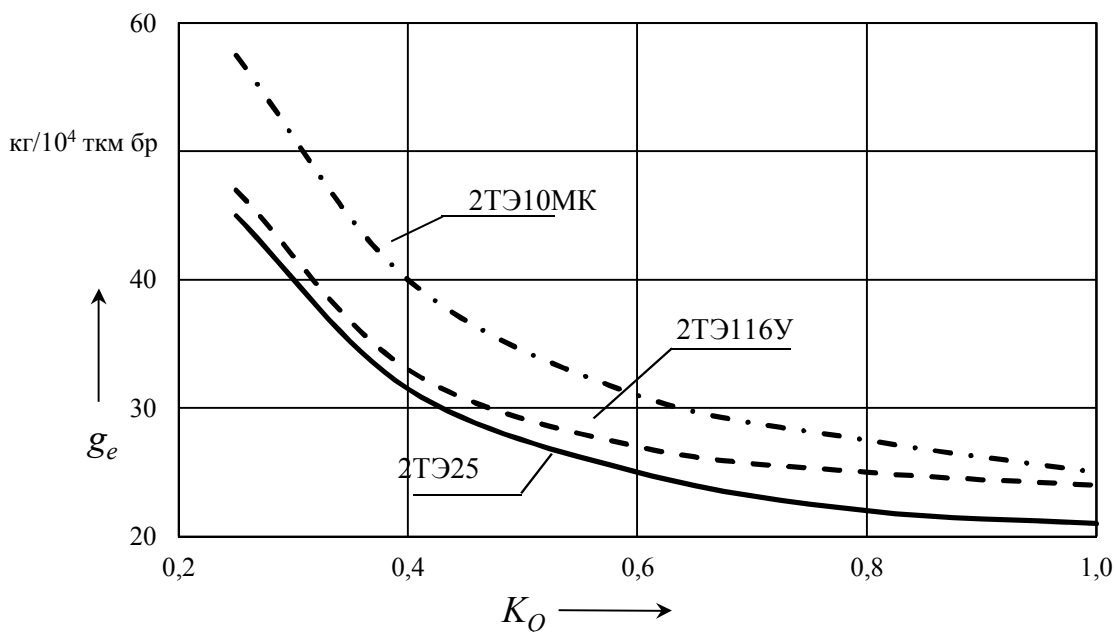


Рисунок 2 – Зависимость удельного расхода топлива от коэффициента массы поезда

Переход к относительным показателям позволяет проводить сравнительный анализ эффективности использования тепловозов различных серий на разных железных дорогах, сократить количество анализируемых показателей [9, 10].

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Значения коэффициента K не превышает 0,7, что свидетельствует о существующих резервах в повышении средней массы поезда.

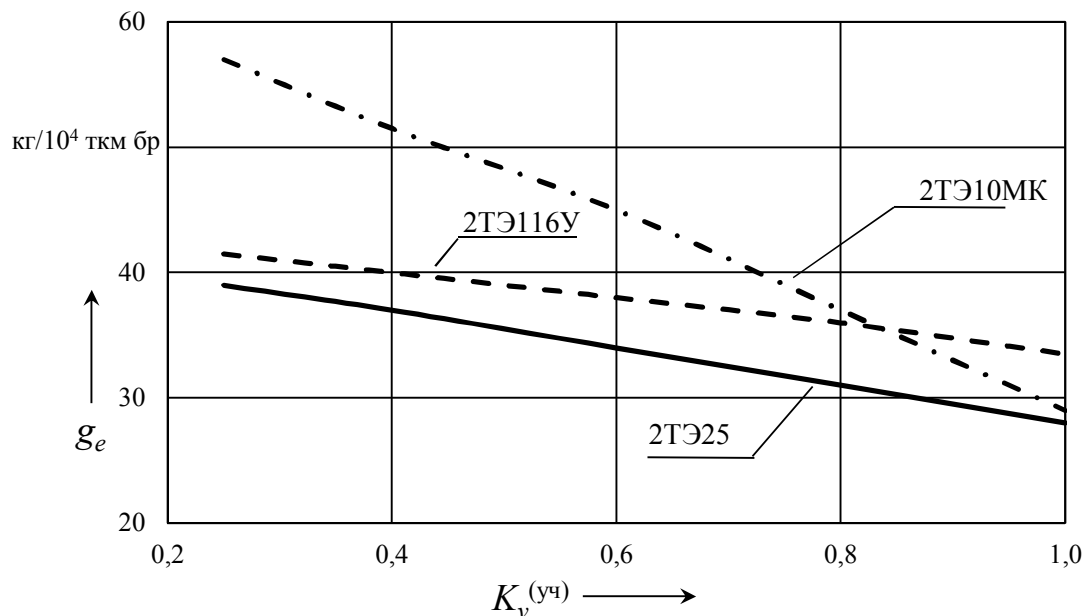


Рисунок 3 – Зависимость удельного расхода топлива от коэффициента участковой скорости

Низкое значение $K_v^{(техн)}$ обусловлено недостаточной мощностью тепловозов для реализации установленной скорости на участках Красноярской, Западно-Сибирской железных дорог. Снижение $K_v^{(уч)}$ на исследуемом полигоне железных дорог свидетельствует о недостатках в организации эксплуатации тепловозов в грузовом движении. Здесь следует отметить, что анализировать $K_v^{(уч)}$ необходимо в комплексе с $K_v^{(техн)}$, так как при низком $K_v^{(техн)}$ возможно высокое значение $K_v^{(уч)}$. Определены аналитические зависимости удельного расхода топлива g_e для тепловозов серий 2ТЭ10МК, 2ТЭ116У и 2ТЭ25 от коэффициентов массы поезда K_o и участковой скорости $K_v^{(уч)}$, получены уравнения регрессии (таблица 2), теснота корреляционных связей оценена коэффициентом r или индексом r_i корреляции.

Таблица 2 – Корреляционные зависимости расхода топлива от коэффициентов

Факторы	Серия тепловоза	Уравнение регрессии	Коэффициент и индекс корреляции
g_e, K_o	2ТЭ10МК	$g_e = 14,38 + \frac{9,82}{K_o}$	$r_i = 0,65$
	2ТЭ116У	$g_e = 13,10 + \frac{8,85}{K_o}$	$r_i = 0,52$
	2ТЭ25	$g_e = 14,5 + \frac{6,72}{K_o}$	$r_i = 0,53$
$g_e, K_v^{(уч)}$	2ТЭ10МК	$g_e = 43,8 - 19,3 K_v^{(уч)}$	$r = 0,63$
	2ТЭ116У	$g_e = 32,78 - 6,49 K_v^{(уч)}$	$r = 0,45$
	2ТЭ25	$g_e = 31,54 - 7,40 K_v^{(уч)}$	$r = 0,48$

Анализ проведенных исследований и полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. С помощью предложенных относительных показателей интенсивности использования локомотивов можно производить сравнительный анализ эффективности эксплуатации различных серий тепловозов на широком полигоне железных дорог и сократить число анализируемых показателей.

2. Установлена корреляционная связь между обобщенными показателями и удельным расходом топлива. С увеличением K_Q и $K_v^{(yч)}$ удельный расход топлива на объем выполненной перевозочной работы снижается. У тепловозов 2ТЭ10МК, имеющих меньшую мощность дизель-генераторной установки, эта зависимость изменяется более резко по сравнению с 2ТЭ116У и 2ТЭ25.

3. Повышение массы поезда, улучшение системы организации эксплуатации тепловозов и движения поездов являются важнейшим резервом решения задачи по снижению расхода топлива на перевозочную работу.

Список литературы

1. Неревяткин, К. А. Совершенствование методики определения технических характеристик проектируемых локомотивов на основе математического моделирования [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Неревяткин Константин Анатольевич. – Москва, 1998. – 165 с.
2. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf, свободный.
3. ОАО «РЖД»: Годовой отчет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ar.rzd.ru/ru/>, свободный.
4. Тепловоз 2ТЭ116 [Текст] / С. П. Филонов, А. И. Гибалов и др. – М.: Транспорт, 1996. – 334 с.
5. Тепловозы типа ТЭ10: Руководство по эксплуатации и обслуживанию [Текст] / С. П. Филонов, А. Е. Заборов и др. – М.: Транспорт, 1985. – 421 с.
6. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25А. Ч.1: Техническое описание 2ТЭ25А РЭ [Текст]: Руководство по эксплуатации / ЗАО УК «БМЗ». – Брянск, 2009 – 199 с.
7. Моделирование процесса технической эксплуатации и формирования режимов нагрузки и прогрева дизель-генераторных установок тепловозов [Текст] / В. В. Молчанов, В. О. Носков и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск – 2017. – № 1 (29). – С. 9 – 16.
8. Методы оценки технического состояния, эксплуатационной экономичности и экологической безопасности дизельных локомотивов [Текст] / А. И. Володин, Е. И. Сковородников и др. // Под ред. А. И. Володиной. – М.: Желдориздат, 2007. – 264 с.
9. Асабин, В. В. Совершенствование процесса эксплуатации тепловоза на основе последовательного анализа исполненных машинистом режимов дизель-генераторной установки [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Асабин Виталий Викторович. – Самара, 2009. – 201 с.
10. Фурман, В. В. Совершенствование законов регулирования силовых установок тепловозов с целью повышения их технико-экономических характеристик [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Фурман Виктор Владимирович. – Самара, 2011. – 156 с.

References

1. Nerevyatkin K. A. *Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya tekhnicheskikh harakteristik proektiruemyh lokomotivov na osnove matematicheskogo modelirovaniya* (Improving the methodology for determining the technical characteristics of designed locomotives based on mathematical modeling). Doctor's thesis, Moscow, MIIT, 1998, 165 p.
2. *Energeticheskaja srstrategija holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda I na perspektivu do 2030 goda* (The energy strategy of the holding «Russian Railways» for the period until 2015 and for the future until 2030), Acces mode: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf, free.
3. *OAO «RZhD»: Godovoj otchet* (Russian Railways OJSC: Annual Report), Access mode: <http://ar.rzd.ru/ru/>, free.
4. Filonov S. P., Gibalov A. I., etc. *Teplovoz 2TЭ116* (Diesel locomotive 2ТЭ116). Moscow: Transport, 1996, 334 p.
5. Filonov S. P., Zaborov A. E., etc. *Teplovozy tipa TЭ10: Rukovodstvo po jekspluatacii i obsluzhivaniju* (Diesel locomotives of type ТЭ10: Operation and maintenance manual). Moscow: Transport, 1985, 421 p.

6. *Magistralnyi gruzuvoj dvuhsekcionnyj teplovoz 2TЭ25A. Ch 1: Tehnicheskoe opisanie 2TЭ25A RJe: Rukovodstvo po jekspluatacii* (Main freight two-section diesel locomotive 2TЭ25A. Pat 1: Technical description 2TЭ25A RE: Operation manual). Bryansk: Management Company BMZ, 2009, 199 p.

7. Molchanov V. V., Noskov V. O., Chetvergova V. A., Chulkov A. V. Modeling the process of technical operation and the formation of loading and heating modes of diesel-generator sets of diesel locomotives [Modelirovanie processa tekhnicheskoy ekspluatacii i formirovaniya rezhimov nagruzki i progrevaz dizel'-generatornykh ustanovok teplovozov]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1 (29), pp. 9 – 16.

8. Volodin A. I., Skovorodnikov E. I., Chulkov A. V., Ovcharenko S. M. *Metody ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya, ekspluatsionnoy ekonomichnosti i ekolo-gicheskoy bezopasnosti dizel'nykh lokomotivov* (Methods for assessing the technical condition, operational economy and environmental safety of diesel locomotives). Moscow: ООО «Zeldorizdat», 2007, 264 p.

9. Asabin V. V. *Sovershenstvovanie processa ekspluatacii teplovoza na osnove posledovatel'nogo analiza ispolnennykh mashinistom rezhimov dizel'-generatornoy ustanovki* (Improving the operation process of a locomotive based on a sequential analysis of the diesel generator set modes performed by the driver). Doctor's thesis, Samara, SSTU, 2009, 201 p.

10. Furman V. V. *Sovershenstvovanie zakonov regulirovaniya silovykh ustanovok teplovozov s cel'yu povysheniya ih tekhniko-ekonomicheskikh harakteristik* (Improving the laws of regulation of power plants of heat carriers in order to increase their technical and economic characteristics). Doctor's thesis, Samara, SSTU, 2011, 156 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Носков Виталий Олегович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Преподаватель кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7-923-690-47-06.

E-mail: Vitalik_noskov@mail.ru

Белоглазов Анатолий Кузьмич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Белоглазова Наталья Анатольевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и компьютерная графика», ОмГУПС.

Тел.: +7-905-923-10-50.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Носков, В. О. Применение методики обобщенных технико-экономических показателей работы тепловозов в эксплуатации [Текст] / В. О. Носков, А. К. Белоглазов, Н. А. Белоглазова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 91 – 97.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Noskov Vitaly Olegovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st, Omsk, 644046, the Russian Federaton.

Senior lecturer of the department «Locomotive», OSTU.

Phone: +7-923-690-47-06.

E-mail: Vitalik_noskov@mail.ru

Beloglazov Anatoliy Kuzmich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st, Omsk, 644046, the Russian Federaton.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Locomotive», OSTU.

Beloglazova Nataliya Anatolevna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st, Omsk, 644046, the Russian Federaton.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Locomotive», OSTU.

Phone: +7-905-923-10-50.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Noskov V. O., Beloglazov A. K., Beloglazova N. A. Application of methodology of generalized technical and economic indicators of diesels work in operation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 1 (41), pp. 91 – 97 (In Russian).

УДК 621.331

М. М. Никифоров

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ

Аннотация. В настоящей статье представлено обоснование необходимости изменения методики определения абсолютного и относительного значений потерь электроэнергии на тягу поездов. Показано, что при определении относительного значения потерь необходимо учитывать объем энергии рекуперации, возвращаемой в контактную сеть по счетчикам электроподвижного состава. Для повышения точности определения абсолютного значения потерь необходимо учитывать расход электроэнергии на нужды системы тягового электроснабжения для профилактического подогрева и плавки гололеда на проводах контактной сети, а также для обеспечения сохранного напряжения на малодействительных электрифицированных участках железных дорог. Предложена формула для оценки составляющей потерь электроэнергии в контактной сети от протекания энергии рекуперации с учетом изменений в методологии определения потерь электроэнергии на тягу поездов.

Ключевые слова: расход электроэнергии, тяга поездов, рекуперация, потери электроэнергии, небаланс, технологический расход.

Mikhail M. Nikiforov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

IMPROVEMENT OF METHODOLOGY FOR DETERMINATION OF ELECTRIC POWER LOSSES ON TRAIN TRACTION

Abstract. This article presents the rationale for the need to change the methodology for determining the absolute and relative values of energy losses to train traction. It is shown that when determining the relative value of the losses, it is necessary to take into account the amount of recovery energy returned to the contact network by electric rolling stock meters. To increase the accuracy of determining the absolute value of losses, it is necessary to take into account the energy consumption for the needs of the traction power supply system for prophylactic heating and smelting of ice on the wires of the contact network, as well as to ensure uninterrupted voltage on inactive electrified sections of railways. A formula is proposed for estimating the component of electric power losses in the contact network from the flow of energy recovery taking into account changes in the methodology for determining the losses of electric power for train traction.

Keywords: power consumption, traction of trains, recovery, electric energy losses, imbalance, technological power consumption.

Обеспечение контроля эффективности использования электроэнергии на тягу поездов является одной из основных задач, решение которых позволяет организовывать работу по энергосбережению в ОАО «Российские железные дороги». В качестве одного из главных критериев оценки энергоэффективности электротяги поездов принят небаланс электроэнергии на тягу поездов, представляющий собой совокупность всех составляющих потерь электроэнергии на тягу поездов.

Таким образом, потери электроэнергии на тягу поездов (небаланс) представляют собой разницу между объемом поступления (поставки) электроэнергии в контактную сеть (КС) через тяговые подстанции (ЭЧЭ) и объемом ее расхода всеми потребителями от КС, точками поставки для которых являются эти ЭЧЭ, по показаниям соответствующих приборов учета потребителей, в том числе для электроподвижного состава (ЭПС) за вычетом объема электроэнергии, возвращенной ЭПС в контактную сеть при применении рекуперативного торможения (далее – энергия рекуперации), и (или) объемом электроэнергии, определенным расчетным путем по данным о мощности электроустановок потребителей и продолжительности

использования этой мощности. На полигонах постоянного тока туда же относят потери в выпрямительных агрегатах ЭЧЭ.

Следует отметить, что потери электроэнергии на тягу поездов могут выражаться как в абсолютных, так и в относительных значениях.

До последнего времени во всех инструктивно-методических документах ОАО «РЖД» значения потери электроэнергии на тягу поездов (небаланс) определялись по следующим формулам.

Абсолютное значение потерь электроэнергии на тягу поездов:

$$\Delta W = (W^{\text{ЭЧЭ}} - W_{\text{возв}}^{\text{ЭЧЭ}}) - (W^{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}) - W_{\text{нетяг}}; \quad (1)$$

относительное значение потерь электроэнергии на тягу поездов:

$$\delta W = \frac{(W^{\text{ЭЧЭ}} - W_{\text{возв}}^{\text{ЭЧЭ}}) - (W^{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}})}{W_{\text{ЭЧЭ}} - W_{\text{возв}}^{\text{ЭЧЭ}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $W_{\text{ЭЧЭ}}$ – количество электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам ЭЧЭ;

$W_{\text{возв}}^{\text{ЭЧЭ}}$ – количество электроэнергии, возвращенной из контактной сети по вводам 27,5 кВ ЭЧЭ переменного тока или по вводам 10 (6) кВ выпрямительно-инверторных преобразователей ЭЧЭ постоянного тока;

$W_{\text{ЭПС}}$ – количество электроэнергии, потребленной по счетчикам ЭПС;

$W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}$ – количество рекуперируемой электроэнергии, возвращенной в контактную сеть по счетчикам ЭПС;

$W_{\text{нетяг}}$ – количество электроэнергии, отпущенной из контактной сети нетяговым потребителям (обогрев помещений постов секционирования, обогрев пассажирских вагонов на путях отстоя, питание испытательных станций ремонтных локомотивных депо).

Динамика относительных значений потерь электроэнергии на тягу поездов по сети железных дорог представлена на рисунке 1.

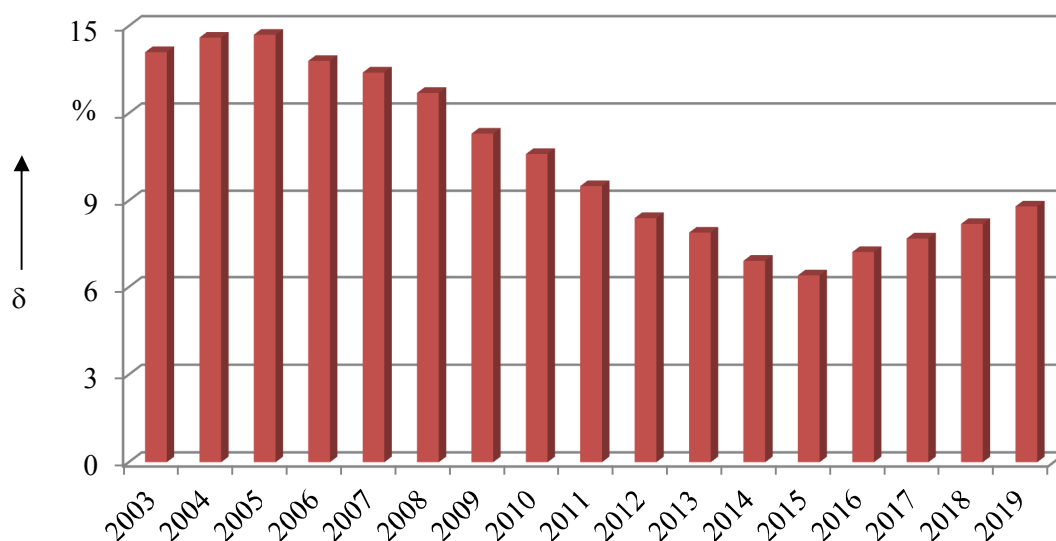


Рисунок 1 – Динамика потерь электроэнергии на тягу поездов по сети железных дорог

Учитывая, что в разные годы по сети железных дорог объем перевозочной работы может существенно изменяться, что оказывает основное влияние на объем потребления электроэнергии на тягу поездов, для оценки эффективности ее использования обычно применяют относительное значение потерь электроэнергии на тягу поездов.

Анализ данных, представленных на рисунке 1, показывает, что на сети железных дорог ведется планомерная работа по снижению уровня потерь электроэнергии. Так, если на момент образования ОАО «РЖД» в 2003 г. среднесетевой уровень потерь составлял 14,1 %, то в 2010 г. – 10,6 %, а в 2015 г. было достигнуто наименьшее значение – 6,4 %. В последующем наблюдается некоторый рост к 2019 г. до уровня 8,8 % (о возможных причинах этого далее).

Необходимо помнить о том, что на полигонах постоянного и переменного тока суммарные значения потерь существенно различаются в силу специфики систем тягового электрообеспечения.

Так, на постоянном токе фактические значения потерь в 2019 г. на разных дорогах находились в диапазоне от 5,8 до 23,3 % при среднем значении по сети дорог 14,4 %, тогда как расчетный диапазон технологических потерь электроэнергии на полигоне постоянного тока составляет 5,4 – 10,4 % [1].

Аналогично для полигона переменного тока фактические значения потерь в 2019 г. на разных дорогах находились в диапазоне от 2,1 до 14,2 % при среднем значении по полигону переменного тока 5,3 %. При этом расчетный диапазон технологических потерь электроэнергии на полигоне переменного тока составляет 3,4 – 6,7 % [2].

Следует отметить, что формулы (1) и (2) применялись не только для определения потерь в границах полигонов постоянного и переменного тока железных дорог, но и при оценке потерь в границах участков железных дорог и при расчете влияния на уровень потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов взаимосъездов локомотивных бригад смежных железных дорог [3].

В конце 2016 г. началось регулярное движение на Московском центральном кольце (МЦК), которое характеризуется тем, что оно является обособленным участком железной дороги, на котором фактически отсутствуют съезды пассажирского и грузового электроподвижного состава, а обращаются только электропоезда ЭС-2Г, двигающиеся в резко переменных режимах с большим количеством остановок по достаточно сложному профилю пути [4, 5].

Отчетные данные за первые несколько месяцев эксплуатации МЦК показали, что уровень фактических потерь на данном участке существенно выше как расчетных значений технологических потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока, так и среднесетевых и даже максимальных значений потерь электроэнергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока. В то же время объем энергии рекуперации, возвращенной в контактную сеть по счетчикам ЭПС, составил в разные месяцы от 30 до 40 % от потребления электроэнергии ЭПС на тягу. В то же время количество электроэнергии, отпущенной с шин тяговых подстанций на тягу поездов, было меньше, чем потребление электроэнергии по счетчикам ЭПС. Это объясняется тем, что на подстанциях, питающих МЦК, отсутствуют выпрямительно-инверторные преобразователи, вследствие чего вся энергия рекуперации, возвращаемая в контактную сеть, потребляется смежным ЭПС [6].

Рассмотрим сложившуюся на МЦК ситуацию на простом примере. Пусть потребление электроэнергии на тягу поездов по счетчикам ЭЧЭ на некотором условном участке составляет 100 единиц, а по счетчикам ЭПС – 90 единиц и рекуперативное торможение не применяется, а выпрямительно-инверторные преобразователи на подстанциях отсутствуют. В этом случае уровень потерь электроэнергии на тягу поездов на условном участке составит 10 %. Допустим, что при сохранившемся на том же уровне потреблении электроэнергии по счетчикам ЭПС на участке стало применяться рекуперативное торможение в размере 10 единиц энергии. Тогда отпуск энергии с шин тяговых подстанций снизится на те же 10 единиц. В этом случае согласно формуле (2) относительные потери электроэнергии на тягу поездов

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

составят уже 11,1 %. Расчет уровня потерь при увеличении объема рекуперации при неизменном объеме работы и потреблении электроэнергии по счетчикам ЭПС приведен в таблице 1.

На основании выполненных расчетов и представленных в таблице 1 данных видно, что с увеличением объема возврата энергии рекуперации в контактную сеть при неизменном объеме расхода электроэнергии на тягу поездов по счетчикам ЭПС относительное значение потерь электроэнергии на тягу поездов, определенное по формуле (2), увеличивается, что противоречит физическому смыслу, так как суммарный объем используемой энергии по участку не изменяется.

Таблица 1 – Изменение относительных потерь электроэнергии на тягу поездов при увеличении доли энергии рекуперации для условного участка при неизменном расходе электроэнергии на тягу поездов по счетчикам ЭПС

Расход электроэнергии, усл. ед.		Объем энергии рекуперации, усл. ед.	Относительное значение потерь электроэнергии на тягу поездов, %
по ЭЧЭ	по ЭПС		
100	90	0	10,0
90	90	10	11,1
80	90	20	12,5
70	90	30	14,3
60	90	40	16,7
50	90	50	20,0

Рассмотрим мгновенные схемы распределения токов, а следовательно, и энергии, представленные на рисунке 2.

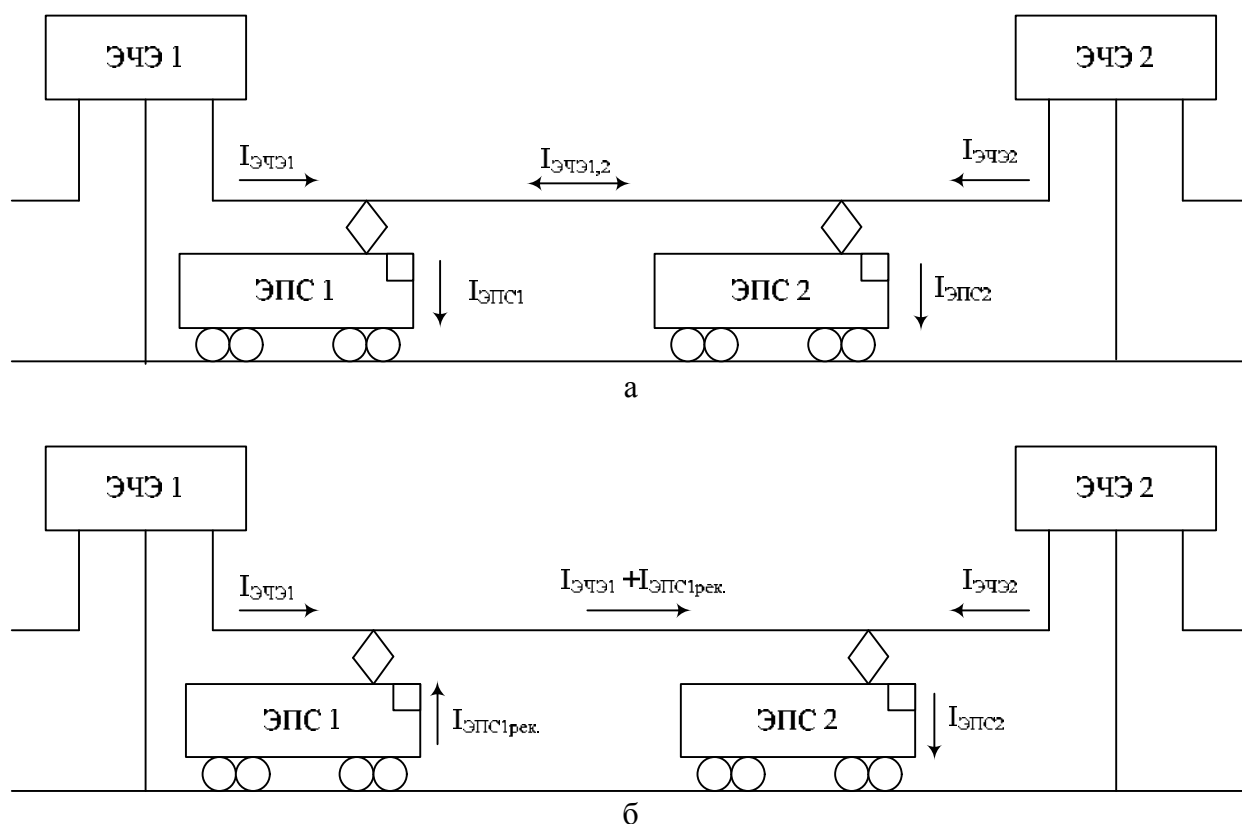


Рисунок 2 – Мгновенные схемы распределения токов на тягу поездов в границах межподстанционной зоны:
а – при отсутствии рекуперации; б – при наличии рекуперации

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для схемы, представленной на рисунке 2, а, определение относительного значения потерь электроэнергии на тягу поездов осуществляется по формуле:

$$\delta W_{\text{рис. 2, а}} = \frac{(W^{\text{ЭЧЭ1}} + W^{\text{ЭЧЭ2}}) - (W^{\text{ЭПС1}} + W^{\text{ЭПС2}})}{W^{\text{ЭЧЭ1}} + W^{\text{ЭЧЭ2}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $W^{\text{ЭЧЭ1}}$, $W^{\text{ЭЧЭ2}}$ – количество электроэнергии, отпущенной с шин тяговых подстанций соответственно ЭЧЭ1 и ЭЧЭ2;

$W^{\text{ЭПС1}}$, $W^{\text{ЭПС2}}$ – количество электроэнергии, потребленной электровозами ЭПС1 и ЭПС2.

То есть относительные потери электроэнергии на тягу поездов есть отношение разности энергии всех источников и всех потребителей к энергии всех источников, но тогда согласно этой логике для схемы, представленной на рисунке 2,б, потери определяются так:

$$\delta W_{\text{рис. 2, б}} = \frac{(W^{\text{ЭЧЭ1}} + W^{\text{ЭЧЭ2}} + W_{\text{рек.}}^{\text{ЭПС1}}) - W^{\text{ЭПС2}}}{W^{\text{ЭЧЭ1}} + W^{\text{ЭЧЭ2}} + W_{\text{рек.}}^{\text{ЭПС1}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $W_{\text{рек.}}^{\text{ЭПС1}}$ – количество электроэнергии, рекуперируемой электровозом ЭПС1.

Результаты расчета уровня потерь электроэнергии на тягу поездов по формуле (4) при изменении объема энергии рекуперации и сравнение их с результатами расчета потерь по формуле (2) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение относительных потерь электроэнергии на тягу поездов при увеличении доли энергии рекуперации для условного участка при неизменном расходе электроэнергии на тягу поездов по счетчикам ЭПС

Расход электроэнергии, усл. ед.		Объем энергии рекуперации, усл. ед.	Относительное значение потерь электроэнергии на тягу поездов, %		Погрешность определения потерь, %
по ЭЧЭ	по ЭПС		по формуле (2)	по формуле (4)	
100	90	0	10,0	10,0	0,0
90	90	10	11,1	10,0	10,0
80	90	20	12,5	10,0	20,0
70	90	30	14,3	10,0	30,0
60	90	40	16,7	10,0	40,0
50	90	50	20,0	10,0	50,0

Таким образом, из данных таблицы 2 видно, что при расчете по формуле (4) для условного участка, на котором выполняется один и тот же объем перевозочной работы и расход электроэнергии по счетчикам ЭПС не изменяется, с увеличением доли энергии рекуперации уровень потерь остается неизменным. Тогда в общем виде расчет относительного значения потерь электроэнергии на тягу поездов должен выполняться по новой формуле:

$$\delta W^{\text{new}} = \frac{(W^{\text{ЭЧЭ}} - W_{\text{возв}}^{\text{ЭЧЭ}}) - (W^{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек.}}^{\text{ЭПС}})}{W^{\text{ЭЧЭ}} - W_{\text{возв}}^{\text{ЭЧЭ}} + W_{\text{рек.}}^{\text{ЭПС}}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Оценим влияние объема энергии рекуперации на уровень относительных потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов по сети железных дорог. Согласно статистическим данным ОАО «Российские железные дороги» объем энергии рекуперации, учтенной по счетчикам ЭПС, увеличился с 906 млн кВт·ч в год в 2003 г. до 2621 млн кВт·ч в год в 2019 г.

При этом необходимо помнить о том, что в статистических данных о расходе электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций уже учтен возврат электроэнергии по выпрямительно-инверторным агрегатам и вводам 27,5 кВ, так как на всей сети железных дорог в настоящее время применяется сальдированный учет электроэнергии [7].

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Результаты пересчета уровня потерь электроэнергии на тягу поездов за 2003 – 2019 гг. на сети железных дорог ОАО «Российские железные дороги» представлены в таблице 3. Как видно из данных таблицы 3, учет энергии рекуперации при расчете относительных потерь по формуле (5) приводит к снижению их значений (рисунок 3) и чем больше объем энергии рекуперации на сети железных дорог, тем выше погрешность определения относительных потерь по формуле (2).

Таблица 3 – Оценка относительных потерь электроэнергии на тягу поездов с учетом энергии рекуперации

Год	Расход электроэнергии, млн кВт·ч		Объем энергии рекуперации, млн кВт·ч	Уровень относительных потерь, %		Погрешность определения потерь, %
	по ЭЧЭ	по ЭПС		по формуле (2)	по формуле (5)	
2003	34 128,30	30 222,21	906	14,1	13,7	2,6
2004	36 195,80	31 830,21	919	14,6	14,2	2,5
2005	36 790,20	32 255,04	873	14,7	14,4	2,3
2006	38 326,00	33 881,01	844	13,8	13,5	2,2
2007	40 406,00	35 900,60	909	13,4	13,1	2,2
2008	40 693,90	36 472,77	947	12,7	12,4	2,3
2009	36 665,20	33 449,03	927	11,3	11,0	2,5
2010	38 588,50	35 576,12	1078	10,6	10,3	2,7
2011	40 201,50	37 660,36	1278	9,5	9,2	3,1
2012	41 038,30	39 154,08	1563	8,4	8,1	3,7
2013	40 102,50	38 616,40	1682	7,9	7,6	4,0
2014	41 075,80	40 186,57	1945	6,9	6,6	4,5
2015	40 192,90	39 706,55	2086	6,4	6,1	4,9
2016	40 875,40	40 083,37	2151	7,2	6,8	5,0
2017	42 965,50	42 027,16	2370	7,7	7,3	5,2
2018	44 405,90	43 239,62	2475	8,2	7,8	5,3
2019	44 553,80	43 254,07	2621	8,8	8,3	5,6

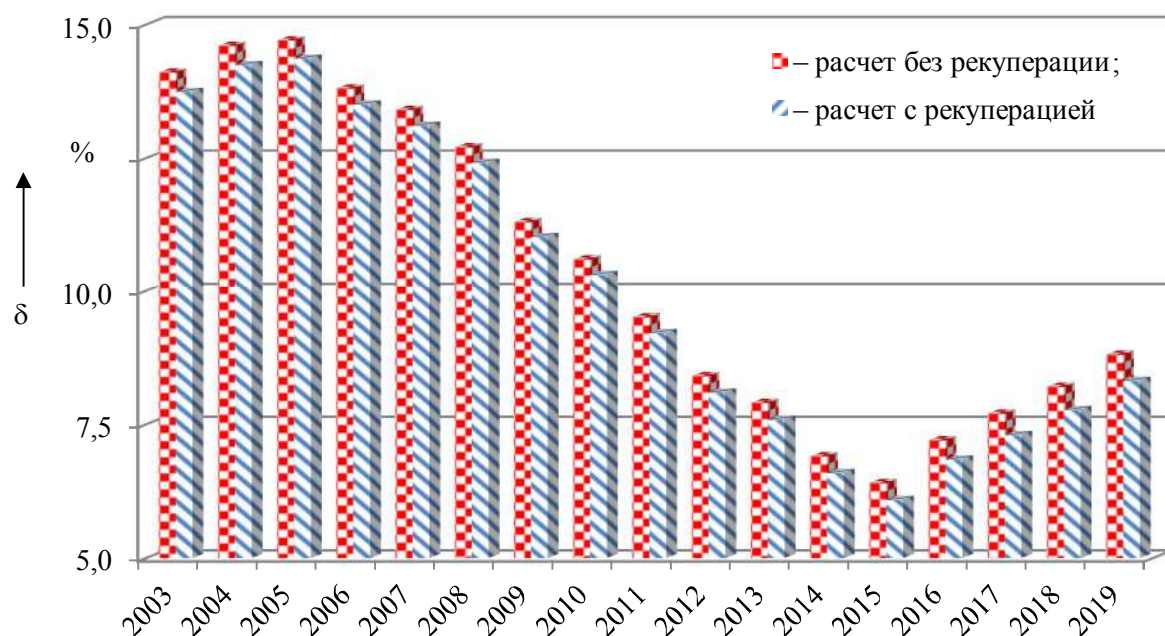


Рисунок 3 – Значения относительных потерь электроэнергии на тягу поездов, определенные без учета и с учетом энергии рекуперации

Помимо корректировки формулы для определения относительных потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов в настоящее время назрела необходимость и корректировки формулы для определения абсолютного значения потерь. В настоящее время значение потерь электроэнергии на тягу поездов в ОАО «Российские железные дороги» планируется использовать как один из ключевых показателей эффективности (KPI) деятельности Дирекции тяги и Трансэнерго. При этом необходимо будет выделить составляющие потерь, за которые они будут отвечать. Проведенный анализ структуры потерь показал, что в настоящее время из потерь электроэнергии на тягу поездов не выделяется расход электроэнергии по счетчикам тяговых подстанций, используемый для профилактического подогрева и плавки гололеда на проводах контактной сети, а также для обеспечения сохранного напряжения на малодеятельных электрифицированных участках железных дорог. Тогда абсолютное значение потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов с учетом указанного потребления электроэнергии на нужды системы тягового электроснабжения $W_{\text{техн}}^{\text{СТЭ}}$ должно определяться по формуле:

$$\Delta W^{\text{new}} = (W^{\text{ЭЧЭ}} - W_{\text{возв}}^{\text{ЭЧЭ}}) - (W^{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}) - W_{\text{нетяг}} - W_{\text{техн}}^{\text{СТЭ}}. \quad (6)$$

Проведенные ранее исследования показали, что существует взаимное влияние параметров и режимов работы оборудования системы тягового электроснабжения на объем рекупируемой энергии в границах участков железных дорог [8] и влияние объема энергии рекуперации, который во многом зависит от графика движения поездов [9], на уровень технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения [10].

Таким образом, при оценке составляющих потерь электроэнергии на тягу поездов необходимо выделять потери электроэнергии в контактной сети от протекания энергии рекуперации от рекупирующего ЭПС к ЭПС, движущемуся в режиме тяги, или к тяговой подстанции, которые могут быть определены по формуле [11]:

$$\Delta W_{\text{рек.}} = \frac{(W^{\text{ЭЧЭ}} - W_{\text{возв}}^{\text{ЭЧЭ}}) - (W^{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}) - W_{\text{нетяг}} - W_{\text{техн}}^{\text{СТЭ}}}{W_{\text{ЭЧЭ}} - W_{\text{возв}}^{\text{ЭЧЭ}} + W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}} \cdot W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}. \quad (7)$$

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Проведенный анализ статистических данных на тягу поездов по сети железных дорог в целом и в границах Московского центрального кольца показал, что требуется корректировка методологии определения уровня относительного значения потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов. Для этого необходимо в знаменателе расчетной формулы учитывать сумму расхода электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций и объема энергии рекуперации, возвращенной в контактную сеть по счетчикам электроподвижного состава. В этом случае снижение отчетных значений относительных потерь электроэнергии на тягу поездов по сети железных дорог составляет от 0,28 до 0,49 % от расхода электроэнергии на тягу поездов.

2. Так как уровень потерь электроэнергии на тягу поездов планируется использовать как один из ключевых показателей эффективности (KPI) деятельности Дирекции тяги и Трансэнерго при определении абсолютного значения потерь, необходимо учитывать расход электроэнергии на нужды системы тягового электроснабжения для профилактического подогрева и плавки гололеда на проводах контактной сети, а также для обеспечения сохранного напряжения на малодеятельных электрифицированных участках железных дорог.

3. С учетом изменения методики определения потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов предложена новая формула для расчета составляющей потерь электроэнергии в контактной сети, обусловленной протеканием энергии рекуперации.

Список литературы

1. Никифоров, М. М. Оценка технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, А. В. Язов // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 40 – 45.
2. Зверев, А. Г. Алгоритм выявления и анализа причин роста «небаланса» электроэнергии на тягу поездов в границах участков железной дороги [Текст] / А. Г. Зверев, М. М. Никифоров // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием: В 2 т. – Красноярск: Гротеск, 2005. – Т. 1. – С. 209 – 212.
3. Зверев, А. Г. Методика расчета электропотребления и небаланса электроэнергии на тягу поездов в границах железных дорог и участков работы локомотивных бригад [Текст] / А. Г. Зверев, М. М. Никифоров, В. Т. Черемисин // Ресурсосберегающие технологии в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2005. – С. 133 – 137.
4. Вильгельм, А. С. Пути повышения энергоэффективности на малом кольце Московской железной дороги с использованием инверторов [Текст] / А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2014. – № 3 (42). – С. 90 – 94.
5. Никифоров, М. М. Повышение энергетической эффективности Московского центрального кольца в условиях применения рекуперативного торможения и накопителей электрической энергии [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, О. А. Комякова // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 286 – 293.
6. Черемисин, В. Т. Оценка потенциала повышения энергоэффективности Московского центрального кольца за счет применения выпрямительно-инверторных преобразователей [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 57 – 67.
7. Анализ возможности применения сальдированного учета электроэнергии на тягу поездов [Текст] / В. Т. Черемисин, Ю. В. Кондратьев и др. // Известия Петербургского ун-та путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб. – 2008. – № 1 (14). – С. 90 – 101.
8. Никифоров, М. М. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, В. И. Гутников // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 74 – 90.
9. Незевак, В. Л. Основные подходы к оценке влияния графика движения поездов на расход электроэнергии [Текст] / В. Л. Незевак, М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 122 – 128.
10. Вильгельм, А. С. Влияние энергии рекуперации на уровень потерь в системе тягового электроснабжения [Текст] / А. С. Вильгельм, М. М. Никифоров // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 2 (53). – С. 55 – 60.
11. Никифоров, М. М. Организация учета электроэнергии на фидерах контактной сети как элемент цифровизации тяговых подстанций постоянного тока [Текст] / М. М. Никифоров // Современные гуманитарные, медицинские и технические науки в мировом контексте: Сб. науч. трудов междунар. науч.-практ. конф. – М.: Научная библиотека, 2020. – С. 218 – 222.

References

1. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S., Yazov A. V. Estimation of technological losses of electric power in the DC traction power supply system [Ocenka tekhnologicheskikh poter' ehlektroenergii v sisteme tyagovogo ehlektrosnabzheniya postoyannogo toka]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoj Dnyu Rossijskoj nauki: «Innovacionnye proekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the scientific-practical conference dedicated to the Day of Russian Science: «Innovative projects and new technologies in education, industry and transport»). – Omsk, 2012, pp. 40 – 45.
2. Zverev A. G., Nikiforov M. M. Algorithm for identifying and analyzing the reasons for the growth of “unbalance” of electric power for train traction within the railway sections [Algoritm vyyavleniya i analiza prichin rosta «nebalansa» elektroenergii na tyagu poyezdov v granitsakh uchastkov zheleznoy dorogi]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem: “Resursosberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte”*, v 2 t. T. 1 (Materials of the All-Russian scientific and technical conference with international participation: «Resource-saving technologies in railway transport». In 2 vol. Vol. 1). – Krasnoyarsk, 2005, pp. 209 – 212.
3. Zverev A. G., Nikiforov M. M., Cheremisin V. T. Methodology for calculating power consumption and unbalance of electric power for traction of trains within the boundaries of railways and sections of locomotive crews [Metodika rascheta elektropotrebleniya i nebalansa elektroenergii na tyagu poyezdov v granitsakh zheleznykh dorog i uchastkov raboty lokomotivnykh brigad]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii: “Resursosberegayushchiye tekhnologii v strukturnykh podrazdeleniyakh Zapadno-Sibirskoy zheleznoy dorogi”* (Materials of the scientific-practical conference: «Resource-saving technologies in structural units of the West Siberian Railway»). – Omsk, 2005, pp. 133 – 137.
4. Vilgelm A. S., Nezevak V. L., Cheremisin V. T. Ways to improve energy efficiency on the Small Ring of Moscow Railway with the help of inverters [Puti povysheniya energoeffektivnosti na Malom kol'tse Moskovskoy zheleznoy dorogi s ispol'zovaniem invertorov]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2014, no. 3 (42), pp. 90 – 94.
5. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S., Komyakova O. O. Increase of energy efficiency of the Moscow Central Ring in conditions of application of regenerative braking and energy storages [Povyshenie energeticheskoy effektivnosti Moskovskogo tsentral'nogo kol'tsa v usloviyakh primeneniya rekuperativnogo tormozheniya i nakopiteley elektricheskoy energii]. *Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: Materialy nauchnoy konferentsii* (Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Proceedings of the scientific conference). – Omsk, 2018, pp. 286 – 293.
6. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Assessment of the Moscow Central Ring energy efficiency potential through the use of rectifier-inverter converters [Otsenka potentsiala povysheniya energoeffektivnosti Moskovskogo tsentral'nogo kol'tsa za schet primeneniya vypryamitel'no-invertornykh preobrazovateley]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 3 (39), pp. 57 – 67.
7. Cheremisin V. T., Kondratiev Yu. V., Komyakova O. O., Privalov S. Ya. Analysis of the possibility of application of balancing electric power account to train traction [Analiz vozmozhnosti primeneniya sal'dirovannogo uchota elektroenergii na tyagu poyezdov]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2008, no. 1 (14), pp. 90 – 101.
8. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S., Gutnikov V. I. Influence of parameters and operating modes traction power supply system on efficiency of energy recovery use. [Vliyaniye parametrov i rezhimov raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na effektivnost' ispol'zovaniya energii rekuperatsii]. *Izvestiya Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1 (29), pp. 74 – 90.

9. Nezevak V. L., Nikiforov M. M., Ushakov S. Yu. The main approaches to the assessment of the effect of the train schedule on electricity consumption [Osnovnyye podkhody k otsenke vliyaniya grafika dvizheniya poyezdov na raskhod elektroenergii]. *Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: Materialy nauchnoy konferentsii* (Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Proceedings of the scientific conference). – Omsk, 2015, pp. 122 – 128.

10. Vilgelm A. S., Nikiforov M. M. Energy recovery influence on the level of losses in traction power supply system [Vliyaniye energii rekuperatsii na uroven' poter' v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya]. *Transport Urala – Transport of Urals*, 2017, no. 2 (53), pp. 55 – 60.

11. Nikiforov M. M. Organization of electricity accounting on feeders of the contact network as an element for digitalization of DC traction substations [Organizatsiya ucheta elektroenergii na fiderakh kontaktnoy seti kak element tsifrovizatsii tyagovykh podstantsiy postoyan-nogo toka]. *Sovremennye gumanitarnye, medicinskie i tekhnicheskie nauki v mirovom kontekste: Sb. nauch. trudov mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (Modern humanitarian, medical and technical Sciences in the world context: Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference). – Moscow, 2020, pp. 218 – 222.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU)

35, Marx av. Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci, deputy director, Research Institute for Energy Efficiency in Railway Transport, Omsk State Transport University.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Никифоров, М. М. Совершенствование методики определения потерь электроэнергии на тягу поездов [Текст] / М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 98 – 107.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nikiforov M. M. Improvement of methodology for determination of electric power losses on train traction. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 1 (41), pp. 98 – 107 (In Russian).

УДК 629.4.027.4:629.46

М. Ф. Капустян, А. В. Обрывалин, К. В. Аверков, О. П. Супчинский

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

СПОСОБ ИСКЛЮЧЕНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ВАГОННЫХ КОЛЕС ПРИ РОСПУСКЕ ГРУЗОВЫХ СОСТАВОВ НА НЕМЕХАНИЗИРОВАННЫХ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

Аннотация. Статья посвящена вопросу устранения термомеханических повреждений на поверхности катания колесных пар вагонов, возникающих при использовании для снижения их скорости тормозных башмаков. Предлагается новая конструкция тормозного башмака, оснащенного электромагнитами, обеспечивающая торможение без заклинивания колесной пары. Выполнен расчет тормозного усилия и обеспечиваемого замедления.

Ключевые слова: торможение, башмак, трение, электромагнит, колесо, рельс, вагон.

Mikhail F. Kapustyan, Alexey V. Obryvalin, Konstantin V. Averkov,
Oleg P. Supchinsky

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

METHOD FOR ELIMINATING THERMOMECHANICAL DAMAGE TO THE ROLLING SURFACE OF WAGON WHEELS DURING THE GRAVITY MARSHALLING ON NON-MECHANIZED SORTING SLIDES

Abstract. The article is devoted to the problem of elimination of thermomechanical damage on the surface of rolling wheel pairs of cars, which arising from the use of brake shoes to reduce their speed. A new design of the brake shoe equipped with electromagnets, which provides braking without jamming the wheel pair. Article contains calculation of the braking force and the provide slowdown.

Keywords: braking, shoe, friction, electromagnet, wheel, rail, car.

Известно, что движение колесной пары юзом приводит к возникновению термомеханических повреждений на поверхности катания колес. Наличие повреждений такого рода существенно усложняет и удорожает ремонт колесной пары.

Такие повреждения могут возникать в том числе при сортировке вагонов на немеханизированных горках, которые все еще активно используются.

В настоящее время Управлением вагонного хозяйства центральной дирекции инфраструктуры в целях обеспечения сохранности грузовых вагонов на сети железных дорог России проводится анализ имеющихся технических и технологических решений, направленных на недопущение повреждения поверхности катания колесных пар грузовых вагонов односторонними ползунами при расформировании составов на немеханизированных сортировочных горках с применением технологий регулирования скорости движения тормозными башмаками.

На немеханизированных горках для остановки отцепов при роспуске составов используют тормозные башмаки. Этот способ торможения вагонов имеет ряд недостатков. При заклинивании башмаком колесной пары последняя движется по поверхности рельса юзом, что сопровождается пластической деформацией и значительным повышением температуры в зоне контакта «колесо – рельс». В конечном итоге это приводит к образованию ползунув и иных термомеханических повреждений. Следует отметить, что образующийся при таком торможении ползун является односторонним. В ремонте в целях сохранения разности диаметров колес, несмотря на наличие одностороннего дефекта, приходится обтачивать оба колеса, что приводит к высокому расходу твердосплавного инструмента и большому объему механической обработки.

Для устранения данной проблемы в настоящей статье предлагается новая конструкция тормозного башмака, которая обеспечивает торможение вагона без заклинивания колесной пары, предназначенная для использования на немеханизированных горках. Конструкция башмака представлена на рисунке 1.

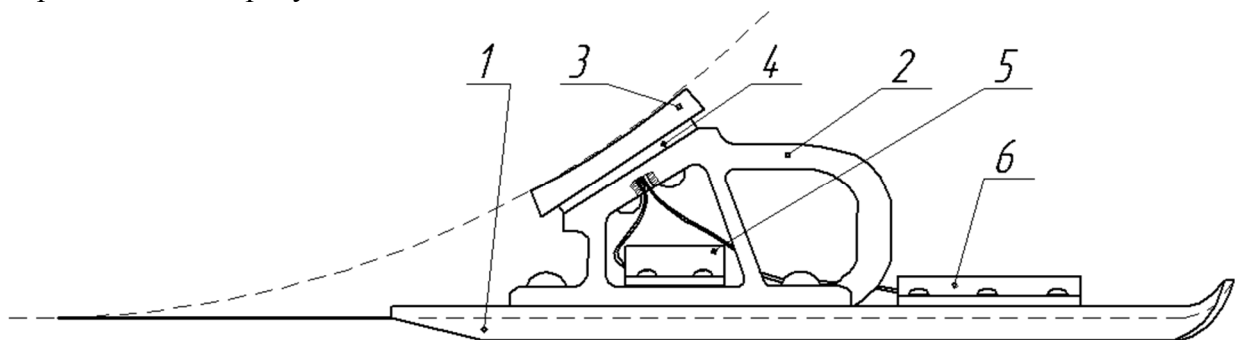


Рисунок 1 – Тормозной башмак предлагаемой конструкции:

1 – ползун; 2 – упорная колодка с ручкой; 3 – антифрикционная накладка;
4 – выключатель; 5 – аккумулятор; 6 – магнит

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Предлагаемая конструкция башмака работает следующим образом. Колесо колесной пары, накатываясь на антифрикционную накладку 3, воздействует на выключатель 4, при этом подается ток от аккумулятора 5 на электромагнит 6, ползод притягивается к рельсу под действием электромагнитных сил, обеспечивая торможение вагона.

Для антифрикционной накладки могут применяться следующие материалы:

- 1) баббиты;
- 2) сплавы на основе меди. Высокооловянистые бронзы (например, БРОФ 8-0,3), низкооловянистые бронзы (например, БРОЦС 4-4-2,5), безоловянистые бронзы (например, БРАЖ 9-4);
- 3) сплавы на основе алюминия. Сплавы, имеющие в своем составе структуре интерметаллидные включения FeAl_3 , Al_3Ni , CuAl_2 , Mg_2Si , AlSb , распределенные в пластичной матрице;
- 4) цинковые сплавы. Наиболее распространен сплав ЦАМ 10-5;
- 5) сплавы на основе железа. Используются серые чугуны и графитизированные стали;
- 6) спеченные материалы. Сплавы на основе железа и графита (ЖГр1, ЖГр2); железа, графита и меди (ЖГр2Д2,5). Используются также сплавы на основе меди (бронзографиты БрОГр10-2; БрОСГр1-29-0,5).

Материал накладки будет испытывать значительные динамические нагрузки, поэтому в данном случае на выбор антифрикционного материала влияют два основных фактора: антифрикционные свойства и прочность. Анализ свойств перечисленных групп материалов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства антифрикционных материалов

Материал	Коэффициент трения	$\sigma_{\text{в}}$, МПа
Баббиты	0,005	100 – 120
Сплавы на основе меди	0,02 – 0,06	400 – 500
Сплавы на основе алюминия	0,04 – 0,06	200 – 220
Цинковые сплавы	0,02 – 0,04	340 – 360
Сплавы на основе железа	0,06 – 0,08	150 – 180
Спеченные материалы	0,03 – 0,06	60 – 80

Из данных таблицы 1 видно, что наилучшим для антифрикционной накладки сочетанием свойств обладают сплавы на основе меди. Среди конкретных марок можно назвать БрОСНЮ-2-3, БрСЗО. Эти бронзы отличаются хорошими механическими свойствами и теплостойкостью.

В качестве магнитов в предлагаемой конструкции могут быть использованы электромагниты, питаемые от аккумуляторов, а также постоянные магниты достаточной мощности, например, неодимовые.

Неодимовые магниты приемлемых габаритов обеспечивают усилие схватывания 150 – 200 кгс, однако они отличаются хрупкостью и быстро изнашиваются. Кроме того, при сильном нагреве (свыше 180 – 200 °С), который неизбежно будет возникать при трении башмака о рельс, они необратимо теряют магнитные свойства. Снятие башмака, оснащенного постоянным магнитом, с рельса после торможения представляет отдельную задачу.

Электромагниты приемлемых для башмака габаритов обеспечивают силу притяжения до 120 – 150 кгс, при этом они могут устанавливаться на башмак по два – три, значительно увеличивая силу взаимодействия. Съем башмака, оснащенного электромагнитами, после торможения не представляет проблемы.

В конструкции башмака предлагается использовать магнит серии МИС6211Е, характеристики магнита представлены в таблице 2 [9].

Таблица 2 – Технические характеристики магнита МИС6211Е

Параметр	Числовое значение
Режим работы, ПВ %	10
Номинальное тяговое усилие, кгс	120
Степень защиты	IP00
Допустимое число циклов в час	300

Для определения работоспособности предлагаемой конструкции башмака необходимо рассчитать скорость движения вагона на втором скоростном участке сортировочной горки и сравнить ее с нормативным значением. При торможении на горке скорость подхода отцепа вагонов к другому отцепу в подгорочном парке, а также при маневрах толчками должна быть не более 5 км/ч [8].

Для расчета был рассмотрен общий случай, при котором вагон скатывается с сортировочной горки поступательно и с заданной начальной скоростью (5,83 м/с [1]). При этом вагон испытывает воздействие лишь внешних сил (силу тяжести с учетом груза или без учета груза, силу аэродинамического сопротивления). При подготовке расчетной модели скатывания вагона использовались упрощенные схемы, учитывающие трение качения колес вагона со скольжением.

При подготовке модели использован основной закон динамики для переносного движения вагона в координатной форме [1]. Результаты расчетов по предложенной методике показали, что скорость вагона при использовании башмака предложенной конструкции не превышает нормативного значения и предлагаемое устройство является вполне работоспособным. Применение башмака предложенной конструкции позволит исключить появление односторонних термомеханических повреждений, которые характерны для средств торможения традиционных конструкций.

Для определения скорости вагона по предлагаемой схеме торможения с использованием электромагнитного тормозного башмака была составлена расчетная схема сил, действующих на колесо (рисунок 2).

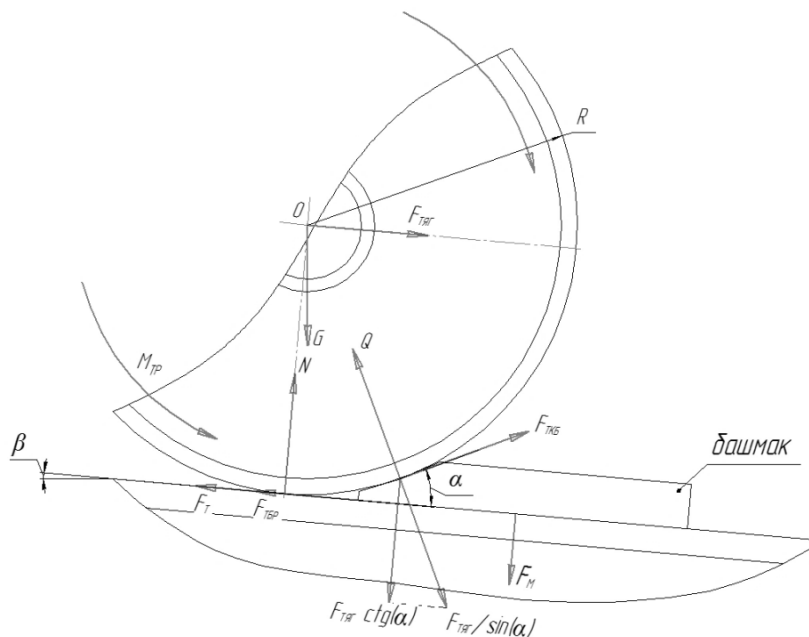


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на колесо при торможении

На рисунке 2 обозначено: ω – угловая скорость колеса, рад^{-1} ; R – радиус колеса, м; $F_{\text{тяг}}$ – сила, под воздействием которой, вагон скатывается по уклону горки, Н; $M_{\text{тр}}$ – момент трения качения колеса по рельсу, Н·м; G – сила тяжести вагона, действующая на колесо, Н; N – нормальная реакция между рельсом и колесом, Н; Q – реакция между колесом и башмаком, Н; $F_{\text{т.к.б}}$ – сила трения колеса о башмак, Н; $F_{\text{т.б.р}}$ – сила трения башмака о рельс, Н; $F_{\text{т}}$ – сила торможения вагона, вызванная взаимодействием колеса с башмаком, Н; $F_{\text{м}}$ – сила магнитного взаимодействия башмака и рельса, Н; α – угол между поверхностью рельса и касательной к рабочей поверхности башмака, град; β – угол наклона рельса на втором тормозном участке.

Из схемы на рисунке 2 следует, что общая тормозная сила, действующая на колесо, Н,

$$F_{\text{то}} = F_{\text{т}} + F_{\text{т.к.б.}} \quad (1)$$

Составим уравнение моментов, действующих на колесо:

$$M_{\text{тр}} + F_{\text{т.к.б.}} \cdot R - F_{\text{т}} \cdot R = 0. \quad (2)$$

Тогда сила торможения вагона, Н,

$$F_{\text{т}} = \frac{M_{\text{тр}}}{R} + F_{\text{т.к.б.}} \quad (3)$$

Момент трения качения колеса по рельсу, Н·м,

$$M_{\text{тр}} = k \cdot N, \quad (4)$$

где $k = 0,04$ – коэффициент трения качения колеса о рельс, м;

N – реакция со стороны рельса на отдельную колесную пару, Н.

Допустив, что нагрузка на оси распределена равномерно, получим:

$$N = \frac{G}{8} = \frac{m_{\text{в}} \cdot g \cdot \cos \beta}{8}, \quad (5)$$

где $m_{\text{в}}$ – масса вагона, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\beta = 5 - 7^\circ$.

Сила трения колеса о башмак, Н,

$$F_{\text{т.к.б.}} = Q \cdot \mu_{\text{к.б.}} = \frac{F_{\text{тяг}} \cdot \mu_{\text{к.б.}}}{\sin \alpha}, \quad (6)$$

где $\mu_{\text{к.б.}}$ – коэффициент трения скольжения колеса о башмак.

Тогда, сила торможения, Н,

$$F_{\text{т}} = \frac{k \cdot m_{\text{в}} \cdot g \cdot \cos \beta}{8 \cdot R} + \frac{F_{\text{тяг}} \cdot \mu_{\text{к.б.}}}{\sin \alpha}. \quad (7)$$

Согласно расчетной схеме (см. рисунок 2) сила трения башмака о рельс

$$F_{\text{т.б.р}} = \mu_{\text{б.р}} \cdot \left(F_{\text{м}} + \frac{F_{\text{тяг}}}{\sin \alpha} \right), \quad (8)$$

где $\mu_{\text{б.р}}$ – коэффициент трения башмака о рельс.

Необходимое замедление

$$a = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot S}, \quad (9)$$

где V_1 и V_2 – начальная и конечная скорости вагона при торможении, м/с;

S – длина тормозного участка, м.

В качестве исходных данных для расчета были приняты такие:

- скорость подхода вагона к подгорочному парку ($V_1 = 5$ км/ч = 1,34 м/с) [3, 4];
- скорость вагона после первого скоростного участка ($V_2 = 10$ км/ч = 2,78 м/с) [2];
- длина тормозного участка ($S = 38$ м) [4, 5, 6];
- масса вагона ($m_{\text{в}} = 9,256 \cdot 10^4$ кг) [7];
- сила, под воздействием которой вагон скатывается по уклону горки ($F_{\text{тяг}} = 17,38$ кН) [8];
- коэффициент трения колеса о башмак ($\mu_{\text{к.б.}} = 0,4$);
- сила магнитного взаимодействия башмака и рельса ($F_{\text{маг}} = 2352$ Н) [9];
- угол между поверхностью рельса и касательной к рабочей поверхности башмака ($\alpha = 25^\circ$);
- радиус колеса ($R = 0,475$ м);
- коэффициент трения башмака о рельс ($\mu_{\text{б.р}} = 0,2$).

Для обеспечения скорости вагона при подходе к горочному парку 5 км/ч необходимо создать замедление 0,34 м/с².

После подстановки исходных данных в уравнения (1), (7) – (9) были получены следующие значения: $F_T = 28054,36 \text{ Н}$; $F_{T.б.р} = 4700,46 \text{ Н}$; $F_{T0} = 32754,82 \text{ Н}$; $a = -0,35 \text{ м/с}^2$.

Полученное значение превышает требуемое. Это означает, что предложенный способ и конструкция обеспечивают необходимое замедление вагона.

На данную конструкцию получен патент на полезную модель [10].

Список литературы

1. Туранов, Х. Т. Пример расчета времени и скорости скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии встречного ветра малой величины по новой методике [Текст] / Х. Т. Туранов // Вестник Уральского гос. ун-та путей сообщения / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2015. – № 3. – С. 25 – 35.
2. Туранов, Х. Т. Некоторые проблемы теоретической предпосылки динамики скатывания вагона по уклону сортировочной горки [Текст] / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Бюллетень транспортной информации. – 2015. – № 3 (237). – С. 29 – 36.
3. Островский, А. М. О повышении безопасности процесса роспуска вагонов, нагруженных опасными грузами, с сортировочных горок [Текст] / А. М. Островский, А. М. Лисютин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного транспорта. – Новосибирск. – 2013. – № 1. – С. 52 – 56.
4. Таранец, О. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках в условиях действия случайных факторов [Текст] / О. И. Таранец // Автоматика на транспорте. – 2015. – № 1. – С. 63 – 72.
5. Климов, А. А. Моделирование проходимости вагонов без саморасцепа по перевальной части сортировочной горки [Текст] / А. А. Климов, Д. В. Осипов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2015. – № 3 (47). – С. 154 – 160.
6. Лойцянский, Л. Г. Курс теоретической механики [Текст] / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. – М.: Наука, 1983. – Т. II. – 640 с.
7. Долженко, А. М. Оптимальное управление роспуском поездов на сортировочных горках малой мощности [Текст] / А. М. Долженко // Вестник транспорта Поволжья / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2014 – № 1 (43). – С. 62 – 66.
8. Инструкция по технической эксплуатации устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки механизированных и автоматизированных сортировочных горок [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 96 с.
9. Электромагниты серии МИС 1100, МИС 1200 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rele.ru/m/ru/prod7-11-mis.htm> (дата обращения: 25.05.2019).
10. Пат. 184691 РФ, МПК В61К 7/16 (2006.01), В61Н 7/10 (2006.01), В61Н 7/02 (2006.01). Тормозной башмак для немеханизированных сортировочных горок [Текст] / Обрывалин А. В., Капустьян М. Ф., Супчинский О. П.; заявитель и патентообладатель ОмГУПС. – № 2017145202; заявл. 21.12.2017; опубл. 06.11.2018, Бюл. № 31.

References

1. Turanov H. T. An example of calculation of time and speed of rolling of the car on the second high-speed section of the sorting hill under the influence of headwind of small size by the new technique [Primer rascheta vremeni i skorosti skatyvaniya vagona na vtorom skorostnom uchastke sortirovochnoj gorki pri vozdejstvii vstrechnogo vetra maloj velichiny po novoj metodike]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – Herald of the Ural State University of Railway Transport*, 2015, no. 3, pp. 25 – 35.
2. Turanov H. T., Gordienko A. A. Some problems of the theoretical background of the dynamics of rolling of the car on the slope of the sorting slide [Nekotorye problemy teoreticheskoy predposylki dinamiki skatyvaniya vagona po uklonu sortirovochnoj gorki]. *Byulleten' transportnoj informacii – The Bulletin of Transport Information*, 2015, no. 3 (237), pp. 29 – 36.

3. Ostrovskij A. M., Lisyutin A. M. On the improved safety of the process of the dissolution of the wagons loaded with dangerous goods, with the sorting slides [O povyshenii bezopasnosti processa rospuska vagonov, zagruzhennyh opasnymi gruzami, s sortirovochnyh gorok]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2013, no. 1, pp. 52 – 56.

4. Taranets O. I. Optimization of deceleration modes of uncoupling on sorting slides under the action of random factors [Optimizaciya rezhimov tormozheniya otcepov na sortirovochnyh gorkah v usloviyah dejstviya sluchajnyh faktorov]. *Avtomatika na transporte – Automation on Transport*, 2015, no. 1, pp. 63 – 72.

5. Klimov A. A., Osipov D. V. Simulation of cross-country cars without samorastsepa on the saddle part of the hump [Modelirovanie prohodimosti vagonov bez samorascepa po pereval'noj chasti sortirovochnoj gorki]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2015, no. 3 (47), pp. 154 – 160.

6. Lojcyanskij L. G., Lur'e A. I. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* (Course of theoretical mechanics). Moscow: Nauka, 1983, vol. II, 640 p.

7. Dolzhenko, A. M. Optimal control of dissolution of trains on sorting slides low power [Optimal'noe upravlenie rospuskom poezdov na sortirovochnyh gorkah maloj moshchnosti]. *Vestnik transporta Povolzhya – Bulletin of Transport of the Volga region*, 2014, no. 1 (43), pp. 62 – 66.

8. *Instrukciya po tekhnicheskoy ekspluatacii ustrojstv i sistem signalizacii, centra-lizacii i blokirovki mekhanizirovannyh i avtomatizirovannyh sortirovochnyh gorok* (Instructions for technical operation of devices and alarm systems, centralization and blocking of mechanized and automated sorting slides), Moscow, JSC Russian Railways, 2015, 96 p.

9. Electromagnets series MIS 1100, MIS 1200 [Elektromagnity serii MIS 1100, MIS 1200], mode of access: <https://rele.ru/m/ru/prod7-11-mis.htm> (date of application: 25.05.2019).

10. Obryvalin A. V., Kapustyan M. F., Sopczynski O. P. *Patent RU 184691*, 06.11.2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Капустьян Михаил Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mcap731@gmail.com

Обрывалин Алексей Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

Аверков Константин Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kapustyan Mikhail Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

Marx Ave., d. 35, Omsk, 644046, Russian Federation.

Candidate of technical Sciences, associate Professor of "Technology of transport engineering and repair of rolling stock", OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mcap731@gmail.com

Obryvalin Alexey Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

Marx Ave., d. 35, Omsk, 644046, Russian Federation.

Candidate of technical Sciences, associate Professor of "Technology of transport engineering and repair of rolling stock", OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

Averkov Konstantin Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

Marx Ave., d. 35, Omsk, 644046, Russian Federation.

Candidate of technical Sciences, associate Professor of "Technology of transport engineering and repair of rolling stock", OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

Супчинский Олег Павлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

Supchinsky Oleg Pavlovich

Omsk State Transport University (OSTU).

Marx Ave., d. 35, Omsk, 644046, Russian Federation.

Candidate of technical Sciences, associate Professor of "Technology of transport engineering and repair of rolling stock", OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Способ исключения термомеханических повреждений поверхности катания вагонных колес при роспуске грузовых составов на немеханизированных сортировочных горках [Текст] / М. Ф. Капустян, А. В. Обрывалин и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 107 – 114.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kapustian M. F., Obryvalin A. V., Averkov K. V., Supchinsky O. P. Method for eliminating thermomechanical damage to the rolling surface of wagon wheels during the gravity marshalling on non-mechanized sorting slides. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 1 (41), pp. 107 – 114 (In Russian).

УДК 656.073

Н. Ю. Лахметкина¹, А. М. Макарова²

¹Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация;

²ООО «ТрансЛес», г. Москва, Российская Федерация

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЖЕНЫМИ И ПОРОЖНИМИ ПРОБЕГАМИ

Аннотация. Возможности транспортно-логистической инфраструктуры в комплексе с технологическими решениями управления транспортными потоками дают прочную основу для повышения качества сервиса, предоставляемого железнодорожным транспортом, эффективности использования подвижного состава и инфраструктуры транспорта при увеличении объемов грузоперевозок, оптимизации транспортных расходов грузовладельцев и повышения доходности и привлекательности железнодорожных перевозок.

Целью настоящей работы является поиск возможных технологических решений управления груженными и порожними пробегами за счет эффективного использования инфраструктуры железнодорожной станции Тайшет Восточно-Сибирской дороги. Актуальность поставленной цели заключается в недостаточно развитой транспортно-логистической инфраструктуре региона, находящегося на пересечении крупных транспортных потоков, а также в высоких затратах логистических операторов на порожний тариф, возникающий из-за дисбаланса груженых и порожних пробегов. С учетом перспектив развития транспортно-логистической инфраструктуры станции в соответствии с долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» появляются возможности для работы с широкой номенклатурой обрабатываемого подвижного состава и грузов, в том числе контейнерных, что стимулирует появление новых железнодорожных сервисов.

В соответствии с поставленной целью на примере данных логистической компании проанализирована существующая ситуация организации груженых и порожних потоков Восточного региона; предложены технологические решения сокращения порожнего пробега подвижного состава благодаря использованию выгодного местоположения станции Тайшет. В статье рассмотрены варианты сокращения порожнего пробега по принципам кольцевой логистики и заадресации порожнего подвижного состава. Практическая значимость рассмотренных мероприятий заключается в возможностях снижения загруженности некоторых станций, в сокращении порожних пробегов подвижного состава, повышении доходности перевозок и эффективности использования подвижного состава за счет сокращения его оборота. Данная технология при своевременном обеспечении порожним подвижным составом рассмотренных станций позволяет значительно повысить уровень погрузки-выгрузки и маршрутизации поступающих порожних вагонов. В целом для сети указанные результаты позволят увеличить пропускную способность и транзитные объемы перевозок контейнеров из Китая в РФ, стимулируя тем самым развитие транспортного бизнеса.

Ключевые слова: транспорт, перевозки, технологические решения управления, порожний пробег, груженный пробег, порожний подвижной состав, контейнерные перевозки, транспортно-логистическая инфраструктура, кольцевая логистика.

Natalia U. Lakhmetkina, Anastasia M. Makarova²

¹Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation;

² LLC «TransLes», Moscow, the Russian Federation

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR MANAGING LOADED AND EMPTY RUNS

Abstract. The article deals measures to improve the efficiency of using empty cars on the example of the East Siberian railway. The problem of the mechanism for managing cargo and empty runs has been identified. It is necessary to create the system for managing empty rolling stock. The authors consider the technology of working with the company's empty car fleet and the logistics of rolling stock through the Taishet station of the East Siberian railway. The relevance of the goal is the insufficiently developed transport and logistics infrastructure of the region located at the intersection of large transport flows, high costs of logistics operators for the empty tariff. Taking into account the prospects for the development of the station's transport and logistics infrastructure in accordance with the long-term development program of Russian Railways, there are opportunities to increase the range of types of rolling stock and cargo, including container ones. This technology, with timely provision of empty rolling stock for stations, will significantly increase the level of loading and unloading and routing of incoming empty cars. The practical significance of the considered measures is the possibility of reducing the load of some stations, reducing empty flights of rolling stock, increasing the profitability of transportation and the efficiency of using rolling stock by reducing its turnover. In General, for the network, the results will increase the capacity and transit volumes of container traffic from China to the Russian Federation, and stimulate the development of the transport business.

Keywords: transport, transportation, technological management solutions, transport flows, empty mileage, loaded mileage, empty rolling stock, container transportation, transport and logistics infrastructure, ring logistics.

Сегодня железнодорожный транспорт, составная часть рыночной инфраструктуры, занимает важнейшее место в функционировании и развитии российского рынка транспортно-логистических услуг. Стоящая перед Россией задача модернизации транспортной инфраструктуры глобальна. С одной стороны, инфраструктурная система наиболее плотна в европейской части России, где проживает большинство населения, с другой стороны, транспортная сеть в Сибири и на Дальнем Востоке развита недостаточно, а некоторые районы и вовсе не имеют соединений с основной транспортной системой.

Эффективность работы всей системы снижают ограничения пропускной способности железнодорожной сети при росте грузовых перевозок и количества используемого для этого подвижного состава. Кроме того, если операторская ставка за пользование вагоном определяется транспортным рынком, то регулируемый государством инфраструктурный тариф растет независимо от экономических реалий.

Общее количество парка грузовых вагонов на сети «РЖД» в конце ноября 2019 г. составило 1,16 млн ед. (в среднем за сутки), что на 5 % больше по сравнению с ноябрем 2018 г. Численность рабочего парка подвижного состава в годовой динамике также выросла на 2,5 % – до 0,95 млн ед. [1].

При этом в период с января по ноябрь 2019 г., по данным «РЖД», погрузка составила 1,17 млрд т. Грузооборот с начала 2019 г. составил 2382,6 млрд тарифных ткм (+0,4 %), грузооборот с учетом пробега вагонов в порожнем состоянии – 3028,4 млрд ткм (+0,3 %) [2].

Контейнерный рынок России в 2019 г. составил 5 млн двадцатифутовых эквивалентов (ДФЭ), показав прирост 12,6 % к аналогичному периоду прошлого года. Назначением на станции Восточного полигона произошло увеличение объемов перевозки в контейнерах на 23 %, а в обратном направлении – на 32 %. При этом заполняемость контейнерных поездов составила в направлении востока и обратно 88 и 95 % соответственно. Такие показатели удалось обеспечить за счет технологических решений в условиях проведения масштабных работ по ремонту и реконструкции Восточного полигона [3].

Не менее важно развитие перевозок в контейнерах с точки зрения сокращения дисбаланса груженых и порожних потоков. Развитие происходит за счет открытия новых маршрутов перевозок из Японии, Китая, Южной Кореи через территорию Казахстана, Монголии назначением в страны Европы, а также за счет расширения поставок товаров и открытия новых

маршрутов из Европы в Китай. Сотрудничество с АО «Улан-Баторская железная дорога» предусматривает активное развитие сквозного сервиса в сообщении Китай – Монголия – Россия – Европа и обратно, а также совершенствование технологии предоставляемого сервиса на пограничных переходах Эрлян – Замын-Ууд и Сухэ-Батор – Наушки с целью предоставления клиентам качественного сервиса на всем маршруте следования и сокращения транзитных сроков доставки грузов. Преимущество перехода Замын-Ууд – Наушки по сравнению с перегруженным Забайкальским заключается в уменьшении сроков доставки из Китая с перспективой увеличения пропускной способности.

Маршрут через Монголию уже зарекомендовал себя как надежный и наиболее предсказуемый по срокам транзитных контейнерных перевозок. В качестве примера можно назвать регулярный контейнерный сервис логистического оператора Rail Cargo Logistics-RUS из Нанкина (Восточный Китай) в Ворсино (Россия), организованный с учетом субсидий на перевозку контейнеров, сохраняющихся в провинции Цзянсу наряду с сокращением субсидий на перевозку в других провинциях. Нанкин, находящийся вблизи крупных производственных центров Китая, занимает выгодное географическое положение, позволяя консолидировать грузы из других провинций. Тестовая отправка поезда из 44 сорокафутовых контейнеров FCL (full container load) с товарами народного потребления доказала успешность маршрута 28 декабря 2019 г. По ориентировочным планам оператора еженедельный сервис позволит доставлять контейнерные поезда и сборные грузы с транзитным временем 14 – 16 суток. Обратная загрузка контейнерных поездов из России в Китай может быть обеспечена за счет экспортных перевозок грузов лесопереработки из Сибири [4]. К примеру, пиломатериалы в контейнерах следуют через сухопутный погранпереход Гродеково – Суйфэньхэ на северо-восток Китая, где загружаются товарами народного потребления, зерном и следуют в обратном направлении в приморские порты, откуда морем отправляются в южные провинции Китая.

Для наращивания объемов перевозок грузов в контейнерах первоначально важно прорабатывать маршруты обратной загрузки, уменьшая тем самым порожний пробег вагонов, что позволит снизить нагрузку на сеть, привлечь больше грузов и увеличить доходность перевозок для оператора, поскольку расходы на порожние пробеги являются значительными затратами любой операторской компании. Для оптимизации порожнего пробега собственники подвижного состава продумывают и внедряют целевые программы, ежедневно решают задачи роста эффективности оперирования вагонными активами, проводят целевые совещания, направленные на оптимизацию порожнего пробега [5].

Во избежание ухода клиентов на альтернативные виды транспорта необходимо развивать комплексные услуги предоставления подвижного состава и прорабатывать решения в направлении попутной и обратной загрузки. Порожний пробег вагонов также сокращается при их максимальном использовании под сдвоенные операции (выгрузка и погрузка на одном грузовом фронте) с учетом их взаимозаменяемости, рационального прикрепления районов производства продукции к районам ее потребления и других мероприятий [6, 7].

Среди наиболее эффективных способов по сокращению порожнего пробега можно назвать следующие:

- повышение тарифа на перевозку порожнего подвижного состава по участкам с ограниченной пропускной способностью с одновременным снижением тарифа на участках, где величина порожнего пробега существенно выше среднесетевого уровня по технологическим причинам (отдаленность станций погрузки от основных вагонопотоков);

- единое предложение, связанное с изменением тарифа во время переадресации порожнего вагона;

- развитие электронных сервисов по предоставлению подвижного состава под перевозку, позволяющих частично решить проблемы гарантированного обеспечения средних и малых предприятий вагонами по рыночным ценам, обеспечить прозрачность ценообразования и сократить порожний пробег за счет активного обмена вагонным парком между операторами.

Возможность сокращения порожнего пробега подвижного состава за счет технологических решений рассмотрена на примере станции Тайшет и данных логистической компании, входящей в многопрофильный железнодорожный холдинг, один из крупнейших независимых операторов подвижного состава России, специализирующийся на перевозках лесных грузов во внутрироссийском и экспортном сообщении.

Станция Тайшет – крупный железнодорожный узел, имеющий важное значение не только для Восточно-Сибирской железной дороги, но и в целом для ОАО «РЖД» по четырем грузовым направлениям: с запада на восток проходит Транссибирская магистраль, в Тайшете начинается Байкало-Амурская магистраль, в южном направлении расположена Южно-Сибирская магистраль, связывающая БАМ с Кузбассом, Алтаем, Северным и Центральным Казахстаном, а также с Южным Уралом. Развита сеть автомобильных дорог в зоне тяготения грузопотоков [8].

В соответствии с долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» станция Тайшет вошла в проект «Увеличение пропускной способности участка Артышта – Междуреченск – Тайшет», направленный на увеличение пропускной и провозной способности инфраструктуры для освоения прогнозируемого объема грузов до 2025 г., в том числе на создание провозной способности БАМа и Транссиба в размере 180 млн т к 2024 г. [9].

Реализация мероприятий по развитию и реконструкции станции Тайшет направлена на освоение перспективного грузопотока за счет увеличения почти в полтора раза пропускной способности станции. В 2019 г. завершился первый этап работ реконструкции станции Тайшет, в рамках которого построен новый грузовой двор, ввод в эксплуатацию которого позволил увеличить переработку грузов на станции по сравнению с 2018 г. в 4,5 раза. Кроме того, с вводом в эксплуатацию контейнерной площадки появился логистический сервис обработки крупнотоннажных контейнеров, о чем свидетельствует 22 отправленных за прошедший год контейнерных поездов [10].

Дальнейшее развитие транспортно-логистической инфраструктуры станции Тайшет в части возможности обработки контейнеропригодных грузов позволит сократить порожний пробег подвижного состава благодаря распределению вагонопотоков в крупные узлы по сравнению с заадресовкой порожних вагонов с пограничных переходов Восточного полигона. Кроме того, следует рассматривать кольцевую логистику обратной загрузки подвижного состава контейнерами после доставки лесных грузов на фитинговых платформах. Такая схема позволит эффективнее использовать подвижной состав, увеличить операционные показатели компании, включая выручку и чистую прибыль, а также стимулировать развитие контейнерных перевозок.

В настоящее время специализированные платформы для перевозки леса после выгрузки на станциях Восточного региона, таких как Забайкальск (Маньчжурия, КНР), Гродеково (Суйфэньхэ, КНР), Наушки (Эрлян, КНР (транзитом через Монголию), порты Дальнего Востока (Находка, Рыбники, Ванино), оператор вынужден возвращать под погрузку в регионы (Иркутская область, Красноярский край, Дальневосточный ФО) в порожнем состоянии. Использование лесовозных платформ, оборудованных фитинговыми упорами, позволит логистическому оператору снизить коэффициент порожнего пробега и расширить географию перевозок. Приоритетными направлениями использования платформ с фитинговыми упорами являются те, где нет хорошо проработанной логистики перевозок на специализированных фитинговых платформах, но существует последующая погрузка лесных грузов. Перспективными направлениями являются перевозки лесных грузов в страны СНГ и на пограничные переходы с возвратом контейнеров в РФ.

К примеру, на выходящих с пограничных переходов платформах с фитинговыми упорами после выгрузки лесоматериалов (пиломатериалов) устанавливаются контейнеры различных собственников. Платформа с контейнером следует до станции Тайшет. Контейнеры выгружаются, а платформы распределяются по тем секторам Восточного полигона, где наиболее вероятно появление потребности в них.

Преимущество такого технологического решения заключается в сокращении порожнего тарифа и времени на заадресовку платформ предоставлением порожних платформ под погрузку с выходом не с пограничных переходов, а со станции Тайшет. При предоставлении платформы под контейнерную перевозку взимается дополнительная стоимость в размере 5000 руб.

Большая часть порожнего подвижного состава предоставляется с погранпереходов Китай – Забайкальск (Маньчжурия) и Гродеково (Суйфэнхэ). Годовой объем, максимально приходящийся на планируемую инфраструктуру станции Тайшет, по данным логистического оператора, может составить около 19000 платформ, что в месяц составит 1583 платформы.

Так как в рассматриваемом варианте со станций пограничных переходов Забайкальск (Маньчжурия) и Гродеково (Суйфэнхэ) на фитинговых платформах отправляются ~1583 платформы с контейнерами грузоотправителя и следуют до станции Тайшет, порожний тариф приравнивается к 0 руб., а за предоставление платформ может взиматься 5000 руб. за единицу. Таким образом, получаемая прибыль за предоставление платформ под погрузку контейнеров в год составит около 95 млн руб. ($1583 \cdot 5000 \text{ руб.} \cdot 12$).

Далее рассмотрим возможные заадресовки порожних вагонов со станции Тайшет на основные направления Восточно-Сибирской дороги (Видим, Военный городок, Гидростроитель, Зима, Игирма, Иркутск-Сортировочный, Киренга, Куйтун, Нижнеудинск, Усть-Илимск и др.) и на основе сводных данных логистического оператора рассчитаем расходы на оплату порожнего тарифа в год при варианте заадресовки вагонов сразу на станции погрузки и варианте отправления со станции Тайшет до станций погрузки (рисунок 1). В среднем указанный способ распределения порожних вагонов сократит порожний тариф на 40 %.

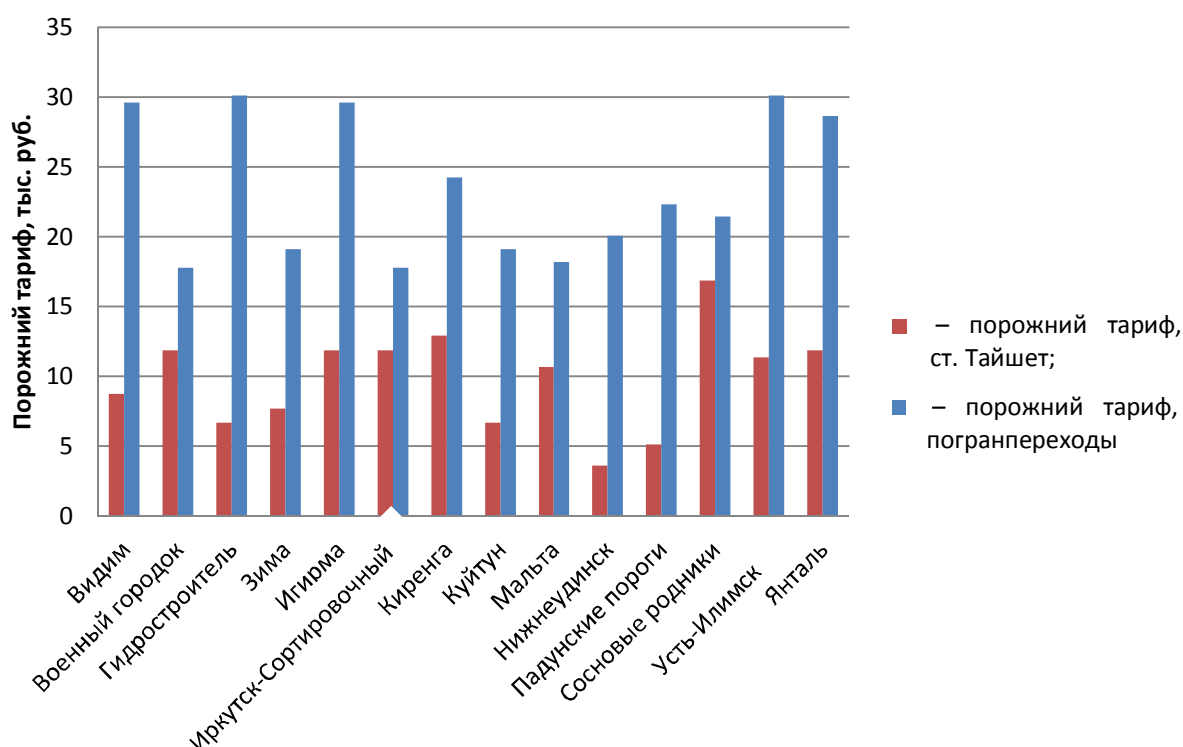


Рисунок 1 – Расходы за оплату порожнего тарифа в год двух вариантов перевозки

Далее рассмотрим разницу сокращения расчетного времени на подачу порожних вагонов под погрузку лесоматериалов (пиломатериалов) с погранперехода и со станции Тайшет, которая в среднем составит 4 – 5 суток в день на заадресовку порожнего вагона, что существенно скажется на обороте подвижного состава и в целом на работе Восточного полигона. Благодаря внедрению рассмотренного распределения можно снизить переработку на станциях Игирма, Гидростроитель, Усть-Илимск и др.

Еще одно технологическое решение заключается в кольцевой логистике обратной загрузки подвижного состава: после доставки по назначению на фитинговых платформах лесного груза в противоположном направлении производится загрузка контейнеров.

По действующей схеме порожний вагон предоставляется с пограничного перехода станции Забайкальск (эксп. Маньчжурия), на станцию Гидростроитель с последующей загрузкой лесоматериалов (пиломатериалов) и отгрузкой по станции Наушки (Эрлянь) или рассмотренной ранее заадресацией порожнего вагона на станцию Нижнеудинск со станцией назначения Забайкальск (эксп.) (рисунок 2).



Рисунок 2 – Действующая схема перевозки

Базовые ставки платы за пользование вагонами, контейнерами дифференцируются в зависимости от групп вагонов, контейнеров, размеров суточного вагонооборота, контейнерооборота, интервалов времени пользования вагонами, контейнерами.

Время нахождения вагонов на станции погрузки-выгрузки не более трех суток под погрузкой и не более двух суток под выгрузкой. Срок нахождения вагонов на станции погрузки-выгрузки исчисляется с момента прибытия вагона на станцию погрузки-выгрузки до даты отправления груженого вагона.

Контроль доходности как завершенных, так и незавершенных рейсов позволяет быстро определять рейсы с «низкой прибыльностью», что дает возможность принимать меры по исправлению ситуации. Можно отказаться от такой перевозки либо повысить тариф.

Технологическое решение кольцевой логистики через станцию Тайшет выглядит следующим образом: платформа с контейнером следует до станции Тайшет. После выгрузки контейнера платформа со станции Тайшет следует на станцию Гидростроитель, откуда после погрузки лесоматериалов (пиломатериалов) проследует до пограничного перехода на станцию Наушки (Эрлянь). Далее порожняя платформа следует под погрузку контейнера на

станции Улан-Батор назначением на станцию Тайшет, после чего подается на станцию Нижнеудинск с последующей отгрузкой на погранпереход Забайкальск (эксп.) (рисунок 3).



Рисунок 3 – Предлагаемая схема перевозки

Допустим, что базовая доходность условно составляет 5000 руб. На основании поэтапного расчета действующей и предлагаемой схем перевозки получено, что в рассматриваемом направлении Гидростроитель – Эрлянь (эксп.) при изначальных ставках доходность составит 6100 руб. (+1100 руб.), что соответственно на 22 % выше изначально базовой доходности, а по направлению Нижнеудинск – Забайкальск (эксп.) доходность вырастет на 15,7 %, что составит 5 785 руб. (+785 руб.). За предоставление платформ под контейнеры и применение кольцевой логистики дополнительная выручка составит 4 833,00 руб. Таким образом, общая прибыль от предлагаемых решений составит суммарно 6718,00 руб. за один оборот вагона. Результаты рассмотренных примеров показывают, что разница в стоимости возрастает от дальности порожней заадресовки вагона, в связи с чем использование технологических решений кольцевой логистики обосновано и имеет практическую значимость.

Повышение эффективности использования подвижного состава за счет сокращения порожнего пробега увеличивает и доходность перевозок. Замена поставок порожних платформ в обмен на загрузку контейнерами позволит оптимизировать логистику перемещений и увеличить пропускную способность сети, стимулируя и обеспечивая тем самым рост перевозок контейнеров из Китая в Европу по территории РФ. Стоит учесть, что помимо лесоматериалов (пиломатериалов) и контейнеров на платформах с соответствующим оборудованием можно транспортировать промышленное оборудование, сельскохозяйственную и дорожную технику, стальной прокат, крупногабаритные грузы при условии обеспечения безопасности перевозки и абсолютной сохранности самого груза.

Реализация рассмотренных технологических решений управления транспортными потоками за счет использования транспортно-логистической инфраструктуры станции Тайшет позволит в значительной мере сократить порожний пробег подвижного состава, повысить эффективность его использования, обеспечить равномерный подвод вагонов к местам погрузки в соответствии с предъявляемыми к перевозке объемами грузов, сбалансировать груженные и порожние пробеги по сети железных дорог, стимулировать развитие контейнерных перевозок, повысить качество перевозок и усилить конкурентоспособность железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Савчук, В. Б. Особенности долгосрочного прогнозирования на рынке грузовых вагонов [Текст] / В. Б. Савчук, А. А. Поликарпов, А. Ю. Слободяник // Вестник Института проблем естественных монополий: техника железных дорог / АНО «Ин-т проблем естественных монополий». – М. – 2019. – № 1 (45). – С. 22 – 27.
2. Иванов, П. А. Осваивая возрастающие объемы перевозок [Текст] / П. А. Иванов // Железнодорожный транспорт. – М. – 2019. – № 2. – С. 52 – 55.
3. Крутоног, Л. Г. Пути повышения эффективности рынка контейнерных перевозок [Текст] / Л. Г. Крутоног // Вестник транспорта / ООО «ТрансРусь». – М. – 2019. – № 8. – С. 16 – 19.
4. Сухарьков, Ю. С. Развивать тенденцию роста контейнерных перевозок [Текст] / Ю. С. Сухарьков // Железнодорожный транспорт. – М. – 2019. – № 6. – С. 14 – 17.
5. Лахметкина, Н. Ю. Как нагрузить порожний вагонопоток [Текст] / Н. Ю. Лахметкина, О. В. Галкина // Мир транспорта / Российский ун-т транспорта. – М. – 2016. – Т. 14. – № 5 (66). – С. 166 – 171.
6. Гвоздева, М. А. Клиентоориентированность грузовых перевозок железнодорожным транспортом [Текст] / М. А. Гвоздева, И. Ю. Сольская // Молодая наука Сибири / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2019. – № 1 (3). – С. 66 – 71.
7. Алабина, В. В. Развитие инструментов взаимодействия железнодорожной транспортной компании и клиентуры при организации завоза-вывоза груза [Текст] / В. В. Алабина // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России: Сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 16 – 19.
8. Тимофеев, В. Н. О развитии станций Тайшет и Иркутск-Сортировочный [Текст] / В. Н. Тимофеев // Железнодорожный транспорт. – М. – 2017. – № 4. – С. 49 – 54.
9. Распоряжение Правительства РФ от 19 марта 2019 г. № 466-р «Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года» [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAg2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 28.01.2020).
10. Инфраструктурные проекты [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://vszd.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=4372&layer_id=3290&refererLayerId=162&id=2185 (дата обращения: 28.01.2020).

References

1. Savchuk V. B., Polikarpov A. A., Slobodyanik A. Yu. Features of long-term forecasting in the market of freight cars [Osobennosti dolgosrochnogo prognozirovaniya na rynke gruzovykh vagonov]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii – Bulletin of the Institute of problems of natural monopolies*, 2019, no. 1 (45), pp. 22 – 27.
2. Ivanov P. A. Mastering the increasing volumes of transportation [Osvaivaya voztastauschie objemi perevozok]. *Zheleznodorozhnii transport – Railway transport*, 2019, no. 2, pp. 52 – 55.

3. Krutonog L. G. Ways to improve the efficiency of the container transport market [Puti povsheniya effektivnosti rinka konteinerh perevozok]. *Vestnik transporta – Bulletin of transport*, 2019, no. 8, pp. 16 – 19.

4. Sukharkov Yu. S. To develop the growth trend of container traffic [Razvivat tendentsiu rosta konteinerh perevozok]. *Zheleznodorozhnii transport – Railway transport*, 2019, no. 6, pp. 14 – 17.

5. Lakhmetkina N. Yu. , Galkina O. V. How to load empty car traffic [Kak nagрузit porozhnii vagonopotok]. *Mir transporta – World of transport*, 2016, vol. 14, no. 5 (66), pp. 166 – 171.

6. Gvozdeva M. A., Solskaya I. Yu. Client-Oriented cargo transportation by rail [Klientoorientirovannost gruzovyh perevozok zheleznodorozhnym transportom]. *Molodaya nauka Sibiri – Young science of Siberia*, 2019, no. 1 (3), pp. 66 – 71.

7. Alabina V. V. Development of tools of interaction between railway transport companies and clientele with the organization of delivery of export cargo [Razvitie instrumentov vzaimodeistviya zheleznodorozhnoi transportnoi kompanii i klientury pri organizatsii zavoza-vyvoza gruzov]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Abstract of the Int. scientific-practical conference «Actual problems and prospects of development of transport, industry and economy of Russia»). – Rostov-on-Don, 2019, pp. 16 – 19.

8. Timofeev V. N. About the development of Taishet and Irkutsk-sorting stations [O razvitii stantsii Taishet i Irkutsk Sortirovochnii]. *Zheleznodorozhnii transport – Railway transport*, 2017, no. 4, pp. 49 – 54.

9. Order Of the government of the Russian Federation dated March 19, 2019 No. 466-R «Long-Term development program of the open joint stock company «Russian Railways» until 2025» [Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 19 marta 2019 g. № 466-r «Dolgosrochnaya pro-gramma razvitiya otkrytogo akcionernogo obshchestva «Rossijskie zheleznye dorogi» do 2025 goda»], URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAg2RXSVoKu.pdf> (accessed 28.01.2020).

10. Infrastructure projects [Infrastrukturnye proekty], URL: http://vszd.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=4372&layer_id=3290&refererLayerId=162&id=2185 (accessed 28.01.2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лахметкина Наталья Юрьевна

Российский университет транспорта (МИИТ).

Образцова, д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистические транспортные системы и технологии», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (903) 258-48-98.

E-mail: naturla@mail.ru

Макарова Анастасия Михайловна

ООО «ТрансЛес».

Верхняя Красносельская, владение 16, стр. 3, г. Москва, 107140, Российская Федерация.

Ведущий специалист отдела продаж «Восток»

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lakhmetkina Natalia Urievna

Russian university of transport (MIIT).

9, Obraztsova, Moscow, 127994, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Logistic transport systems and technologies», OSTU.

Phone: +7 (903) 258-48-98.

E-mail: naturla@mail.ru

Makarova Anastasia Mihailovna

LLC TransLes.

16/3, Verhnyaa Krasnoselskaya., Moscow, 107140, the Russian Federation.

Leading specialist of the sales Department "Vostok".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лахметкина, Н. Ю. Технологические решения управления грузными и порожними пробегами [Текст] / Н. Ю. Лахметкина, А. М. Макарова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 114 – 122.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lakhmetkina N.U., Makarova A.M. Technological solutions for managing loaded and empty runs. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 1 (41), pp. 114 – 122 (In Russian).

УДК 621.372.001

А. А. Геркусов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева (КАИ), г. Казань, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ИХ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. В настоящее время согласно нормативным документам удельное сопротивление проводов линий электропередачи принимается одинаковым для любого допустимого тока нагрузки и температуры нагрева проводов, равной 20°. Такой учет удельных сопротивлений вызывает значительные погрешности, существенно влияющие на режимы работы линий электропередачи. В данной статье проанализировано влияние температуры наружного воздуха, тока нагрузки, интенсивности солнечной радиации, скорости и направления ветра на температуру нагрева проводов воздушных линий электропередачи и, как следствие, на значение удельного сопротивления проводов и потерь мощности и электроэнергии в них. На примере трассы БАМа показано, что даже в условиях одного региона температура наружного воздуха меняется в зависимости от времени года в весьма широких пределах. Это в свою очередь требует скрупулезного учета зависимости значения удельного сопротивления проводов линии от внешней температуры воздуха. Вместе с тем показана допустимость неучета интенсивности солнечной радиации, скорости и направления ветра на температуру нагрева проводов воздушных линий электропередачи в связи с отсутствием исчерпывающей информации об этих факторах и их противоположной направленностью. Однако такое допущение будет справедливо только при рабочих токах в диапазоне от нуля до двойного значения тока, соответствующего экономической плотности. При расчете потерь электроэнергии, особенно в сильно загруженных линиях, обязателен учет всех внешних температурных воздействий. В связи с появлением сенсорных датчиков температуры предлагается их непосредственное использование для измерения температуры нагрева проводов линии с последующим вычислением их удельного сопротивления.

Ключевые слова: температура нагрева провода, электроэнергетическая система, сопротивление линии, потери электроэнергии.

Alexey A. Gerkusov

Kazan national research technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, the Russian Federation

INFLUENCE OF THE TEMPERATURE OF THE WIRES LINES ON THEIR RESISTANCE AND POWER LOSS

Abstract. Currently, according to regulatory documents, the resistivity of power line wires is assumed to be the same for any permissible load current and the heating temperature of the wires is equal to 20 degrees. This account of resistivity causes significant errors that significantly affect the operating modes of power transmission lines. This article analyzes the influence of outdoor air temperature, load current, solar radiation intensity, wind speed and direction on the heating temperature of overhead power lines, and as a result, on the value of the resistivity of the wires and power and electricity losses in them. The example of the BAM highway shows that even in the conditions of one region, the outdoor air temperature varies, depending on the time of year, within a very wide range. This in turn requires careful consideration of the dependence of the resistivity value of the line wires on the external air temperature. At the same time, it is shown that it is permissible to ignore the intensity of solar radiation, wind speed and direction on the heating temperature of overhead power lines due to the lack of comprehensive information about these factors and their opposite direction. However, this assumption will only be valid for operating currents in the range from zero to double the current value corresponding to the economic density. When calculating power losses, especially in heavily loaded lines, it is necessary to take into account all external temperature influences. Due to the appearance of sensor temperature sensors, it is proposed to use them directly to measure the heating temperature of line wires and then calculate their resistivity.

Key words: Temperature heating wire; power system; the resistance of the line; the loss of electricity.

Электронергетическая система характеризуется параметрами системы, зависящими от свойств входящего в нее оборудования и в частности от удельных активных сопротивлений и

проводимостей линий электропередачи. В свою очередь от значений удельных активных сопротивлений зависят такие параметры режима, как значения напряжения в узлах нагрузки и протекающих токов в ветвях, потери напряжения, мощности и электроэнергии в линиях электропередачи, затраты на передачу и распределение электроэнергии, селективная и надежная работа релейной дистанционной защиты, так как эта защита реагирует на значение полного сопротивления от места ее включения до точки короткого замыкания, а при значительном отклонении удельного сопротивления линии от расчетного возникнет несоответствие между сопротивлением защищаемого участка линии и выбранной уставкой, а следовательно, нарушается устойчивая работа электроэнергетической системы в целом. Так, например, в июле 2012 г., при возникновении двухфазного короткого замыкания на участке ВЛ-110 кВ Джанкой – Нижнегорское (АО «Крымэнерго») произошел отказ первой ступени дистанционной защиты ШДЭ-2802 по причине роста сопротивления проводов воздушных линий (ВЛ) в условиях полного отсутствия ветра, при высокой температуре наружного воздуха (+44 °С), значительных стрелах провеса линии и активном солнце. Дополнительно нагрев проводов ВЛ осуществлялся нагрузочным током промежуточных подстанций НС-2 и НС-3, от которых осуществлялось орошение земель сельскохозяйственного назначения. В результате отказа основной защиты линия отключилась от действия резервной второй ступени ШДЭ-2802 и токовой отсечки.

Температура нагрева провода оказывает большое влияние на величину удельного сопротивления проводов и кабелей. Согласно документам [1, 2] удельные сопротивления проводов принимаются в расчетах, как правило, при температуре +20 °С либо, в редких случаях, температура провода принимается равной температуре воздуха.

Как известно, температура материала проводников, из которого изготовлены провода, меняется в весьма широких пределах. Это зависит как от погодных условий окружающей среды, так и от дополнительного нагрева проводников током нагрузки. На территории СНГ наружная температура воздуха меняется в зависимости от широты, времени года, количества выпадаемых осадков, солнечной радиации в диапазоне от +55 до –60 °С. Даже в условиях одного региона пределы изменения температуры воздуха весьма широки. Например, на западном участке трассы БАМ, особенно в Северо-Муйской и Чарской котловинах, а также в долине реки Олёкма климат приближается к арктическому. Зимой здесь устойчивые низкие температуры с сильными ветрами, снегопадами и малой влажностью. Абсолютный минимум в некоторых местах достигает –58 °С, а среднегодовая температура составляет всего 7,8 °С. Продолжительность периода со среднесуточной температурой ниже нуля составляет 196 – 209 дней в году. Летом наблюдаются обильные затяжные дожди, при этом количество осадков в короткий ливневый период может достигать 100 мм. Температура воздуха летом достигает +40 °С [3].

Изменяющаяся в таких широких пределах температура оказывает значительное влияние на величину удельного сопротивления проводов и кабелей r_{np} , однако до настоящего времени учет влияния температуры нагрева проводов ЛЭП в расчетах рабочих режимов и потерь электроэнергии проводится в редких случаях. Не используются и не исследуются ни температура нагрева провода током нагрузки, ни интенсивность солнечной радиации, ни температура окружающего воздуха, а издаваемых научно-исследовательских работ в этой области недостаточно.

Учет температуры проводов воздушных линий электропередачи в расчетах потерь электроэнергии. Зависимость активного сопротивления проводов ВЛ r_{np} от температуры нагрева провода t_{np} определяется формулой [4, 5]

$$r_{np} = r_0 [1 + 0,004(t_{np} - 20^\circ)], \quad (1)$$

где r_0 – удельное сопротивление провода при температуре +20 °.

Как следует из (1), отличие температуры провода от 20 ° на величину Δt_{np} приведет к изменению его сопротивления на величину $0,004\Delta t_{np}$. Температура провода, как правило, неиз-

вестна и зависит от температуры окружающего воздуха t_b , протекающего по проводу тока, скорости и направления ветра, а также от интенсивности солнечной радиации.

В настоящее время в практических расчетах учесть охлаждение провода в зависимости от скорости ветра, его направления и нагрев от воздействия солнечной радиации невозможно по причине отсутствия исчерпывающей информации об этих факторах. В связи с тем, что степень их воздействия значительно меньше, чем от температуры воздуха и тока нагрузки, а также учитывая противоположную направленность их воздействия, в практических расчетах ими можно пренебречь. Расчеты, проведенные на кафедре электроэнергетических систем МЭИ, показывают, что это допущение справедливо при рабочих токах *в диапазоне от нуля до двойного значения тока, соответствующего экономической плотности*. На основании этого в учебном пособии [6] была предложена следующая формула для определения температуры провода $t_{пр}$:

$$t_{пр} = t_b + 8,3 \cdot j^2 \sqrt{\frac{F}{300}} = t_b + 8,3 \cdot \frac{I^2}{F} \sqrt{\frac{1}{300F}}. \quad (2)$$

Таким образом, температура нагрева провода будет нелинейно зависеть от значения нагрузочного тока I и сечения провода F . Согласно Правилам...[2] допустимая температура нагрева проводов составляет 70°C . Тогда, решая неравенство

$$t_{пр} = t_b + 8,3 \cdot \frac{I^2}{F} \sqrt{\frac{1}{300F}} \leq 70, \quad (3)$$

относительно $I = I_{доп}$, получаем области допустимых токовых нагрузок $I_{доп}$ линии при заданном сечении проводов F :

$$I_{доп} \leq \sqrt{\frac{F \cdot (70 - t_b)}{8,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{300F}}}}. \quad (4)$$

На основании выражения (4) построены графические зависимости (рисунок 1) длительных допустимых токов сталеалюминиевых проводов от температуры наружного воздуха:

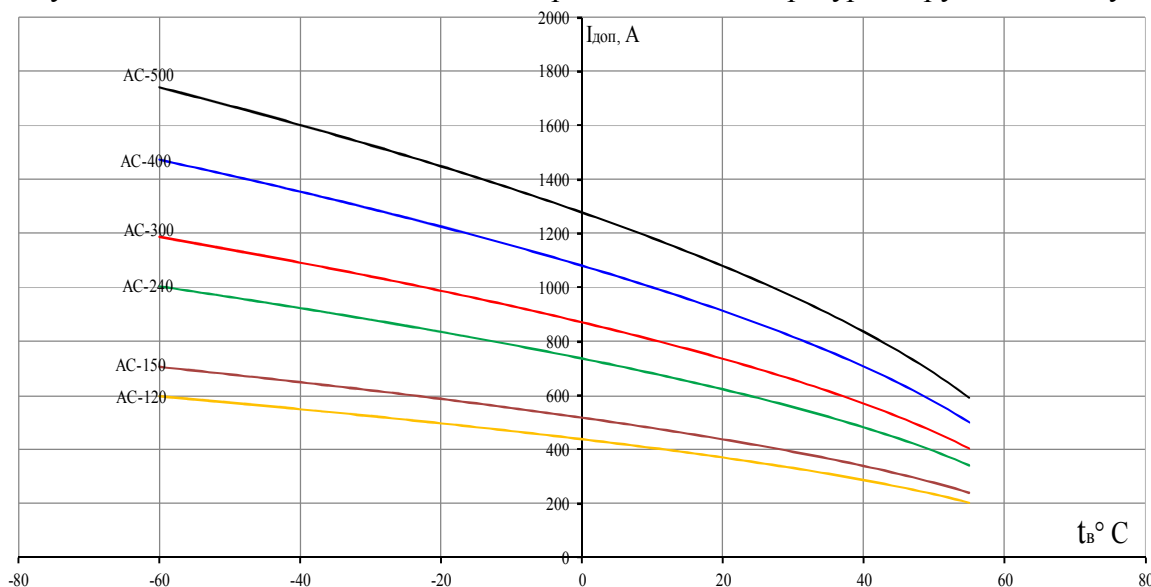


Рисунок 1 – Зависимость допустимых длительных токов для сталеалюминиевых проводов марки АС от температуры наружного воздуха

Из приведенных на рисунке 1 зависимостей следует, что со снижением температуры растет допустимая токовая нагрузка линии. При этом погрешность вычислений по формулам (2) – (4) составляет менее 2 %.

Так, например, для сталеалюминиевого провода марки АС-300/39 при температуре наружного воздуха $+25^{\circ}\text{C}$ согласно работе [2] $I_{\text{доп}} = 710\text{ A}$, а на основании расчетов, проведенных по формуле (4), $I'_{\text{доп}} = 698,5\text{ A}$. Тогда погрешность $\delta I_{\text{доп}}$ определится по формуле:

$$\delta I_{\text{доп}} = \frac{|I_{\text{доп}} - I'_{\text{доп}}|}{I_{\text{доп}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

и составит

$$\delta I_{\text{доп}} = \frac{710 - 698,5}{710} \cdot 100\% = 1,619\%.$$

Таким образом, *при рабочих токах в диапазоне от нуля до двойного значения тока, соответствующего экономической плотности*, применение для практических расчетов формул (2) – (4), без учета скорости и направления ветра, а также интенсивности солнечной радиации вполне оправданны.

Тогда формула (1) для расчета активных сопротивлений, существенно зависящих от температуры окружающего воздуха и с учетом выражения (2), окончательно запишется в виде:

$$r_{\text{пр}} = k_{\text{арм}} r_0 \left[1 + 0,004 \left(t_{\text{в}} - 20 + 8,3 \cdot j^2 \sqrt{\frac{F}{300}} \right) \right], \quad (6)$$

где j – плотность тока в проводе, $\text{A}/\text{мм}^2$, $k_{\text{арм}} = 1,02$ – коэффициент, учитывающий влияние дополнительных потерь в крепежной арматуре проводов ЛЭП (седлах, виброгасителях и т. д.).

На основании выражения (6) при варьируемом токе нагрузки I , для различных значений температуры наружного воздуха были построены зависимости $r_{\text{пр}} = f(I)$ для проводов марок АС-240/39 (рисунок 2) и АС-500/27 (рисунок 3), из которых следует, что принимать температуру провода равной температуре воздуха допустимо только в условиях, когда фактическая плотность тока ниже ее экономических значений, а солнечная радиация отсутствует. При этих условиях погрешность в оценке действительных значений сопротивления проводов не превосходит 3,2 %. В условиях слабого ветра, направленного вдоль проводов, при наличии солнечной радиации даже при фактических плотностях тока ниже экономических значений, перегрев может составлять более 15° [5 – 8].

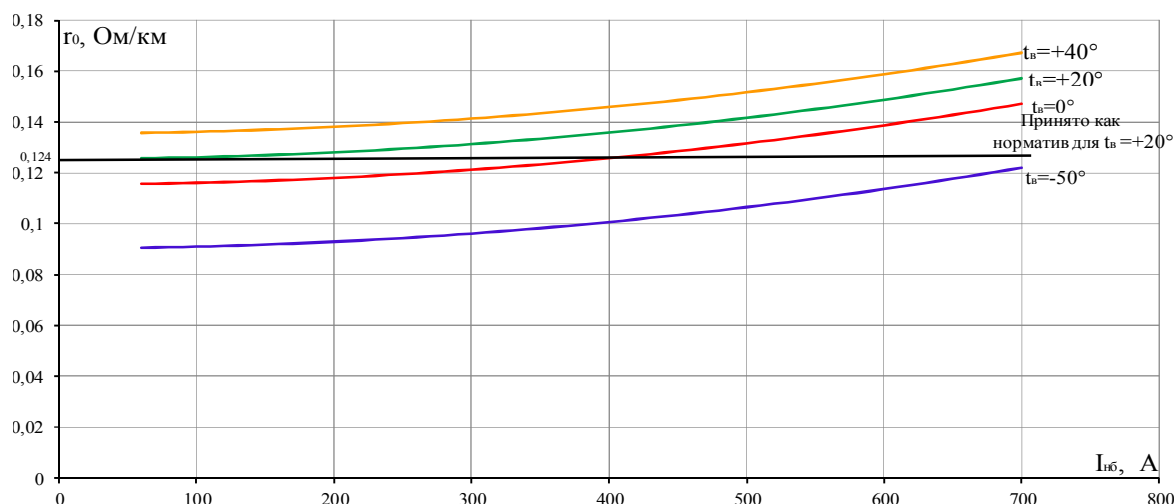


Рисунок 2 – Зависимость удельного активного сопротивления провода АС-240/39 от тока нагрузки при различных значениях температуры наружного воздуха

При фактической плотности тока, превышающей экономические значения, неучет фактической интенсивности солнечной радиации, скорости и направления ветра может приводить к перегреву проводов по сравнению с воздухом до 50° [5 – 8], а погрешность в оценке действительных значений сопротивления проводов согласно рисункам 2 и 3 возрастает

до 20 %, а для определенных сочетаний значений этих погодных факторов (например, при полном отсутствии ветра и интенсивной солнечной радиации) погрешность формулы (3) может достигать 100 %.

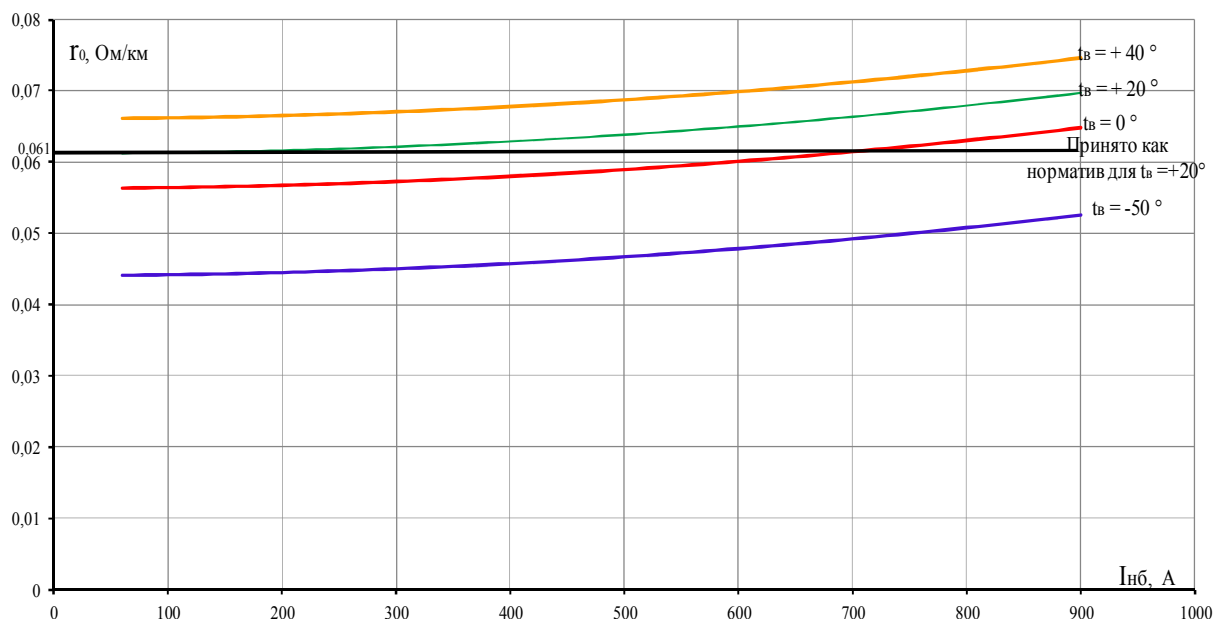


Рисунок 3 – Зависимость удельного активного сопротивления провода АС-500/27 от тока нагрузки при различных значениях температуры наружного воздуха

В настоящее время успешно применяются разработанные в ООО «Димрус» (г. Пермь), сенсорные датчики системы WDM-T, состоящие из трех (и более) автономных датчиков контроля температуры марки WTS, смонтированных непосредственно на проводах ЛЭП, и одного блока приемника-концентратора информации марки WDM, установленного на земле. Данные устройства позволяют измерять температуру провода непосредственно во время работы ЛЭП. При этом точность измерения составляет не менее 97 % от фактических значений температуры проводов [9].

В связи с разработкой и началом промышленного выпуска сенсорных датчиков для измерения температуры находящихся в эксплуатации проводов линий электропередачи предлагается использовать более простой и точный метод расчета сопротивления проводов непосредственно по формуле (1), где $t_{пр}$ – измеренная температура нагрева провода с учетом всех влияющих на нее факторов.

Удельные потери электроэнергии с учетом нагрузочного тока рассматриваемой ВЛ, воздействия температуры наружного воздуха на удельное сопротивление проводов ВЛ и условно-постоянных потерь электроэнергии на корону и в линейной изоляции вычисляются по формуле [10, 11]:

$$\frac{\Delta W_{\Sigma}}{W} = \frac{\sqrt{3} \cdot r_{пр} \cdot \tau \cdot L \cdot I_{нб}}{U_n \cdot T_{нб} \cdot \cos(\varphi)} + \frac{8760 \cdot \Delta P_{кор} \cdot L}{\sqrt{3} U_n I_{нб} \cos(\varphi) T_{нб}} + \frac{U_n T_{вл} N_{гир} \cdot L}{3 \sqrt{3} R_{из} N_{из} I_{нб} T_{нб} \cos(\varphi)}, \quad (7)$$

где W – объем переданной по ВЛ электроэнергии, кВт·ч; ΔW – суммарные абсолютные потери электроэнергии, кВт·ч; L – полная длина линии, км; U_n – номинальное напряжение линии, кВ; $T_{нб}$ – число часов использования максимума нагрузки, ч; τ – время максимума потерь, ч; $\cos(\varphi)$ – коэффициент мощности; $T_{вл}$ – число часов влажной погоды в году; $\Delta P_{кор}$ – удельные потери мощности на корону; $N_{гир}$ – число изоляторов в гирлянде, шт; $N_{гир}$ – число гирлянд на 1 км ВЛ, шт./км;

По формуле (7) для различных сечений проводов ВЛ-220 кВ длиной $L = 120$ км, проходящей в третьем районе по степени загрязнения атмосферы (СЗА), с числом часов использо-

вания максимума загрузки, соответственно равным 2000 и 5000 ч, при варьируемом токе нагрузки построим зависимости $\Delta W/W = f(I_{нб})$ (рисунки 4 и 5).

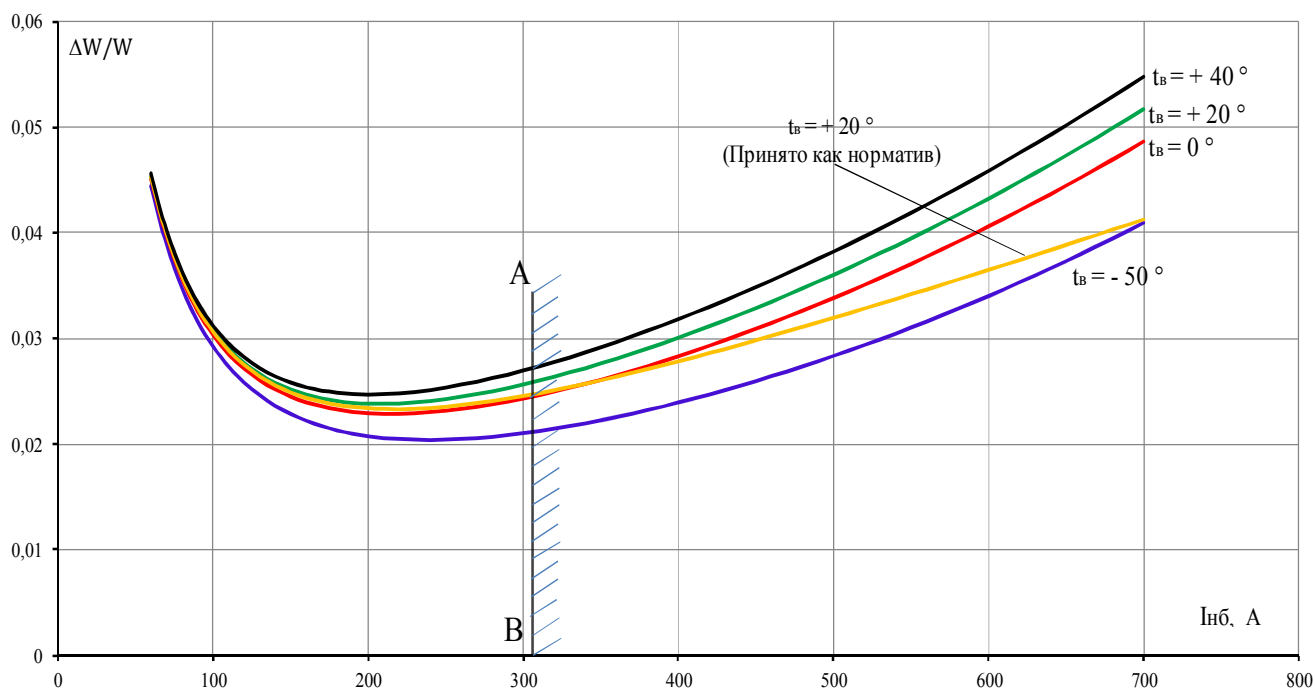


Рисунок 4 – Зависимость суммарных относительных потерь электроэнергии от тока нагрузки в ВЛ-220 кВ длиной 120 км, сооружаемой проводом марки АС-240/39 и в третьем районе СЗА при различных значениях температуры окружающего воздуха и времени $T_{нб} = 2000$ ч

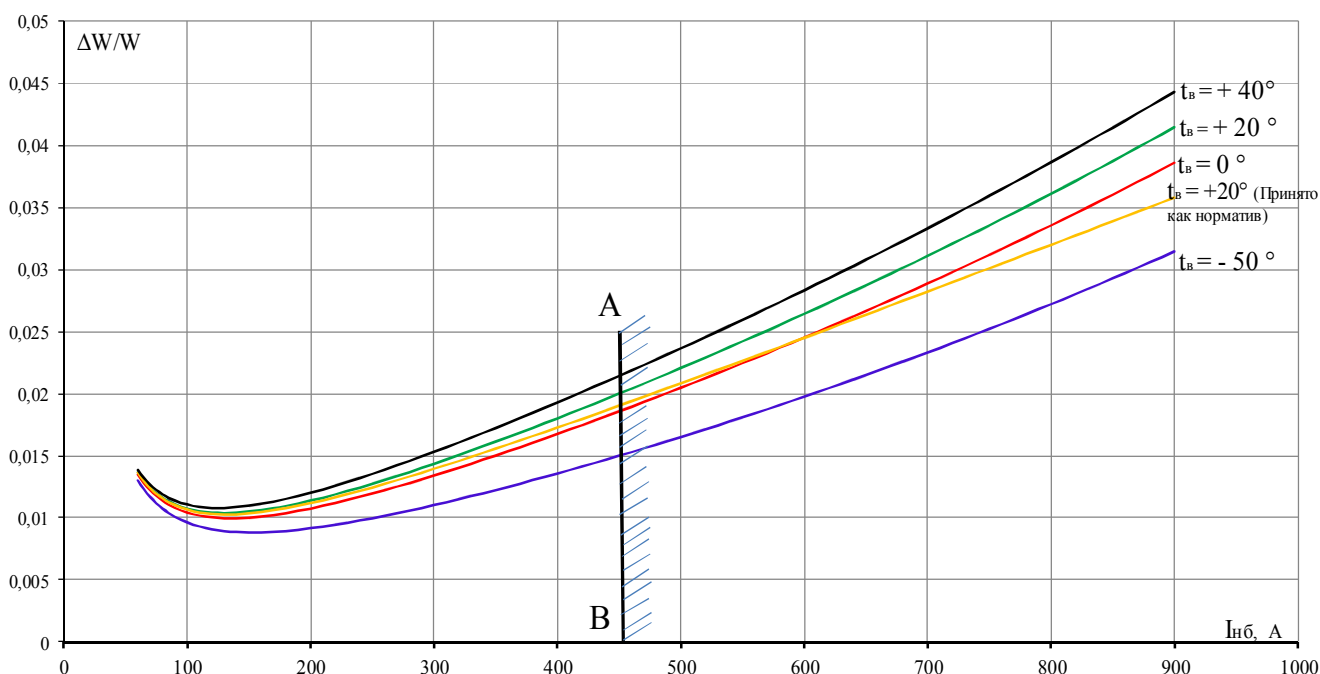


Рисунок 5 – Зависимость суммарных относительных потерь электроэнергии от тока нагрузки в ВЛ-220 кВ длиной 120 км, сооружаемой проводом марки АС-500/27 и в третьем районе СЗА при различных значениях температуры окружающего воздуха и времени $T_{нб} = 5000$ ч

Из построенных зависимостей видно, что учитывать внешние температурные и ветровые воздействия на уровень относительных потерь электроэнергии следует при фактической

плотности тока j , превышающей ее нормированные экономические значения, определяемые границей А-В:

для ВЛ-220 кВ, выполненной проводом АС-240 при $T_{нб} = 2000$ ч: при $j > 1,3$ А/мм² (см. рисунок 4);

для ВЛ-220 кВ, выполненной проводом АС-500 при $T_{нб} = 5000$ ч: при $j > 0,9$ А/мм² (см. рисунок 5), что полностью совпадает со сказанным выше по отношению к сопротивлениям проводов ВЛ.

Погрешность в определении потерь электрической энергии $\delta_{\Delta W}$ в зависимости от $t_{пр}$ при варьируемом токе нагрузки по отношению к потерям, полученным по формуле (7), на основании справочных данных определяется выражением:

$$\delta_{\Delta W} = \frac{\left(\frac{\Delta W}{W}\right)_{20} - \left(\frac{\Delta W}{W}\right)_{t_{пр}}}{\left(\frac{\Delta W}{W}\right)_{20}} \cdot 100 \% \quad (8)$$

На основании проведенных на ЭВМ по формуле (8) расчетов построим зависимости $\delta_{\Delta W} = f(I_{нб})$ (рисунок 6), из которых следует, что погрешность в оценке действительных значений потерь электроэнергии при условии неучета фактической интенсивности солнечной радиации, скорости и направления ветра согласно рисункам 6 и 7 возрастает до 51 %. А для определенных сочетаний значений этих погодных факторов погрешность может достигать 100 %.

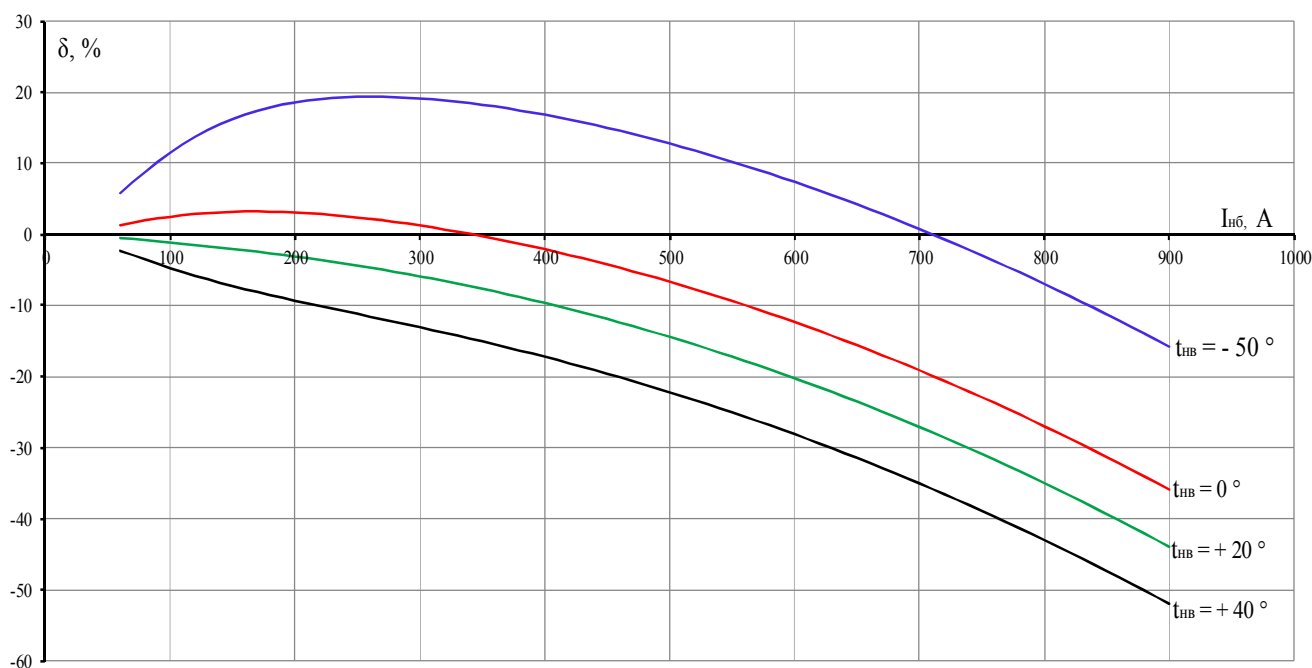


Рисунок 6 – Зависимость погрешности расчета суммарных относительных потерь электроэнергии от тока нагрузки без учета интенсивности солнечной радиации, скорости и направления ветра в ВЛ-220 кВ развнутой длиной 120 км, сооружаемой проводом марки АС-240/39 в третьем районе СЗА при различных значениях температуры окружающего воздуха и времени $T_{нб} = 5000$ ч

Значительные величины погрешностей указывают на целесообразность учета реальной $t_{\text{пр}}$ для совершенствования существующих методов расчета потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередачи [12], что может быть легко достигнуто широким применением сенсорных датчиков системы WDM-T и в первую очередь на линиях электропередачи напряжением 110 кВ и выше.

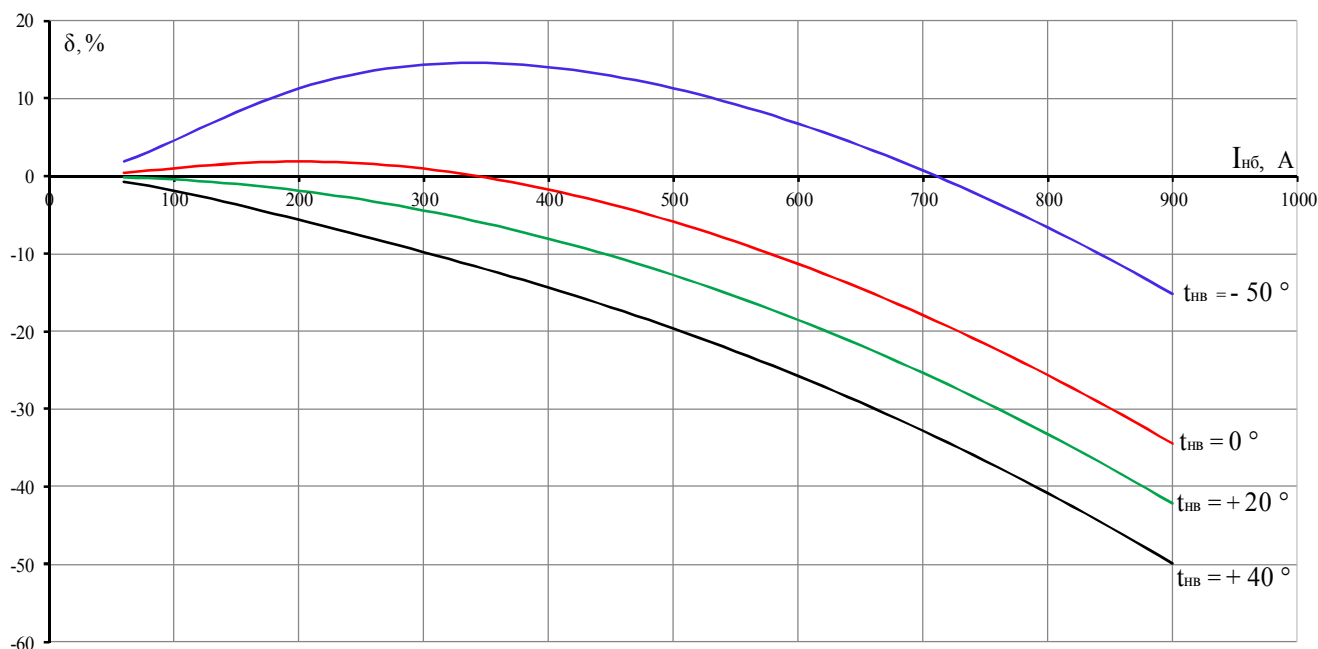


Рисунок 7 – Зависимость погрешности расчета суммарных относительных потерь электроэнергии от тока нагрузки без учета интенсивности солнечной радиации, скорости и направления ветра в ВЛ-220 кВ развернутой длиной 120 км, сооружаемой проводом марки АС-240/39 в третьем районе СЗА при различных значениях температуры окружающего воздуха и времени $T_{\text{нб}} = 2000 \text{ ч}$

Таким образом, *при расчете потерь электроэнергии, особенно в сильно загруженных линиях, обязателен учет влияния как интенсивности солнечной радиации, так и скорости и направления ветра путем широкого внедрения сенсорных датчиков и в первую очередь на линиях напряжением 110 – 220 кВ.*

Вместе с тем необходимо учитывать, что в зимний период наблюдается максимум нагрузки, но при этом будут самые низкие температуры воздуха и отсутствие солнечной радиации. Наоборот, в летний период при меньших, чем зимой, нагрузках наблюдаются самые высокие температуры воздуха и максимальное воздействие солнечной радиации. В результате эквивалентная величина сопротивления провода за год и годовое значение потерь компенсируют друг друга, а степень этой компенсации зависит от географической широты местности.

Список литературы

1. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / Под ред. Л. Д. Файбисовича. – М.: ЭНАС, 2005. – 314 с.
2. Правила устройства электроустановок [Текст]. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 630 с.
3. Особенности проектирования и строительства устройств энергоснабжения в суровых климатических условиях: Сб. науч. тр. [Текст] / ВНИИ трансп. стр-ва; Под ред. В. П. Шурыгина. – М.: Транспорт, 1977. – 78 с.
4. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 «Об организации в Министерстве промышленности и энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям» [Текст] [Электрон-

ный ресурс]. – Режим доступа: https://www.eens.ru/upload/file/4_3_minpromenergo_326.pdf (дата обращения: 08.05.2020).

5. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

6. Потери электроэнергии в электрических сетях: основные сведения, расчет и нормирование: Учебное пособие [Текст] / Ю. С. Железко, Ю. В. Шаров и др. – М.: МЭИ, 2011. – 128 с.

7. Xiaoming Dong, Chongqing Kang, Hua San, Ning Zhang. A proposed algorithm for overhead transmission line conductor temperature rise calculation. *Internations an transmission on electrical energy systems*, 2014. – vol. 24. – Pp. 578 – 596.

8. CIGRE Technical brochure: Guide for thermal rating calculation of overhead lines. WG B 2.43. – 2014. – 95 p.

9. Базовый модуль-приемник «WDM». Руководство по эксплуатации. Версия 1.0 [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dimrus/manuals/wdm_um.pdf (дата обращения: 08.05.2020).

10. Железко, Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. – М.: ЭНАС, 2005. – 277 с.

11. Геркусов, А. А. Оптимизация потерь электроэнергии, передаваемой по воздушным линиям напряжением 110 кВ и выше [Текст] / А. А. Геркусов // Научно-технические ведомости СПбГПУ / Санкт-Петербургский политехн. ун-т Петра Великого. – СПб. – № 1 (214) – 2015. – С. 89 – 96.

12. Расчет погрешностей определения потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности из-за неучета атмосферных и режимных параметров [Текст] / Е. В. Петрова, А. Я. Бигун и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2013. – № 2 (120). – С. 191 – 196.

References

1. *Spravochnik po proyektirovaniyu elektricheskikh setey. Pod redaktsiyey L.D. Faybisovicha* (Reference design of electrical networks. Edited by L. D. Faibisovich). Moscow: N.Ts. ENAS, 2005, 314 p.

2. *Pravila ustroystva elektroustanovok, 6-ye izdaniye* (Electrical installation rules 6 th edition). Moscow: Energoatomizdat, 2002, 630 p.

3. *Osobennosti proyektirovaniya i stroitelstva ustroystv energosnabzheniya v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh : sbornik nauchnykh trudov; pod red. V. P. Shurygina* (Features of the design and construction of energy supply devices in severe climatic conditions: a collection of scientific papers. Edited by V. P. Shurygin). Moscow: Transport, 1977, 78 p.

4. *Prikaz Ministerstva energetiki RF ot 30 dekabrya 2008 goda № 326 «Ob organizatsii v ministerstve promyshlennosti i energetiki Rossiyskoy federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tekhnologicheskikh poter elektroenergii pri yeye peredache po elektricheskim setyam»* (Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated December 30, 2008 No. 326 “On the organization in the Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation of work on the approval of standards for technological losses of electricity during transmission through electric networks”), URL: https://www.eens.ru/upload/file/4_3_minpromenergo_326.pdf (accessed 08.05.2020).

5. Zhelezko Yu. S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvodlya prakticheskikh raschetov* (Loss of electricity. Reactive power. Electricity quality: a guide for practical calculations). Moscow: ENAS, 2009, 456 p.

6. Zhelezko Yu. S. Sharov Yu. V. Zarudsky G. K. Sipacheva O. V. Shvedov G. V. *Poteri elektroenergii v elektricheskikh setyakh: osnovnyye svedeniya raschet i normirovaniye* (Uchebnoye

posobiye Electricity losses in electric networks: basic information calculation and rationing. Tutorial). Moscow: MPEI, 2011, 128 p.

7. Xiaoming Dong, Chongqing Kang, Hua San, Ning Zhang. A proposed algorithm for overhead transmission line conductor temperature rise calculation. *Internations an transmission on electrical energy systems*, 2014; vol. 24, pp. 578 – 596.

8. CIGRE Technical brochure: Guide for thermal rating calculation of overhead lines. WG B2.43, 2014, 95 p.

9. The basic receiver module "WDM". User manual. Version 1.0 [Bazovyy modul'-priemnik «WDM». Rukovodstvo po ekspluatatsii. Versiya 1.0]. URL: https://dimrus/manuals/wdm_um.pdf (accessed 08.05.2020).

10. Zhelezko Yu. S., Artemyev A. V. Savchenko O. V. *Raschet, analiz i normirovaniye poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh* (Calculation, analysis and rationing of electric power losses in electric networks). Moscow: NTs ENAS, 2005, 277 p.

11. Gerkusov A. A. Optimization of the loss of electricity transmitted overhead lines of 110 kV and above [Optimizatsiya poter elektroenergii, peredavayemoy po vozdushnym liniyam napryazheniyem 110 kV i vyshe]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU – Scientific and Technical Sheets of St. Petersburg State Polytechnical University*, 2015, no. 1 (214), pp. 89 – 96.

12. Petrova E. V., Bigun A. Ya., Goryunov V. N., Girshin S. S. Bubenichikov A. A. Calculation of errors in determining the loss of electric energy in wires of increased throughput due to neglect of atmospheric and operational parameters [Raschet pogreshnostey opredeleniya poter elektricheskoy energii v provodakh povyshennoy propusknoy sposobnosti iz-za neucheta atmosferykh i rezhimnykh parametrov]. *Omskiy nauchnyy vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 2 (120), pp. 191 – 196.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Геркусов Алексей Анатольевич

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ.

К. Маркса ул., д. 10, г. Казань, 420111, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и информационные технологии» ЗИМИТ КНИТУ – КАИ.

Юдинская дистанция электроснабжения Горьковской железной дороги (ЭЧ-7), электромеханик РРУ, группа релейной защиты и автоматики.

Тел.: 8-987-404-99-07.

E-mail: Gerkusov_Alex@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gerkusov Alexey Anatolievich

Kazan national research technical University named after A. N. Tupolev-KAI.

K. Marx str. 10, Kazan, 420111, Russian Federation.

Candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department "Of mechanical engineering and information technologies" ZIMIT KNITU-KAI

Yudinskaya distance of power supply of the Gorky railway (ECH-7) Electrician of the relay protection and automation group of the RRU

Tel. 8-987-404-99-07

E-mail: Gerkusov_Alex@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Геркусов, А. А. Влияние температуры проводов воздушной линии электропередачи на их сопротивление и потери электроэнергии [Текст] / А. А. Геркусов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 123 – 132.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gerkusov A. A. Influence of temperature of overhead line wires on their resistance and power losses. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 1 (41), pp. 123 – 132 (In Russian).

УДК 621.3

С. В. Гужов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), г. Москва, Российская Федерация

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ СПРОСА НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ РЕГИОНОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. Расчет прогнозного спроса на электрическую энергию энергетическими системами и комплексами субъектов Российской Федерации является актуальной задачей. Использование детерминированных способов для объектов подобного масштаба практически исключено в силу отсутствия либо существенной неполноты исходных данных. Статистические данные, доступные в официальных источниках в неизменном формате, представлены, как правило, на период три – пять лет, что является недостаточным для применения искусственных нейронных сетей. В статье сделана попытка исследования свойств сходных энергетических систем и комплексов. Современные энергосистемы и комплексы относятся к замкнутым подсистемам, множество элементов и связей которых эквивалентно множеству элементов локальных подсистем энергосистемы более высокого уровня. Это означает недопустимость составления предиктивных правил функционирования без учета разнородных внешних воздействий. Система и подсистемы при этом представляются в качестве «черного ящика». Взаимодействия между системой и внешней средой и внутри системы осуществляются передачей сигналов, которые описываются конечным набором факторов, доступных к анализу и прогнозированию. Проведен анализ возможности дополнения генеральной совокупности статистическими данными по иным объектам со сходной структурой. Подтверждено свойство гетероморфизма энергетических систем и комплексов. На примере энергосистем регионов Российской Федерации показана возможность подобного подхода в случае применения к анализу неколлинеарных групп факторов. Приведены результаты 15 расчетов наиболее энергоемких субъектов страны, в 28 % случаев погрешность точности прогнозного электропотребления составляет менее 5 %. Дальнейшее повышение точности прогноза должно развиваться в направлении увеличения числа входных факторов при соблюдении условия отсутствия их коллинеарности и мультиколлинеарности.

Ключевые слова: сопоставимые условия, прогнозирование, спрос на электрическую энергию, искусственная нейронная сеть, погрешность.

Sergey V. Guzhov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, the Russian Federation

ON FORECASTING DEMAND FOR ELECTRIC POWER WITH APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS BY ENERGY SYSTEMS OF THE REGIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION

Abstract. The calculation of the forecast demand for electric energy by energy systems and complexes of the constituent entities of the Russian Federation is an urgent task. The use of deterministic methods for objects of a similar scale is practically excluded due to the absence or significant incompleteness of the source data. Statistical data available in official sources in an unchanged format is usually presented for a period of 3 – 5 years, which is insufficient for the use of artificial neural networks. The article attempts to study the properties of similar energy systems and complexes. Modern power systems and complexes belong to closed subsystems, the set of elements and connections of which is equivalent to the set of elements of local subsystems of a higher level energy system. This means the inadmissibility of drawing up predictive rules of functioning without taking into account heterogeneous external influences. The system and subsystems are presented as a "black box". Interactions between the system and the external environment and within the system are carried out by the transmission of signals, which are described by a finite set of factors available for analysis and forecasting. The analysis of the possibility of supplementing the general population with statistical data on other objects with a similar structure is carried out. The property of heteromorphism of energy systems and complexes is confirmed. The example of energy systems in the regions of the Russian Federation shows the possibility of a similar approach if non-collinear groups of factors are applied to the analysis. The results of 15 calculations of the most energy-intensive entities of the country are presented, in 28 % of cases the accuracy of forecasted power consumption accuracy is less than 5 %. A further increase in the accuracy of the forecast should develop in the direction of increasing the number of input factors, subject to the condition of the absence of their collinearity and multicollinearity. It is shown

that energy systems and complexes of various scales can be described by non-Gaussian stable distributions with infinite dispersion of non-Gaussian distributions, which makes incorrect the use of such methods as the simple extrapolation method, as well as statistical methods based on the assumption that the random distribution law is normal.

Keywords: comparable conditions, forecasting, demand for electric energy, artificial neural network, error.

Проблематика повышения качества прогнозирования энергопотребления актуальна для 80 % всех предприятий, организаций и учреждений Российской Федерации и состоит в снижении экономической эффективности ввиду отсутствия возможности осуществлять качественное прогнозирование энергопотребления энергосистемами и комплексами (ЭСиК). Более чем 35 % предприятий указывает высокий износ технологического оборудования значимой причиной, усложняющей прогнозирование по причине существенного дрейфа фактических характеристик ЭСиК относительно проектных значений. Поскольку снижение энергоемкости – процесс, растянутый по временной шкале, то расчет состоит в вычислении разницы между спрогнозированным значением энергопотребления до модернизации, очищенным от всех воздействующих факторов, и фактическим значением энергопотребления после модернизации, очищенным от всех воздействующих факторов.

Основная сложность в расчете «базовой» линии состоит в определении значения энергопотребления до модернизации, спрогнозированного на момент после свершения модернизации. В связи с этим корректность составления прогнозного спроса на энергетические ресурсы влияет не только на процесс принятия решений о модернизации, но и преимущественно на расчет энергоемкости производимого продукта (оказываемой услуги) как составляющей цены продукции (прибыли энергокомплекса предприятия).

Выводы о возможности снижения энергозатрат и улучшении качественных характеристик выходного продукта делаются, как правило, не в процессе проектирования ЭСиК, а в результате практической их эксплуатации. В таких условиях улучшение характеристик подсистем часто не представляется возможным, так как это требует коренной их переделки. При исследовании сложных систем создавать адекватную физическую модель, как правило, не представляется возможным. Для решения сложных проблем обычно применяют системный подход, в котором моделирование является основным методом исследования. Для большинства рабочих процессов необходимая точность прогнозирования их характеристик может быть достигнута на основе математического моделирования. Наиболее распространенным является способ прямого математического моделирования, использование которого ввиду большого объема вычислительных работ, сложности и широкой взаимосвязанности реальных процессов возможно только на базе современной высокопроизводительной вычислительной техники. Необходимая точность моделирования достигается использованием достаточно большого числа входных данных, которые для достижения общих результатов при сохранении их достоверности необходимо ограничивать только вполне надежными значениями и, как правило, характерными для широкого ряда устройств.

ЭСиК включает в себя одну или несколько подсистем. При этом каждая выделенная подсистема обладает рядом свойств:

- представляет собой целостный комплекс взаимосвязанных элементов, способный к самостоятельному рассмотрению и анализу;

- образует единство со средой и требует учета воздействия как системы на среду, так и среды на систему;

- является элементом системы более высокого порядка;

- при необходимости может быть разделена на ряд систем более низкого порядка.

Основными задачами формирования сводного прогнозного баланса производства и поставок энергии потребителю являются удовлетворение спроса, обеспечение надежного энергоснабжения, минимизация затрат на производство и поставку электрической и тепловой энергии [1].

Для достижения поставленной цели ЭСиК целесообразно представить как систему, описываемую тремя классами математических моделей:

1) агрегативно, основываясь на причинности во времени (и в неявной форме), считая систему неупреждающей;

2) экономико-математическими моделями, в частности, на основании модели Неймана [2];

3) как сообщество технических изделий, на множестве которых осуществлено разбиение на семейства и виды, принадлежащие данному множеству.

Для описания современных ЭСМК различного масштаба применимы негауссовы устойчивые распределения с бесконечной дисперсией негауссовых распределений, приводящих к увеличению разброса средней величины, по сравнению с гауссовыми законами [3]. При их определении становится возможным сформулировать уравнения для расчета параметров распределений.

Очевидно, что все три класса моделей не используют в явной форме, например, законы термодинамики и иные классические уравнения, а основываются на следующих статистических положениях:

1) техническое и энергетическое хозяйство ЭСМК есть целое, обладающее новыми качественными характеристиками, не присущими каждому из составляющих элементов в отдельности;

2) техническое и энергетическое хозяйство ЭСМК может быть описано системой показателей, необходимой и достаточной для принятия решений с необходимой точностью и достоверностью в условиях неопределенности и дефицита времени;

3) процесс принятия решения неформализуем и осуществляется как на основе профессионально-логического анализа комбинированных результатов машинной обработки данных информационной базы, так и эвристического анализа параметров расчетных моделей.

В настоящей работе поставлена цель проверить свойства морфизма региональных энергетических систем и комплексов, а также осуществить прогнозирование спроса на электрическую энергию энергосистемами регионов Российской Федерации. Дополнительными особенностями подобного рода энергетических систем является, как правило, их связь с единой электроэнергетической системой страны. Поскольку ряд регионов отличается существенными профицитными объемами генерации электрической энергии, то данные по генерации электрической энергии будут вносить в анализ существенный дисбаланс. В дальнейшем рассматриваем энергосистемы регионов с точки зрения объединенных подмножеств потребителей энергоресурсов. В таком случае энергопотребление субъектов РФ будет зависеть от ряда экономических факторов, а также являться следствием изменения ряда иных факторов.

Сложность, многофункциональность, существенная дифференцируемость по нагрузке оборудования, различный физический и моральных износ подсистем энергетических систем и комплексов, а также отсутствие и иногда закрытость даже общей технической информации о рассматриваемом объекте являются причинами невозможности полноценного детерминированного описания данных систем и подсистем с достаточной точностью. Следовательно, при анализе необходимо использовать стохастические методы обработки информации, к которым относятся искусственные нейронные сети (ИНС) и многофакторный регрессионный анализ. Система и подсистемы при этом представляются в качестве «черного ящика». Поскольку функционирование реального технического и энергетического хозяйства ЭСМК носит в общем случае случайный характер, зависящий от множества факторов, то допустимо представить описание эксплуатации системы как случайного процесса, не выходящего за некоторые пределы. Энергетической системой будем считать совокупность конечного числа автономных и неавтономных агрегатов вместе с их взаимосвязями. Взаимодействие между системой и внешней средой и внутри системы осуществляется передачей сигналов, которые описываются конечным набором факторов, доступных к анализу и прогнозированию.

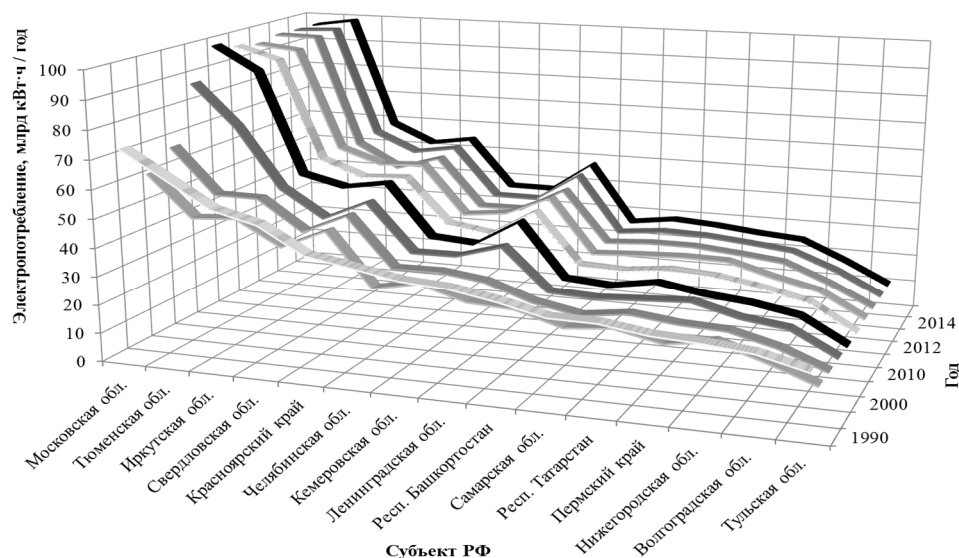
Для подсистем технического и энергетического хозяйства ЭСМК характерны все виды морфизма, но наиболее распространены гетероморфизм, полиморфизм и автоморфизм [4].

Опираясь на свойства гетероморфизма, всякая ЭСик одного объекта подобна аналогичной системе другого объекта [5]. Таким образом, прогнозная модель и спрогнозированный эффект управляющего воздействия, например, от энергосберегающего мероприятия [6], в одной ЭСик может быть транспонирован на все объекты аналогичного класса. Определим применимость данного свойства к задачам формирования предиктивных правил при определении прогнозных объемов энергопотребления субъектами РФ. Перечисленные выше сходные качества энергетических систем будут частично нивелироваться следующими причинами:

- 1) каждый из субъектов РФ находится на отдельно стоящей позиции в социально-экономическом рейтинге [7];
- 2) климатические и погодные характеристики в один и тот же момент времени могут существенно различаться для групп рассматриваемых энергосистем;
- 3) площадь территории, плотность населения и объем производимого валового регионального продукта (ВРП) различны;
- 4) для различных субъектов РФ характерно развитие различных отраслей промышленности и сельского хозяйства, сложившегося и развивающегося исходя из исторических, территориальных, климатических и иных, порою стохастических, причин;
- 5) статистические данные, предоставляемые Федеральной службой государственной статистики [8], проходят предварительную обработку и обновляются крайне редко – дискретность раз в год.

В связи с перечисленным выше, а также с недостаточностью и высокой дискретностью данных о функционировании объектов точность результатов прогнозирования не может быть высокой. Дискретность прогнозных величин будет равняться наибольшей дискретности входных факторов, т. е. ежегодной.

Существенный вклад в анализ энергопотребления объектов внес Б. И. Кудрин посредством развития теории Н-распределения техноценозов. Анализ и прогноз абсолютных показателей энергопотребления показывает неравномерный характер темпов их изменений по регионам [9], отраслям, ЭСик. Результатом структурно-топологического прогноза является совокупность траекторий случайных процессов изменения показателя спроса на электрическую энергию во времени (рисунок) [10]. Учитывая фрактальность и нелинейность траекторий, подобное рассмотрение структуры позволяет осуществить прогнозирование как места объекта среди аналогов, так и тенденции дрейфа его показателей с течением времени. К недостаткам метода можно отнести отсутствие алгоритма точного и достоверного прогнозирования трендов энергопотребления ЭСик.



Фрагмент типовой картины структурно-топологической динамики рангового распределения электропотребления

Входные факторы для расчета прогнозного энергопотребления могут быть представлены, например, следующим перечнем:

- X1. Среднегодовая температура ($T_{\text{среднегод}}$), °C;
- X2. Относительная влажность (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли ($\phi_{\text{среднегод}}$), %;
- X3. Реальные денежные доходы населения в процентах к предыдущему году;
- X4. Численность пенсионеров, тыс. чел.;
- X5. Удельный вес расходов домашних хозяйств на оплату жилищно-коммунальных услуг, тыс. чел.;
- X6. Фактическое конечное потребление домашних хозяйств на душу населения на территории субъектов Российской Федерации, руб.;
- X7. Индексы промышленного производства в процентах к предыдущему году;
- X8. Валовой сбор зерна (в весе после доработки), тыс. т;
- X9. Расход кормов в расчете на одну условную голову крупного рогатого скота в сельскохозяйственных организациях, центнеров кормовых единиц;
- X10. Объем работ, выполненных по виду экономической деятельности «Строительство», млн руб.;
- X11. Ввод в действие жилых домов на 1000 человек населения, кв. м. общей площади жилых помещений;
- X12. Объем платных услуг на душу населения, руб.;
- X13. Объем услуг связи на душу населения, руб.

Прогнозируемым фактором (Y) является потребление электрической энергии субъектом РФ, млрд кВт·ч/год. Климатические данные получены из открытой базы данных [10], остальные – с сайта Федеральной службы государственной статистики, период анализа – с 1990 по 2015 г. Необходимо отметить, что представленный набор факторов не претендует на уникальность. Для моделирования могут быть применены и иные наборы факторов, использование которых позволит достичь лучшей или худшей по сравнению с приведенной в статье точностью прогнозирования. Комплектование группы входных факторов должно подчиняться нескольким правилам:

1. Данные должны быть достоверны и проверяемы.
2. Данные должны содержать не менее двух независимых погодных фактора: X1 и X2.
3. Методология сбора и обработки статистических данных не должна изменяться на протяжении всего периода, за который производится анализ. Необходимо отметить, что для многих факторов методологии сбора и обработки данных с 1990 по 2015 г. изменялись, например, в связи с объединением субъектов РФ, изменением агрегированных данных по энергосистемам ввиду изменения границ субъектов РФ, инфляцией, изменением демографических критериев и пр.
4. Используемые статистические факторы по регионам должны быть разнородными. Недопустимо использование факторов, например, только экономического или только энергетического, или только социального профиля.
5. Используемые статистические факторы по регионам должны иметь отношение к объемам потребления электрической энергии, но не обязательно должны быть определяющими для региона. Также не следует чрезмерно ограничивать набор входных данных, так как один и тот же фактор может быть несущественным для электропотребления одних регионов и весьма существенным для других. В качестве яркого примера можно привести объемы электропотребления на нужды сельского хозяйства для Ямало-Ненецкого АО и для Краснодарского края. Незначительность для ЯНАО не является поводом для исключения рассматриваемого критерия из набора входных данных, так как для Краснодарского края и прочих южных регионов фактор является существенным.

Для обучения была выбрана трехслойная ИНС с 13 входными нейронами и одним выходным, скрытый слой включает в себя 40 нейронов. Активационная функция – сигмоидная с кривизной 2. На вход всего подано 7000 единиц первичной информации.

В качестве тестовой выборки приняты наиболее сложные для анализа энергоемкие области, показанные на рисунке. Результаты прогнозирования представлены в таблице. Сравнению подлежит прогнозное и фактическое электропотребление за 2015 г.

Результаты прогнозирования объемов потребления электрической энергии наиболее энергоемкими субъектами Российской Федерации

№	Субъект РФ	Точность прогнозирования, %
1	Московская обл.	79,13
2	Тюменская обл.	96,78
3	Иркутская область	96,04
4	Свердловская область	81,31
5	Красноярский край	97,34
6	Челябинская область	87,63
7	Кемеровская область	86,66
8	Ленинградская область	97,97
9	Республика Башкортостан	93,57
10	Самарская область	91,46
11	Республика Татарстан	99,29
12	Пермский край	77,29
13	Нижегородская область	94,59
14	Волгоградская область	95,08
15	Тульская область	96,74

Результаты сравнительного анализа прогнозного и фактического электропотребления показывают, что в шести из 15 тестовых выборок удалось получить точность свыше 95 %. Из 83 проанализированных субъектов РФ в 24 случаях получена погрешность не выше 5 %. Причиной относительно низкой точности прогнозных моделей в остальных случаях является невысокая точность исходных данных и чрезмерно низкая ежегодная периодичность наблюдения. Дальнейшее повышение точности прогноза должно развиваться в направлении увеличения числа входных факторов при соблюдении условия отсутствия их коллинеарности и мультиколлинеарности.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы.

1. Современные ЭСМК по сложившейся практике эксплуатации, экономическим и технологическим критериям относятся к замкнутым подсистемам, множество составляющих элементов и связей которых эквивалентно множеству элементов локальных подсистем энергосистемы более высокого уровня, что означает недопустимость рассмотрения и формулирования предиктивных правил функционирования ЭСМК любого масштаба без учета разнородных и разнонаправленных внешних воздействий.

2. Задача прогнозирования потребления топливно-энергетических ресурсов ЭСМК может быть решена либо посредством составления громоздкого индивидуального технико-экономического детерминированного аппарата, либо с применением статистических моделей, например, искусственных нейронных сетей.

3. Подтверждено свойство гетероморфизма энергетических систем и комплексов. Малый объем выборки для одного объекта может быть дополнен выборками аналогичных объектов до массива, пригодного к обработке посредством искусственных нейронных сетей. В 28 % случаев прогнозирование спроса на электрическую энергию энергосистемами регионов Российской Федерации посредством ИНС дало результат с погрешностью менее 5 %.

Статья подготовлена по результатам проекта, выполненного при поддержке Российского научного фонда (уникальный идентификатор гранта РНФ № 16-19-20568).

Список литературы

1. Приложение к приказу Федеральной службы по тарифам от 21 марта 2006 г. № 60-э/5 «Порядок формирования сводного прогнозного баланса производства и поставок электрической энергии (мощности) в рамках Единой энергетической системы России по субъектам Российской Федерации» [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/5221140/> (дата обращения: 12.04.2020).
2. Абакумов, А. И. Модели Неймана – Гейла [Текст] / А. И. Абакумов / Дальневост. гос. ун-т. – Владивосток, 2004. – 44 с.
3. Седнев, В. А. Применение техноценологического подхода для обеспечения электроэнергетической безопасности территорий [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-2/01-02-16.ttb.pdf> (дата обращения: 12.04.2020).
4. Морфизмы алгебраических систем [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studopedia.ru/18_69302_morfizmi-algebraicheskikh-sistem.html (дата обращения 12.04.2020).
5. Кудрин, Б. И. Организация, построение и управление электрическим хозяйством металлургических предприятий: Дис... доктора техн. наук: 05.09.03 / Кудрин Борис Иванович. – М., 1979. – 283 с.
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 25 января 2011 г. № 18 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к Правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов» [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/12182261/>. (дата обращения: 12.04.2020).
7. Рейтинг социально-экономического положения регионов-2019 [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://riarating.ru/infografika/20190604/630126280.html> (дата обращения: 12.04.2020).
8. Федеральная служба государственной статистики [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gks.ru/> (дата обращения: 12.04.2020).
9. Потребление электрической энергии субъектами Российской Федерации, млрд кВт·ч/год [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kudrinbi.ru/public/304301/index.htm> (дата обращения: 12.04.2020).
10. rp5.ru. Расписание погоды [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 12.04.2020).

References

1. *Prilozheniye k prikazu Federal'noy sluzhby po tarifam ot «21» marta 2006 goda № 60-e/5 «Poryadok formirovaniya svodnogo prognoznogo balansa proizvodstva i postavok elektricheskoy energii (moshchnosti) v ramkakh Yedinoy energeticheskoy sistemy Rossii po sub'yektam Rossiyskoy Federatsii»* (Appendix to the order of the Federal Tariff Service of March 21, 2006 No. 60-e / 5 “Procedure for the Formation of the Consolidated Forecast Balance of Production and Supply of Electric Energy (Power) within the Unified Energy System of Russia by Subjects of the Russian Federation”), URL: <https://base.garant.ru/5221140/> (accessed 04/12/2020).
2. Abakumov A. I. *Modeli Neymana – Geyla* (Neumann – Gale Models). Vladivostok: FENU, 2004, 44 p.
3. Sednev, V. A. Application of a technocenological approach to ensure the electric power security of territories [Primeneniye tekhnotsenologicheskogo podkhoda dlya obespecheniya elektroenergeticheskoy bezopasnosti territoriy], URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-2/01-02-16.ttb.pdf> (accessed 12.04.2020).
4. Morphisms of algebraic systems [Morfizmy algebraicheskikh sistem], URL: https://studopedia.ru/18_69302_morfizmi-algebraicheskikh-sistem.html (accessed 12.04.2020).

5. Kudrin B. I. *Organizatsiya, postroyeniye i upravleniye energeticheskim khozyaystvom metallurgicheskikh predpriyatiy* (Organization, construction and management of the energy sector of metallurgical enterprises). Doctor's thesis. Moscow, State Union Institute for the Design of Metallurgical Plants (GIPROMEZ), 1979, 282 p.
6. *Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 25 yanvarya 2011 g. № 18 «Ob utverzhdenii Pravil ustanovleniya trebovaniy energeticheskoy effektivnosti dlya zdaniy, stroyeniy, sooruzheniy i trebovaniy k Pravilam opredeleniya klassa energeticheskoy effektivnosti mnogokvartirnykh domov»* (Decree of the Government of the Russian Federation of January 25, 2011 No. 18 "On approval of the Rules for establishing energy efficiency requirements for buildings, structures, structures and requirements for the Rules for determining the energy efficiency class of apartment buildings"), URL: <https://base.garant.ru/12182261/> (accessed 12.04.2020).
7. *Reyting sotsial'no-ekonomicheskogo polozheniya regionov – 2019* (Rating of the socio-economic situation of the regions – 2019), URL: <https://riarating.ru/infografika/20190604/630126280.html> (accessed 12.04.2020).
8. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki* (Federal State Statistics Service), URL: <https://www.gks.ru/> (accessed 12.04.2020).
9. *Potrebleniye elektricheskoy energii sub'yektami Rossiyskoy Federatsii, mlrd. kVt·ch/god* (Electric energy consumption by the constituent entities of the Russian Federation, billion kW·h/year), URL: <http://www.kudrinbi.ru/public/304301/index.htm> (accessed 12.04.2020).
10. *rp5.ru Raspisaniye pogody* (rp5.ru Weather schedule), URL: <https://rp5.ru/> (accessed 12.04.2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гужов Сергей Вадимович

НИУ «МЭИ» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»).

Красноказарменная ул., д. 14, г. Москва, 111250, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепломассообменные процессы и установки», НИУ «МЭИ».

Тел.: +7-965-294-91-11.

E-mail: GuzhovSV@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Guzhov Sergey Vadimovich

National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU «MPEI»).

14, Krasnokazarmennaya st., 14, Moscow, 111250, Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Heat and Mass Transfer Processes and Installations», NRU «MPEI».

Phone: +7-965-294-91-11.

E-mail: GuzhovSV@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гужов, С. В. О прогнозировании спроса на электроэнергию энергосистемами регионов Российской Федерации с применением искусственных нейронных сетей / С. В. Гужов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2020. – № 1 (41). – С. 133 – 140.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Guzhov S. V. On forecasting demand for electric power by energy systems of the regions of the Russian Federation with application of artificial neural networks. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 1 (41), pp. 133 – 140 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования;
- электрические станции и электроэнергетические системы;
- энергетические системы и комплексы;
- автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подписочные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. *Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 1 (41) 2020

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 03 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 26.06.2020.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 26.06.2020.

