

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 4(40)

2019

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. Бокарев Сергей Александрович – профессор кафедры «Мосты» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
7. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. Демин Юрий Васильевич – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТА, д.т.н., профессор (Новосибирск).
10. Зыкина Анна Владимировна – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГТУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. Каргапольцев Сергей Константинович – ректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
12. Косарев Александр Борисович – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
13. Лю Цзянькунь – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
14. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
15. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, д.т.н., доцент (Омск).
16. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
17. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
18. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТашИИТА, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
19. 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. Bokaryov Sergey Alexandrovich – professor of the department «Bridges» of SSUT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
8. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Demin Yuri Vasilyevich – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
10. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. Kargapol'tcev Sergey Konstantinovich – rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
12. Kosarev Alexander Borisovich – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
13. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
14. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
15. Paramonov Alexander Mikhailovich – professor of the department «Heat-power» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk).
16. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
18. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons» of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
19. 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

- Рауба А. А., Дюндин В. В., Бородин А. В. Влияние дефектов обода колесных пар, поступивших в ремонт, на производительность их восстановления обточкой.....2
- Овчаренко С. М., Метелев А. А., Минаков В. А., Ведрученко В. Р. Оперативный контроль эффективности работы системы охлаждения тепловоза.....9
- Сиряк П. А. Методика получения и использования распределения второй производной силы тока тягового генератора маневрового тепловоза.....17
- Смердин А. Н., Бутенко Е. А. Применение моделей поперечных колебаний растянутого стержня для расчета натяжений проводов контактной сети.....25
- Литвинова О. В. Определение электрических параметров изолированного проводника.....33
- Утепбергенова С. М., Томилов В. В., Сидоров О. А. Методика расчета теплового состояния полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава с учетом изменения положения контактного провода в плане.....43
- Воробьев А. А., Кольцов Ю. А., Мухамбетов А. Е. Определение рациональных сроков восстановления оборудования электровозов.....54

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

- Вакуленко С. П., Колин А. В., Евреенова Н. Ю. Особенности интеграции малоинтенсивных линий с магистральными железнодорожными линиями.....61

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

- Тарута В. Ф., Глухов С. В., Глухова М. В. Утилизация вторичных энергетических ресурсов при нагрузочных испытаниях тепловозов.....70
- Резанов Е. М., Петров П. В. Повышение эффективности утепления стен зданий с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии.....77
- Хороших О. В., Стариков А. П., Кадцын И. И. Исследование возможности улучшения технико-экономических показателей теплообеспечения индивидуальных потребителей...86

Электрические станции и электроэнергетические системы

- Горовой С. А., Симаков А. В., Скороходов В. И. Анализ несинусоидального режима работы системы электроснабжения на основе вейвлет-преобразования цифрового потока мгновенных значений тока.....96
- Кайсаров А. К., Кызыров К. Б. Обработка плазмы с низким уровнем реактивного угля...106
- Володарский В. А., Гаранин А. Е. К вопросу оптимизации технического содержания кабельных линий.....114

Энергетические системы и комплексы

- Гаак В. К., Финиченко А. Ю., Гаак А. В. Основные направления повышения экологической эффективности тепловой энергетики120

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 621.9.65.015.13

А. А. Рауба, В. В. Дюндин, А. В. Бородин

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

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ ОБОДА КОЛЕСНЫХ ПАР, ПОСТУПИВШИХ В РЕМОНТ, НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОБТОЧКОЙ

Аннотация. Приведены результаты исследований воздействия свойств материала и неисправностей колес, поступающих в ремонт на процесс их механической обработки на колесотокарных станках. Разработан комплексный критерий, учитывающий действие различных факторов на допустимую скорость резания. Полученные результаты могут быть использованы в разработке методов снижения расхода твердосплавного режущего инструмента для механической обработки деталей подвижного состава с эксплуатационными дефектами. Предложена методика оценки обрабатываемости резанием колес через аддитивные критерии, учитывающие суммарное влияние многочисленных, разноразмерных и противоречивых факторов на допустимую скорость резания по экономической стойкости режущего инструмента. На этой основе получены количественные характеристики обрабатываемости резанием колес, учитывающие образующиеся макропогрешности геометрической формы, поверхностные дефекты обода, наклеп и наличие зон повышенной твердости, дефекты термомеханического взаимодействия колеса, тормозной колодки и рельса.

Ключевые слова: неисправность колес, допустимая скорость резания, экономическая стойкость инструмента, приведенный коэффициент обрабатываемости, твердость стали.

Alexander A. Rauba, Vadim V. Dyundin, Anatoliy V. Borodin

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

INFLUENCE OF DEFECTS RIM WHEELSETS, RECEIVED IN REPAIR, ON PERFORMANCE OF THEIR RECOVERY TURNING

Abstract. The article presents the results of studies of the effect of material properties and wheel failures on the process of their machining on the on the car wheel lathe. Developed by complex criterion that takes into account the effect of various factors on the allowable cutting speed. The proposed method for assessing the machinability of cutting wheels through additive criteria. The quantitative characteristics of the machinability of cutting are obtained, taking into account the macroscopic imprecision of the geometric shape, defects in the thermomechanical interaction of the wheel, brake pad and rail, surface defects of the rim, work hardening and the presence of zones of increased hardness.

The results can be used in the development of methods to reduce the consumption of carbide cutting tools for machining parts of rolling stock with operational defects.

Keywords: wheel failure, allowable cutting speed, economic tool life, reduced machinability, steel hardness.

По классификатору неисправностей вагонных колесных пар и их элементов 1.20.001-2007, изданному ОАО «РЖД», из 32 наименований дефектов колес 20 из них устраняют обточкой поверхности катания на колесотокарном станке. Анализ справочных материалов Центральной дирекции инфраструктуры управления вагонного хозяйства, проектно – конструкторского бюро вагонного хозяйства (ПКБ ЦВ ОАО «РЖД») за 2015-2016 гг. показал, что около 20 % вагонов поступают в текущий отцепочный ремонт по неисправностям колесных пар, 97 % которых подлежали обточке [1, 2].

Установлено, что более 70 % колес, поступающих в ремонт, имеют неисправности, ухудшающие их обрабатываемость резанием, которая в три – шесть раз ниже обрабатываемости новых бездефектных колес. Экономическая скорость резания при обточке таких колес в зависимости от жесткости станка и качества инструмента – 16 – 40 м/мин, поэтому повышение эффективности обработки таких колес является весьма актуальной задачей.

Известно, что производительность механической обработки железнодорожных колес при обеспечении заданного качества в основном определяется скоростью резания [3, 4], значение

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

которой выбирается между скоростями, обеспечивающими минимальные затраты на обработку $V_{эк}$ и максимальную производительность V_{max} ($V_{эк} \leq V < V_{max}$). Значение скорости резания, обеспечивающее максимальную производительность, ограничивается значением периода стойкости инструмента T_{max} , ниже которого она уменьшается по причине увеличения затрат времени на смену инструмента и настройку станка (рисунок 1).

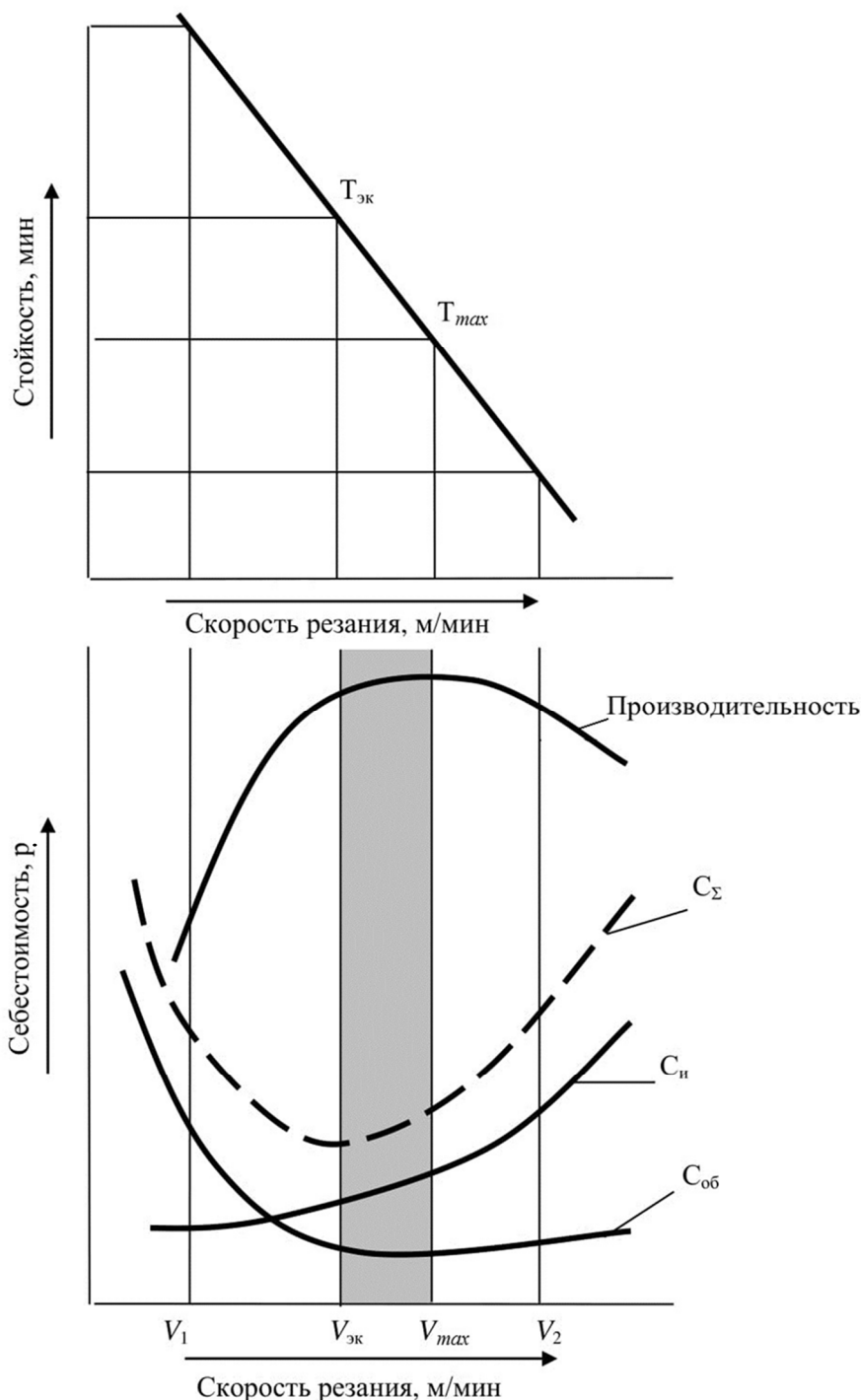


Рисунок 1 – Влияние скорости резания на производительность, себестоимость обработки и стойкость инструмента: $C_{об}$ – затраты на оборудование; $C_{и}$ – затраты на инструмент; C_{Σ} – себестоимость обработки

На практике периодом стойкости задаются исходя из приемлемых затрат на эксплуатацию инструмента $T_{эк}$. Затем для конкретных условий обработки определяют допустимую скорость резания V_T , при которой обеспечивается заданная стойкость

инструмента. Скорость резания по заданной стойкости зависит в основном от физико-механических свойств материала, срезаемого с колеса, состояния его поверхности и поверхностного слоя, а также от прочности и износостойкости режущей части инструмента [5, 6].

Одним из важнейших технологических свойств материала колес является его обрабатываемость резанием, в значительной степени характеризующая уровень затрат для достижения заданных производительности и качества обработки. Обрабатываемость отражает многие стороны процесса резания, поэтому единой универсальной характеристики она не имеет и оценивается комплексом технологических свойств (интенсивность изнашивания инструмента, силы резания и потребляемая мощность, достижимое качество обработки, вид стружки и др.) путем сравнения со свойствами обрабатываемости материала, принятого за эталон, которые определяются при идентичных условиях резания. Выбор показателей обрабатываемости производится исходя из конкретных требований, предъявляемых к операции.

Особенно большой практический интерес представляют зависимости между обрабатываемостью резанием и твердостью металлов. По данным Э. И. Фельдштейна эти зависимости не отличаются высокой точностью, но в определенных пределах хорошо согласуются с данными экспериментальной проверки. Поэтому они могут быть успешно использованы для приблизительной оценки обрабатываемости сталей, так как твердость в большей степени связана с истирающей способностью и температурой резания – факторами, в наибольшей степени влияющими на стойкость инструмента и уровень допустимых скоростей резания. К тому же определение твердости металла на производстве не вызывает трудности.

Одной из главных причин низкой обрабатываемости при ремонте колес является значительный разброс значений твердости по всему объему срезаемого слоя. В результате низкой прокаливаемости колесной стали твердость по толщине обода изменяется от 300 – 310 (у нового колеса на диаметре обода 950 мм) до 240 – 260 *HB* (у предельно изношенного колеса с диаметром обода 850 мм). Твердость наклепанного слоя глубиной до двух миллиметров достигает 500 – 400 *HB*. Отдельные участки термомеханического повреждения имеют твердость 700 – 1200 *HV*. Поэтому производительность их обточки в четыре – шесть раз ниже, а расходы на режущий инструмент в три – шесть раз выше, чем в транспортном машиностроении, и составляют более 40 % себестоимости ремонта колесных пар.

Переменная твердость не только снижает стойкость инструмента за счет его ударного взаимодействия с деталью, но и увеличивает погрешность обработки в результате отжата инструмента от заготовки. Для получения заданного качества обработки ремонтные предприятия вынуждены увеличивать количество проходов и уменьшать режимы резания, что снижает производительность и увеличивает стоимость обработки.

Влияние твердости колесной стали на ее обрабатываемость оценивали коэффициентом K_{VT60} :

$$K_{VT60} = V_{T60} / V_{T60 \text{ эт}}, \quad (1)$$

где V_{T60} – допустимая скорость резания стали для 60-минутной стойкости инструмента;

$V_{T60 \text{ эт}}$ – допустимая скорость резания стали для 60- минутной стойкости инструмента для эталонной стали.

Анализ и обобщение имеющихся данных о влиянии твердости на обрабатываемость стали, оцениваемой допустимой скоростью резания по 60-минутной стойкости V_{T60} , для колесной стали (по данным С. В. Урушева [7] и фирмы Сандвик – МКТС) позволили построить зависимость влияния твердости колесной стали на значение K_{VT60} (рисунок 2):

$$K_{T60} = 2,16 - 4,64 \cdot 10^{-3} \text{ HB} \quad (2)$$

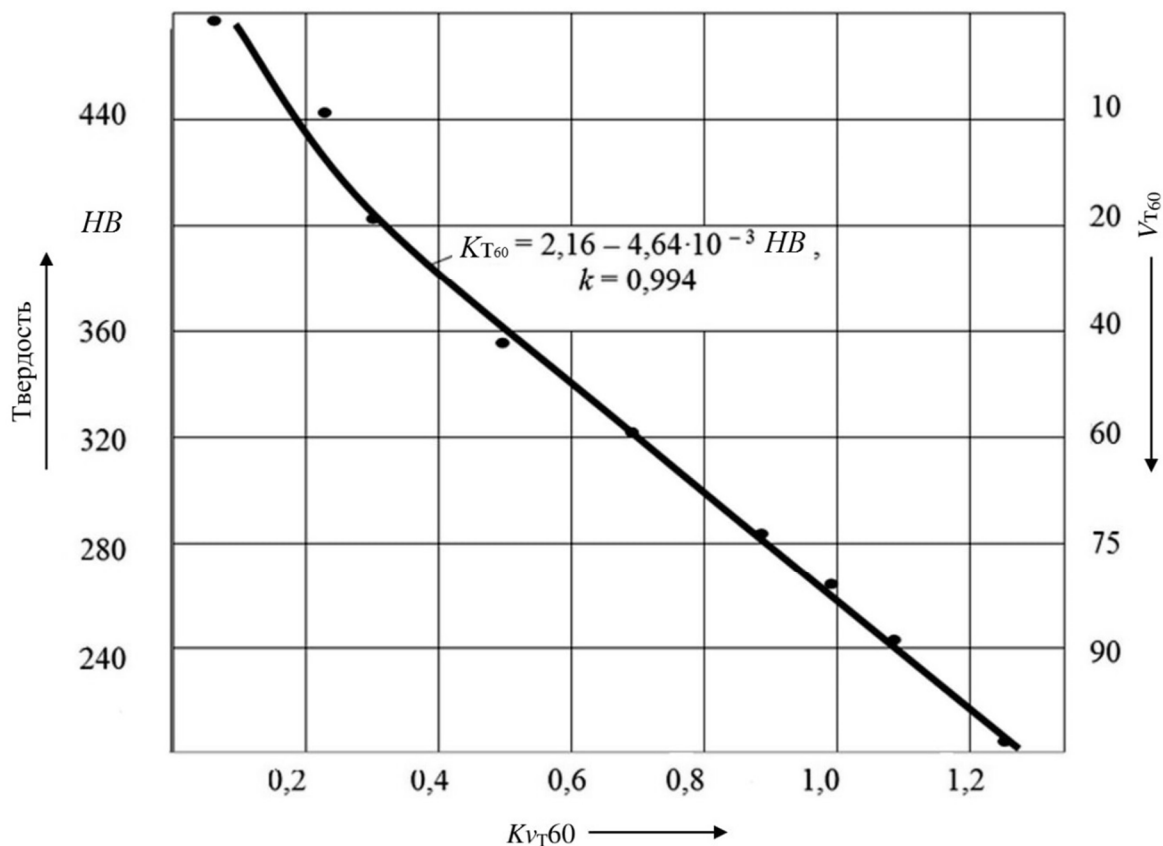


Рисунок 2 – Влияние твердости колесной стали на ее обрабатываемость резанием твердосплавным инструментом

По этой зависимости можно определить допустимую скорость резания для 60- минутной стойкости инструмента ($V_{T60} = K_{V_{T60}} V_{T60 \text{ эт}}$) при изменении твердости колесной стали в пределах 220 – 440 HB . В качестве эталона взята колесная сталь марки 2 (ГОСТ 10791-2011 [8]) с исходной твердостью 260 HB ($V_{T60 \text{ эт}} = 85$ м/мин; $K_{V_{T60}} = 1$).

Оценка обрабатываемости по твердости колесной стали имеет большое практическое значение, так как в настоящее время во ВНИИЖТе совместно с металлургами разработаны новые марки специальной колесной стали с твердостью 320 – 360 HB (марки Т и Л по ГОСТ 10791-2011). Колеса из этой стали поступили в эксплуатацию, что повлекло за собой снижение их обрабатываемости (до $K_{V_{T60}} = 0,5 - 0,7$) и заметное увеличение расхода твердого сплава на обработку колес (в полтора – два раза).

Приведенные в литературе [9, 10] критерии обрабатываемости оценивают влияние на процесс резания ограниченного количества параметров. Работы по оценке обрабатываемости деталей с дефектами материала и макрогеометрии, приобретенными в эксплуатации, отсутствуют, что не дает возможности определить рациональный уровень допустимой по экономическим критериям скорости резания для большинства операций механической обработки в ремонтном производстве, создает проблемы в выборе режимов резания и в конструировании инструмента.

Допустимая по заданной стойкости скорость резания V_T не отражает влияния всего многообразия параметров, определяющих обрабатываемость колес с эксплуатационными дефектами, поэтому в качестве критерия обрабатываемости предлагается использовать скорость, обеспечивающую минимальную себестоимость при заданных производительности и качестве обработки, т. е. находящуюся между скоростями экономической и скоростью, обеспечивающей максимальную производительность: $V_э \leq V_{\text{доп}} < V_{\text{max}}$.

$$V_{\text{доп}} = V_{\text{доп.эт}} K_v, \quad (3)$$

где $V_{\text{доп.эт}}$ – допустимая скорость резания для условий обработки, принятых за эталон (обработка нового колеса на жестком станке стандартным режущим твердосплавным инструментом, твердость колесной стали – 260 HB, $V_{\text{доп.эт}} = 85$ м/мин);

K_v – приведенный коэффициент обрабатываемости.

$$K_v = 1 - F(x), \quad (4)$$

где $F(x)$ – функция изменения обрабатываемости.

Обрабатываемость деталей в ремонтном производстве целесообразно описывать через аддитивные критерии, учитывающие суммарное влияние многочисленных разноразмерных и противоречивых факторов на допустимую скорость резания:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n c_i \frac{F_i(x) - F_i^{(0)}(x)}{F_i^{(0)}(x)}, \quad (5)$$

где $F_i(x)$ – текущее значение частного критерия;

$F_i^{(0)}(x)$ – эталонное значение частного критерия;

c_i – весовой коэффициент i -го частного критерия, определяется экспериментально или методом экспертных оценок (например, степень поврежденности колеса i -м дефектом), $\sum c_i = 1$;

Частный коэффициент относительного изменения обрабатываемости:

$$K_{\text{от } i} = \frac{F_i(x) - F_i^{(0)}(x)}{F_i^{(0)}(x)}. \quad (6)$$

Частными критериями могут быть такие разноразмерные параметры, как качество инструмента, жесткость технологической системы, степень поврежденности поверхности катания колес в эксплуатации, квалификация рабочего.

Для относительного изменения допустимой скорости резания в результате влияния i -го фактора (i -го дефекта) этот коэффициент определяется так:

$$K_{\text{от. } i} = \frac{V_{\text{доп.эт}} - V_{\text{доп. } i}}{V_{\text{доп.эт}}}, \quad (7)$$

где $V_{\text{доп. } i}$ – допустимая скорость по заданным выходным параметрам для обработки колеса с i -м дефектом, определяется экспериментально и уточняется по результатам статистической обработки производственных данных.

Размеры дефектов поверхности катания колес: по длине – до 150; глубине – до 10; ширине – до 40 мм. Разрушение инструмента чаще происходит при взаимодействии его с выщербинами первого рода и лысками (выбоинами), имеющими повышенную твердость (до 400 – 700 HB). Такие дефекты, как вертикальный подрез гребня, остроконечный накат, неравномерный износ и разность диаметров колес, повышают трудоемкость обработки за счет увеличения припуска от 6 до 24 мм и более, а также снижают производительность из-за неравномерности его значения по длине обточки.

Анализ публикаций и обобщение данных ремонтных заводов и колесоремонтных мастерских позволил оценить влияние каждого из основных дефектов на производительность обточки колес, поступающих в ремонт на аддитивном уровне, через коэффициенты относительного изменения обрабатываемости (таблица).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Значение коэффициентов изменения обрабатываемости и допустимой скорости резания при обточке колесных пар (инструментальный материал – твердый сплав марки ММ 2, группа резания – Р 25, пластина – LNUX 191940-22 производства МКТС – Сандвик)

Код и наименование неисправности по классификатору ОАО «РЖД» 1.20.001-2007	Коэффициент изменения обрабатываемости $K_{от i}$	Допустимая скорость резания $V_{доп i}$, м/мин
111 Равномерный прокат	0	85
112 Неравномерный прокат	0,05	81
116 Кольцевые выработки		
Термомеханические повреждения при торможении:	0,22	66
211 – навар, 212 – ползун (глубина до 1,0 мм)		
212 Ползун (глубина – более 1,0 мм)	0,44	48
611 Выщербины по светлым пятнам, ползунам, наварам	0,38	53
612 Выщербины по усталостным трещинам	0,09	77
311 Остроконечный накат гребня		
312 Круговой наплыв на фаску	0,05	81
313 Местное уширение обода		
112 – неравномерный прокат и 114 – вертикальный подрез гребня	0,24	65
111 – равномерный прокат и 113 – износ гребня	0,09	77
Прокат и износ гребня с термомеханическими повреждениями малых и средних размеров	0,29	60
Термомеханические повреждения (ТМП) и наличие большого количества выщербин крупных размеров	0,47	45
Наклеп, ТМП, ползун и выщербины больших размеров	0,67	28

Предложенная методика определения допустимой скорости резания может быть использована при механической обработке всех деталей, поступающих в ремонт с эксплуатационными дефектами.

Список литературы

1. Справочные материалы по поступлению колесных пар грузовых вагонов в ВКМ и КРЦ вагоноремонтных и эксплуатационных депо России за 2015 год [Текст] / Центральная дирекция инфраструктуры, управление вагонного хозяйства, проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства. – М., 2015. – 150 с.
2. Справочные материалы по поступлению колесных пар грузовых вагонов в ВКМ и КРЦ вагоноремонтных и эксплуатационных депо России за 2016 год [Текст] / Центральная дирекция инфраструктуры, управление вагонного хозяйства, проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства. – М., 2016. – 137 с.
3. Фельдштейн, Э. И. Обрабатываемость сталей в связи с условиями термической обработки и микроструктурой: Учебник [Текст] / Э. И. Фельдштейн. – М.: Машгиз, 1953. – 255 с.
4. Обрывалин, А. В. Обрабатываемость резанием материала вагонных колес повышенной твердости при наличии эксплуатационных дефектов [Текст] / А. В. Обрывалин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование: Науч. журнал / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2009. – С. 30 – 36.
5. Справочник инструментальщика: Справочник [Текст] / И. А. Ординарцев, Г. Н. Филиппов и др. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.

6. Вульф, Л. М. Основы резания металлов: Учебник [Текст] / Л. М. Вульф. – Л.: Машгиз, 1954. – 327 с.
7. Урушев, С. В. Разработка ресурсосберегающих технологий ремонта колес железнодорожного подвижного состава [Текст]: Дис... доктора техн. наук: 05.22.07 / Урушев Сергей Викторович. – Санкт-Петербург, 2000. – 450 с.
8. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия [Текст]. – Введ. 2012-01-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 32 с.
9. Зильберман, Г. М. Комплексное определение параметров обрабатываемости металлов с применением радиоэлектронной аппаратуры: Научное издание [Текст] / Г. М. Зильберман, В. Г. Сальников / Пермский сельскохозяйственный ин-т. – Пермь, 1966. – 160 с.
10. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учебник [Текст] / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск: Вышэйша школа, 1990. – 512 с.

References

1. *Spravochnye materialy po postupleniiu kolesnykh par gruzovykh vagonov v VKM i KRTs vagonoremontnykh i ekspluatatsionnykh depo Rossii za 2015 god* (Reference materials on the receipt of wheel pairs of freight cars in VKM and CRT car repair and operational depot of Russia for 2015), Moscow, Design bureau Russian Railways, 2015, 150 p.
2. *Spravochnye materialy po postupleniiu kolesnykh par gruzovykh vagonov v VKM i KRTs vagonoremontnykh i ekspluatatsionnykh depo Rossii za 2016 god* (Reference materials on the receipt of wheel pairs of freight cars in VKM and CRT car repair and operational depot of Russia for 2016), Moscow, Design bureau Russian Railways, 2016, 137 p.
3. Fel'dshtein E. I. *Obrabatyvaemost' stalei v sviazi s usloviiami termicheskoi obrabotki i mikrostrukturoi* (Machinability of steel due to heat treatment conditions and microstructure). Moscow: Mashgiz, 1953, 255 p.
4. Obryvalin A. V. The machinability of the material of wagon wheels of increased hardness in the presence of operational defects [Obrabatyvaemost' rezaniem materiala vagonnykh koles povyshennoi tverdosti pri nalichii ekspluatatsionnykh defektov]. *Materialy mezhvuzovskogo sbornika nauchnykh statei «Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie»* (Materials interuniversity collection of scientific articles «Modern technologies. System analysis. Modeling»). Irkutsk, 2009, pp. 30 – 36.
5. Ordinartsev I. A., Filippov G. N. *Spravochnik instrumental'shchika* (Toolmaker Handbook). Leningrad: Engineering, 1987, 846 p.
6. Vul'f L. M. *Osnovy rezaniia metallov* (Metal Cutting Basics). Leningrad: Mashgiz, 1954, 327 p.
7. Urushev S. V. *Razrabotka resursosberegaiushchikh tekhnologii remonta koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* (Development of resource-saving technologies for the repair of rolling stock wheels). Doctor's thesis, St. Petersburg, PGUPS, 2000, 450 p.
8. *Kolesa tsel'nokatanye. Tekhnicheskie usloviia*, GOST 10791-2011 (Solid wheels. Technical conditions, State Standard 10791-2011). Moscow, Standartinform, 2011, 32 p.
9. Zilberman G. M. *Kompleksnoe opredelenie parametrov obrabatyvaemosti metallov s primeneniem radioelektronnoi apparatury* (Comprehensive determination of the parameters of workability of metals with the use of electronic equipment). Permian, Perm State Agro-Technological University, 1966, 160 p.
10. Iashcheritsyn P. I., Eremenko M. L., Feldstein E. E. *Teoriya rezaniya. Fizicheskie i teplovye processy v texnologicheskix sistemax* (Cutting theory. Physical and thermal processes in technological systems). Minsk, Vyshyssha School, 1990, 512 p.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рауба Александр Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: aleksandr_rauba@mail.ru

Дюндин Вадим Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: dyundinvv@mail.ru

Бородин Анатолий Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rauba Alexander Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr.Sci.Tech., Professor of the department «Technology of transport engineering and repair of a rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: aleksandr_rauba@mail.ru

Dyundin Vadim Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: dyundinvv@mail.ru

Borodin Anatoliy Vasilievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr.Sci.Tech., Professor

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Рауба, А. А. Влияние дефектов обода колесных пар, поступивших в ремонт, на производительность их восстановления обточкой [Текст] / А. А. Рауба, В. В. Дюндин, А. В. Бородин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 2 – 9.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Rauba A. A., Dyundin V. V., Borodin A. V. Influence of defects rim wheelsets, received in repair, on performance of their recovery turning. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 2 – 9 (In Russian).

УДК 629.424.3

С. М. Овчаренко, А. А. Метелев, В. А. Минаков, В. Р. Ведрученко

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОВОЗА

Аннотация. В статье приведены анализ затрат различных топливно-энергетических ресурсов в ОАО «РЖД» за период с 2013 по 2017 г., результаты наблюдения о сокращении доли дизельного топлива в общей структуре потребления ресурсов, анализ распределения количества отказов узлов тепловозов в пути следования, распределения отказов узлов системы охлаждения в пути следования и распределения отказов узлов тепловозов, значения мощности, затрачиваемой на привод вентилятора шахты холодильника, различных тепловозов. Рассчитан часовой расход топлива, затрачиваемого на привод вентилятора тепловозов.

Ключевые слова: тепловоз, система охлаждения, топливно-энергетический ресурс, дизельное топливо, отказ, привод вентилятора, мощность, часовой расход топлива.

Sergey M. Ovcharenko, Alexander A. Metelev, Vitaliy A. Minakov, Victor R. Vedruchenko

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

OPERATIONAL CONTROL OF SYSTEM PERFORMANCE COOLING OF THE LOCOMOTIVE

Abstract. The article presents an analysis of the costs of various fuel and energy resources in JSC "Russian Railways" for the period from 2013 to 2017, results the observations on the reduction of the share of diesel fuel in the total resource consumption structure, the analysis of the distribution of the number of failures of diesel locomotive nodes along the route, the distribution of failures of the cooling system nodes along the route and the distribution of failures of diesel locomotive, the values of power consumed to drive the fan of the refrigerator shaft, various diesel locomotives. Calculated fuel flow rates spent on the drive of the fan of diesel locomotives.

Keywords: diesel locomotive, cooling system, fuel and energy resource, diesel fuel, failure, fan drive, power, fuel flow rate.

Целью энергетической стратегии России на период до 2030 г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. №1715-р [1], является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики. Так как железнодорожный транспорт является крупным потребителем почти всех видов топлива, вырабатываемого нефтяной промышленностью (за исключением авиационных бензинов и керосинов), то он вполне вписывается в данную стратегию. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 г. и на перспективу до 2030 г., утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 15 декабря 2011 г. № 2718р [2], направлена на решение задачи качественного улучшения структуры управления потреблением топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на основе использования современных информационных технологий, систем учета, нормирования и мониторинга потребления ТЭР.

По данным отчетов ОАО «РЖД» [3 – 7] видно, что потребление дизельного топлива на тягу поездов занимают второе место среди всех затрат ТЭР компании.

Структура потребления ТЭР в ОАО «РЖД» в период с 2013 по 2017 г. представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Структура потребления ТЭР в ОАО «РЖД» в период с 2013 по 2017 г.

Вид ТЭР	Количество потребленного ресурса (доля в общем объеме потребления, %)				
	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
Электрическая энергия на тягу поездов, млн кВт·ч	39 826,7 (60)	40963,0 (62,5)	40159,4 (62,9)	40586,5 (63,8)	42672 (65,4)
Электрическая энергия на нетяговые нужды, млн кВт·ч	6249,4 (9,5)	5638,9 (8,6)	5751,8 (9,0)	5969,0 (9,4)	5757,6 (8,8)
Дизельное топливо на тягу поездов, тыс. т	2593,7 (16,9)	2547,8(16,8)	2445,9 (16,6)	2430,8 (16,6)	2426,8 (16,1)
Дизельное топливо на нетяговые нужды, тыс. т	260,8 (1,7)	213,8 (1,4)	178,0 (1,2)	147,5 (1,0)	144,0 (1,0)
Уголь, тыс. т	1234,3 (4,1)	1033,5 (3,3)	993,6 (3,2)	760,7 (2,5)	703,5 (2,3)
Мазут, тыс. т	383,1 (2,4)	356,0 (2,2)	324,1 (2,1)	308,6 (2,0)	228,8 (1,8)
Природный газ, млн м ³	500,1 (2,6)	493,5 (2,6)	470,9 (2,7)	494,6(2,7)	488,7 (2,6)
Бензин, тыс. т	108,4 (0,7)	97,7 (0,7)	75,3 (0,5)	34,8(0,2)	34,2 (0,2)
Тепловая энергия со стороны, млн Гкал	2,7 (2,1)	2,4 (1,9)	2,2 (1,8)	2,18(1,8)	2,2 (1,8)

Прогнозируется, что к 2030 г. потребление ТЭР увеличится примерно на 32,1 % при росте перевозочной работы на 52,3 %, а удельные энергозатраты на тягу поездов тепловозами снизятся на 13,3 – 17,2 % относительно 2010 г.

От надежности и эффективности работы системы охлаждения во многом зависит надежность и эффективность работы тепловоза в целом. Анализ отчетных данных по отказам узлов

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

и систем тепловозов позволяет охарактеризовать систему охлаждения как систему, формирующую значительную долю отказов в общем количестве отказов тепловоза в целом. распределение в процентах количества отказов узлов и систем в среднем по всему парку тепловозов приведено на рисунках 1, 2.

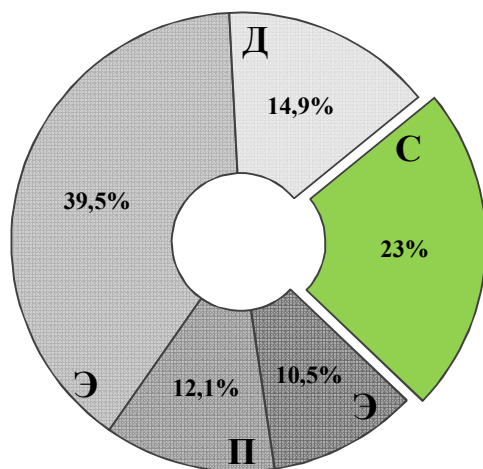


Рисунок 1 – Распределение количества отказов узлов тепловозов в пути следования:
Д – дизель; Э – экипажная часть; ЭО – электрическое оборудование; СО – система охлаждения; П – прочие узлы

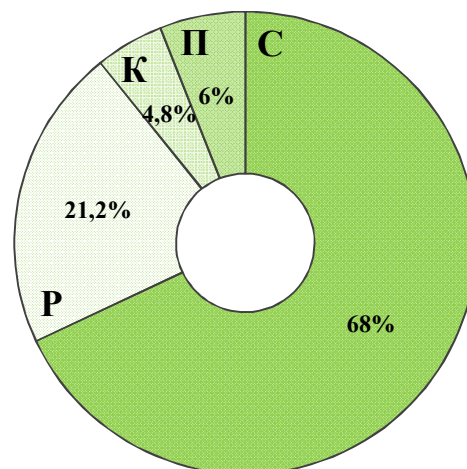


Рисунок 2 – Распределение отказов узлов системы охлаждения в пути следования:
С – секции; Р – редуктор; К – колесо вентилятора; П – прочие узлы

Основными видами неисправностей узлов системы охлаждения тепловозов являются течь воды по трубкам секций радиатора, разрушение резиновых уплотнительных колец и дюритовых соединений из-за нарушения температурного режима, механические повреждения водомасляного теплообменника и охладителя наддувочного воздуха. При этом основное количество отказов системы охлаждения приходится на секции холодильника – до 70 %.

Несвоевременное обнаружение неисправностей узлов системы охлаждения в пути следования может привести к серьезным последствиям вплоть до выхода из строя тепловозного дизеля.

Наряду с отказами системы значительной проблемой является снижение эффективности работы системы охлаждения. Это снижение связано с загрязнением трубопроводов, неудовлетворительной работой насосов, загрязнением внешних и внутренних поверхностей теплообмена и т.д. Все это приводит к увеличению энергозатрат на обеспечение температурного режима работы дизеля.

При работе тепловозного дизеля необходимо обеспечить требуемый температурный режим деталей. Часть выделяющегося при сгорании топлива тепла отводится в систему охлаждения. При работе на режиме номинальной нагрузки в систему охлаждения за счет теплообмена может отводиться до 27 % для двухтактных и до 25 % для четырехтактных двигателей выработанной энергии. При работе на холостом ходу эти значения вырастают до 55,5 и 48,4 % соответственно [8].

Система охлаждения дизеля – одна из наиболее энергопотребляющих вспомогательных систем тепловоза [9], она включает в себя водяные насосы, трубопроводы, промежуточные теплообменники (для охлаждения масла и наддувочного воздуха дизеля водой), воздухопроводы, жалюзи, радиаторные секции (рекуперативные теплообменники) и вентиляторы. Вентиляторы подают воздух на радиаторные секции и потребляют при этом до 7 % вырабатываемой мощности [10 – 16] (таблица 2).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Параметры вентилятора шахты холодильника при номинальном режиме работы тепловоза

Серия тепловоза	Тип привода	Мощность, затрачиваемая на привод вентилятора, кВт
ТЭМ2	Механический	37,5
ТЭМ18	Механический	37,5
ТЭМ7	Механический с гидромурфтой	56,6
ТЭ10М	Механический	125
ТЭ116	Электрический	24
ТЭ25А	Электрический	55
ТЭП70	Гидростатический	57

Система регулирования температуры охлаждающей жидкости обеспечивает своевременный запуск вентилятора холодильника с частотой, необходимой для создания напора воздуха, при котором будет поддерживаться баланс между количеством тепла, поступившим в охлаждающую жидкость и количеством тепла, отведенным из охлаждающей жидкости через систему охлаждения. При этом ухудшение процесса теплообмена приводит к увеличению затрачиваемой мощности, увеличению расхода топлива на привод вентилятора холодильника. Часовой расход топлива, затрачиваемого на привод вентиляторной установки (ВУ), кг/ч, определяется так:

$$B_{\text{чв}} = b_e \cdot N_{\text{в}}, \quad (1)$$

где b_e – удельный расход топлива, кг/(кВт·ч);

$N_{\text{в}}$ – мощность, затрачиваемая на привод вентилятора, кВт.

Усредненные расчетные значения часового расхода топлива, затрачиваемого на привод вентилятора, для различных серий тепловозов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Часовой расход топлива на привод вентиляторов системы охлаждения тепловозов на номинальном режиме

Серия тепловоза	Часовой расход топлива, кг/ч
ТЭМ2	8,70
ТЭМ18	8,25
ТЭМ7	12,0
ТЭ10М	28,75
ТЭ116	5,04
ТЭ25А	11,28
ТЭП70	11,97

Для повышения эффективности работы тепловоза необходимо решить задачу оперативной оценки качества работы системы охлаждения, так как в процессе эксплуатации ее эффективность может снижаться, что приводит к работе дизеля при повышенной температуре теплоносителей, ограничению его мощности, снижению надежности работы и снижению топливной экономичности. Эта проблема наиболее актуальна для тепловозов с автоматической системой регулирования температурного режима, так как ухудшение теплообменных процессов будет автоматически компенсироваться увеличением частоты вращения вентилятора холодильника с увеличением затрат мощности на его привод.

На маневровых локомотивах серии ТЭМ18ДМ при превышении температуры 75 °С контура охлаждения дизеля происходит автоматическое открытие жалюзи холодильной камеры, а при превышении температуры 80 °С – запуск вентилятора холодильной камеры. Для анализа параметров работы системы охлаждения использованы данные системы АПК «Борт» работы локомотива серии ТЭМ18ДМ ст. Входная, по которым построен график температуры охлаждающей жидкости контура охлаждения дизеля (рисунок 3).

Следует отметить, что существенное влияние на температурные режимы работы системы охлаждения дизеля оказывают погодные условия. Так, в зимний период времени зачастую холодильная камера закрывается накладными вставками со стороны жалюзи. В период

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

работы локомотива, указанный на графике, температура окружающей среды изменялась от 14 до 7 °С, скорость ветра – от 0 до 2 м/с, давление – от 758 до 754 мм рт. ст.



Рисунок 3 – Распределение температуры воды контура охлаждения дизеля

Результаты расчета расхода топлива на привод вентилятора холодильника по одной из поездов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Затраты дизельного топлива на привод вентилятора холодильной камеры локомотива

Локомотив	Время работы локомотива, ч	Время работы вентилятора холодильной камеры, ч	Расход топлива локомотивом за смену, кг	Затраты топлива на привод вентилятора, кг
ТЭМ18ДМ	11, 83	2,15	128	9,45

В упрощенном виде моделирование работы системы охлаждения базируется на следующих зависимостях [9]:

– количества тепла, отводимого от воды к стенкам охлаждающих секций, кДж/с:

$$Q_B = c_B G_B (t_2 - t_1); \quad (2)$$

– количества тепла, отводимого от охлаждающих секций в воздушную среду, кДж/с:

$$Q_{B3} = c_{B3} S v_{B3} (t'_2 - t'_1), \quad (3)$$

где c_B, c_{B3} – удельная теплоемкость воды и воздуха соответственно, кДж/(кг·°С);

G_B – массовый расход воды, кг/с;

t_2, t_1 – температура воды на входе и на выходе, °С;

S – площадь сечения трубок, м²;

v_{B3} – скорость воздушного потока, м/с;

t'_2, t'_1 – температура воздуха на входе и средняя температура на выходе, °С.

Для характеристики интенсивности теплообмена определяются коэффициенты:

– теплоотдачи от воды к стенкам охлаждающих секций, кВт/(м²·°С):

$$\alpha_1 = \frac{Q}{F_B (t_2 - t_{ст})}; \quad (4)$$

– теплоотдачи от стенок охлаждающих секций воздуху, кВт/(м²·°С):

$$\alpha_2 = \frac{Q}{F_{B3}(t_{ст} - t_2')}, \quad (5)$$

где F_B , F_{B3} – площадь поверхности теплообмена, m^2 .

Использование математических моделей для расчета параметров работы позволяет определить те рабочие характеристики, что соответствуют исправному состоянию системы охлаждения дизелей локомотивов [10].

К техническим средствам контроля для оценки качества работы секций холодильника служит тепловизор. Это средство бесконтактного тепловизионного контроля позволяет снять показания с поверхностей теплообмена секций холодильника и оценить с учетом реализуемых параметров работы и по результатам контроля эффективность работы системы охлаждения в целом. Перед началом диагностирования проводят предварительную подготовку: секции холодильника продувают сжатым воздухом, убеждаются в отсутствии подсоса воздуха в шахту холодильника, в том, что клапаны межконтурного перепуска перекрыты, настраивают и проверяют тепловизор. Поверхность объекта измерений во время съемки должна находиться в прямой видимости под углом не менее 60° . Измерения проводят при близком к стационарному режиму теплопередачи, что достигается прогревом дизеля на максимальной позиции контроллера машиниста в течение 15 – 30 мин. Во время прогрева фиксируют температуры внутри шахты холодильника и наружного воздуха, после дизель останавливают и проводят термографирование [10].

Исследования, проведенные при реостатных испытаниях тепловозов с применением тепловизора *Testo 875i* позволяют сделать вывод, что состояние систем охлаждения тепловозов (секций холодильника) имеет значительный разброс по теплорассеивающей способности (рисунки 4, 5). На снимках, приведенных на рисунках 4, 5, видно, что часть секций имеет локации с пониженной температурой внешней поверхности, обусловленной загрязнением внешней либо внутренней части трубок и оребрения.

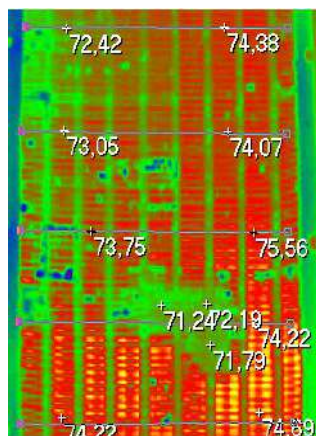


Рисунок 4 – Фрагмент поверхности теплообмена секций холодильника тепловоза ТЭМ18

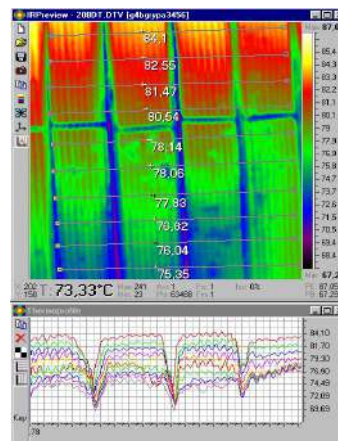


Рисунок 5 – Фрагмент поверхности теплообмена секций холодильника тепловоза ТЭМ2

Оценкой качества работы секций системы охлаждения дизелей локомотивов служит сопоставление опытных данных (данных контроля) с эталонными показателями. Оперативный контроль эффективности работы системы охлаждения тепловоза – технология, позволяющая оценить качество теплообменных процессов, параметров работы дизель-генераторной установки и системы охлаждения локомотива.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>, свободный.

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 2013 [Электронный ресурс]/Режим доступа: <http://ar2013.rzd.ru/ru/>, свободный.
4. ОАО «РЖД»: Годовой отчет 2014 [Электронный ресурс]/Режим доступа: <http://ar2014.rzd.ru/ru/>, свободный.
5. ОАО «РЖД»: Годовой отчет 2015 [Электронный ресурс]/Режим доступа: <http://ar2015.rzd.ru/ru/>, свободный.
6. ОАО «РЖД»: Годовой отчет 2016 [Электронный ресурс]/Режим доступа: <http://ar2016.rzd.ru/ru/>, свободный.
7. ОАО «РЖД»: Годовой отчет 2017 [Электронный ресурс]/Режим доступа: <http://ar2017.rzd.ru/ru/>, свободный.
8. Анисимов, А. С. Расчет тепловыделения в систему охлаждения при работе тепловозного дизеля на холостом ходу [Текст] / А. С. Анисимов, В. О. Носков, В. К. Фоменко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – №3. – С. 2 – 7.
9. Склифус, Я. К. Повышение интенсивности теплопередачи радиаторных секций тепловоза применением фазовых переходов теплоносителя [Текст] / Я. К. Склифус // Инженерный вестник Дона / Ростовское региональное отделение общероссийской общественной организации «Российская инженерная академия» (РО РИА). – Ростов-на-Дону, 2015. – № 3. – С. 159.
10. Балагин, О. В. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния секций холодильников тепловозных дизелей [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Балагин Олег Владимирович. – Омск, 2005. – 165 с.
11. Тепловоз ТЭМ2: Руководство по эксплуатации и обслуживанию [Текст] / Е. Ф. Сдобников, Г. А. Карабан и др. – М.: Транспорт, 1980. – 151 с.
12. Тепловоз ТЭМ18ДМ. Кн. 1: Техническое описание ТЭМ18ДМ РЭ [Текст]: Руководство по эксплуатации / ЗАО УК «БМЗ» – Брянск, 2009. – 151 с.
13. Тепловоз ТЭМ7 [Текст] / А. В. Балашов, И. И. Зеленов и др.; Под ред. Г. С. Меликджанова. – М.: Транспорт, 1989. – 294 с.
14. Тепловозы типа ТЭ10М: Руководство по эксплуатации и обслуживанию [Текст] / С. П. Филонов, А. Е. Заборов и др. – М.: Транспорт, 1985. – 421 с.
15. Тепловоз 2ТЭ116 [Текст] / С. П. Филонов, А. И. Гибалов и др. – М.: Транспорт, 1996. – 334 с.
16. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25 А. Ч 1: Техническое описание 2ТЭ25А РЭ [Текст]: Руководство по эксплуатации / ЗАО УК «БМЗ». – Брянск., 2009. – 199 с.
17. Тепловоз ТЭП70. Ч. 1: Техническое описание [Текст]: Руководство по эксплуатации ТЭП70.00.РЭ / ПО «Коломенский завод». – Коломна, 1988. – 349 с.

References

1. *Energeticheskaja strategija Rossii na period do 2030 goda* (Russia's energy strategy for the period until 2030) / Access mode: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>, free.
2. *Energeticheskaja strategija 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) / Access mode: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf, free.
3. *OAO «RZhD»: Godovoj otchet 2013* (Russian Railways OJSC: Annual Report 2013) / Access mode: <http://ar2013.rzd.ru/ru/>, free.
4. *OAO «RZhD»: Godovoj otchet 2014* (Russian Railways OJSC: Annual Report 2014) / Access mode: <http://ar2014.rzd.ru/ru/>, free.

5. ОАО «РЖД»: *Godovoj otchet 2015* (Russian Railways OJSC: Annual Report 2015) / Access mode: <http://ar2015.rzd.ru/ru/>, free.
6. ОАО «РЖД»: *Godovoj otchet 2016* (Russian Railways OJSC: Annual Report 2016) / Access mode: <http://ar2016.rzd.ru/ru/>, free.
7. ОАО «РЖД»: *Godovoj otchet 2017* (Russian Railways OJSC: Annual Report 2017) / Access mode: <http://ar2017.rzd.ru/ru/>, free.
8. Anisimov A. S., Noskov V. O., Fomenko V. K. Calculation of heat generation in the cooling system when the diesel engine is idling [Raschet teplovyydeniya v sistemu ohlazhdeniya pri rabote teplovoznogo dizelja na holostom ходу]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 3 (23), pp. 2 – 7.
9. Sklifus Ja.K. Increasing the heat transfer intensity of heat-radiator sections using heat transfer phase transitions [Povyshenie intensivnosti teploperedachi radiatornykh sekcij teplovoza primeneniem fazovykh perehodov teplonositelja]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2015, no 3. p. 159.
10. Balagin O. V. *Razrabotka texnologii teplovizionnogo kontrolya texnicheskogo sostoyaniya sekcij xolodil'nikov teplovozn'x dizelej* (Development of technology for thermal imaging control of the technical condition of sections of refrigerators of diesel locomotives). Doctor's thesis, Omsk, 2005. 165 p.
11. Sdobnikov E. F., Karaban G. A. et al. *Teplovoz TE`M 2: Rukovodstvo po jekspluatacii i obsluzhivaniyu* (Diesel locomotive TEM2: Operation and Maintenance Manual). Moscow: Transport, 1980, 151 p.
12. *Teplovoz TEM18DM. Kn. 1: Tehnicheskoe opisanie TE`M 18DM RJe: Rukovodstvo po jekspluatacii* (Diesel locomotive TEM18DM. Technical description of TEM18DM RE: Operation manual). Bryansk, Management Company BMZ, 2009, 151 p.
13. Balashov A. V., Zelenov I. I. i dr.; Pod red. Melikdzhanova G. S. *Teplovoz TJeM7* (Diesel locomotive TEM7). Moscow: Transport, 1989, 294 p.
14. Filonov S. P., Zaborov A. E. i dr. *Teplovozy tipa TE`10M: Rukovodstvo po jekspluatacii i obsluzhivaniyu* (Diesel locomotives of type TЭ10M: Operation and maintenance manual). Moscow: Transport, 1985, 421 p.
15. Filonov S. P., Gibalov A. I. i dr. 3 izd., pererab. i dop. *Teplovoz 2 TE`116* (Diesel locomotive 2TE116). Moscow: Transport, 1996, 334 p.
16. *Magistral'nyj gruzovoj dvuhsekcionnyj teplovoz 2 TE`25 A. Ch 1: Tehnicheskoe opisanie 2TJe25A RJe: Rukovodstvo po jekspluatacii* (Main freight two-section diesel locomotive 2TE25A. Part 1: Technical description 2TE25A RE: Operation manual). Bryansk, Management Company BMZ, 2009, 199 p.
17. *Teplovoz TJeP70. Ch. 1: Tehnicheskoe opisanie: Rukovodstvo po jekspluatacii TE`P70.00. RJe* (Diesel locomotive TEP70. Part 1: Technical specification: Operation manual of TEP70.00. RE). Kolomna, Kolomensk's plant, 1988, 349 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Овчаренко Сергей Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (9609) 83 -75-89.

E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

Метелев Александр Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ovcharenko Sergey Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., Associate professor, head of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (9609) 83 -75-89.

E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

Metelev Alexander Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: +7 (9236) 13 -04-50.
E-mail: nice.metelev@list.ru

Postgraduate student of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: +7 (9236) 13 -04-50.
E-mail: nice.metelev@list.ru

Минаков Виталий Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: vitalya_13@mail.ru

Minakov Vitaliy Anatolevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering Sciences, senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: vitalya_13@mail.ru

Ведрученко Виктор Родионович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Vedruchenko Victor Rodionovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the department «Power system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Оперативный контроль эффективности работы системы охлаждения тепловоза [Текст] / С. М. Овчаренко, А. А. Метелев и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 9 – 17.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ovcharenko S. M., Metelev A. A., Minakov V. A., Vedruchenko V. R. Operational control of system performance cooling of the locomotive. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 9 – 17 (In Russian).

УДК 629.488

П. А. Сиряк

Общество с ограниченной ответственностью «АВИСКОМ» (ООО «АВИСКОМ»), г. Омск, Российская Федерация

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВТОРОЙ ПРОИЗВОДНОЙ СИЛЫ ТОКА ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА

Аннотация. На основании ранее предложенной общей методики использования баз данных измерений бортовой системы параметров дизель-генераторной установки маневрового локомотива описана методика определения закона распределения второй производной функции изменения силы тока тягового генератора, оценки его параметров, определения образцовой функции изменения параметров на межремонтном периоде. Приведена методика и критерии оценки технического состояния дизель-генераторной установки наблюдаемого локомотива с использованием образцовой функции.

Ключевые слова: техническая диагностика, дизель-генераторная установка, маневровый тепловоз, диагностический признак, сила тока, напряжение, мощность.

Pavel A. Siryak

limited liability company «AVISKOM» (LLC « AVISKOM»), Omsk, the Russian Federation

METHOD OF OBTAINING AND USING THE DISTRIBUTION OF THE SECOND DERIVATIVE OF THE CURRENT STRENGTH OF THE TRACTION GENERATOR OF A SHUNTING LOCOMOTIVE

Abstract. On the basis of a previously proposed General method of using a database of measurements onboard system parameters diesel generator set of shunting locomotives a technique of determining the distribution law of the values characterizing the intensity of change of current of the traction generator, evaluation parameters, determining a model function of the parameter changes on the overhaul period. The technique and criteria for assessing the technical condition of the diesel generator set of the observed locomotive using the model function are given.

Keywords: technical diagnostics, diesel generator set, shunting locomotive, diagnostic feature, current, voltage, power.

В статьях [1, 2] отмечалось, что используются экспериментальные данные из архивов результатов измерений параметров дизель-генераторной установки ТЭМ2 аппаратно-программным комплексом «Борт» [3] (АПК «Борт»). Описана методика отбора переходных процессов. Рассматривается также возможность применения точечных характеристик переходных процессов – начальной мощности и начального тока I_0 [4] (рисунок 1) тягового генератора в качестве диагностических параметров дизель-генераторной установки маневрового тепловоза ТЭМ2. Для использования в аналогичных целях всех данных каждого переходного процесса силы тока тягового генератора предложено применять вторую производную I'' функции (линия 3 на рисунке 1), аппроксимирующей значения силы тока i_i , измеренные бортовой системой [3]. Общая методика использования в частности этого параметра при техническом диагностировании дизель-генераторной установки описана в [2] и основана на сравнении параметров образцовой функции плотности вероятности p (1) с параметрами распределения величины I'' для наблюдаемого локомотива при соблюдении условия (2):

$$p = f_0(n_i, n_{mk}, n_{V_{0j}}, t_{\text{меж}}, I'', \Theta); \quad (1)$$

$$n_i = \text{const}; n_{mk} = \text{const}; n_{V_{0j}} = \text{const}. \quad (2)$$

Здесь n_i – номер позиции контроллера машиниста (КМ); n_{mk} – номер межремонтного периода [5]; $n_{V_{0j}}$ – номер интервала начальной скорости. Сущность и необходимость принятия условий (2) раскрывается в источнике [2].

В этой статье рассматривается методика определения образцового закона распределения I'' и его параметров и разработка методики и критериев оценки технического состояния дизель-генераторной установки с использованием образцового распределения и параметров распределения I'' наблюдаемого тепловоза.

Обозначим F – множество пар значений времени t_i измерения силы тока i_i тягового генератора тепловоза в переходном процессе. Обозначения на рисунке 1: 1 – графическое представление изменения силы тока, построенное по измеренным значениям i_i (точки 4), 2 – номер позиции контроллера машиниста n_i . Изображение на рисунке 1 аналогично графическому представлению результатов измерений программой «Kontrol» автоматизированного рабочего места (АРМа) «Борт».

В предлагаемой методике рассматриваются переходные процессы с постоянным уменьшением значений силы тока тягового генератора после переключения КМ на более высокую позицию. Выберем начало координат так, чтобы $I(t_0) = I_{\text{max}} = I_0$ – точка отсчета – момент времени t_0 , при котором ток после переключения КМ достиг максимума I_0 – начального тока.

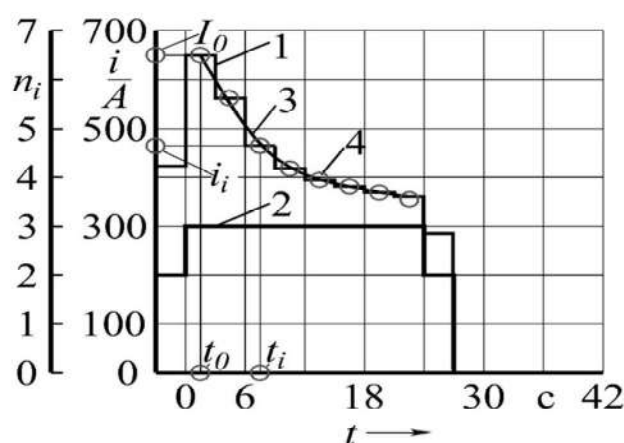


Рисунок 1 – Фрагмент визуализированной записи изменения силы тока тягового генератора

Величина I_0 определяется номером позиции n_i , начальной скоростью локомотива V_0 и нагрузкой на дизель-генераторную установку F_{np} . Значение I_0 не может стремиться к бесконечности при любых условиях. Поэтому первое требование – ордината точки $I(t_0) = I_0$ имеет конечное значение. Функция $I(t)$ должна быть гладкой, убывающей [6] в каждом из выбранных переходных процессов. Экстремумы должны находиться за пределами временного отрезка переходного процесса. Вторая производная функции должна быть константой, т. е. $d^2 I(t)/dt^2 = I'' = \text{const}$.

В соответствии с этими требованиями выбрана алгебраическая функция $I(t)$ второго порядка (3) (кривая 3 на рисунке 1):

$$I(t) = a \ln(t)^2 + b \ln(t) + c. \quad (3)$$

Время t_i в парах измеренных значений силы тока и времени $i_i, t_i | i_i \in F, t_i \in F$ принимается равным середине каждого трехсекундного интервала, а сила тока – постоянной на этом интервале. Оценки параметров a, b, c выполнены методом наименьших квадратов [7]. Получаемая при этом система решалась численно. Точка экстремума функции (3) находится за пределами временного интервала для рассматриваемых переходных процессов (рисунок 2). Индексами $I_1, \dots, I_4$ обозначены экспериментальные точки, а $I_{1m}, \dots, I_{4m}$ – теоретические кривые, рассчитанные по (3) с коэффициентами, оцененными численным методом Гаусса [8]. Коэффициенты достоверности аппроксимации R^2 находятся в диапазоне от 0,97 до 0,99, что подтверждает возможность использования аппроксимации силы тока функцией (3).

Полученные функции и их первую производную (см. рисунок 2) сложно использовать при техническом диагностировании. Большой интерес представляет вторая производная I'' от $I(t)$ по времени $I'' = d^2 I(t)/dt^2 = 2a$.

Значение I'' для каждого переходного процесса и выбранной функции (3) – постоянная величина. Очевидно, что это справедливо для случая аппроксимации параболой. Вторая производная в общем случае показывает ускорение при развитии какого-либо физического процесса. По аналогии в дальнейшем будем называть величину I'' ускорением, интенсивностью изменения силы тока тягового генератора или «величиной I'' ».

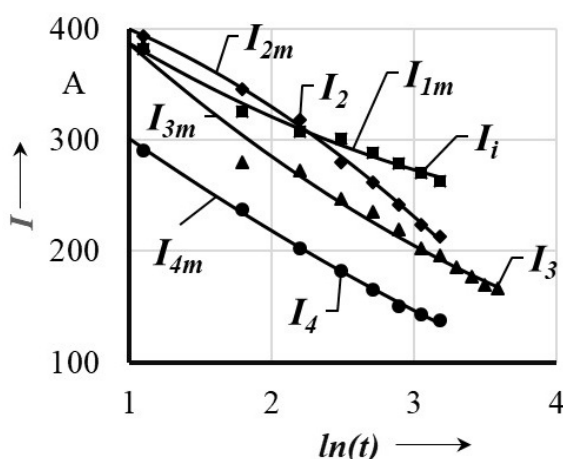


Рисунок 2 – Примеры изменения тока в переходных процессах

Значение I'' является случайной величиной, она принимает как положительное (см. рисунок 2, кривые I_{1m}, I_{3m}, I_{4m}), так и отрицательное (кривая I_{2m}) значения. Соотношение случаев появления ускорения того или иного знака ($+I''$ и $-I''$) непостоянно. Для номеров позиций и интервалов начальной скорости, при рассмотрении которых получены удовлетворительные результаты проверки нулевой сложной гипотезы о соответствии распределения нормальному закону, количество $+I''$ и $-I''$ соизмеримо, поэтому рассматривать необходимо как положительные, так и отрицательные значения. Предположим, что во всех сочетаниях позиции межремонтного

периода и номера интервала начальной скорости значения I'' распределены по нормальному закону.

Оценка параметров распределения осуществлялась выборочным методом для каждого из

сочетаний n_i , n_{pk} , $n_{v_{0j}}$. Полученные значения оценок математического ожидания $\mu_{lg(2a)}$, стандартного отклонения $\sigma_{lg(I'')}$ и стандартного отклонения σ_μ математического ожидания $\mu_{lg(I'')}$ группировались по условию (2) отдельно для случаев подтверждения нулевой сложной гипотезы по критерию Колмогорова или критерию Пирсона. Группы из 12 значений перечисленных величин, соответствующих трехмесячным периодам межремонтной наработки, описывают изменение этих параметров в течение каждого из четырех межремонтных периодов (T_1 , T_2 , T_3 , T_4). Установлено, что эти 12 значений аппроксимируются квадратным трехчленом с максимальным коэффициентом достоверности аппроксимации R^2 [9] (таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициенты аппроксимации математического ожидания $\mu_{lg(I'')}$, стандартного отклонения $\sigma_{lg(I'')}$ и стандартного отклонения σ_μ математического ожидания $\mu_{lg(I'')}$ для ТЭМ2

Межремонтный период	Номер позиции	Интервал начальной скорости	Коэффициенты								
			для $\mu_{lg(I'')}$			для σ_μ			для σ		
			a_μ	b_μ	c_μ	a_{μ_σ}	b_{μ_σ}	c_{μ_σ}	a_σ	b_σ	c_σ
1	2	1	0,018	-0,05	3,19	0,003	-0,01	0,007	0,03	-0,05	0,053
2	5	0	-0,15	0,267	3,0	-0,01	0,01	0,01	-0,04	0,07	0,07
3	4	2	0,058	-0,17	3,05	-0,01	0,009	0,01	-0,04	0,052	0,062
4	5	1	0,259	-0,68	3,32	-0,03	0,08	-0,03	-0,02	0,074	0,037

Обозначения, принятые в табл. 1: a_μ , b_μ , c_μ , a_σ , b_σ , c_σ , a_{μ_σ} , b_{μ_σ} , c_{μ_σ} – коэффициенты аппроксимирующего трехчлена для математического ожидания, стандартного отклонения и стандартного отклонения математического ожидания выборок с подтверждением нулевой гипотезы. Номера интервалов начальной скорости $n_{v_{0j}}$ отсчитываются от нуля. Коэффициенты таблицы 1 соответствуют выборкам $I'_{lg(I'')}$ с удаленными промахами (в отличие от примера, показанного на рисунке 3), для которых подтверждена сложная нулевая гипотеза [10] о соответствии нормальному закону распределения величины I'' .

Эти коэффициенты позволяют построить образцовую функцию $\mu_{lg(I'')}(lg(t))$ и $\sigma_{lg(I'')}(lg(t))$. С использованием значений этих функций строится плотность распределения величины $lg(I'')$ (рисунок 4, номер позиции КМ – 6, интервал начальной скорости 3, межремонтный период 1). Образцовая поверхность S – совокупность множества плотностей распределения $p_i = f(lg(t_i), lg(I''))$. Оценка математического ожидания $\mu_{lg(I'')}(t_i)$ (кривая 1) и стандартного отклонения $\sigma_{lg(I'')}(t_i)$ рассчитываются по уравнению параболы с аргументом $lg(t_i)$ и коэффициентами из таблиц, аналогичных таблице 1. Здесь t_i – межремонтная наработка от 1,5 до 36 мес. Кривые 2, 3, 6 соответствуют $\mu_{lg(I'')}(t_i) \pm 4\sigma_{lg(I'')}(t_i)$ (см. рисунок 4, а, кривая 6).

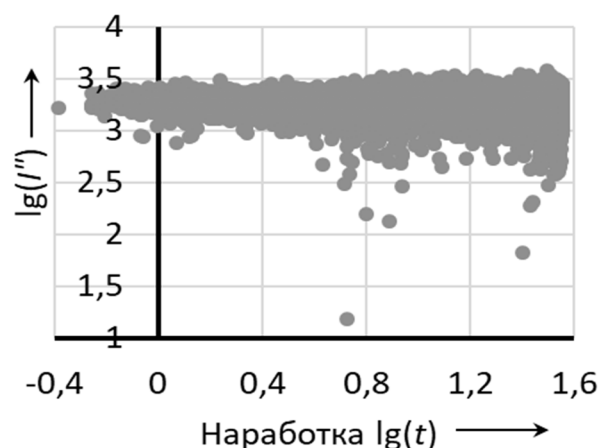


Рисунок 3 – Множество измеренных $lg(I'')$ без удаления промахов

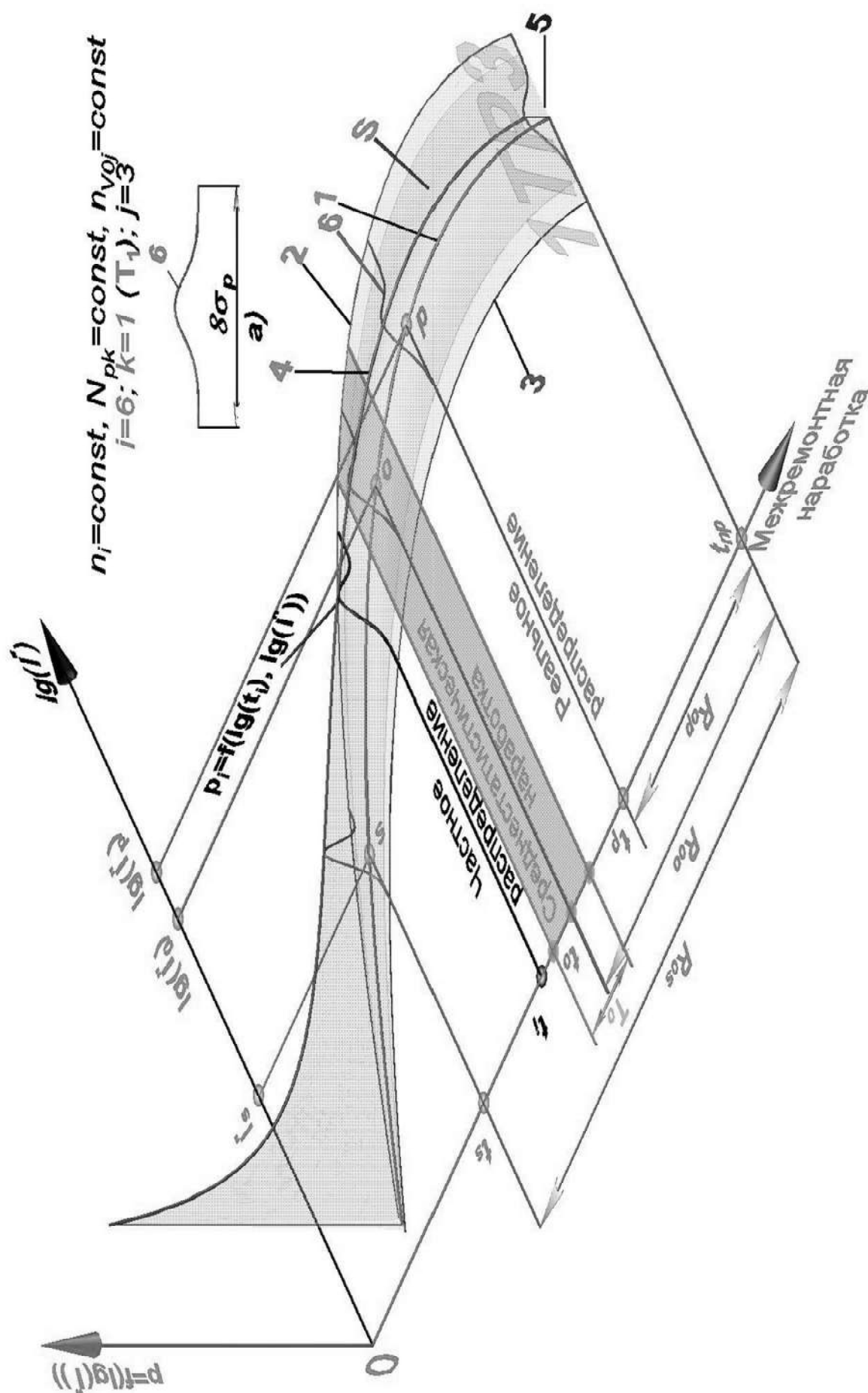


Рисунок 4 – Методика использования величины $lg(2a)$ при техническом диагностировании

Разброс значений величины $\lg(I'')$ относительно мал в области начальных значений наработки и график плотности распределения узкий. В этой же области максимум p_i (4) больше, чем при t_{np} – наработке локомотива при выходе в ремонт (здесь в 1ТР3). Кривая 4 – отображение образцового математического ожидания на S . Область допустимых значений для $\lg(I'')$ – поверхность 5, ограниченная величинами $\mu_{\lg(I'')}(t_i) \pm 3\sigma_{\lg(I'')}(t_i)$.

В ходе мониторинга технического состояния наблюдаемого локомотива (НЛ) (например, в течение трех месяцев) отбираются переходные процессы и определяются коэффициенты функции (3). По совокупности величин $\lg(I'')$ оцениваются параметры распределения: математическое ожидание $\bar{\mu}_p = \lg(I''_p)$ и стандартное отклонение $\bar{\sigma}_p$ для НЛ. Результаты относятся к одной точке на оси наработки – t_0 . Значение t_p находится как решение уравнения

$$a_{mI''} \lg(t_p)^2 + b_{mI''} \lg(t_p) + c_{mI''} = \bar{\mu}_p. \quad (4)$$

Коэффициенты в уравнении (4) подставляются из таблицы 1. Координаты $(t_p, \bar{\mu}_p)$ определяют положение точки p и расположение распределения величины $\lg(I'')$ (кривая 6).

Если $\bar{\mu}_p \neq \mu_0$, т.е. $\lg(I''_p) \neq \lg(I''_0)$, то по этому параметру техническое состояние наблюдаемого локомотива отличается от среднестатистического. Если $R_{0p} < R_{00}$, то остаточный ресурс данного локомотива в текущее время менее среднестатистического. В обоих случаях предлагается принимать решение на основе оценок специалистов эксплуатирующих и ремонтных подразделений. При такой методике диагностирования не определены допустимые значения $\bar{\mu}_p$ и R_{0p} . Примем, что $\Delta\mu = \mu_{\lg(I'')}(t) - \mu_{\lg(I''_t)}$. Здесь $\mu_{\lg(I'')}(t)$ – значение функции среднего значения $\lg(I'')$ на каждом межремонтном периоде T при наработке t , соответствующей середине трехмесячного интервала; $\mu_{\lg(I''_t)}$ – случайное значение математического ожидания.

Установлено, что величина $\Delta\mu$ распределена по нормальному закону для каждого из сочетаний $n_i, n_{pk}, n_{V_{0j}}$. Следовательно, допустимые значения среднего величины $\lg(I'')$ у наблюдаемого локомотива, должны быть в диапазоне

$$\mu_{\lg(I'')}(t_i) - 3\sigma_{\mu}(t_i) \leq \mu_{\lg(I'')}(t_i) \leq \mu_{\lg(I'')}(t_i) + 3\sigma_{\mu}(t_i). \quad (5)$$

Здесь: $\mu_{\lg(I'')}$ – среднее величины $\lg(I'')$ на отрезке времени наблюдения; t_i – наработка локомотива; $\mu_{\lg(I'')}, \sigma_{\mu}$ – математическое ожидание и стандартное отклонение среднего $\lg(I'')$, вычисленные по коэффициентам таблицы 1.

Допустимые значения среднего $\lg(I'')$ (линия 1 на рисунке 5) $\mu_{\lg(I'')} \pm 3\sigma_{\mu}$ (линии 2, 3) примерно на порядок меньше соответствующих значений $\mu_{\lg(I'')} \pm 3\sigma_{\lg(I'')}$ (линии 4, 5). Методика использования образцовых функций изменения средних значений выбранного диагностического признака (здесь $\mu_{\lg(I'')}$), стандартного отклонения среднего $\lg(I'')$ и стандартного отклонения диагностического признака $\lg(I'')$ рас-

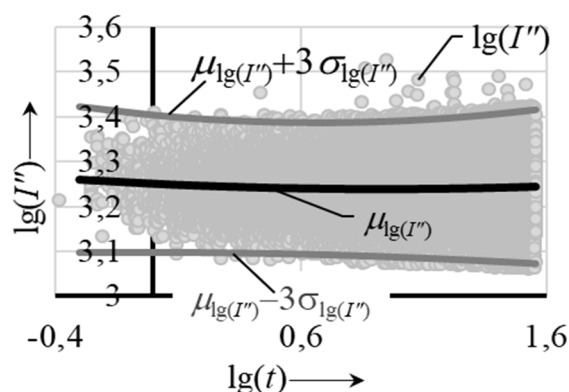


Рисунок 5 – Распределение величины $\lg(I'')$ тепловоза № 1390

смотрена в статьях о начальном токе и начальной мощности и здесь не приводится из-за ограниченности объема статьи.

Используя указанную методику, можно отметить, что у наблюдаемого локомотива № 1390 в течение межремонтного периода от начала эксплуатации (после капитального ремонта) до 1ТРЗ величины $\lg(I'')$ и $\mu_{\lg(I'')}$ не выходят за допустимые значения $\mu_{\lg(I'')} \pm 3\sigma_{\lg(I'')}$, $\mu_{\lg(I'')} \pm 3\sigma_{\mu}$ (см. рисунок 5).

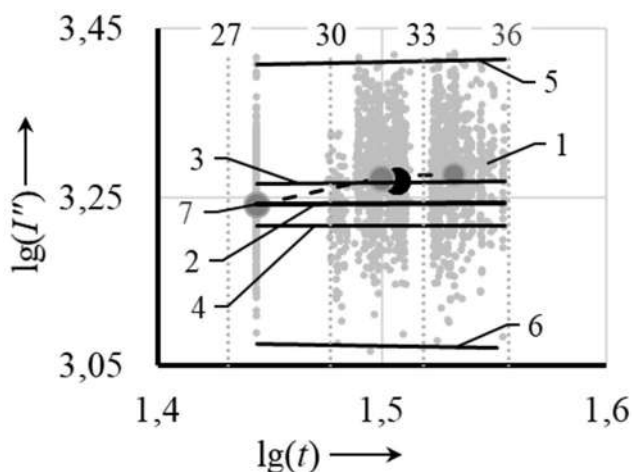


Рисунок 6 – Распределение величины $\lg(I'')$ для тепловоза № 2548

Следовательно, техническое состояние дизель-генераторной установки этого локомотива соответствует образцовым среднестатистическим характеристикам и не требуется дополнительного углубленного диагностирования или неплановых ремонтных воздействий.

По локомотиву № 2548 (рисунок 6, значения $\lg(I'')$ – серые малые точки 1) на первом интервале (при наработке от 27 до 30 мес.) среднее значение $\mu'_{\lg(I'')}$ (большие серые точки линии 7) практически совпадает с образцовым средним $\mu_{\lg(I'')}$ (линия 2). Далее при наработке от 30 до 36

мес. оно превышает $\mu_{\lg(I'')} + 3\sigma_{\mu}$ (линия 3). Это указывает на необходимость дополнительного диагностирования дизель-генераторной установки. Линии 5 и 6 соответствуют образцовым значениям $\mu_{\lg(I'')} \pm 3\sigma_{\lg(I'')}$.

У тепловоза № 2962 (рисунок 7) по результатам измерений, выполненных бортовой системой АПК «Борт», значения логарифма производной $\lg(I'')$ смещены вниз относительно образцовых среднестатистических показателей почти во всем межремонтном периоде. Крупные точки – среднее значение $\lg(I'')$ – выходят за допустимое значение $\mu_{\lg(I'')} - 3\sigma_{\lg(I'')}$. Такое положение средних значений $\lg(I'')$ свидетельствует о необходимости дополнительного диагностирования. Обозначения на рисунке 7 такие же, как и на рисунке 6.

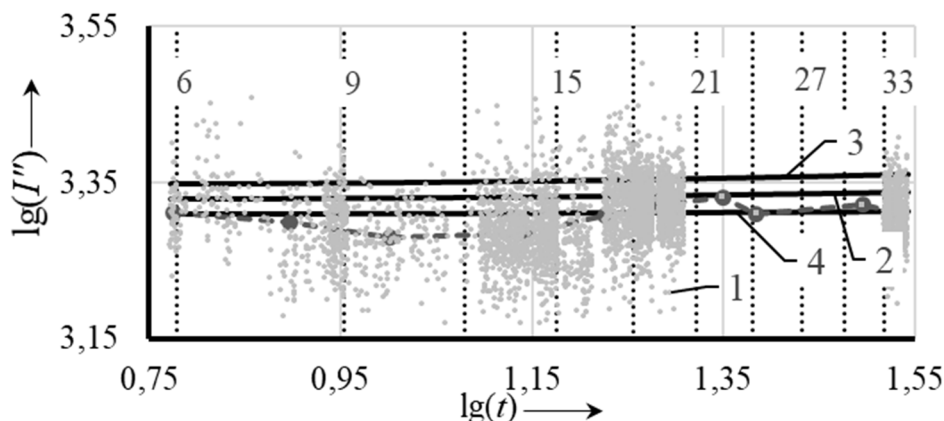


Рисунок 7 – Распределение величины $\lg(I'')$ тепловоза № 2962

Таким образом, предложено в качестве диагностического признака дизель-генераторной установки маневрового тепловоза использовать вторую производную функции, аппроксимирующей силу тока тягового генератора в переходных процессах, принимая ее как случайную величину.

Список литературы

1. Четвергов, В. А. Нарботка локомотивов в едином временном пространстве [Текст] / В. А. Четвергов, А. И. Мишин, П. А. Сиряк // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2 (14). – С. 37 – 45.
2. О методике использования базы данных АПК «Борт» для оценки технического состояния локомотива [Текст] / В. А. Четвергов, М. С. Величко и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 2. – С. 69 – 73 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36587> (Дата обращения: 05.12.2019).
3. Аппаратно-программный комплекс «Борт». Руководство по эксплуатации. РДТЖ.4214559.100РЭ. [Текст] / ООО ПКТП «Транспорт». – Омск, 2016 – 82 с.
4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.
5. О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД» [Текст]: Распоряжение № 3Р: утв. первым вице-президентом ОАО «РЖД» 17.01.2005 / ОАО «РЖД». – М., 2005. – 7 с.
6. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике [Текст]. / М. Я. Выгодский. – М.: Наука, 1977. – 872 с.
7. Линник, Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений [Текст] / Ю. В. Линник. – М.: Физматгиз, 1958. – 334 с.
8. Калиткин, Н. Н. Численные методы [Текст] / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 103 с.
9. Петрович, М. Л. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ [Текст] / М. Л. Петрович, М. И. Давидович. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 191 с.
10. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

References

1. Chetvergov V. A., Mishin A. I., Siryak P. A. Operating time of locomotives in a single time space [Narbotka lokomotivov v edinom vremennom prostranstve]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 2 (14), pp. 37 – 45.
2. Chetvergov V. A., Velichko M. C., Mishin A. I., Siryak P. A. On the methodology of using the database of agro-industrial complex "Bort" to assess the technical condition of the locomotive [O metodike ispol'zovaniya bazy dannyh APK «Bort» dlya ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotiva]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – The journal of Modern science-intensive technologies*, 2017, no. 2, pp. 69 – 73.
3. Apparato-programmnyj kompleks «Bort». Rukovodstvo po ekspluatácii. RDTZh.4214559.100RE. (Hardware and software complex "Bort". User manual. RDTG.4214559.100RE), Omsk, ООО ПКТП «Transport», 2016, 82 p.
4. Bessonov L. A. Theoretical foundations of electrical engineering: Electrical circuits. – 7th ed., pererab., and extra. (Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: Elektricheskie cepi. – 7-e izd., pererab., i dop.). Moscow: Vyssh. shkola, 1978. 528 p.
5. About system of maintenance and repair of locomotives of JSC "Russian Railways". Order No. 3R: UTV. First Vice-President of JSC "Russian Railways" 17.01.2005. (O sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lokomotivov ОАО «РЖД»). *Rasporyazhenie № 3R: utv. Pervym vice-prezidentom ОАО «РЖД» 17.01.2005*, Moscow, JSC "Russian Railways", 2005, 7 p.
6. Vygodsky M. Y. Handbook of higher mathematics (Spravochnik po vysshej matematike). Moscow: Nauka, 1977, 872 p.
7. Linnik Yu. V. Method of least squares and bases of mathematical and statistical theory of observation processing (Metod naimen'shih kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudenij). Moscow: Fizmatgiz, 1958. 334 p.
8. Kalitkin N. N. Numerical methods (Chislennye metody). Moscow: Nauka, 1978, 103 p.

9. Petrovich M. L., Davidovich M. I. Statistical estimation and hypothesis testing on a computer (Statisticheskoe ocenivanie i proverka gipotez na EVM). Moscow: Finance and statistics, 1989, 191 p.

10. Kobzar A. I. Applied mathematical statistics. For engineers and scientists (Kobzar' A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov). Moscow: Fizmatlit, 2006, 816 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сиряк Павел Анатольевич

Общество с ограниченной ответственностью
«Ависком» (ООО «Ависком»).

Гоголя ул., д. 78, г. Омск, 644030, Российская
Федерация.

Директор ООО «Ависком».

Тел.: +7-913-153-32-76.

E-mail: siryakpa@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Siryak Pavel Anatoleavich

Limited liability company «Aviskom» (LLC
«AVISKOM»).

78, Gogol st., Omsk, 644030, the Russian
Federation.

Director of LLC «Aviskom».

Phone: +7-913-153-32-76.

E-mail: siryakpa@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ СТАТЬИ

ОПИСАНИЕ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Сиряк, П. А. Методика получения и использования распределения второй производной силы тока тягового генератора маневрового тепловоза [Текст] // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 17 – 25.

Siryak P.A. Method of obtaining and using the distribution of the second derivative of the current strength of the traction generator of a shunting locomotive. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 17 – 25 (In Russian).

УДК 621.317

А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко

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

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАСТЯНУТОГО СТЕРЖНЯ ДЛЯ РАСЧЕТА НАТЯЖЕНИЙ ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Аннотация. В статье рассматривается возможность использования математической модели растянутого стержня для определения взаимосвязей параметров колебаний контактных проводов и их натяжений. Данная модель позволяет по частоте колебаний контактного провода, полученных после прохода токоприемника, определить натяжение. При этом скорость движения электроподвижного состава не будет влиять на частоту колебаний. Благодаря предложенной модели снижается трудоемкость определения натяжения проводов без перерывов движения поездов и появляется возможность оперативного контроля состояния контактной подвески дистанционно.

Ключевые слова: диагностическая модель контактной сети, натяжение, частота колебания контактного провода, устройство измерения.

Alexandr N. Smerdin, Elena A. Butenko

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

APPLICATION MODELS OF THE TRANSVERSE OSCILLATION OF TENSIONAL MEMBER FOR CALCULATION OF TENSION WIRES CONTACT NETWORK

Abstract. The article considers a suitability of mathematical model of stretched rod to determine the relationship of the parameters oscillations of the contact wires and their tension. This model allows you to determine the tension by

the frequency oscillations of the contact wire obtained after the passage of the current collector. In this case, the speed of the electric rolling stock will not affect the frequency of the damped oscillations. Thanks to the proposed model, the labor intensity is reduced of determining the tension of wires without interruptions in the movement of trains is reduced and there is an opportunity of operational monitoring of the state of the contact suspension remotely.

Keywords: diagnostic model of the contact network, tension, frequency of oscillation of the contact wire, measuring device

В соответствии с принятой стратегией развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 г. планируется увеличение скоростного и высокоскоростного движения, повышение надежности работы устройств и снижение эксплуатационных затрат [1].

С точки зрения мониторинга и диагностики системы токосъема весьма актуальной задачей является контроль натяжения контактного провода и несущего троса, так как эти параметры оказывают наибольшее влияние на показатели работы и характеристики контактной подвески. В процессе эксплуатации натяжение может варьироваться в широких пределах, вплоть до выхода за рамки допустимых значений. Имеющиеся в настоящее время методы диагностики контактной сети [2] не обеспечивают требуемой достоверности определения показателей ее работоспособности, в результате чего число нарушений в работе системы токосъема остается высоким [3, 4].

В настоящее время широкое распространение для контроля натяжения получили врезные и накладные динамометры, устанавливаемые в отходящий на анкеровку трос компенсатора. Они создают ограничения на движение поездов во время выполнения измерений, поэтому во время монтажа или при испытаниях контактной сети часто ограничиваются подсчетом веса грузов компенсаторов контактных проводов и несущих тросов. Ключевым недостатком данных методов является отсутствие возможности контроля натяжения в средней части анкерного участка. Состояние контактной сети в начале и в середине анкерного участка изменяется при повышении или снижении температуры, и полученные данные не будут отражать состояние всего анкерного участка. Поэтому для контроля натяжения предлагается использовать косвенные методы, основанные на известных физических закономерностях [5, 11].

В настоящее время в мире широко известны математические модели, в которых контактные провода и несущие тросы представлены как гибкая нить (рисунок 1, а), струна (рисунок 1, б), волновая нить (рисунок 1, в). Основным недостатком этих моделей является то, что они не учитывают расположения неоднородностей по длине пролета контактной сети [6].

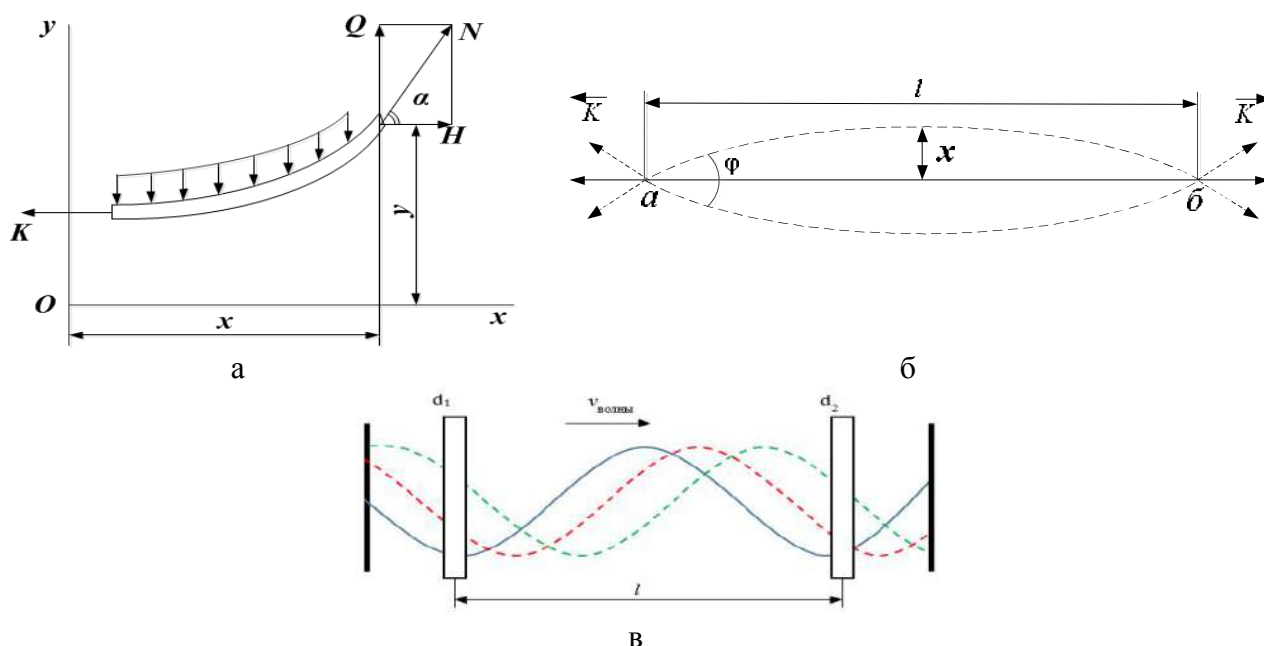
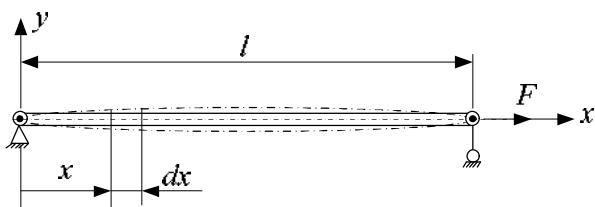
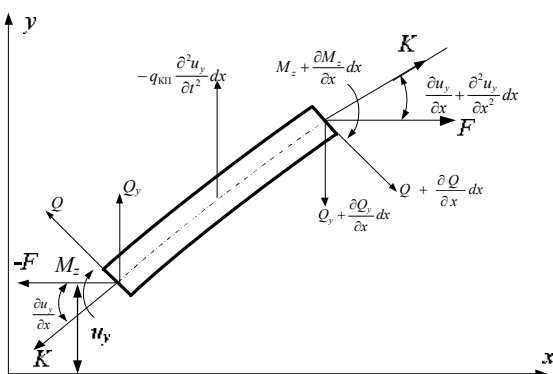


Рисунок 1 – Определение показателей работоспособности контактной подвески с помощью различных методов: а – определение стрелы провеса; б – частоты колебаний; в – скорости распространения поперечной волны

Для исследования взаимосвязи колебаний контактных проводов и их натяжений предлагается использовать модель растянутого стержня, в котором поперечные колебания происходят в горизонтальной плоскости (рисунок 2, а, б), при этом учитываются изгибная жесткость контактного провода и влияние неоднородностей с помощью анализа гармонического состава колебаний [7, 8].



а



б

Рисунок 2 – Силы, действующие на элемент контактного провода в горизонтальной плоскости: представление натянутого провода в горизонтальной плоскости (а) и приращение показателей механических колебаний на единичном отрезке (б)

После сложения проекций на ось y сил, действующих на контактный провод, с учетом малости деформации принимаем, что $\cos\left(\frac{\partial u_y}{\partial x}\right) = 1$, а $\sin\left(\frac{\partial u_y}{\partial x}\right) = \frac{\partial u_y}{\partial x}$. Полученную сумму моментов приравняем к нулю [9, 12]:

$$-q_{к.п} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} dx + Q_y - (Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial x} dx) + K \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} dx \right) - K \frac{\partial u_y}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

или

$$q_{к.п} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + \frac{\partial Q_y}{\partial x} - K \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = 0, \quad (2)$$

где Q_y – перерезывающая сила;

$q_{к.п}$ – погонная масса контактного провода, кг/м;

K – натяжение контактного провода, Н;

u_y – поперечное перемещение контактного провода по оси y .

Ввиду малости угла между направлениями K и растягивающей силой F , приложенной к стержню, можно принять его равным отношению $\frac{\partial u_y}{\partial x}$. С учетом равенства суммы моментов всех сил, приложенных к растянутому стержню, можно записать отношение, не учитывающее члены высшего порядка малости:

$$Q_y = \frac{\partial M_z}{\partial x}, \quad (3)$$

где M_z – изгибающий момент.

В соответствии с дифференциальным уравнением упругой балки $M_z = E_{к.п} J_{к.п} \frac{\partial u_y}{\partial x}$ выражение (2) приведем к виду:

$$q_{к.п} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + E_{к.п} J_{к.п} \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} - K \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = 0, \quad (4)$$

где $E_{к.п}$ – модуль упругости материала контактного провода сплошного сечения, Н·м²;

$J_{к.п}$ – момент инерции поперечного сечения контактного провода относительно главной центральной оси, м⁴.

Принимая допущение о том, что контактный провод совершает гармонические колебания и уравнение имеет частный вид решения, можно записать (4):

$$u_{yr}(x, t) = v_r(x) \sin(\omega_r t + \varphi_r). \quad (5)$$

при этом относительно функции $v_r(x)$ линейное дифференциальное уравнение имеет вид:

$$E_{к.п} J_{к.п} v_r^{IV}(x) - K v_r''(x) - q_{к.п} \omega_r^2 v_r(x) = 0. \quad (6)$$

где v_r – амплитуда колебаний гармоники r , м;

ω_r – частота колебания контактного провода соответствующей гармоники r , Гц.

В соответствии с функцией колебаний натянутого стержня закон изменения амплитуды перемещения можно записать виде:

$$v_r(x) = \frac{\mathcal{G}(0) \cdot l}{\pi \cdot r} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot r \cdot x}{l}\right), \quad (7)$$

где $\mathcal{G}(0)$ – угол изгибающих моментов;

r – номер гармоники;

l – длина пролета, м.

Колебания контактных проводов и несущего троса при проходе электроподвижного состава записываются и анализируются, в результате чего определяется гармонический состав колебаний [10]. Диагностическую ценность представляют не только колебания после прохода электроподвижного состава, но и предшествующие ему, они позволяют сформировать цифровой «отпечаток» токоприемника проходящего электровоза (рисунок 3).

После подстановки выражения (7) в дифференциальное уравнение и преобразований частота колебаний контактного провода может быть определена по формуле:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{\pi^4 \cdot r^4 \cdot E_{к.п} \cdot J_{к.п}}{q_{к.п} \cdot l^4} \cdot \left(1 + \frac{K \cdot l^2}{\pi^2 \cdot r^2 \cdot E_{к.п} \cdot J_{к.п}}\right)}. \quad (8)$$

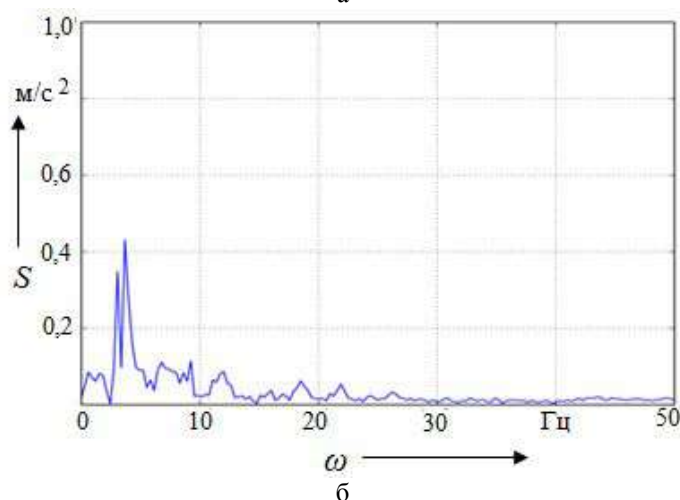
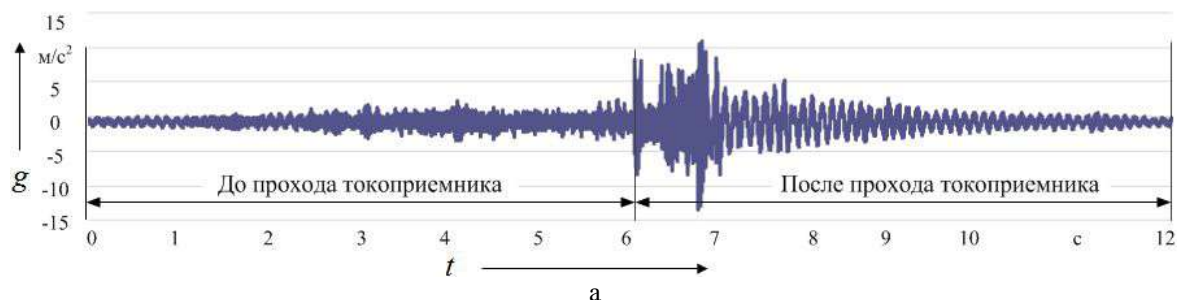


Рисунок 3 – Виброграмма (а) и гармонический спектр (б) колебаний контактного провода в горизонтальной плоскости после прохода токоприемника электроподвижного состава

Продифференцировав функцию (5), получим уравнение состояния натяжения контактной подвески:

$$\frac{\pi^5 \cdot E_{\text{к.п}} \cdot J_{\text{к.п}} \cdot r^5 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot r \cdot x}{l}\right)}{l^5} + \frac{\pi^3 \cdot K \cdot r^3 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot r \cdot x}{l}\right)}{l^3} - \frac{\pi^2 \cdot q_{\text{к.п}} \cdot r^2 \cdot \omega_r \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot r \cdot x}{l}\right)}{l^2} = 0. \quad (9)$$

В дальнейшем измерения натяжения предлагается выполнять с помощью записи колебаний в средней части пролета контактной сети. В качестве средства измерения используется акселерометр, данные с которого поступают в накопитель с независимым электроснабжением (рисунок 4).



Рисунок 4 – Расположение элементов измерительной системы в пролете контактной сети

По полученному спектру определяются частота колебания и соответствующее ему натяжение. Для определения натяжения достаточно по номограмме (рисунок 5) найти соответствующую точку полученной частоты колебания. Номограмма приведена для первой гармоники с амплитудой $0,35 \text{ м/с}^2$ и частотой $2,7 \text{ Гц}$ в соответствии с рисунком 3, б.

Полученную номограмму удобно использовать для контактной подвески, состоящей из несущего троса и контактного провода, которая хорошо аппроксимируется показательной функцией (коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9344$) в рассматриваемом диапазоне изменения натяжения.

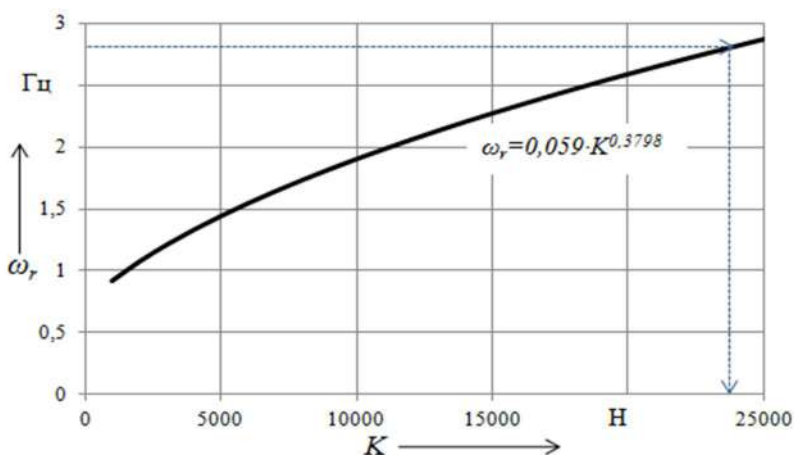


Рисунок 5 – Номограмма определения натяжения контактного провода по частоте колебания

Для применения в автоматизированных системах мониторинга аппроксимирующую функцию целесообразнее преобразовать таким образом, чтобы натяжение можно было определять по частоте одной из гармоник затухающих колебаний:

$$K = 0,3798 \sqrt{\frac{\omega_r}{0,059}} \quad (10)$$

На основании рассмотренной математической модели разработан алгоритм (рисунок 6) для контроля натяжения контактного провода, который реализуется следующим образом.

Алгоритм предполагает работу расположенных вдоль контактной сети датчиков на непрерывной основе, благодаря чему оперативно-технический персонал будет знать о текущем состоянии контактной сети.

Данный алгоритм позволяет определять натяжение контактных проводов и несущих тросов в произвольном (заранее определенном) месте контактной подвески без перерывов движения поездов и повысить точность измерений по сравнению с применяемыми ранее способами.

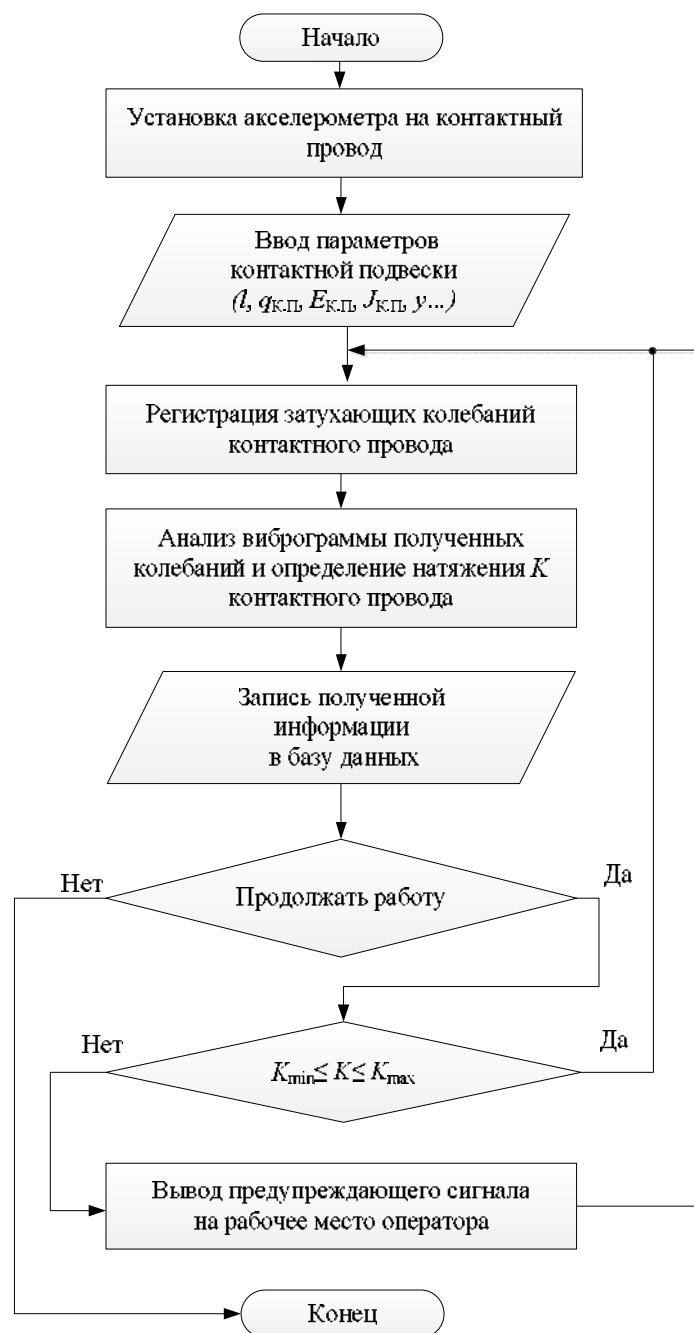


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма для контроля натяжения контактного провода

Список литературы

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 г. («Белая книга» ОАО «РЖД») / ОАО «РЖД». – М., 2011. – 340 с.
2. Пат. 99165 Российская Федерация, МПК G01L 5/04. Устройство для измерения натяжения проводов и тросов / Сидоров О. А., Смердин А. Н., Чертков И. Е., Заренков С. В., Дербилов Е. М. (РФ) – № 2010118196/28; заявл. 05.05.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31.
3. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2016 г.. ЦЭ ОАО «РЖД». – М., 2017. – 116 с.
4. Анализ работы Трансэнерго по итогам 2017 г. ОАО «РЖД». – М., 2018. – 116 с.
5. Пат. 2555196 Российская Федерация, МПК G01L 5/04. Способ измерения натяжения длинномерных изделий / Сидоров О. А., Смердин А. Н., Голубков А. С., Чертков И. Е.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2013147558/28; заявл. 24.10.2013; опубл. 27.04.2016, Бюл. № 16.
6. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи [Текст] / В. П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.
7. Вологин, В. А. Динамические параметры системы контактная сеть-токоприемник [Текст] / В. А. Вологин, А. С. Герасимов // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2008. – № 2. – С. 19 – 23.
8. Смердин, А. Н. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвеске на основе конечной элементной модели [Текст] / А. Н. Смердин, А. С. Голубков, В. А. Жданов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011 – №1 (5). – С. 30 – 37.
9. Хазанов, Х. С. Механические колебания систем с распределенными параметрами [Текст]: учебное пособие / Х. С. Хазанов // Самарский гос. аэрокосмич. ун-т. – Самара, 2002. – 80 с.
10. Gonzalez, F.J. Dynamic analysis using finite elements to calculate the critical wear section of the contact wire in suburban railway overhead conductor rails [Текст] / F.J. Gonzalez, J.A. Chover, B. Suarez, M. Vazquez // Proc. IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 222, P. 145 – 157, 2008.
11. Kiesling, F. Contact lines for electric railways planning design implementation [Текст] / F. Kiesling, R. Pushman, A. Schmieder // Berlin and Munich: Siemens, 2001. – 822 p.
12. Кудряшов, Е. В. Механические расчеты контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей [Текст] / Е. В. Кудряшов // Известия Петербургского ун-та путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб. – 2010. – № 3 (24). – С. 258 – 269.

References

1. The development strategy of the holding «RZD» for the period up to 2030 [Strategiya razvitiya kholdinga «RZHD» na period do 2030 g.] («White Book» of JSC «RZD») / Moscow: ОАО «RZhD», 2011, 340 p.
2. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Chertokov I. E., Zarenkov S.V., Derbilov E. M. Patent RU99165U1, 10.11.2010.
3. Analysis of the operation of the electrification and electricity supply in 2016 [Analiz raboty khozyaystva elektrifikatsii i elektrosnabzheniya v 2016 g.]. Moscow: ОАО «RZhD», 2017, 116 p.
- 4 Analysis of the work of Transenergo in 2017 [Analiz raboty Transenergo po itogam 2017 g.]. Moscow: ОАО «RZD», 2018, 116 p.
5. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S., Chertokov I. E. Patent RU2555196U1, 27.04.2015.
6. Mikheev, V. P. Contact networks and power lines [Kontaktnyye seti i linii elektroperedachi]. Moscow: Route, 2003, 416 p.

7. Vologin, V. A. Dynamic parameters of the system contact network-current collector [Dinamicheskiye parametry sistemy kontaktnaya set'-tokopriyemnik] / V.A. Vologin, A.S. Gerasimov // Bulletin VNIIZHTa/ VNIIZHT. Moscow: –2008, no 2, pp. 19 – 23.

8. Smerdin, A. N. Improving the methodology for studying wave processes in a contact suspension based on a finite element model [Sovershenstvovaniye metodiki issledovaniya volnovykh protsessov v kontaktnoy podveske na osnove konechnoy elementnoy modeli] / A. N. Smerdin, A. S. Golubkov, V. A. Zhdanov. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 1 (5), pp. 30 – 37.

9. Khazanov Kh. S. Mechanical vibrations of systems with distributed parameters [Mekhanicheskiye kolebaniya sistem s raspredelennymi parametrami]: Textbook Allowance. Samara gos. aerospace un-t. Samara, 2002, 80 p.

10. Gonzalez, F.J. Dynamic analysis using finite elements to calculate the critical wear section of the contact wire in suburban railway overhead conductor rails / F.J. Gonzalez, J.A. Chover, B. Suarez, M. Vazquez // Proc. IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2008, Vol. 222, pp. 145 – 157.

11. Kiesling F., Pushman R., Schmieder A. Contact lines for electric railways planning design implementation. Berlin and Munich: Siemens, 2001, 822 p.

12. Kudryashov, E. V. Mechanical Calculations of the Catenaries Based on Static Finite Element Models [Mekhanicheskiye raschety kontaktnykh podvesok na osnove staticheskikh konechno-elementnykh modeley]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya – Izvestiia of St. Petersburg University of Railways*, 2011, no. 3 (24), pp. 258 – 269.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Бутенко Елена Александровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7-904-076-00-95, +7-913-600-47-86.

E-mail: butenkoelena1994@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Смердин, А. Н. Применение моделей поперечных колебаний растянутого стержня для расчета натяжений проводов контактной сети [Текст] / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 25 – 32.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smerdin Alexandr Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia, the Russian Federation.

Dr. Sci. Tech., Associate Professor of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Butenko Elena Alexandrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7-904-076-00-95, +7-913-600-47-86.

E-mail: butenkoelena1994@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Smerdin A. N., Butenko E. A. Application models of the transverse oscillation of tensional member for calculation of tension wires contact network. *Journal of Transsib Railway Studies* 2019, vol. 4, no. 40, pp. 25 – 32 (In Russian).

УДК 624.332:621.316.97

О. В. Литвинова

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛИРОВАННОГО ПРОВОДНИКА

Аннотация. В данной статье объектом исследования являются кабели энергоснабжения не тяговых железнодорожных потребителей. Определены электрические параметры изолированного проводника. Получены первичные параметры алюминиевой оболочки магистрального кабеля энергоснабжения. В результате решения задачи определено переходное сопротивление изолированного проводника. Из граничных условий определена постоянная распространения металлической оболочки кабеля энергоснабжения в полимерном изолирующем покрытии. В итоге значения переходного сопротивления, полученные разными методами, совпадают.

Ключевые слова: изолированный проводник, переходная проводимость, ток утечки, функции Бесселя, внешнее сопротивление, переходное сопротивление.

Olga V. Litvinova

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

DETERMINATION OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF THE ISOLATED CONDUCTOR

Abstract. In this article, the object of the study is the power supply cables for non-traction railway consumers. The electrical parameters of the insulated conductor are determined. Primary parameters of the aluminum shell of the main power supply cable are obtained. As a result of solving the problem, the transient resistance of an isolated conductor is determined. From the boundary conditions, the propagation constant of the metal shell of the power supply cable in the polymer insulating coating is determined. As a result, the values of the transition resistance obtained by different methods are the same.

Keywords: insulated conductor, transient conductivity, leakage current, Bessel functions, external resistance, transient resistance.

Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта осуществляется за счет увеличения пропускной и провозной способности железных дорог, что требует применения современных систем электроснабжения, их надежной и безотказной работы. Кроме того, внедрение современных систем управления транспортом, включающего в себя элементы вычислительной техники, систем передачи и обработки больших информационных потоков, что потребует увеличения качественных показателей потребляемой электрической энергии, расширения кабельных сетей электроснабжения и их надежной и безотказной работы. Безопасность железнодорожного транспорта зависит также и от надежности работы системы электроснабжения, одним из основных элементов которой являются кабельные линии энергоснабжения.

Протяженность электрифицированных железных дорог России превышает 43,4 тыс. км, из них на постоянном токе применяются кабели в алюминиевой оболочке и полимерном изолирующем покрытии, а для кабелей автоматики, телемеханики и связи применяются кабели без металлических покрытий. Эти кабели могут успешно работать в условиях электротяги постоянного тока, при котором некомпенсированные электромагнитные поля имеют незначительную амплитуду. Гармонический состав этих полей в условиях электротяги постоянного тока имеет довольно широкий спектральный состав, который определяется выпрямительными агрегатами тяговой подстанции. Выпрямительные агрегаты, осуществляющие преобразование переменного тока в постоянный, выполняют на кремниевых силовых диодах. Типы выпрямительных агрегатов, применяемых на тяговых подстанциях: 6-, 12- и 24-х пульсовые.

Железнодорожный транспорт имеет развитую сеть кабельных линий электроснабжения, магистральных и местных линий связи, кабельных линий контроля и автоматики. Подземные коммуникации обеспечивают функционирование систем, их безопасное обслуживание и защиту этих систем в условиях грозových разрядов и коротких замыканий, как ЛЭП высокого напряжения, так и тягового электроснабжения [1].

Для определения параметров электромагнитного поля проводника наиболее удобно использовать вектор-потенциальную функцию, которая связана с параметрами определяемого поля.

Волновое уравнение совместно с граничными условиями

$$\Delta A - m^2 A = 0 \quad (1)$$

определяет значения векторного и скалярного потенциалов, а следовательно, и компонентов электромагнитного поля.

Поскольку поле линейного источника в безграничном пространстве обладает цилиндрической симметрией, то вектор-потенциальная функция имеет единственную составляющую, направленную вдоль линейного проводника [2].

Уравнение (1) в цилиндрической системе координат примет вид:

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial A_x}{\partial r} - m^2 A_x = 0 \quad (2)$$

где $r = \sqrt{y^2 + z^2}$;

$m^2 = \kappa^2 - \gamma^2$;

$\kappa = \sqrt{j\omega\mu\sigma - \omega^2\epsilon\mu}$ – волновое число среды, 1/м;

ω – круговая частота, рад/с;

μ – магнитная проницаемость среды, Гн/м;

σ – удельная проводимость среды, См/м;

ϵ – диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

γ – коэффициент распространения тока в проводнике, 1/м.

Решение уравнения (2) записывается через модифицированные функции Бесселя I_0 и K_0 [3]. Считается, что величина тока по длине проводника изменяется по закону $I_x = I_n e^{-\gamma x}$:

$$A_x = [AK_0(mr) + BI_0(mr)], \quad (3)$$

где A и B – постоянные, определяемые из граничных условий. Для вектор-потенциальной функции в проводнике в выражении (3) следует принять $A = 0$, поскольку при $r \rightarrow 0$ $K_0(mr) \rightarrow \infty$.

Для определения коэффициента B_1 в проводнике перейдем от вектор-потенциальной функции $A_x^{(1)} = B_1 I_0(m_1 r)$ к напряженности магнитного поля $H_\phi^{(1)}$.

$$H_\phi^{(1)} = \frac{1}{\mu} \text{rot } A_x^{(1)} = \frac{B_1}{\mu} \text{rot}[I_0(m_1 r)] = \frac{B_1}{\mu} m_1 I_1(m_1 r) = \frac{I_x}{2\pi r_1} \quad (4)$$

где $m_1 = \sqrt{\kappa_1^2 - \gamma^2}$;

r_1 – радиус провода;

Из закона полного тока $I = H 2\pi r$ определим значение B_1 для поверхности проводника:

$$B_1 = \frac{I_x \mu}{2\pi r_1 m_1 I_1(m_1 r_1)}. \quad (5)$$

Напряженность магнитного поля в проводнике

$$H_\phi^{(1)} = \frac{I_x I_1(m_1 r)}{2\pi r_1 I_1(m_1 r_1)}. \quad (6)$$

Из уравнения Максвелла определим E_r и E_x :

$$\frac{\partial H_\phi}{\partial x} = -(\sigma + j\omega\epsilon)E_r = -\tilde{\sigma}E_r; \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial r}(rH_\phi) = r\tilde{\sigma}E_x; \quad (8)$$

Откуда получим:

$$E_r^{(1)} = \frac{I_x \gamma}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1} \cdot \frac{I_0(m_1 r)}{I_1(m_1 r_1)}; \quad (9)$$

$$E_x^{(1)} = \frac{I_x m_1}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1} \cdot \frac{I_0(m_1 r)}{I_1(m_1 r_1)}. \quad (10)$$

Запишем решение уравнения (3) для диэлектрика, окружающего линейный проводник:

$$A_x^{(из)} = A_{из} K_0(m_{из} r) + B_{из} I_0(m_{из} r). \quad (11)$$

Компоненты электромагнитного поля определяются по известному значению вектор-потенциальной функции:

$$H_\phi^{(из)} = \frac{m_{из}}{\mu} [A_{из} K_1(m_{из} r) + B_{из} I_1(m_{из} r)]; \quad (12)$$

$$E_r^{(из)} = \frac{m_{из} \gamma}{\mu \tilde{\sigma}_{из}} [A_{из} K_1(m_{из} r) + B_{из} I_1(m_{из} r)]; \quad (13)$$

$$E_x^{(из)} = \frac{m_{из}^2}{\mu \tilde{\sigma}_{из}} [B_{из} I_0(m_{из} r) + A_{из} K_0(m_{из} r)]. \quad (14)$$

При определении постоянных $A_{из}$ и $B_{из}$ воспользуемся граничными условиями на границе «металл – диэлектрик» и «диэлектрик – среда». Для границы раздела «металл – диэлектрик» при $r = r_1$ имеем:

$$H_\phi^{(из)} = \frac{I_x}{2\pi r_1} = \frac{1}{\mu} [A_{из} m_{из} K_1(m_{из} r_1) + B_{из} m_{из} I_1(m_{из} r_1)] \quad (15)$$

и для второй границы при $r = r_2$:

$$H_{\varphi}^{(из)} = \frac{I_x}{2\pi r_2} = \frac{1}{\mu} [A_{из} m_{из} K_1(m_{из} r_2) + B_2 m_{из} I_1(m_{из} r_2)]. \quad (16)$$

Из полученных соотношений граничных условий (15), (16) определяются постоянные:

$$A_{из} = \frac{\mu I_x}{2\pi m_{из} r_1 r_2} \left[\frac{r_1 I_1(m_{из} r_1) - r_2 I_1(m_{из} r_2)}{I_1(m_{из} r_1) K_1(m_{из} r_2) - I_1(m_{из} r_2) K_1(m_{из} r_1)} \right]; \quad (17)$$

$$B_{из} = \frac{\mu I_x}{2\pi m_{из} r_1 r_2} \left[\frac{r_2 K_1(m_{из} r_2) - r_1 K_1(m_{из} r_1)}{I_1(m_{из} r_1) K_1(m_{из} r_2) - I_1(m_{из} r_2) K_1(m_{из} r_1)} \right]. \quad (18)$$

Для внешней среды постоянные A_2 и B_2 определяются из следующих условий:

$$\begin{cases} H_{\varphi} \rightarrow 0, r \rightarrow \infty; \\ H_{\varphi} = \frac{I_x}{2\pi r_2}, r = r_2. \end{cases} \quad (19)$$

В этом случае следует принять $B_2 = 0$, поскольку при $r \rightarrow \infty I_0(m_2 r) \rightarrow \infty$. Используя соотношения (9) для внешней среды, вектор-потенциальную функцию и компоненты электромагнитного поля можно записать в виде:

$$\begin{cases} A_x^{(2)} = \frac{I_x \mu K_0(m_2 r)}{2\pi m_2 r_2 K_1(m_2 r_2)}; \\ H_{\varphi}^{(2)} = \frac{I_x K_1(m_2 r)}{2\pi r_2 K_1(m_2 r_2)}; \\ E_r^{(2)} = \frac{I_x \gamma K_1(m_2 r)}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}; \\ E_x^{(2)} = \frac{I_x m K_0(m_2 r)}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}. \end{cases} \quad (20)$$

Затухание электрического сигнала в изолированном проводнике зависит от электрических параметров проводника, материала проводника, параметров земли, формы сигнала и др. В статье рассмотрены параметры изолированного проводника в однородной среде. При известных параметрах проводника определяется изменение сигнала по длине проводника как функции координаты. Аналитический расчет электрических величин в земле и подземных или наземных сооружениях сопряжен со значительными трудностями, поскольку представляет собой трехмерную задачу с граничными условиями. При определении параметров изолированного проводника воспользуемся граничным условием [4], которое связывает тангенциальные составляющие электрического поля по обе стороны изолирующего покрытия.

Параметры проводника определяют из граничных условий [4]:

$$E_x^{(1)} + \frac{\tilde{\sigma}_1 h_{из}}{\tilde{\sigma}_{из}} \cdot \frac{\partial E_2^{(1)}}{\partial x} = E_x^{(2)}. \quad (21)$$

Граничное условие (21), после подстановки необходимых компонентов электромагнитного поля, примет вид:

$$\frac{I_x m_1 I_0(m_1 r_1)}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)} - \frac{\tilde{\sigma}_1 h_{из} I_x \gamma^2 I_1(m_1 r_1)}{\tilde{\sigma}_{из} 2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)} = \frac{I_x m_2 K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}. \quad (22)$$

Из полученного выражения (22) определим постоянную распространения:

$$\gamma^2 = \left[\frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{\sigma_1 I_1(m_1 r_1)} + \frac{r_1 m_2 K_0(m_2 r_2)}{r_2 \sigma_2 K_1(m_2 r_2)} \right] \frac{\tilde{\sigma}_{из}}{h_{из}}. \quad (23)$$

Умножим и разделим второе слагаемое в выражении (23) на m_2 , сгруппируем члены с γ^2 и после сокращения на $\tilde{\sigma}_{из}/h_{из}$ запишем:

$$\gamma^2 = \frac{\frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{r_1 \sigma_1 I_1(m_1 r_1)} + j\omega \frac{\mu}{r_2 m_2} \cdot \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}}{\frac{h_{из}}{r_1 \tilde{\sigma}_{из}} + \frac{1}{r_2 \sigma_2 m_2} \cdot \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}}. \quad (24)$$

Разделим числитель и знаменатель полученной дроби (24) на 2π :

$$\gamma^2 = \frac{\frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)} + \frac{j\omega \mu}{2\pi r_2 m_2} \cdot \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}}{\frac{h_{из}}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_{из}} + \frac{1}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_2 m_2} \cdot \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}} = (Z_{вн} + Z_{в}) Y_a. \quad (25)$$

В выражении (25) первое слагаемое в числителе является внутренним (собственным) сопротивлением проводника:

$$Z_{вн} = \frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)}, \quad (26)$$

второе слагаемое – внешним (вносимым):

$$Z_{в} = \frac{j\omega \mu K_0(m_1 r_1)}{2\pi r_2 m_2 K_1(m_2 r_2)}. \quad (27)$$

Знаменатель выражения (25) является полным переходным сопротивлением изолированного проводника:

$$Z_a = \frac{h_u}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_{из}} + \frac{1}{2\pi r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2} \cdot \frac{K_0(m_2 r_2)}{K_1(m_2 r_2)}, \quad (28)$$

$$Z_a = \frac{1}{Y_a}, \quad (29)$$

где Y_a – полная переходная проводимость изолированного проводника.

Первое слагаемое $\frac{h_u}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_{из}}$ в полном переходном сопротивлении проводимости определяется геометрическими размерами и свойством изолирующего покрытия. Второе слагаемое определяется параметрами земли. Учитывая, что в тональном диапазоне частот аргумен-

ты функции Бесселя малы, можно воспользоваться разложением их в ряды и ограничить их первыми членами: $I_0(mr) \approx 1$, $I_1(mr) \approx \frac{mr}{2}$, $K_0(mr) \approx \ln \frac{1,12}{mr}$, $K_1(mr) \approx \frac{1}{mr}$.

Кроме того, в тональном диапазоне частот в выражении $\tilde{\sigma}_{из} = \sigma_{из} + j\omega\epsilon$ выполняется условие: $\sigma_{из} \ll j\omega\epsilon$. Поэтому можно записать:

$$\frac{h_{из}}{2\pi r_1 j\omega\epsilon} \approx \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi j\omega\epsilon} = (j\omega C)^{-1}. \quad (30)$$

С учетом принятых допущений

$$\gamma^2 = \frac{(\pi r_2 \tilde{\sigma}_1)^{-1} + \frac{j\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{1,12}{m_2 r_2}}{(j\omega C)^{-1} + \frac{1}{2\pi \tilde{\sigma}_2} \ln \frac{1,12}{m_2 r_2}}. \quad (31)$$

Первичные параметры можно получить по известным значениям составляющих электромагнитного поля, входящих в γ . Внутреннее сопротивление проводника определится как отношение $E_x^{(1)}$ на поверхности проводника к току:

$$Z_{вн} = \frac{E_x^{(1)}(r_1)}{I_x} = \frac{m_1 I_0(m_1 r_1)}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1 I_1(m_1 r_1)}. \quad (32)$$

Для проводников в широком диапазоне частот выполняются условия [5]:

$$\sigma_1 \gg \omega\epsilon_1; \quad \omega\mu\sigma_1 \gg \gamma^2. \quad (33)$$

Умножив и разделив полученное выражение (32) на κ_1 , с учетом условия (33) запишем:

$$Z_{вн} = \frac{j\omega\mu}{2\pi r_1 \kappa_1} \frac{I_0(\kappa_1 r_1)}{I_1(\kappa_1 r_1)}. \quad (34)$$

Внешнее сопротивление проводника получим из следующего условия [4]:

$$E_x^{(\beta)} = -Z_{вн} I_x = -j\omega A_x^{(2)}, \quad (35)$$

откуда:

$$Z_{вн} = \frac{j\omega\mu K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 m_2 K_1(m_2 r_2)}. \quad (36)$$

Для определения переходной проводимости проводника Y_a воспользуемся следующими соотношениями:

$$Y_a = \frac{I_{ут}}{\varphi}; \quad Z_a = \frac{1}{Y_a}, \quad (37)$$

где $I_{ут} = \frac{\partial I_x}{\partial X}$ – ток утечки с проводника.

Потенциал изолированного проводника запишем так:

$$\varphi = \Delta\varphi + \varphi_3, \quad (38)$$

где $\Delta\varphi$ – падение напряжения на изолирующем покрытии;

φ_3 – потенциал земли на поверхности изолированного проводника.

$$\varphi = \int_{r_1}^{r_2} E_r^{(из)} dr + \int_{r_2}^{\infty} E_r^{(2)} dr. \quad (39)$$

Подставляя в первый интеграл выражения (39) значение $E_r^{(из)}$ из уравнения (13) получим:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{из} &= \frac{m_{из}\gamma}{\mu\tilde{\sigma}_{из}} A_{из} \int_{r_1}^{r_2} K_1(m_{из}r) dr + \frac{m_{из}\gamma}{\mu\tilde{\sigma}_{из}} B_{из} \int_{r_1}^{r_2} I_1(m_{из}r) dr = \\ &= \frac{A_{из}}{\mu\tilde{\sigma}_{из}} [K_0(m_{из}r_2) - K_0(m_{из}r_1)] + \frac{B_{из}}{\mu\tilde{\sigma}_{из}} [I_0(m_{из}r_2) - I_0(m_{из}r_1)]. \end{aligned} \quad (40)$$

Значения $A_{из}$ и $B_{из}$ определяются выражениями (17) и (18).

Второй интеграл в выражении (39)

$$\varphi_3 = \int_{r_{12}}^{\infty} E_r^{(2)} dr = \int_{r_{12}}^{\infty} \frac{I_x \gamma K_1(m_2 r)}{2\pi r_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)} dr = \frac{I_x \gamma K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}. \quad (41)$$

По известным значениям $\Delta\varphi$ и $\Delta\varphi_3$ можно определить Z_a из выражения (37) получим:

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{A'_{из}}{\mu\tilde{\sigma}_{из}} [K_0(m_{из}r_2) - K_0(m_{из}r_1)] + \frac{B'_{из}}{\mu\tilde{\sigma}_{из}} [I_0(m_{из}r_2) - I_0(m_{из}r_1)] + \\ &\quad + \frac{K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}, \end{aligned} \quad (42)$$

где $A'_{из} = \frac{A_{из}}{I_x}$, $B'_{из} = \frac{B_{из}}{I_x}$.

Учитывая, что $(m_{из}r_1) \ll 1$, $(m_{из}r_2) \ll 1$, можно воспользоваться соотношениями функций Бесселя для малых аргументов:

$$Z_a = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi r \tilde{\sigma}_{из}} + \frac{K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)}. \quad (43)$$

С учетом формулы (30) выражения (28) и (43) для определения переходного сопротивления, полученные разными методами, совпадают.

Результаты сравнительных испытаний различных полимерных изолирующих покрытий показали, что их защитные свойства зависят от конструкции изолирующего покрова, свойств используемых материалов и технологии нанесения на защищаемую поверхность.

Основным видом защиты от коррозии алюминиевой оболочки кабеля являются полимерные покрытия, обеспечивающие изоляцию алюминиевой конструкции от воздействия агрессивных компонентов окружающей среды и проникновения блуждающих и других токов в алюминиевую оболочку [7 – 9]. В качестве изолирующих покрытий в настоящее время

используется полиэтилен, в том числе и термоусаживаемый [10]. Материалы должны иметь хорошую адгезию к металлу сооружения, обладать высокими диэлектрическими свойствами, малой влаго- и газопроницаемостью, иметь высокие механические свойства. Результаты сравнительных испытаний различных полимерных изолирующих покрытий показали, что их защитные свойства зависят от конструкции изолирующего покрова, свойств используемых материалов и технологии нанесения изолирующего покрытия на защищаемую поверхность [11].

Изолирующие покровы ленточного типа имеют более низкое переходное сопротивление по сравнению с покрывами шлангового типа, которые обеспечивают лучшую защиту алюминиевой оболочки от коррозии [12]. Наличие подклеивающего слоя и битумного компаунда между алюминиевой оболочкой и полимерным шланговым покрытием значительно повышает защитные свойства покрытия [6].

Для проводников в полимерном изолирующем покрытии шлангового типа в тональном диапазоне частот выполняется условие:

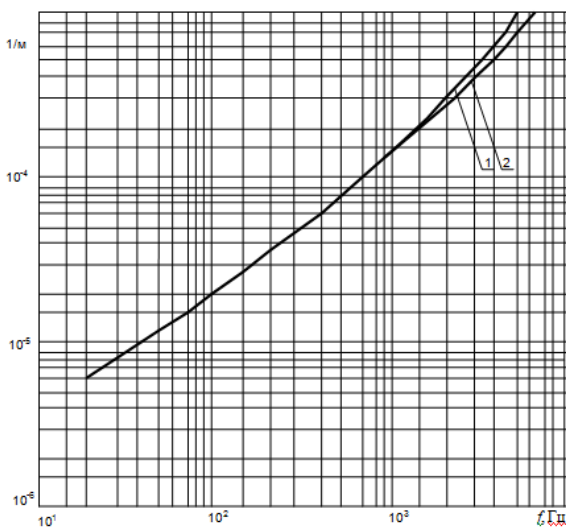
$$(j\omega C)^{-1} \gg \frac{K_0(m_2 r_2)}{2\pi r_2 m_2 \tilde{\sigma}_2 K_1(m_2 r_2)} \approx \frac{1}{2\pi \sigma_2} \ln \frac{1,12}{m_2 r_2}. \quad (44)$$

Емкость изолированного проводника относительно земли

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (45)$$

С учетом условия (44) выражение (31) запишется в виде:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi r_1^2 \sigma_1} + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{1,12}{m_2 r_2} \right) j \omega C}. \quad (46)$$



Изменение модуля постоянной
распространения изолированного алюминиевого
проводника при $\sigma_3 = 0,02$ см/м, $d = 22,6$ мм

Результаты расчета γ , выполненные по выражениям (24) и (46), приведены на рисунке (кривые 1 и 2 соответственно).

С помощью полученных выражений (34), (36), (43), (46) можно определить параметры изолированного цилиндрического проводника в однородной среде с достаточной для практики точностью.

Результаты расчета постоянной распространения по выражениям (25) и (46) показывают, что в области высоких частот, погрешность составляет 7 %, расчет выполнен до $f = 104$ Гц.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Результаты расчетов параметров имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными.

2. Постоянная распространения металлической оболочки кабеля в полимерном изолирующем покрытии определена из граничных условий.

3. Результаты, полученные в работе, могут использоваться для расчета распределения электрических величин по длине кабеля.

4. Полученные результаты могут быть использованы для расчета импульсных сигналов с использованием преобразования Фурье.

Расчет электрических параметров изолированного проводника является важной задачей для повышения точности определения мест повреждения изоляции кабеля энергоснабжения.

Своевременное устранение неисправности в результате оперативного устранения повреждения изоляции кабеля энергоснабжения на железнодорожном транспорте позволит повысить надежность и безопасность перевозочного процесса.

Список литературы

1. Котельников, А. В. Электрификация железных дорог, мировые тенденции и перспективы [Текст] / А. В. Котельников. – М.: Интекст, 2002. – 103 с.
2. Бурсиан, В. Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке [Текст] / В. Р. Бурсиан – Л.: Недра, 1972. – 367 с.
3. Гринберг, Г. А. Основы точной теории волнового поля линий электропередачи [Текст] / Г. А. Гринберг, Б. Э. Бонштедт // Журнал технической физики. – 1954. – Т. 24. – Вып. 1. – С. 67 – 95.
4. Стрижевский, И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения [Текст] / И. В. Стрижевский, В. И. Дмитриев. – М.: Стройиздат, 1967. – 247 с.
5. Вэнс, Э. Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели [Текст] / Э. Ф. Вэнс. – М.: Радио и связь, 1982. – 117 с.
6. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений системы электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / УМЦ ЖДТ. – М., 2013. – 552 с.
7. Герасимов, В. В. Коррозия алюминия и его сплавов [Текст] / В. В. Герасимов. – М.: Металлургия, 1970. – 114 с.
8. ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Стандартинформ, 2010. – 55 с.
9. Инструкция по защите железнодорожных подземных сооружений от коррозии блуждающими токами (ЦЭ-518). – М.: Транспорт, 1999. – 124 с.
10. Никольский, К. К. Защита от коррозии кабелей связи в алюминиевых оболочках [Текст] / К. К. Никольский. – М.: Связь, 1970. – 140 с.
11. Ершов, И. М. Определение опасности электрокоррозии подземных кабелей связи [Текст] / И. М. Ершов. – М.: Транспорт, 1957. – 92 с.
12. Никольский, К. К. Коррозия и защита от нее подземных металлических сооружений связи [Текст] / К. К. Никольский. – М.: Связь, 1984. – 207 с.

References

1. Kotelnikov A. V. *E'lektrifikaciya zheleznny'h dorog, mirovy'e tendencii i perspektivy* (Electrification of railways, world trends and prospects). Moscow: Intekst, 2002, 103 p.
2. Bursian V. R. *Teoriya elektromagnitnykh poley, primenyayemykh v elektrorazvedke* (Theory of electromagnetic fields used in electrical exploration). Leningrad: Nedra, 1972, 367 p.
3. Grinberg G. A. Fundamentals of the exact theory of the wave field of power lines [Osnovy tochnoy teorii volnovogo polya liniy elektroperedachi]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of technical physics*, 1954. vol. 24, no. 1, pp. 67 – 95.
4. Strizhevsky I. V. *Teoriya i raschet vliyaniya e'lektrificirovannoj zheleznoj dorogi na podzemny'e metallicheskie sooruzheniya* (Theory and calculation of the effect of an electrified railway on underground metal structures). Moscow: Strojizdat, 1967, 247 p.

5. Vance E. F. *Vliyanie e'lektromagnitny'x polej na e'kranirovanny'e kabeli* (Influence of electromagnetic fields on shielded cables). Moscow: Radio i svyaz', 1982, 117 p.
6. Kotelnikov V. A., Kandaev V. A. *Blyjdauchie toki I eksplyatacionniy kontrol korrozionnogo sostoiania podzemnich sooryjeniy sistemy elektrosnabgenia jeleznodorojnogo transporta* (Stray currents and operational control of corrosion condition of underground structures of supply system of railway transport). Moscow: UMCz ZhDT, 2013, 552 p.
7. Gerasimov V. V. *Korroziya alyuminiya i ego splavov* (Corrosion of aluminum and its alloys). Moscow: Metallurgiya, 1970, 114 p.
8. *Edinaya sistema zashhity' ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemny'e. Obshhie trebovaniya k zashhite ot korrozii. GOST 9.602-2005* (Unified system of protection against corrosion and aging. Underground structures. General requirements for corrosion protection. State Standart 9.602-2005). Moscow, Standarty, 2010, 55 p.
9. *Instrukciya po zashhite zheleznodorozhny'x podzemny'x sooruzhenij ot korrozii bluzhdayushhimi tokami (CzE'-518)* (Instruction for the protection of railway underground structures against corrosion by stray currents (CE-518)). Moscow: Transport, 1999, 124 p.
10. Nikolsky K. K. *Zashhita ot korrozii kabelej svyazi v alyuminievy'x obolochkax* (Corrosion and protection of underground metal communication structures from it). Moscow: Svyaz', 1984, 207 p.
11. Ershov I. M. *Opreделение opasnosti e'lektrokorrozii podzemny'x kabelej svyazi* (Determination of the danger of electrocorrosion of underground communication cables). Moscow: Transport, 1957, 92 p.
12. Nikolsky K. K. *Korroziya i zashhita ot nee podzemny'x metallicheskih sooruzhenij svyazi* (Corrosion and protection from it of underground metal communication structures). Moscow: Svyaz, 1984, 207 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Литвинова Ольга Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Инженер кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 46-72-41.

E-mail: Litvinova69.08@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Litvinova Olga Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Engineer of the department of «Telecommunications, radiotechnical systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812) 46-72-41.

E-mail: Litvinova69.08@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Литвинова, О. В. Определение электрических параметров изолированного проводника / О. В. Литвинова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 33 – 42.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Litvinova O. V. Determination of the electrical parameters of the isolated conductor. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 33 – 42 (In Russian).

УДК 621.336.2

С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов, О. А. Сидоров

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

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОЗА ТОКОПРИЕМНИКА МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ КОНТАКТНОГО ПРОВОДА В ПЛАНЕ

Аннотация. В статье приведена методика расчета теплового состояния полоза токоприемника. Функция положения контактного провода в плане заменена плотностью распределения зигзага подвески с учетом ряда допущений. Приведены результаты расчета температуры полоза при различной ширине зигзага типовой подвески, в том числе нулевом. Дана оценка влияния синусоидальной и тангенциальных контактных подвесок на распределение температуры полоза.

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

Sandugash M. Utepbergenova, Valerii V. Tomilov, Oleg A. Sidorov

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

METHOD FOR THE HEAT STATE CALCULATING OF PANTOGRAPH HEAD OF A MAINLINE ELECTRIC ROLLING STOCK TAKING ACCOUNT THE CONTACT WIRE ZIGZAG

Abstract. The article presents a method of calculation of the thermal state of the pantograph head. The density of the suspension zigzag distribution, taking into account a number of assumptions, has replaced the contact wire position function in the plan. Results of calculating the temperature of the pantograph head at different width of the zigzag of the typical suspension, including zero, are presented. The influence of sinusoidal and tangential contact suspensions on the temperature distribution of the pantograph head is estimated.

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

Процесс взаимодействия контактной подвески и токоприемника электроподвижного состава характеризуется различными физическими процессами: механическим нажатием, износом контактных пар, передачей электрической энергии, нагревом и охлаждением контактных материалов (рисунки 1).

Особенностью токосъема на железнодорожном транспорте является распределенное воздействие контактного провода, вызванное наличием его зигзага, на верхнюю часть контактных элементов полоза токоприемника. В настоящей статье под зигзагом подразумевается функция горизонтального отклонения провода от оси пути в пролете контактной сети [1].

Продолжительность передачи тока от провода на конкретные места верхней части полоза (площадки вставки) определяет температуру его нагрева [2]. Кратковременное повышение температуры нагрева площадок вставки с последующим их охлаждением – повторяющийся переходный процесс, вызванный наличием зигзага контактного провода и движением по нему токоприемника. Установившееся значение температуры полоза определяется средней температурой таких площадок шириной не менее 30 мм [2]. Максимальная температура наиболее нагретой площадки характеризует нагрузочную способность полоза токоприемника, которая определяет возможность пропуска тягового тока системой токосъема и обеспечения требуемой величины мощности электроподвижного состава. Перегрев полоза токоприемника является фактор ограничения скорости и веса поезда, а неравномерность нагрева – фактор снижения этих характеристик и увеличения риска нарушения безопасности движения поездов. Решение проблем, связанных с неравномерностью нагрева полоза токоприемника и

превышением максимально допустимой температуры его элементов, является весьма актуальной задачей.

Положение контактного провода в плане зависит от условий трассы (прямой участок пути, кривая), правил содержания и эксплуатации контактной сети (ширина зигзага), типа подвески: хордовая в кривых, ветроустойчивые – ромбическая или ромбовидная на мосту, жесткие в тоннелях, прилегающих к железнодорожной станции, специальные типы подвесок – полужесткая в тоннелях на Байкало-Амурской магистрали [1, 3, 4].

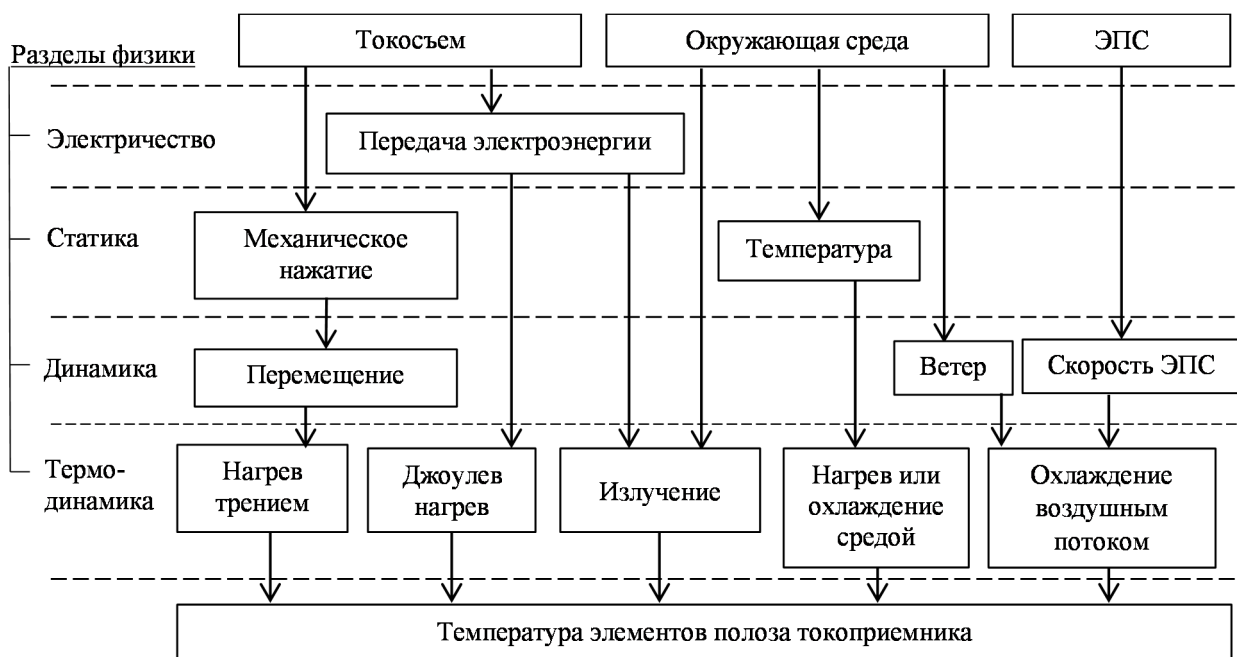


Рисунок 1 – Физические процессы, определяющие нагрузочную характеристику токоприемника

Неравномерность нагрева полоза обусловлена положением провода контактной подвески. Правилами эксплуатации контактной сети односторонний зигзаг контактного провода не допускается, что способствует отсутствию локального перегрева вставки. Пространственные подвески, где контактные провода в середине пролета не имеют зигзага, ограничиваются по длине и не превышают определенной величины по участку эксплуатации токоприемника [5]. Фактор износа контактных пластин токоприемника с увеличенной температурой нагрева усиливается, приводя к сокращению их срока службы и возможному разрушению контактных пар электровзрывной коррозией [6].

Функцию положения контактного провода в плане, распределенно взаимодействующего с ползком токоприемника, можно представить в виде плотности распределения зигзага контактного провода $\sigma(z)$ [1] с учетом следующих допущений.

Плотность распределения зигзага контактного провода является установившейся функцией. В реальных условиях положение контактного провода от пролета к пролету может изменяться весьма существенно, например, при переходе подвижного состава с прямого участка на кривую пути или проход токоприемником одного пролета сопряжения контактной сети. В таком случае функцию $\sigma(z)$ целесообразно применять для конкретных условий трассы и типа подвески, неизменных на период расчета.

Изменение положения контактного провода в двух смежных пролетах (период зигзага), формируемое постоянным профилем пути и одним типом контактной подвески, имеет такую же функцию $\sigma(z)$, как и в остальных пролетах на всем расчетном участке. В реальных условиях положение контактного провода формируется также окружающей средой, например,

воздействием ветра, вызывающим выносы контактного провода, величина которых зависит от натяжения элементов подвески и длины пролета.

Величина периода зигзага остается неизменной на всем времени расчета и много меньшей времени этого расчета, что обеспечивается движением электроподвижного состава. При чрезмерно малых скоростях токоприемника медленное перемещение провода вдоль полоза, эквивалентное нулевому зигзагу, будет вызывать быстрый перегрев, что является недопустимым явлением. В реальных условиях достижение установившейся температуры полоза составляет в среднем 13 мин, а время испытаний при определении нагрузочной способности полоза составляет не менее 20 мин.

При соблюдении таких условий изменение положения контактного провода в плане можно считать стационарным (или установившимся) процессом, у которого не изменяется распределение вероятности зигзага при смещении во времени, а представление зигзага функцией $\sigma(z)$ может быть допустимым.

По результатам многочисленных исследований [7 – 10] выявлено, что установившаяся температура контактных вставок вдоль полоза распределяется неравномерно. Факторы, определяющие температуру полоза токоприемника, рассмотрены в работе [7]. Нагрев полоза обусловлен тремя основными факторами: механическим трением контактного провода вдоль и поперек полоза, электрическими процессами в переходном сопротивлении сильноточного скользящего контакта и тяговыми токами вдоль полоза токоприемника по направлению к шунтам (далее – транзитные). В системах электроснабжения постоянного тока электрические процессы, являющиеся причинами Джоулева нагрева, в значительной степени определяют температуру полоза. Для ее оценки в математической модели нагрев трением не учитывается, что является еще одним допущением.

Величина мощности нагрева, как показано на рисунке 2 на i -м элементе вставки площадью $\Delta z = 30$ мм,

$$P_i = P_{\text{кт}i} + P_{\text{тр}i} \quad (1)$$

где $P_{\text{кт}i}$ – мощность в переходном контакте;

$P_{\text{тр}i}$ – мощность протекаемого по плечам полоза транзитного тока (рисунок 3, б).

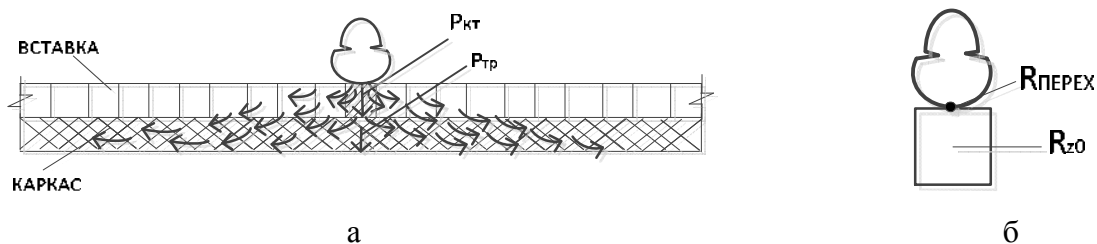


Рисунок 2 – Принципиальная схема электрических процессов в полозе токоприемника при взаимодействии с контактным проводом: а – иллюстрация распределения плотности тягового тока; б – расположение сопротивлений на пути тягового тока

Мощность Джоулева нагрева в точке контакта на площадке i -го элемента

$$P_{\text{кт}i} = I^2 \cdot R_{\text{перех}} \cdot f(z_i) \quad (2)$$

где I – тяговый ток полоза;

$R_{\text{перех}}$ – переходное сопротивление «контактный провод – вставка»;

$f(z_i)$ – доля времени контакта провода с i -м элементом вставки, определяемая плотностью распределения зигзага $\sigma(z)$.

При равномерном распределении зигзага ± 300 мм (рисунок 3, в) справедливо равенство

$$f(z_i) = \frac{1}{n}, \quad (3)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

где n – число i -х элементов полоза ($n = 21$ или 20).

В реальных условиях доля времени $f(z_i)$ для каждой площадки i -го элемента на полозе различна [1, 7], что является для данной модели допущением.

Мощность нагрева транзитным током, выделяемая на i -м элементе вставки,

$$P_{\text{тр } i} = I_{\text{пл}}^2 \cdot R_{zi}, \quad (4)$$

где $I_{\text{пл}}$ – ток плеча (рисунок 3, б), на котором расположен i -й элемент;

R_{zi} – сопротивление i -го элемента вставки (рисунок 2, б).

Тогда мощность нагрева тяговым током (1) на i -м элементе вставки с учетом уравнений (2) – (4) будет такой:

$$P_i = I^2 \cdot R_{\text{перех}} \cdot \frac{1}{21} + I_{\text{пл}}^2 \cdot R_{zi}. \quad (5)$$

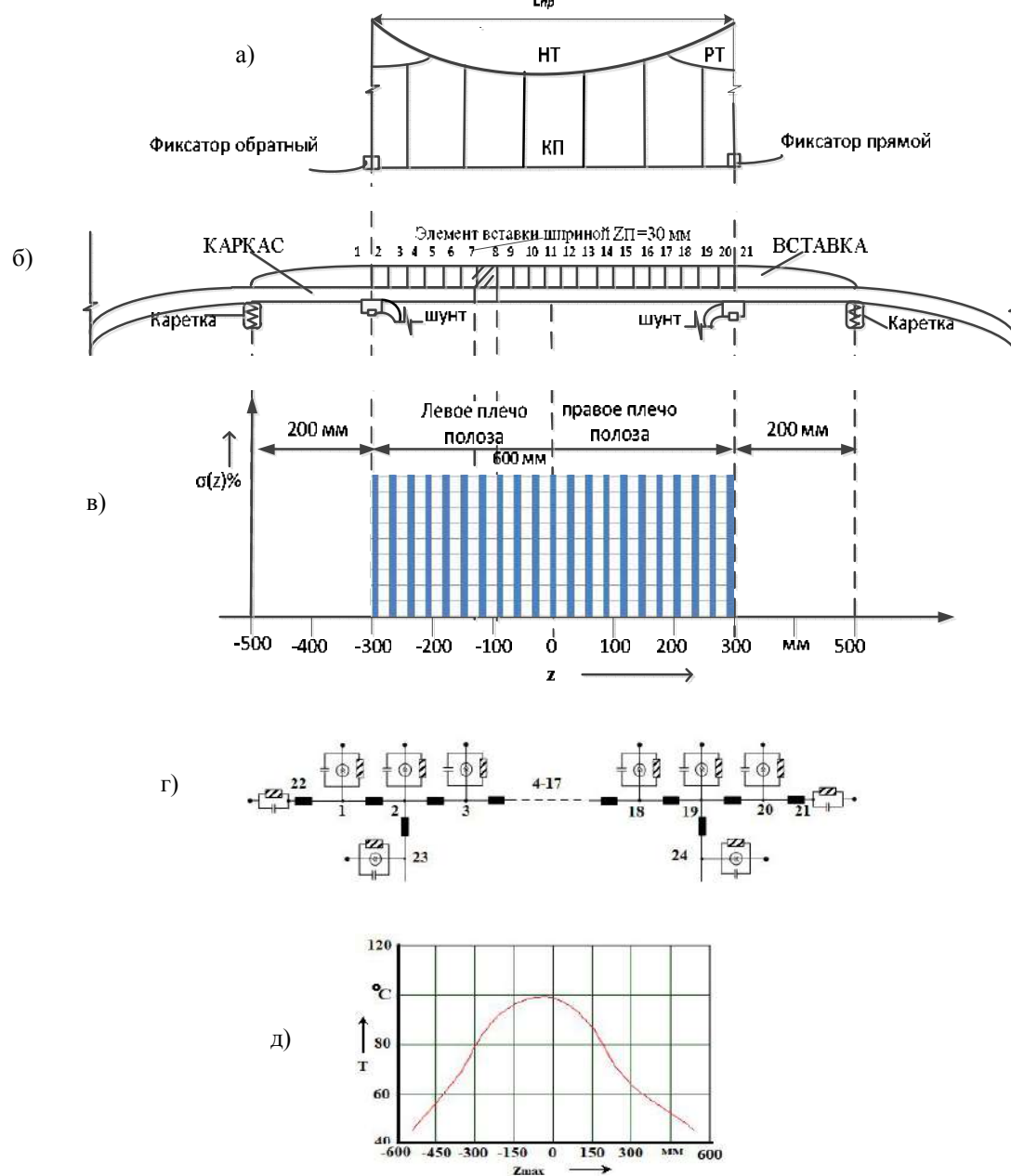


Рисунок 3 – Расчетная схема влияния распределения зигзага контактного провода на нагрев полоза токоприемника: а – схема пролета контактной подвески; б – схема каркасного полоза токоприемника; в – плотность распределения зигзага контактного провода (нормальный закон); г – электрическая схема замещения тепловых процессов полоза; д – график распределения температуры полоза

С учетом выполнения условия (3) действующее значение тока плеча полоза $I_{пл}$ равно половине тягового I . Тогда выражение (1) принимает вид:

$$P_i = I^2 \cdot \left(\frac{1}{21} \cdot R_{перех} + \frac{1}{4} \cdot R_{zi} \right). \quad (6)$$

Расчетная схема математической модели тепловых процессов полоза токоприемника приведена на рисунках 3 а, б. Полоз токоприемника разбивается на элементы шириной 30 мм согласно п. 7.4 «Проверка электрических показателей» в ГОСТе [2]. Ширина исследуемого элемента равна интервалу Δz для построения плотности распределения зигзага контактного провода $\sigma(z)$, определяемой функцией времени воздействия на данном i -м интервале $f(z_i)$. Подвеска в математической модели описывается ломаной функцией (3), плотность $\sigma(z)$ распределения которой задается равномерным законом распределения (см. рисунок 3, в).

Предельные отклонения (ширина) зигзага контактной подвески, обусловленные профилем участка, как указано выше, могут принимать разные значения. Разработанная математическая модель позволяет исследовать влияние ширины зигзага на распределение температуры полоза токоприемника.

Тепловая схема полоза, приведенная на рисунке 3, г, разработана на основе усовершенствованной математической модели теплового состояния токоприемника для режимов стоянки и движения [11] с применением метода эквивалентных тепловых схем замещения, основанного на аналогии теплового потока с электрическим током. Количество расчетных элементов полоза токоприемника с источниками тепла, мощность которых определена выражением (6), соответствует количеству элементов на схеме (см. рисунок 3, б).

Тепловое состояние i -го элемента описывается следующим дифференциальным уравнением теплового баланса:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^{q(j \neq i)} \lambda_{ji} (T_j - T_i) + \sum P_i, \quad (7)$$

где C_i – теплоемкость i -го элемента полоза;

T_i – температура i -го элемента;

T_j – температура одного из соседних элемента 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 ;

ΣP_i – потери мощности в данном элементе i ;

t – текущее время.

Результат расчета с помощью программы MathCad температуры нагрева полоза в установившемся режиме при равномерном законе распределения зигзага ± 300 мм (см. рисунок 3, в), характерного для прямого участка пути, приведен на рисунке 3, д. Исходные данные исследуемой модели токоприемника тяжелого типа соответствуют конструкции, оснащенной двумя европолозами с самонесущими вставками с импегнированным углиграфитом, в режиме движения и потребления тока величиной 3000 А.

Результаты расчета распределения температуры нагрева полоза от воздействия контактной подвески с отличными от нормального зигзага на прямом участке пути ± 300 мм приведены на графиках рисунка 4. Хордовая подвеска с увеличенным зигзагом до ± 400 мм (см. рисунок 4, а), применяемая на кривых участках пути, снижает максимальную температуру нагрева в центре полоза, при этом расширяя зону теплового воздействия на вставки и увеличивая температуру по краям полоза. Для максимально допустимого отклонения контактного провода ± 500 мм на прямом участке пути отечественных железных дорог указанное выше перераспределение температуры увеличивается: центр нагрет меньше, края – больше. Необходимо отметить, что для величин зигзага более ± 300 мм точки нагрева располагаются дальше мест установки шунтов (рисунок 4, б), которые в местах соединения с полем являлись также источниками нагрева, участвующими в общем распределении температуры по полю.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Уменьшенная ширина зигзага контактного провода ± 200 мм (см. рисунок 4, б), используемая на европейских подвесках [1], приводит к разогреву середины полоза, усиливая имеющуюся неравномерность распределения температуры.

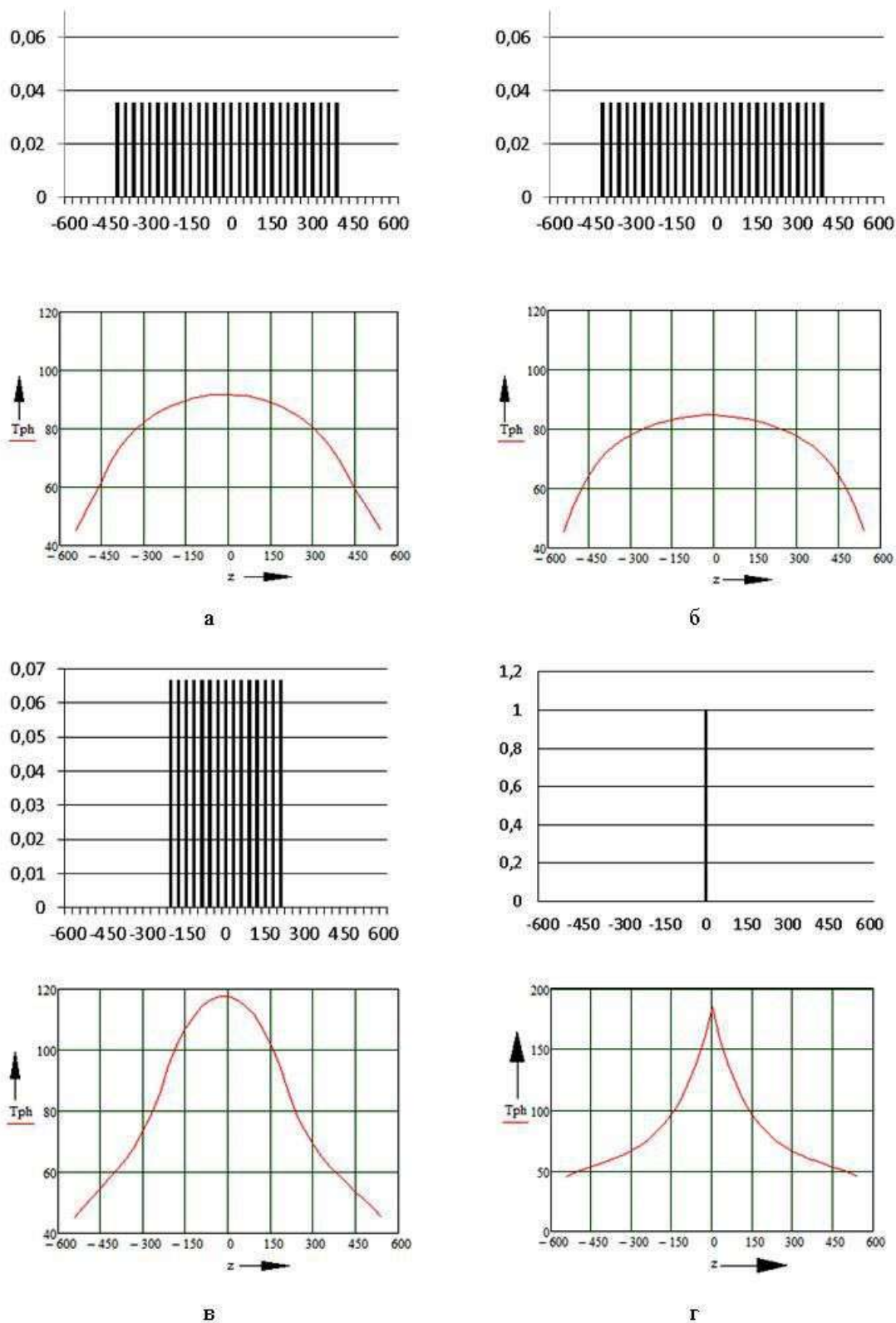


Рисунок 4 – Результаты расчета распределения температуры вдоль полоза токоприемника при различном зигзаге: а – хордовая подвеска в кривой с нормальным зигзагом ± 400 ; б – подвеска на прямом участке с максимально допустимым отклонением ± 500 ; в – европейская подвеска в тоннеле; г – нулевой зигзаг

При отсутствии зигзага контактного провода (см. рисунок 4, а), расположенном по оси пути, распределение температуры носит экспоненциальный характер с экстремумом в середине, где по условиям математического моделирования располагается источник тепла $P_{кт\ i}$, убывающий к концам полоза.

График зависимости максимальной температуры полоза от ширины зигзага контактного провода приведен на рисунке 5. Максимальная температура элементов ползцов является усредненной величиной, что является допущением математической модели, в реальности неравномерность в сечении полоза существенна и ее корректировку можно учесть, используя результаты расчета методом конечных элементов [12]. Верхняя площадка контактируемой с контактным проводом поверхности вставки нагрета сильнее, чем ее фронтальная и тыловая части, а алюминиевый каркас подвержен только транзитному току и имеет значительно меньшую температуру нагрева. В таком случае температура, характеризующая электрические характеристики токоприемника [2], будет выше. Нелинейность зависимости $T(Z_{max})$ указывает на значительное влияние ширины зигзага величиной менее 300 мм, снижающее нагрузочную способность токоприемника.

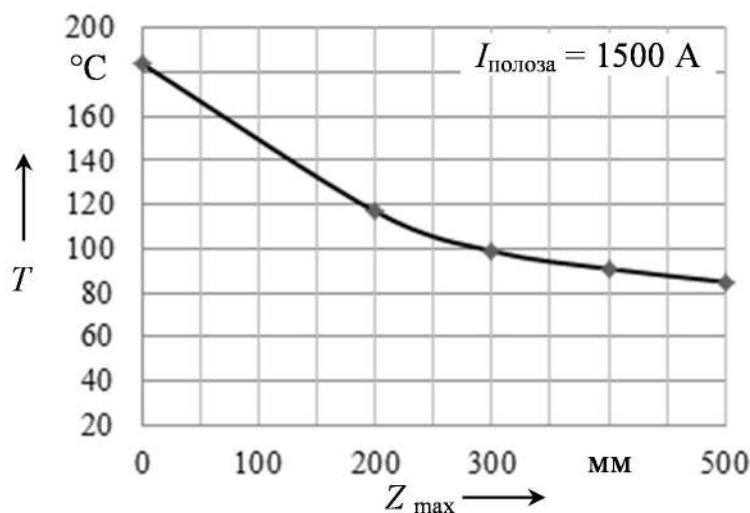


Рисунок 5 – График зависимости максимальной температуры полоза от ширины зигзага контактного провода

Увеличенная ширина зигзага дает снижение температуры, однако в реальных условиях труднореализуема, поскольку является фактором риска разрушения системы токосъема в результате схода провода с полоза токоприемника из-за наклона опоры или выноса провода ветром.

Выражение (2), определяющее нагрев контактной поверхности, с постоянной величиной $R_{перех}$ справедливо для равноэластичной подвески. В реальных условиях переходное сопротивление скользящего контакта обусловлено динамическим контактным нажатием, зависящим от множества факторов [13, 14]. В рассматриваемой математической модели сопротивление представлено функцией $R_{перех}(z)$, зависящей от положения в пролете полоза или провода на контактной вставке. Приведенные результаты расчетов учитывают изменение сопротивления в контакте пропорционально отклонению жесткости подвески КС-160 в соответствии с ее проектными значениями.

При выполнении условий равноэластичности и геометрической регулировки контактной подвески с равномерной плотностью распределения зигзага максимум нагрева полоза приходится на его середину. Математическая модель позволяет дать оценку еще одному из способов увеличения нагрузочной способности полоза токоприемника путем изменения ломаной функции зигзага контактного провода (рисунок 6, в).

Для снижения максимальной температуры нагрева центра полоза можно применить сложные подвески, имеющие функцию положения контактного провода в плане в виде синусу-

соиды или тангенса. Результаты расчета распределения температуры по полозу при взаимодействии с синусоидальной и тангенциальной подвесками при прочих равных условиях указанных выше расчетов приведены на рисунках 6, а и б соответственно. Плотность распределения зигзага контактного провода таких функций существенно отличается от равномерного закона распределения (рисунок 6, в). У таких подвесок плотность распределения зигзага контактного провода выше на краях полоза и значительно ниже в середине, причем для тангенциальной подвески эти максимумы значительно превышают остальную часть распределения.

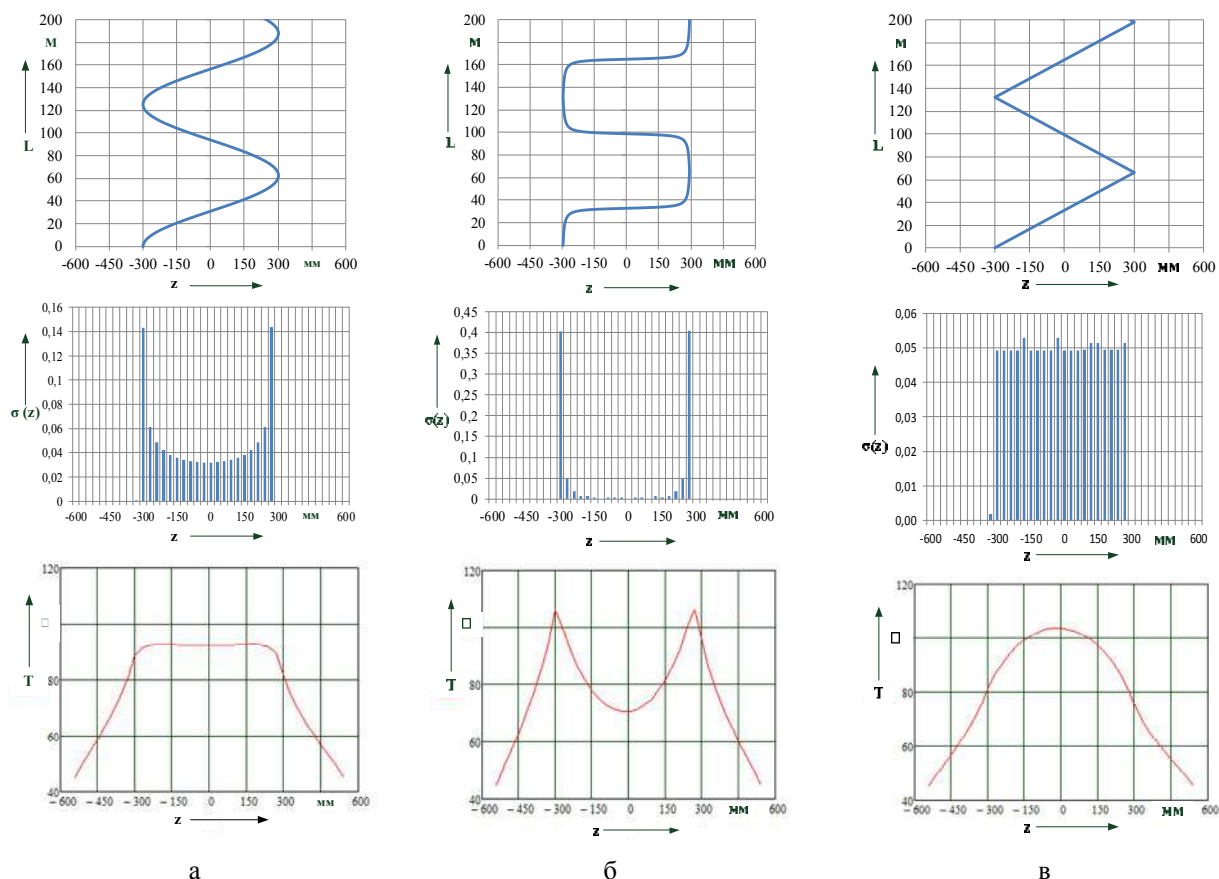


Рисунок 6 – Распределение температуры полоза токоприемника в зависимости от функций зигзага контактного провода: математические – $\sin$ (а) и $\tan$ (б); реальная – ломаная (в)

Анализ результатов расчета показывает, что применение синусоидальной подвески приводит к почти полному выравниванию температуры полоза в зоне контакта с проводом, а применение тангенциальной подвески приводит к значительному снижению теплового режима центра полоза. Для таких подвесок целесообразно разрабатывать специальные полозы токоприемника, облегченные в центральной части и усиленные над каретками.

В реальных условиях синусоидальную контактную подвеску, имеющую преимущества и недостатки сложных подвесок, реализовать и обслуживать крайне сложно, для чего требуются как минимум два несущих троса и высококвалифицированный персонал. Тангенциальная подвеска потребует еще более сложных технических решений. В случае реализации на действующих участках такие подвески возможны в тоннелях и на мостах, где достаточно точек подвешивания контактного провода и обеспечения сохранения его геометрии. Остается открытым вопрос влияния функции зигзага синусоидальной и тангенциальной подвесок на износные характеристики полозов токоприемника.

Повышение нагрузочной способности токоприемника путем изменения функции зигзага контактного провода и конструкции полоза токоприемника, как единой системы токосъема –

перспективное направление, проектные решения которого могут быть рассчитаны с помощью предлагаемой математической модели.

На основе изложенного можно сделать следующие выводы.

Создана методика расчета теплового состояния полоза токоприемника электроподвижного состава, учитывающая наличие зигзагов контактного провода.

Решение математических выражений модели осуществлено в программе MathCad, полученные результаты расчета совпадают с экспериментальными данными исследования теплового состояния токоприемников в рамках оценки их нагрузочной характеристики в режиме движения.

Применение предлагаемой методики расчета, учитывающей изменение зигзага, позволяет дать оценку тепловому состоянию полоза при различных значениях тягового тока, в том числе сверхнормативных, для любых типов контактных подвесок.

По результатам расчета установлено, что синусоидальная подвеска по сравнению с типовой позволяет существенно снизить максимальную температуру нагрева полоза и обеспечить съем больших значений тягового тока.

Список литературы

1. Contact lines for Electric Railways [Текст] / F. Kiessling, R. Pushman, A. Shmieder, E. Schneider – Берлин, Мюнхен: Siemens AG, 2009. – 994 с.
2. ГОСТ 32204-2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 24 с.
3. Auditeau, G. Износ материала контактных вставок токоприемника [Текст] / G. Auditeau // Железные дороги мира. – 2013. – №10. – С. 50 – 56.
4. Sievers, G. Токоприемник Variopanto с раздвижным ползком [Текст] / G. Sievers // Железные дороги мира. – 2014. – № 12. – С. 62, 63.
5. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети [Текст] / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М: Транспорт, 1991. – 335 с.
6. Купцов, Ю. Е. Беседы о токосъеме, его надежности, экономичности и о путях совершенствования [Текст] / Ю. Е. Купцов. – М.: Модерн-А, 2001. – 256 с.
7. 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.
8. Проверка токовой нагрузочной способности токоприемников ТАС 24 и ЛАС 25 [Текст] / В. М. Павлов, П. В. Попов и др. // Вестник ВЭЛНИИ / Всероссийский науч.-исслед. и проектно-конструкторский ин-т электровозостроения. – Новочеркасск. – 2015. – № 2 (70). – С. 33 – 43.
9. Экспериментальные исследования нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. М. Павлов, А. Н. Смердин. и др. // Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2013. – С. 62 – 69.
10. Исследования токовой нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. М. Павлов, О. А. Сидоров и др. // Вестник ВНИИЖТ/Всероссийский научно-исследовательский ин-т железнодорожного транспорта. – М. – 2015. – № 4. – С. 19 – 24.
11. Томилов, В. В. Особенности теплового расчета токоприемников магистрального электроподвижного состава [Текст] / В. В. Томилов, А. В. Тарасенко, А. Н. Кутькин // Материалы шестого междунар. симпозиума «Eltrans'2011» Санкт-Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2013. – С. 526 – 536.
12. 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.

13. Берент, В. Я. Перспективность применения металл-углеродных контактных вставок для токосъема на железных дорогах России [Текст] / В. Я. Берент // Вестник ВНИИЖТа/ Всероссийский научно-исследовательский ин-т железнодорожного транспорта. – М. – 2017. – № 3. – С. 174 – 180.

14. Берент, В. Я. Перспективы улучшения работы сильноточного скользящего контакта «контактный провод – токосъемный элемент полоза токоприемника» [Текст] / В. Я. Берент // Железные дороги мира. – 2002. – №10. – С. 46 – 51.

References

1. Kiessling F., Pushman R., Shmieder A., Schneider E. *Contact lines for Electric Railways* (Контактной сети электрических железных дорог). Berlin, Munich: Siemens AG Publ., 2009, 994 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. Auditeau G. Wear of the material of contact inserts of pantographs [Iznos materiala kontaktnykh vstavok tokopriyemnika]. *Zheleznyye dorogi mira – The journal of Railways of the world*, 2013, no. 10, pp. 50 – 56.

4. Sievers G. Variopaint pantograph with retractable pantograph head [Tokopriyemnik Variopanto s razdvizhnym polozom]. *Zheleznyye dorogi mira – The journal of Railways of the world*, 2014, no.12, pp. 62– 63.

5. Frayfeld A.V. *Proyektirovaniye kontaktnoy seti* (Design of a contact network). Moscow: Transport Publ., 1991, 335 p.

6. 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.

7. Sidorov O.A., Smerdin A.N., 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, vol. 32, no. 3, pp 25 – 34.

8. 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.

9. Pavlov V. M., Smerdin A. N., Tomilov V. V., Golubkov A. S., Emelyanov M. V. Experimental investigations of loading capacity of the main electric previous pantographs [Eksperimental'nye issledovaniia nagruzochnoi sposobnosti tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] *Materialy Vserossiiskoi nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem. «Pribory i metody izmerenii, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte»* (materials of the all-Russian scientific and technical conference with international participation «Measuring instruments and methods, quality control and diagnostics in industry and transport»). – Omsk, 2013, pp. 62 – 69.

10. 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 Mainline 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.

11. Tomilov V.V. Features of thermal calculation of current collectors of main electric rolling stock [Osobennosti teplovogo rascheta tokopriyemnikov magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava].

va]. Materialy Shestogo Mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans'2011» (Materials of the Sixth International Symposium «Eltrans'2011»). – S. Petersburg, 2013, pp. 526 – 536.

12. 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 elektro-podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 2 (38), pp. 66 – 75.

13. 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.

14. Berent V. Y. Prospects for improving the operation of a high-current sliding contact " contact wire-current-removing element of the current collector slide [Perspektivy uluchsheniya raboty sil'notochnogo skol'zyashchego kontakta «kontaktnyy provod – tokos'yemnyy element poloza tokopriyemnika]. *Zheleznyye dorogi mira – The journal of Railways of the world*, 2002, no. 10, pp. 46–51.

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

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: egt@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

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.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Utepbergenova Sandugash Myrzabekovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate 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

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 «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: egt@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

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 zigzag. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 43 – 53 (In Russian).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СРОКОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Аннотация. Статья посвящена определению рациональных межремонтных пробегов конкретного оборудования локомотивов. В качестве метода, выбранного для реализации данной задачи, используются функции интенсивности отказов с последующим построением функций распределения ресурса и определения 90 % ресурса оборудования электровозов. Предложенная методика позволяет определять рациональные сроки проведения технического обслуживания и ремонта локомотивов в конкретных условиях их эксплуатации. Расчёты выполнены на основе информации об изменении технического состояния колесно-моторного блока электровозов ВЛ10.

Ключевые слова: железная дорога, интенсивность отказов, надежность, ресурс, электровоз ВЛ10.

Alexander A. Vorobjev, Yuriy A. Koltsov, Adilzhan E. Mukhambetov

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

DETERMINATION OF RATIONAL TERMS FOR REHABILITATION OF ELECTRIC LOCOMOTIVE EQUIPMENTS

Abstract. The article is devoted to the definition of rational overhaul runs equipment of locomotives. This has an impact not only on the reliability of the rolling stock, but also on safety. As a method chosen for the implementation of this task, the functions of the failure rate are used, with the subsequent construction of the functions of resource distribution and determining 90 % of the resource of the equipment of electric locomotives. The proposed technique allows you to determine the rational timing of maintenance and repair of locomotives in the specific conditions of their operation. The calculations are based on information about changes in the technical condition of the wheel-motor block of VL10 electric locomotives.

Keywords: railway, failure rate, reliability, life, electric VL10 locomotive.

Одной из главных задач наряду с безопасностью движения поездов и надежностью подвижного состава является реализация максимальной силы тяги локомотивов, выполняющих задачи по обеспечению транспортного обслуживания и перевозочного процессов. Для обеспечения данных требований существенную роль играет качественное и своевременное выполнение технического обслуживания [1] и ремонта подвижного состава [2 – 4], а также информационное обеспечение (достоверность информации о наработках между отказами). Получая и анализируя данную информацию о состоянии оборудования, определяют показатели безотказности и долговечности, оптимальные сроки восстановления оборудования локомотивов [5 – 7].

Для решения задачи определения рациональных сроков восстановления оборудования локомотивов [8] была собрана статистическая информация о наработках до отказа оборудования колесно-моторного блока электровозов ВЛ10, приписанных к депо Дёма Куйбышевской железной дороги. Актуальность данного вопроса подтверждается эксплуатацией в настоящее время большого количества локомотивов данной серии на всех полигонах железных дорог России.

При анализе показателей безотказности оборудования электровозов в рамках установленных межремонтных пробегов используется план испытаний на надежность $[N, U, T]$, в результате которого появляется возможность решать важные задачи надежности [9].

В большинстве случаев надежность оборудования электровозов является высокой, в связи с чем для получения достоверной информации требуются большие продолжительность испытаний и объем выборки.

В качестве исходной информации для расчетов выступает выборка наработок до отказа оборудования τ_i , объем которой равен r , т. е. количеству отказавших экземпляров оборудования. Так как в течение периода испытаний L_0 не все экземпляры оборудования отказывают, то выборка наработок до отказа для N экземпляров оборудования усечена справа моментом проведения очередного планового ремонта. Следовательно, количество экземпляров оборудования, для которого в течение периода испытаний L_0 отказы не возникли, составляет $N - r$.

Исходя из полученной в результате таких испытаний информации можно рассчитать оценку вероятности отказа испытуемого оборудования к моменту проведения очередного планового ремонта L_0 :

$$Q^*(L_0) = \frac{r}{N}. \quad (1)$$

Упорядочив наработки до отказа для всех отказавших экземпляров оборудования в порядке возрастания в вариационный ряд, можно построить зависимость оценки вероятности отказа от наработки $Q^*(\tau_i)$ в межремонтном периоде.

Следует отметить, что рассчитанные значения оценки вероятности отказа являются точечными и они ограничены справа моментом проведения очередного планового ремонта. Поэтому для определения интенсивности отказов $\lambda(t)$ оборудования тягового подвижного состава (ТПС) по этим результатам необходимо иметь теоретическую зависимость вероятности отказа от наработки без усечения справа.

Для получения этой зависимости задаются одним из известных типов законов распределения наработки до отказа $F(t)$ и значениями параметров выбранного распределения $F(t) = f(a, b)$. Затем сравнивают оценку функции вероятности отказа $Q^*(\tau_i)$ в интервале межремонтного пробега с теоретическим распределением $F(t)$ и рассчитывают сумму квадратов отклонений между функциями при известных значениях наработок до отказа τ_i :

$$S_0^2 = \sum_{i=1}^r (Q^*(\tau_i) - F(\tau_i))^2. \quad (2)$$

Далее, изменяя тип закона распределения наработки до отказа и его параметры, методом последовательных приближений определяют такой тип закона распределения и его параметры a и b , для которых сумма квадратов отклонений (2) минимальна (метод «наименьших квадратов»). Критерием для выбора «наилучшей» функции является минимум остаточной дисперсии.

Полученная полная теоретическая функция распределения наработки до отказа $F(t)$ может быть использована для определения всех показателей безотказности и долговечности оборудования электровозов.

Функция интенсивности отказов $\lambda(t)$ характеризует скорость отказов и по определению равна отношению производной от вероятности безотказной работы к самой этой вероятности, взятому с обратным знаком:

$$\lambda(t) = -\frac{P'(t)}{P(t)}. \quad (3)$$

Обычно по результатам испытаний невосстанавливаемых объектов рассчитывают статистическую функцию интенсивности отказов $\lambda^*(t)$, а через нее находят вероятность безотказной работы $P^*(t)$ и оценку средней наработки до отказа T .

Перепишем выражение (3) в виде:

$$\lambda(t) = -\frac{dP(t)}{dt \cdot P(t)}. \quad (4)$$

Функция вероятности безотказной работы

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (5)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

После вычисления функции $P^*(t)$ находим среднюю наработку до отказа:

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} dt. \quad (6)$$

Параметры законов распределения и значения минимумов остаточной дисперсии приведены в таблице 1

Таблица 1 – Параметры законов распределения и значения минимумов остаточной дисперсии

Причина отказа оборудования	Объем выборки, N	Функции плотности и параметры законов распределения							
		экспоненциальное		нормальное			Вейбулла		
		$f(x) = a \cdot e^{-ax}$		$f(x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2b^2}}$			$f(x) = \frac{a}{b^a} \cdot x^{a-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^a}$		
		a	S_0^2	a	b	S_0^2	a	b	S_0^2
Проворот бандажа	125	10,6·10 ⁻⁵	127,6·10 ⁻⁵	1400	650	7,8·10 ⁻⁵	1,5	3060	11,9·10 ⁻⁵
Отказы моторно-осевых подшипников	139	9,8·10 ⁻⁵	177,4·10 ⁻⁵	1430	660	49,6·10 ⁻⁵	1,5	3170	44,9·10 ⁻⁵
Отгар кабелей ТЭД	57	8,2·10 ⁻⁵	13,4·10 ⁻⁵	1920	980	2,71·10 ⁻⁵	1,2	6560	3,35·10 ⁻⁵
Переброс по коллектору ТЭД	192	44,5·10 ⁻⁵	142,9·10 ⁻⁵	10	940	1729·10 ⁻⁵	1	2250	142,8·10 ⁻⁵
Пробой обмотки возбуждения ТЭД	19	2,86·10 ⁻⁵	1,11·10 ⁻⁵	4210	2070	1,02·10 ⁻⁵	1	35000	1,11·10 ⁻⁵
Пробой якоря ТЭД	191	36·10 ⁻⁵	1212·10 ⁻⁵	680	1000	2237·10 ⁻⁵	1	2770	1210,1·10 ⁻⁵

Исходя из данных таблицы 1 по значениям суммы квадратов отклонений видно, что наработки до отказа по причинам переброса и кругового огня по коллектору ТЭД, пробоев обмоток возбуждения и пробоев обмоток якорей имеют экспоненциальный закон распределения. Нарботки до отказа по причинам проворотов бандажей и отгаров кабелей ТЭД имеют нормальный закон распределения, а наработки до отказа моторно-осевых подшипников – Вейбулла.

Функции интенсивности отказов оборудования колесно-моторного блока электровозов ВЛ10 представлены на рисунках 1 – 6.

Для анализа надежности оборудования рассчитаем значения γ -процентного ресурса, который определяется при помощи функции распределения ресурса $F(l)$.

Это такое значение наработки, при котором не менее γ процентов деталей остаются в работоспособном состоянии. Значение $\frac{\gamma}{100}$ определяет величину заданной вероятности безот-

казной работы, а значение $1 - \frac{\gamma}{100}$ соответствует вероятности отказа.

В инженерной практике наибольшее распространение получила величина $\gamma = 90\%$, соответствующая вероятности отказа $Q(l) = 0,1$. Исходя из этого определим $l_{90\%}$ – 90 % ресурсов (пунктирная линия) при отказах оборудования колесно-моторного блока электровозов ВЛ10, представленных на рисунках 7 – 12.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

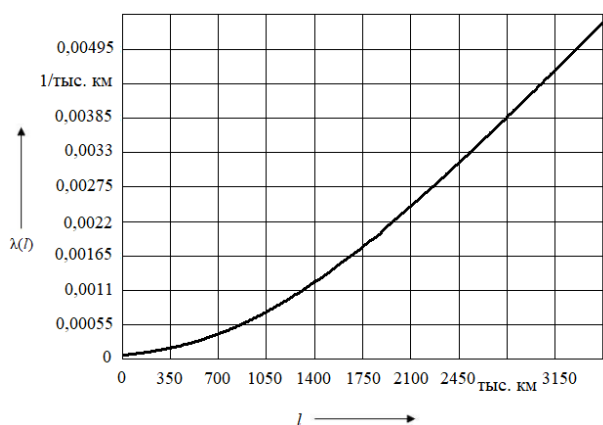


Рисунок 1 – Функция интенсивности отказов бандажей (по причине ослаблений посадки)

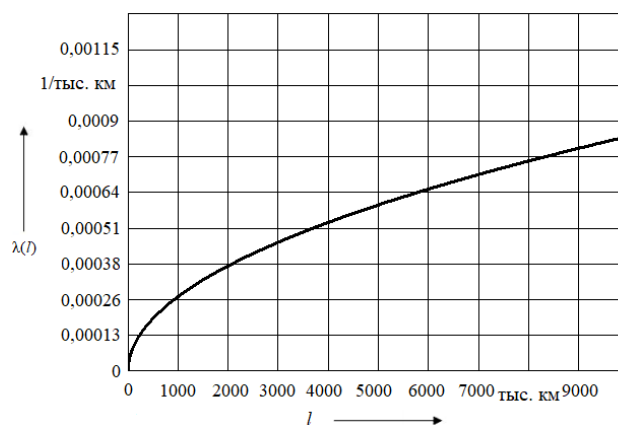


Рисунок 2 – Функция интенсивности отказов моторно-осевых подшипников

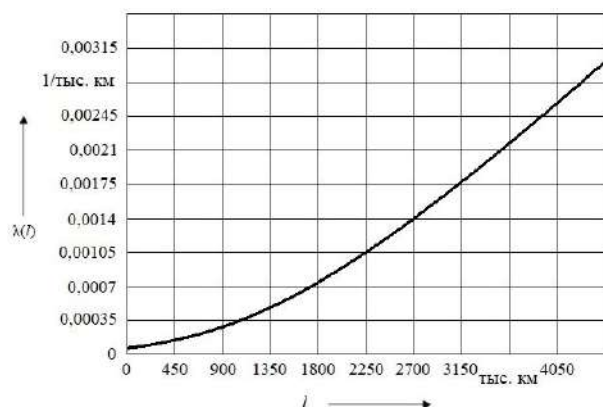


Рисунок 3 – Функция интенсивности отказов тяговых электродвигателей (по причине отгара кабелей)

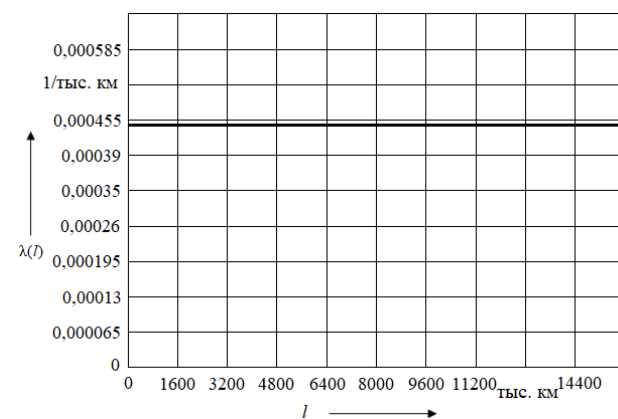


Рисунок 4 – Функция интенсивности отказов тяговых электродвигателей (по причине переброса и кругового огня по коллектору)

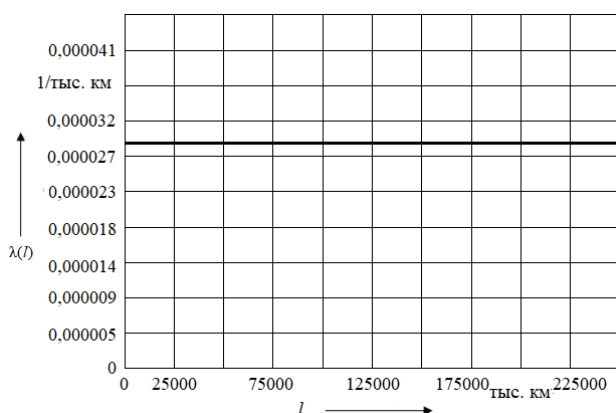


Рисунок 5 – Функция интенсивности отказов тяговых электродвигателей (по причине пробоя изоляции обмоток возбуждения)

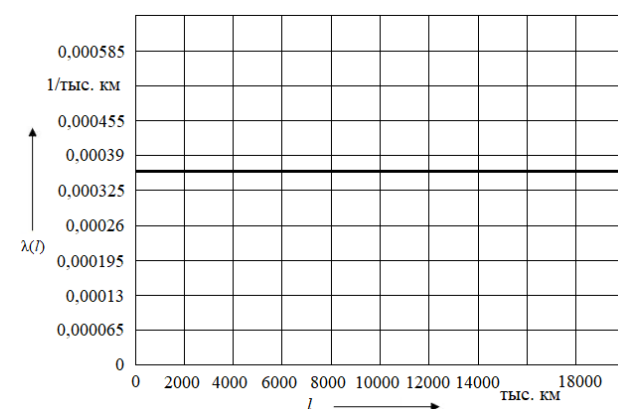


Рисунок 6 – Функция интенсивности отказов тяговых электродвигателей (по причине пробоя изоляции якорей)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

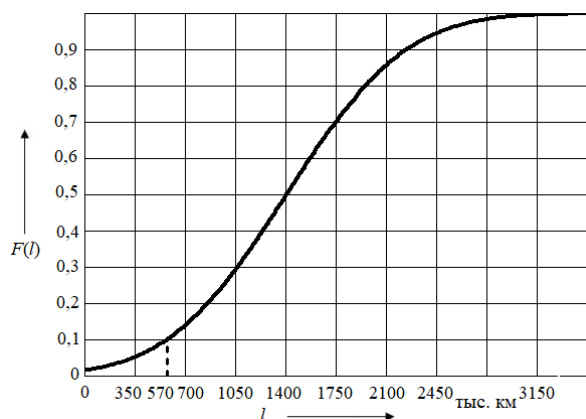


Рисунок 7 – Функция распределения ресурса бандажей колесных пар (по причине ослабления посадки)

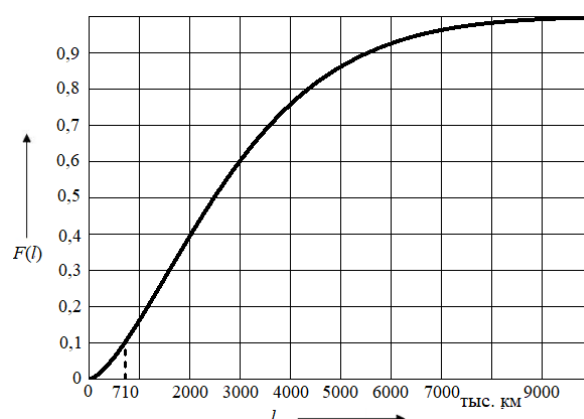


Рисунок 8 – Функция распределения ресурса моторно-осевых подшипников

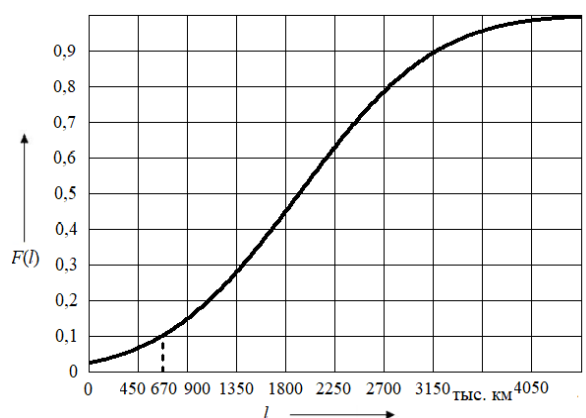


Рисунок 9 – Функция распределения ресурса тяговых электродвигателей (по причине отгара кабелей)

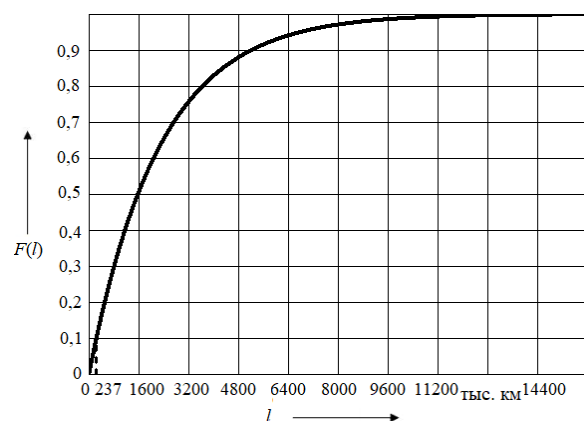


Рисунок 10 – Функция распределения ресурса тяговых электродвигателей (по причине переброса и кругового огня по коллектору)

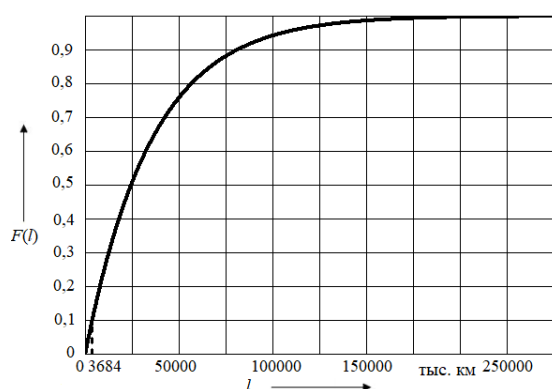


Рисунок 11 – Функция распределения ресурса тяговых электродвигателей (по причине пробоя изоляции обмоток возбуждения)

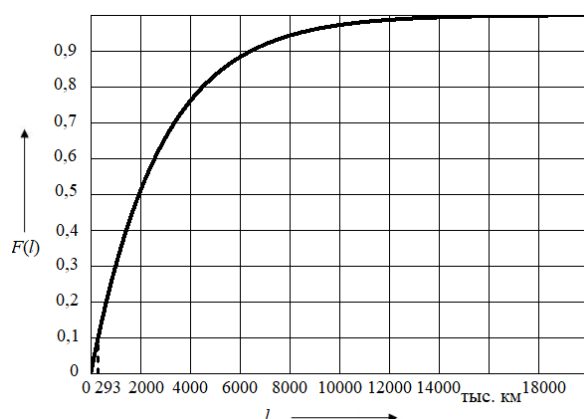


Рисунок 12 – Функция распределения ресурса тяговых электродвигателей (по причине пробоя изоляции якорей)

Сведем полученные результаты в таблицу 2.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Значения 90 % ресурса оборудования электровозов ВЛ10

Вид отказа	90 % ресурс, тыс. км	Установленная норма межремонтного пробега, тыс. км
Отказы бандажей колесных пар по причине проворотов и ослаблений	570	400
Отказы моторно-осевых подшипников	710	400
Отказы тяговых электродвигателей ТЛ-2К1 по причине отгара кабелей	670	400
Отказы тяговых электродвигателей ТЛ-2К1 по причине переброса и кругового огня по коллектору	237	400
Отказы тяговых электродвигателей ТЛ-2К1 по причине пробоя изоляции обмоток возбуждения	3684	400
Отказы тяговых электродвигателей ТЛ-2К1 по причине пробоя изоляции якорей	293	400

В связи с тем, что наработки до отказа по причине переброса и кругового огня по коллектору, пробоя обмоток возбуждения и изоляции якорей имеют экспоненциальный закон распределения, для данного оборудования в рамках рассматриваемого периода наблюдения плановый ремонт нецелесообразен, так как его выполнение приведет к дополнительным затратам без улучшения технического состояния ТЭД. В то же время интенсивность отказов изоляции якорей значительно больше, чем интенсивность отказов обмоток возбуждения. Исходя из этого для коллекторно-щеточного аппарата, обмоток возбуждения и обмоток якоря необходимо провести эксперимент с увеличенным межремонтным пробегом с целью определения наработки, при которой интенсивность отказов начнет увеличиваться. Эта наработка будет являться ориентиром для определения рационального межремонтного пробега до обслуживания коллекторно-щеточного аппарата и пропитки обмоток.

Проанализировав полученные результаты значений 90 % ресурсов из таблицы 2, можно заметить, что при отказах бандажей колесных пар по причинам проворотов и ослаблений, отказах моторно-осевых подшипников и отказах тяговых электродвигателей ТЛ-2К1 по причинам отгара кабелей и пробоев изоляции обмоток возбуждения ресурс существенно недоиспользуется.

В свою очередь при отказах тяговых электродвигателей по причинам переброса и кругового огня по коллектору, а также пробоя изоляции якорей ресурс значительно ниже установленных в настоящее время норм межремонтных пробегов, что может говорить о сложности конструкции коллекторно-щеточного аппарата, а также о некачественном проведении ремонта и технического обслуживания конкретного оборудования.

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод о том, что пробеги ТПС между ремонтами, их последовательность и структуру необходимо определять исходя из фактического технического состояния оборудования локомотивов на основе анализа показателей безотказности и долговечности [10].

Список литературы

1. Гапанович, В. А. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава [Текст] / В. А. Гапанович, В. И. Киселев, И. К. Лакин. – М.: Ирис-групп, 2012. – 576 с.
2. Воробьев, А. А. Рационализация системы ремонта ТПС [Текст] / А. А. Воробьев, А. В. Горский, А. В. Скребков // Мир транспорта / МИИТ. – М. – 2011. – № 5. – С. 64 – 68.
3. Данковцев, В. Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов: Учебник [Текст] / В. Т. Данковцев, В. И. Киселев, В. А. Четвергов / УМЦ ЖДТ. – М., 2007. – 557 с.
4. Шантаренко, С. Г. Технологический аудит как инструмент обеспечения эксплуатационной надежности локомотивов [Текст] / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустян // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 4. – С. 63 – 69.

5. Надежность подвижного состава: Учебник [Текст] / А. А. Воробьев, В. А. Четвергов и др. / УМЦ ЖДТ. – М., 2017. – 301 с.
6. Горский, А. В. Надежность электроподвижного состава: Учебник [Текст] / А. В. Горский, А. А. Воробьев. – М.: Маршрут, 2005. – 303 с.
7. Галкин, В. Г. Надежность тягового подвижного состава: Учебное пособие [Текст] / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
8. Воробьев, А. А. Оценка ресурса оборудования ТПС [Текст] / А. А. Воробьев, А. В. Скребков // Мир транспорта / МИИТ. – М. – 2012. – № 5. – С. 38 – 42.
9. Кольцов, Ю. А. Оценка эксплуатационных показателей безотказности оборудования электровозов [Текст] / Ю. А. Кольцов, А. В. Скребков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 29 – 35.
10. Скребков, А. В. Определение оптимальной структуры ремонтного цикла электровозов в конкретных условиях эксплуатации [Текст] / А. В. Скребков: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07. – М., 2003. – 137 с.

References

1. Gapanovich V. A., Kiselev V. I., Lakin I. K. *Ekspluatatsiia i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava* (Operation and maintenance of rolling stock). Moscow: «Iris group», 2012, 576 p.
2. Vorobiev A. A., Gorskiy A. V., Skrebkov A. V. Rationalization of the System of Traction Rolling Stock Repairing [Racionalizaciya sistemy remonta TPS]. *Mir transporta – World of transport*, 2011, no. 5, pp. 64 – 68.
3. Dankovtsev V. T., Kiselev V. I., Chetvergova V. A. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont lokomotivov* (Maintenance and repair of locomotives). Moscow, 2007, 557 p.
4. Shantarenko S. G., Kapust'jan M. F. Technology audit as a tool to ensure the operational reliability of locomotives [Tehnologicheskij audit kak instrument obespeche-niya jekspluatacionnoj nadezhnosti lokomotivov]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 4, pp. 63 – 69.
5. Vorobiev A. A., Chetvergova V. A. et al. *Nadezhnost' podvizhnogo sostava* (Reliability of rolling stock). Moscow, 2017, 301 p.
6. Gorskiy A. V., Vorobiev A. A. *Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava* (Reliability of electric rolling stock). Moscow: Route., 2005, 303 p.
7. Galkin V. G., Paramzin V. P., Chetvergova V. A. *Nadezhnost' tzhagovogo podvizhnogo sostava* (Dependability of locomotives). Moscow: Transport, 1981, 184 p.
8. Vorobiev A. A., Skrebkov A. V. Assessment of life capacity of equipment of traction rolling stock [Ocenka resursa oborudovaniya TPS]. *Mir transporta – World of transport*, 2012, no. 5, pp. 38 – 42.
9. Koltsov Y. A., Skrebkov A. V. Assessment of observed reliability measures of locomotive equipments [Otsenka nablyudayemykh pokazateley nadezhnosti lokomotivnogo oborudovaniya]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 2 (34), pp. 29 – 35.
10. Skrebkov A. V. *Opredelenie optimal'noj struktury remontnogo cikla jelektrovozov v konkretnykh usloviyakh jekspluatatsii* (Determination the optimal structure of the repair cycle of electric locomotives in specific service conditions). Ph.D. thesis, Moscow, 2003, 137 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Воробьев Александр Алексеевич

Российский университет транспорта (МИИТ).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994,
Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел: +7 (495) 684-22-31.

E-mail: vorobyov-a@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vorobiev Alexander Alekseevich

Russian University of Transport (MIIT).

Obraztsova street, 9, building 9, Moscow, 127994,
the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the de-
partment «Electric trains and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-22-31.

E-mail: vorobyov-a@yandex.ru

Кольцов Юрий Александрович

Российский университет транспорта (МИИТ).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел: +7 (495) 684-22-31.

E-mail: yuriy_koltsov@mail.ru

Koltsov Yuriy Alexandrovich

Russian University of Transport (MIIT).

Obraztsova street, 9, building 9, Moscow, 127994, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Electric trains and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-22-31.

E-mail: yuriy_koltsov@mail.ru

Мухамбетов Адильжан Ерсанович

Российский университет транспорта (МИИТ).

Образцова ул., д. 9, строение 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел: +7 (495) 684-22-31.

E-mail: Adil.nevazhno.12@mail.ru

Mukhambetov Adilzhan Yersainovich

Russian University of Transport (MIIT).

Obraztsova street, 9, building 9, Moscow, 127994, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Electric trains and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-22-31.

E-mail: Adil.nevazhno.12@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Воробьев, А. А. Определение рациональных сроков восстановления оборудования электропоездов [Текст] / А. А. Воробьев, Ю. А. Кольцов, А. Е. Мухамбетов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 54 – 61.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Vorobjev A. A., Koltsov Y. A., Mukhambetov A. E. Determination of rational terms for rehabilitation of electric locomotive equipments. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 54 – 61 (In Russian).

УДК 656.21

С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕГРАЦИИ МАЛОИНТЕНСИВНЫХ ЛИНИЙ С МАГИСТРАЛЬНЫМИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ ЛИНИЯМИ

Аннотация. Малоинтенсивные железнодорожные линии (МЖЛ) составляют почти 1/5 часть (15 353 км) (18,2 %) от общей протяженности железных дорог ОАО «РЖД». В настоящее время эксплуатация МЖЛ как в странах Европы, так и в России очень затратна. Это обусловлено большим числом выполняемых вручную операций управления и повышенной потребностью в персонале. Решение проблемы эффективности использования МЖЛ в условиях рыночной экономики одна из приоритетных задач, стоящих перед транспортной отраслью. Несмотря на то, что МЖЛ являются слабо загруженными (в среднем 3,5 пары поездов в сутки) и, следовательно, убыточными, к их содержанию предъявляются практически такие же требования, как и к магистральным, включая требования по отчетности. Начальники станций и персонал МЖЛ перегружены отчетной документацией. Это требует выполнения работ по пересмотру технологии, нормативов обслуживания и порядка эксплуатации МЖЛ. Цель исследования – сокращение расходов по основным видам деятельности за счет изменения технологии содержания и эксплуатации МЖЛ. Предмет настоящего исследования – эксплуатация и содержание МЖЛ сети ОАО «РЖД». Методология проведенного исследования основывается на системном анализе и научном обобщении отечественного и зарубежного опыта в области эксплуатации и содержания МЖЛ. В статье выделены технологические особенности эксплуатации МЖЛ. Разработана типизация линий с малоинтенсивным движением и определены критерии их отнесения к предложенным типам. Представлены особенности организации движения поездов, пассажирской и грузовой работы на МЖЛ различных типов.

Ключевые слова: малоинтенсивные железнодорожные линии, грузовые и пассажирские перевозки, рентабельная эксплуатация, интеграция, оптимизация.

Sergey P. Vakulenko, Alexey V. Kolin, Nadezhda Yu. Evreenova
Russian University of Transport, Moscow, the Russian Federation

FEATURES OF INTEGRATION OF LOW-DENSITY LINES WITH MAIN RAILWAY LINES

Abstract. Low-density railway lines (LDRL) make up almost 1/5 (15,353 km) (18.2 %) of the total length of Railways of JSC "Russian Railways". Currently, the operation of LDRLs in countries of Europe and in Russia is very expensive. This is due to the large number of manual management operations and the excessive need for staff. The solution to the problem of efficiency of use of LDRL in the conditions of market economy is one of the priority tasks facing the transport industry. Despite the fact that LDRL are poorly loaded (on average 3.5 pairs of trains per day) and, therefore, unprofitable, their content is subject to almost the same requirements as for the mainlines, including reporting requirements. The stationmaster and staff of LDRL are overloaded the reporting documentation. This requires the performance of work on the revision of the technology, standards of service and operating procedures LDRL. The purpose of the study is to reduce costs for the main types of activities by changing the technology of maintenance and operation of LDRL. The subject of this study is the operation and maintenance of the LDRL network of JSC "Russian Railways". The methodology of the conducted research is based on the system analysis and scientific generalization of domestic and foreign experience in operation and maintenance of LDRL. The article highlights the technological features of operation of the LDRL. The classification of lines with low-intensity traffic has been developed and the criteria for their assignment to the proposed types have been determined. The peculiarities of the organization of movement of trains, passenger and freight work for the LDRL of various types are presented.

Keywords: low-density railway lines, freight and passenger transportation, cost-effective operation, integration, optimization.

Каждая железнодорожная линия имеет свою задачу и условия эксплуатации, как внешние, так и внутренние, совершенно различные. Можно выделить четыре наиболее характерных типа железнодорожных линий (таблица 1), которые отнесены по действующей классификации [7, 10] к МЖЛ:

- малоинтенсивные соединительные линии технологического назначения;
- линии с интегрированным движением (пассажирским и (или) грузовым);
- линии с неинтегрированным пассажирским движением;
- линии с неинтегрированным грузовым движением.

Эффективная эксплуатация МЖЛ – это не только проблема сети российских железных дорог. Многие МЖЛ зарубежных стран находятся сейчас под угрозой закрытия, причина которой их убыточность, связанная часто с заложенной десятилетия назад системой управления движением, которая не отвечает сегодняшнему объему перевозок и общей экономической ситуацией на железнодорожном транспорте. Трудности в эксплуатации МЖЛ есть во Франции, Германии, Швейцарии, Финляндии, Великобритании, США и в других странах.

В настоящее время эксплуатация МЖЛ в странах Европы обходится дорого, это обусловлено большим числом выполняемых вручную операций управления и потребностью в персонале для приема и отправления поездов на станциях. Среди основных тенденций в зарубежном опыте эксплуатации МЖЛ можно выделить следующие:

применение спутниковой навигации для управления движением поездов, позволяющей отказаться от значительной части напольного оборудования СЦБ, для работы которого необходимы дорогостоящие кабельные сети;

автоматизация и телеуправление систем централизации;

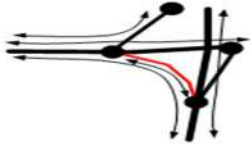
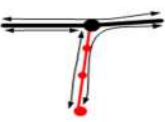
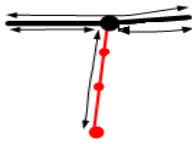
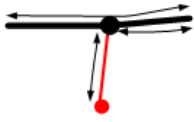
применение современных технологий (например, замена постового и напольного оборудования на микропроцессорную централизацию), что позволяет сократить обслуживающий персонал и в условиях высокого уровня европейской заработной платы достичь существенного экономического эффекта.

На наш взгляд, наиболее реальное внедрение зарубежного опыта на российских МЖЛ может быть в их использовании для организации туристического сервиса, сокращении пер-

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

сонала и штатных единиц и применении специального подвижного состава облегченного типа. Остальное требует исследований и обоснования.

Таблица 1 – Критерии отнесения МЖЛ к предложенным типам

Критерии	Малоинтенсивная соединительная линия технологического назначения	Линия с интегрированным движением	Линия с неинтегрированным пассажирским движением	Линия с неинтегрированным грузовым движением
Степень интеграции с примыкающими железнодорожными линиями	Интегрирована с технологией работы железнодорожного узла	Маршруты обращения поездов выходят за пределы линии	Маршруты обращения поездов не выходят за пределы линии	Маршруты обращения поездов не выходят за пределы линии
Наличие пассажирских поездов	Есть или отсутствуют	Есть или отсутствуют	Есть	Нет
Наличие пригородных поездов	Есть или отсутствуют	Есть или отсутствуют	Есть	Нет
Наличие грузовых поездов	Есть или отсутствуют	Есть или отсутствуют	Есть (обращаются только местные грузовые поезда, формирование и расформирование которых производится на станции примыкания к магистральной линии) или отсутствуют	Обращаются только местные грузовые поезда, формирование и расформирование которых производится на станции примыкания к магистральной линии
Расположение линии	В пределах железнодорожного узла	Выходит за пределы железнодорожного узла		
Схема				

Ключевым аспектом интеграции МЖЛ с магистральными железнодорожными линиями является наличие или отсутствие интегрированного движения поездов, т. е. поездов, выходящих за пределы МЖЛ [1]. По этому признаку следует различать МЖЛ с интегрированным движением (т. е. наличием движения поездов, выходящих за ее пределы на магистральные участки) и линии с неинтегрированным движением, имеющие локальный характер работы.

В первом случае техническое оснащение линии должно быть максимально унифицированное с магистральной железнодорожной линией. Интегрированные линии чаще всего примыкают непосредственно к промежуточным станциям. По характеру работы интегрированные МЖЛ также могут различаться. На них может быть смешанное движение – пропуск поездов всех категорий – грузовых, пассажирских, пригородных. Однако поезда хотя бы одной из категорий выходят за пределы линии.

Часть из них используются для пропуска сквозных грузовых поездов установленных веса и длины (включая маршруты). Например, Ледмозеро – Суккозеро, Бобрик-Донской – Рязск I, Дятьково – Занозная и др. Некоторые железнодорожные линии используются для транзитного пропуска пассажирских поездов (Новгород-Лужский – Батецкая, Котляревская – Нальчик). При несоответствии рода тяги на станции примыкания производится смена локомотива (Новгород-Великий, Новгород-Лужский).

Ряд интегрированных МЖЛ специализируются на пропуске сквозных пригородных поездов. В основном это железнодорожные ветви в крупных транспортных узлах, по которым курсируют электропоезда, отправляющиеся с головных станций узла (Тосно – Шапки и Мга – Невдубстрой в Санкт-Петербургском узле, Софрино – Красноармейск в Московском узле, Графская – Рамонь в Воронежском узле, Енисей – Дивногорск в Красноярском узле и др.).

Малоинтенсивные соединительные линии технологического назначения помимо того, что являются интегрированными (даже если регулярное движение организованных поездов отсутствует), обеспечивают высокую маневренность и надежность узлов.

Очевидно, что поскольку интегрированные МЖЛ обеспечивают пропуск поездов установленных веса и длины, на них невозможно упрощение условий эксплуатации, зависящих от длины тормозного пути, отказ от средств безопасности, необходимых для магистральных железнодорожных линий.

Наибольшего внимания в части возможности применения мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования МЖЛ [6, 9], заслуживают МЖЛ с неинтегрированным движением.

Такие линии, как правило, примыкают к техническим станциям (сортировочным, участковым, грузовым), располагающим устройствами по формированию-расформированию составов грузовых поездов, пунктами экипировки и подготовки в рейс пригородных поездов, локомотивным хозяйством или, как минимум, пунктами смены локомотивных бригад, пунктами технического и коммерческого осмотра вагонов, при таких станциях зачастую располагаются подразделения, обслуживающие инфраструктурные объекты (ПЧ, ПМС, ШЧ, ЭЧ и др.). Среди технических станций, являющихся началом МЖЛ с неинтегрированным движением, можно назвать ст. Великие Луки, Бологое-Моск., Суоярви, Торжок, Архангельск-Город, Сосногорск, Микунь, Ржев-Балтийский, Сухиничи-Главные, Верховье, Яр, Ижевск, Дружинино, Миасс, Бердяуш, Галич, Сакмарская и др.

На неинтегрированных МЖЛ отсутствует сквозное грузовое движение. Развоз местных вагонов осуществляется местными грузовыми поездами: сборными, передаточными, вывозными, диспетчерскими локомотивами, формирование-расформирование которых производится непосредственно на станции примыкания. Выдача локомотива производится также на станции примыкания. Причем весовые нормы существенно ниже, чем на магистральных линиях, к которым примыкают данные МЖЛ (составляют 2000 – 4000 т), да и те редко выполняются. Как показывает анализ, на большинстве линий развоз производится диспетчерскими локомотивами (в составе поезда не более 10 вагонов) и реже сборными, вывозными и передаточными поездами, состав которых редко превышает 20 вагонов. Количество станций, на которых производится отцепка-прицепка вагонов не превышает 4 – 6. Важно отметить, что на промежуточных станциях МЖЛ отсутствуют пункты отдыха локомотивных бригад, поэтому график движения сборных поездов составлен таким образом, чтобы время движения в одну сторону не превышало 12 ч.

Пассажирское движение дальнего сообщения на таких линиях, как правило, отсутствует. Например, на линии Великие Луки – Бологое пассажирские поезда сообщением Осташков – Санкт-Петербург назначаются только в праздничные дни, т. е. несколько раз в год. На линиях Архангельск – Карпогоры и Яр – Верхнекамская пассажирские поезда обращаются только в пределах МЖЛ. Они не могут быть заменены на пригородные поезда с местами для стоя-

ния ввиду высокой продолжительности поездки. Однако такие поезда характеризуются малой величиной состава (не более пяти вагонов).

На большинстве МЖЛ с неинтегрированным движением преобладает пригородное движение, а на некоторых (Будогощь – Тихвин) оно является единственным. При этом МЖЛ с неинтегрированным движением характеризуются малыми пассажиропотоками, для освоения которых в большинстве случаев достаточно одного вагона. Пригородные поезда обслуживаются как поездами локомотивной тяги, так и автомотрисами. В настоящее время вагоны беспересадочного сообщения не обращаются на МЖЛ, поэтому нет необходимости использования локомотивной тяги в пригородном сообщении. С другой стороны, переход на обслуживание автомотрисами сопряжен с трудностями их обслуживания и затратами на их приобретение. Далеко не все локомотивные депо, обслуживающие тепловозы, могут обслуживать автомотрисы. Отсутствуют специализированное оборудование и квалифицированный персонал [8].

Для МЖЛ с неинтегрированным движением можно обозначить больше ресурсов по сокращению издержек. Помимо оптимизации технологии обслуживания объектов инфраструктуры можно выделить мероприятия по реорганизации перевозочного процесса [2 – 5]:

- перевод грузового движения на маломощные локомотивы (мощностью менее 1000 кВт);
- совмещение поездного и маневрового режимов при расстановке местных вагонов по фронтам погрузки-выгрузки на станциях (локомотив, привозящий вагоны, расставляет вагоны по фронтам погрузки-выгрузки);
- организация руководства маневровой работой на станциях силами поездной бригады;
- организация погрузо-выгрузочных и приемосдаточных операций без отцепки-прицепки вагонов от состава поезда;
- перевозка грузов в составах пригородных поездов;
- замена пригородных поездов локомотивной тяги автомотрисами;
- замена подвижного состава в пригородных поездах, обслуживаемых по МЖЛ облегченными рельсовыми автобусами (расчет эффекта от данного мероприятия приведен в таблице 2).

Основные направления в изменении технологии работы МЖЛ представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Основные направления в изменении технологии работы МЖЛ

Таблица 2 – Расчет эффекта от замены подвижного состава в пригородных поездах, обращающихся по МЖЛ рассматриваемого полигона

Сообщение	Расстояние, км	Время в пути, ч	Стоимость проезда, руб.	Периодичность обращения (пар рейсов в неделю)	Подвижной состав, используемый в н. в.	Кол-во вагонов в составе поезда	Средняя численность на вагон, чел. / ваг	Оценочные расходы, тыс. руб. в год		Эффект, млн руб. в год	Оценочные доходы в н. в., тыс. руб. в год	Оценочная прибыль в н. в., тыс. руб. в год
								при существующем подвижном составе	при использовании рельсового автобуса			
Бологое – Осташков	112	2,83	269,0	7	ДМ62+ваг	2	30	25 146,1	6 906,1	18,2	5 891,1	– 19 255,0
Осташков – Великие Луки	198	5,72	482,0	5	РА1	1	20	21 339,3	4 859,2	16,5	5 032,1	– 16 307,2
Осташков – Кувшиново	149	4,67	358,0	2	ТЭП70+ваг	1	15	9 143,7	2 663,4	6,5	1 122,3	– 8 021,4
Тихвин – Будогощь	94	2,58	187,0	1	М62+ваг	1	20	2 600,0	2 267,5	0,3	392,7	– 2 207,3
Земцы – Жарковский	47	3,37	113,0	2	РА1	1	10	3 462,8	2 266,0	1,2	236,2	– 3 226,6
Тосно – Шапки*	20	0,50	50,0	21	ЭТ2М	8	5	12 669,2	–	–	547,5	– 12 121,7
Сосногорск – Троицко-Печорск	162	4,67	340,0	3	2ТЭ10М+ваг	2	20	17 077,1	4 939,4	12,1	2 128,4	– 14 948,7
Архангельск – Каргогоры (Сия)*	150	4,00	300,0	3	2ТЭ10У+ваг	6	30	26 557,3	–	–	2 817,0	– 23 740,3
Владимир – Тумская *	121	3,17	334,0	14	М62+ваг	5	30	88 242,3	–	–	14 629,2	– 73 613,1
Яр – Верхнекамская*	179	5,83	382,0	2	2ТЭ10М+ваг	3	30	16 157,1	–	–	2 395,1	– 13 762,0
Перевлес – Ясаково *	7	0,33	20,5	14	ЭР2К/ЭД4М	6	5	5 746,7	–	–	149,7	– 5 597,1
Сухиничи – Фаянсовая *	70	1,78	187,00	14	АЧ2/РА2	3	30	42 728,2	–	–	8 190,6	– 34 537,6
Сошно – Валутино*	100											
Линия разобрана												
Итого (к расчету)	–	–	–	–	–	–	–	78 769,0	23 901,6	54,9	14 802,8	– 63 966,2

* – перевод на облегченные рельсовые автобусы не предусматривается.

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

На рисунке 2 представлены возможности внедрения предлагаемых мероприятий по сокращению издержек по эксплуатации МЖЛ.

	Подвижной состав	Организация перевозочного процесса	Обслуживание объектов инфраструктуры
Бологое – Великие Луки	✓ 40	✓ 23	✓ 4
Будогощь – Тихвин	✓ 1	✗	✓ 1
Тосно – Шапки	✗	✗	✓ 1
Перевлес – Ясаково	✗	✗	✓ 2
Фаянсовая – Сухиничи Гл.	✗	✓ 50	✓ 2
Карпогоры – Архангельск-город	✗	✓ 35	✓ 2
Троицко-Печорск – Сосногорск	✓ 12	✓ 65	✓ 2
Владимир – Тумская	✗	✓ 65	✓ 2
Яр – Верхнекамская	✗	✓ 68	✓ 2

✗ – нет мероприятия; ✓ – есть мероприятие.

Рисунок 2 – Возможности внедрения предлагаемых мероприятий по сокращению издержек по эксплуатации МЖЛ, млн руб. в год

Экономический эффект от применения предложенных мер по сокращению издержек в сфере обслуживания подвижного состава может дать до 40 млн руб. на линию, в сфере организации перевозочного процесса – до 68 млн руб. на линию, в сфере обслуживания объектов инфраструктуры – до 4 млн руб. на линию.

На полигоне Октябрьской, Московской, Северной и Горьковской дорог, как показали предварительные расчеты, эффект от внедрения данных мероприятий может составить до 300 млн руб. в год, при тиражировании опыта на всю сеть ОАО «РЖД» – около 3 млрд руб. в год.

Следует отметить, что МЖЛ, на которых возможно сквозное движение (не тупиковые линии) обеспечивают работоспособность сети в случаях форс-мажорных обстоятельств (аварий, крушений, стихийных бедствий и т. п.) и в случаях запланированных продолжительных «окон» на магистральных линиях. МЖЛ могут использоваться для пропуска поездов, временно отклоняемых с магистральных линий. На этот случай они должны иметь возможность перехода на круглосуточный режим работы.

Список литературы

1. Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.05.2017 № 944р «Об утверждении Регламента эксплуатации и обслуживании инфраструктуры на малоинтенсивных железнодорожных участках». – М., 2017.

2. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий: Монография [Текст] / С. П. Вакуленко, А. В. Колин и др. / ВИНТИ РАН – М., 2018. – 218 с.
3. Вакуленко, С. П. Малодеятельные линии: состояние и варианты оптимизации [Текст] / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2017. – № 3. – С. 174 – 180.
4. Вакуленко, С. П. Направления оптимизации работы малоинтенсивных железнодорожных линий [Текст] / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – 2017. – № 4. – С. 89 – 95.
5. Проблемы и перспективы малоинтенсивных линий [Текст] / С. П. Вакуленко, А. В. Колин и др. // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 6. – С. 7 – 10.
6. Программа развития вертикали управления движением на основе научно-технических достижений и информатизации: Утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 1458р от 09.06.2015. – М., 2015.
7. Распоряжение ОАО «РЖД» № 3188р от 31.12.2015 г. «Об утверждении результатов классификации железнодорожных линий». – М., 2015.
8. Распоряжение ОАО «РЖД» от 13 сентября 2016 г. № 1882р «О порядке совмещения профессий (должностей) в филиалах ОАО «РЖД». – М., 2016.
9. Постановление Правительства РФ от 15 мая 1998 г. № 448 «О Концепции структурной реформы федерального железнодорожного транспорта» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1998. – № 20. – Ст. 2159.
10. Распоряжение ОАО «РЖД» № 3048р от 23.12.2015 г. «Об утверждении методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД». – М., 2015.

References

1. *Rasporyazhenie ОАО «RZhD» ot 17.05.2017 № 944r «Ob utverzhdenii Reglamenta ekspluatatsii i obsluzhivaniya infrastruktury na malointensivnyh zheleznodorozhnyh uchastkah»* (The Order of JSC Russian Railways of 17.05.2017 No. 944r «On approval of the Regulations for operation and maintenance of infrastructure at low-intensity railway sections»). Moscow, 2017.
2. Vakulenko, S. P., Kolin A.V., Evreenova, N. Yu., Romensky, D. Yu., Golikov, K. V. *Effektivnost' ekspluatatsii i obsluzhivaniya malointensivnyh zheleznodorozhnyh linii: Monografiya* (Efficiency of operation and maintenance of low-intensity railway lines: Monograph). Moscow, VINITI RAS, 2018, 218 p.
3. Vakulenko, S. P., Kolin A.V., Evreenova, N. Yu. Low-density lines: state and optimization options [Malodeyatel'ny'e linii: sostoyanie i varianty` optimizatsii]. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, Vol. 15, 2017, Iss. 3, pp. 174 – 180.
4. Vakulenko, S. P., Kolin A.V., Evreenova, N. Yu. Directions for optimizing the operation of low-intensity railway lines [Napravleniya optimizatsii raboty malointensivnyh zheleznodorozhnyh linii]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*, 2017, Iss. 4, pp. 89 – 95.
5. Vakulenko, S. P., Kolin A. V., Evreenova, N. Yu. Problems and prospects of low-intensity lines [Problemy i perspektivy malointensivnyh linii]. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, communication and Informatics*, 2017, Iss. 6, pp. 7-10.
6. *Programma razvitiya vertikali upravleniya dvizheniem na osnove nauchno-tekhnicheskikh dostizhenij i informatizatsii: utv. rasporyazheniem ОАО «RZhD» № 1458r ot 09.06.2015* (The program of development of a chain of command by the movement on the basis of scientific and technical achievements and informatization approved by the order of JSC «Russian Railways». It is approved by the Order of JSC «Russian Railways» № 1458r from 09.06.2015). Moscow, 2015.

7. *Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 3188r от 31.12.2015 g. «Ob utverzhdenii rezul'tatov klassifikatsii zheleznodorozhnyh linij»* (The order of JSC «Russian Railways» № 3188r from 31.12.2015. «About the approval of results classification on railway lines»). Moscow, 2015.

8. *Rasporyazhenie OAO «RZhD» от 13 sentyabrya 2016 g. № 1882r «O poryadke sovmeshcheniya professij (dolzhnostej) v filialah OAO «RZhD»* (The order of JSC «Russian Railways» of September 13, 2016 № 1882r «About an order of combination of professions (positions) in Russian Railways branches of JSC»). Moscow, 2016.

9. Resolution of the Government of the Russian Federation of May 15, 1998 № 448 «About the Concept of structural reform of federal railway transport» [Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 15 maya 1998 g. № 448 «O Konceptcii strukturnoj reformy federal'nogo zheleznodorozhnogo transporta»]. *Rossiyskaya Gazeta: in the Converted legislation of the Russian Federation*, 1998. no. 20, art. 2159.

10. *Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 3048r от 23.12.2015 g. «Ob utverzhdenii metodiki klassifikatsii i specializatsii zheleznodorozhnyh linij OAO «RZhD»* (The order of JSC «Russian Railways» № 3048r from 23.12.2015. «About the statement of a technique classification and specialization on railway lines of JSC «Russian Railways»), Moscow, 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вакуленко Сергей Петрович

Российский университет транспорта (МИИТ).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, профессор, директор Института управления и цифровых технологий, РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 684-24-14.

E-mail: vakulenkosp@mail.ru

Колин Алексей Валентинович

Российский университет транспорта (МИИТ).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Начальник научного центра РУТ (МИИТ).

Евреенова Надежда Юрьевна

Российский университет транспорта (МИИТ).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7-905-724-68-53.

E-mail: nevreenova@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Вакуленко, С. П. Особенности интеграции малоинтенсивных линий с магистральными железнодорожными линиями [Текст] / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 61 – 69.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vakulenko Sergey Petrovich

Russian University of Transport (MIIT).

9b9 Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, professor, director of the Institute of Management and Digital Technologies of Russian University of Transport (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-24-14.

E-mail: vakulenkosp@mail.ru

Kolin Alexey Valentinovich

Russian University of Transport (MIIT).

9b9 Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Head of the scientific center of Russian University of Transport (MIIT).

Evreenova Nadezhda Yurevna

Russian University of Transport (MIIT).

9b9 Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport business management and intelligent systems» of Russian University of Transport (MIIT).

Phone: +7-905-724-68-53.

E-mail: nevreenova@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Yu. Features of integration of low-density lines with main railway lines. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 61 – 69 (In Russian).

УДК 629.4.016.2

В. Ф. Тарута, С. В. Глухов, М. В. Глухова

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

УТИЛИЗАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПРИ НАГРУЗОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТЕПЛОВЗОВ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы возможности утилизации энергии выпускных газов дизель-генераторных установок тепловзов при проведении нагрузочных испытаний. Выполнен расчет количества тепла, уносимого при проведении испытаний с уходящими газами. Рассмотрены возможные варианты утилизации теплоты с использованием различного рода теплообменников.

Ключевые слова: ресурсосберегающие технологии, вторичные энергетические ресурсы, утилизация энергии, выпускные газы дизеля, нагрузочные испытания.

Victor F. Taruta, Sergey V. Glukhov, Marya V. Glukhova

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

UTILIZATION OF SECONDARY ENERGY RESOURCES LOAD TESTING OF LOCOMOTIVES

Abstract. The article deals with the possibility of energy utilization of exhaust gases of diesel-generator sets of locomotives during load tests. The calculation of the amount of heat carried out during tests with exhaust gases. Possible variants of heat utilization with the use of various heat exchangers are considered.

Keywords: resource-saving technologies, secondary energy resources, energy utilization, diesel exhaust gases, load tests.

Одним из приоритетных направлений дальнейшего развития и совершенствования организации технического обслуживания и ремонта локомотивов является использование ресурсосберегающих технологий, разработка и внедрение программ энерго- и ресурсосбережения. В компании ОАО «Российские железные дороги» в 2004 г. была принята и в 2011 г. актуализирована Энергетическая стратегия. Важнейшей целью стратегии определены оптимизация энергопотребления и реализация комплексных мероприятий по экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

В настоящее время основой ресурсосбережения в локомотивном комплексе является экономное использование дизельного топлива и электроэнергии в эксплуатации. Для достижения заданной цели ведутся работы, направленные на повышение энергетической эффективности локомотивов – так называемые ресурсосберегающие технологии, – в частности, на снижение потребления топливно-энергетических ресурсов на единицу выполненной работы. В серии «Библиотека энергоэффективности и энергосбережения» выпущено трехтомное справочно-методическое издание «Энергосбережение на железнодорожном транспорте» (под редакцией к.т.н. В. А. Гапановича) [1].

В издании отмечается, что «... наиболее энергозатратными и ресурсоемкими являются испытания следующих видов оборудования локомотивов: дизель-генераторной установки тепловзов, тяговых и вспомогательных электрических машин, выпрямительных установок, поршневых воздушных компрессоров тормозной системы локомотивов, колесно-моторных блоков после ремонта». Указываются и возможные направления экономии ТЭР, например, переход от водяных нагрузочных реостатов к сухим, с помощью которых «появляется возможность использовать выделяемую теплоту на обогрев помещений депо и подогрев технической воды для производственных нужд», а также «испытания по специальным и сокращенным программам с использованием методов имитационного моде-

лирования и прогнозирования технологических параметров». Однако вряд ли в ближайшие годы «имитационное моделирование» заменит традиционную технологию послеремонтной проверки технического состояния дизель-генераторных установок (ДГУ) нагружением на реостат. Значит, искать резервы экономии следует пока здесь.

Одной из технологий в данном направлении является утилизация энергии горячей воды нагрузочного реостата с использованием теплообменников [2]; другой – утилизация энергии выпускных газов тепловоза при проведении реостатных испытаний.

В тепловозных ДГУ значительное количество теплоты рассеивается с выхлопными газами, имеющими температуру 270 – 400 °С. Это так называемые тепловые вторичные энергетические ресурсы (ВЭР), представляющие собой энтальпию тепла отходящих газов, которые могут быть использованы другими потребителями. Тепловой баланс тепловозного дизеля с газотурбинным наддувом показывает, что в среднем лишь 41,5 % тепла, получаемого при сгорании топлива, превращается в эффективную работу, а потери с выпускными газами составляют приблизительно от 32 до 40 %.

Проблемой утилизации выпускных газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) давно интересуются на Западе. Например, известны экспериментальные работы ведущих западных автоконцернов по созданию систем регенерации тепловой энергии в системе выпуска отработавших газов по циклу Ренкина и термоэлектрических генераторов на эффекте Зеебека, однако ввиду сложности и все еще достаточно низкого КПД широкого распространения они до сих пор не получили.

Например, фирма BMW для использования энергии отработавших газов разработала вариант двигателя, в котором газы нагревали воду, превращая ее в пар, который затем с помощью паровой машины подкручивал коленчатый вал ДВС. Эта же фирма разработала конструкцию, в которой рядом с выхлопной трубой автомобиля размещается термоэлектрогенератор, преобразующий энергию охлаждающей жидкости и отработавших газов в электрический ток, который используется для питания многочисленных потребителей на борту, разгрузив штатный генератор [3].

Сообщается также, что «при поддержке Министерства энергетики США ученые представили большой термоэлектрогенератор (ТЭГ) на 200 Вт, который планируется устанавливать на танки с целью снижения расходов на топливо. Аналогичным образом планируется оптимизация и в автомобильной сфере, где ожидается повышение эффективности благодаря ТЭГ на пять процентов» [4].

Однако ни применение термоэлектрогенераторов, ни использование каких-либо иных источников утилизации ВЭР не получили широкого распространения на транспорте по ряду причин, в частности, из-за низкого КПД и относительно высокой стоимости. Оснащать отдельную транспортную единицу установкой для утилизации ВЭР пока экономически невыгодно. На это указывается и в рецензии [5] на статью «Источники энергии – термоэлектрические генераторы».

Однако в большинстве сервисных локомотивных депо по ремонту тепловозов (СЛД) имеются станции реостатных испытаний. Известно количество теплоты ($Q_{\text{в}}$), которое в ДВС теряется с отработавшими газами:

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{во}} - (Q_{\text{ов}} + Q_{\text{от}}), \quad (1)$$

где $Q_{\text{во}}$ – количество теплоты в отработавших газах – физической (теплосодержание от 0 °С) и химической (при неполноте сгорания);

$Q_{\text{ов}}$ – теплота, внесенная в двигатель воздухом из окружающей среды (теплосодержание от 0 °С);

$Q_{\text{от}}$ – теплота топлива (теплосодержание от 0 °С), поступившего в двигатель.

В свою очередь количество теплоты, уносимой отработавшими газами ($q_{\text{г}}$), находится в прямой зависимости от количества сгоревшего топлива [6]:

$$q_r = Q_r \cdot g_e, \quad (2)$$

где Q_r – количество тепла, уносимого отработавшими газами 1 кг сгоревшего топлива, ккал/кг;
 g_e – удельный эффективный расход топлива g_e , г/кВт·ч.

Следовательно, зная расход топлива за время проведения нагрузочных испытаний, можно на основе теплового баланса двигателя приблизительно оценить количество тепловой энергии, потерянной с уходящими газами.

Исследованиями, проведенными сотрудниками кафедры «Тепловозы и тепловозное хозяйство» ОМИИТа на ряде дорог МПС (Южно-Уральской, Свердловской, Юго-Восточной, Северной) в период 1972 – 1984 гг. [6] было установлено, что удельный расход топлива дизель-генераторной установкой тепловозов типа 2ТЭ116 под нагрузкой по тепловозной характеристике (по позициям контроллера) с высокой достоверностью аппроксимируется полиномом третьего порядка (рисунок 1).

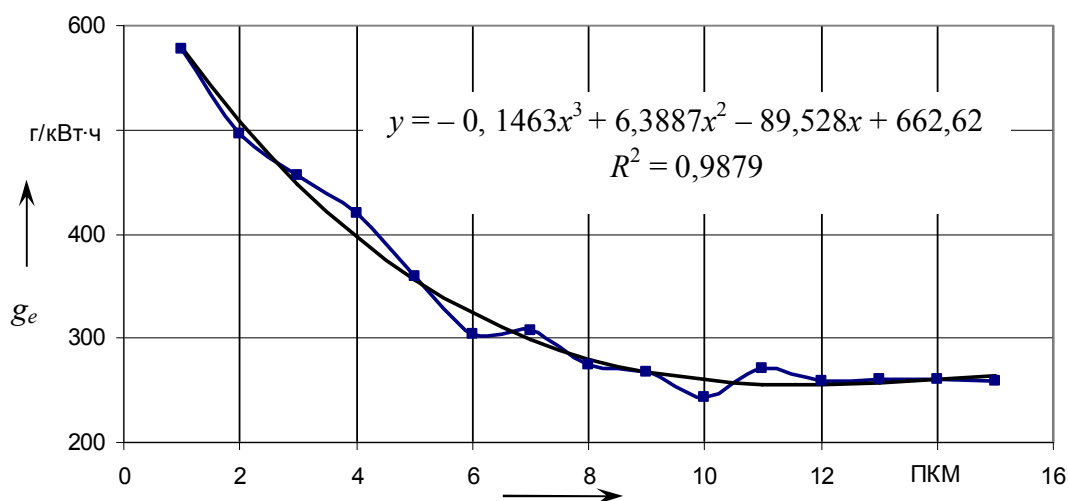


Рисунок 1 – Расходная характеристика ДГУ тепловоза 2ТЭ116

Имея подобную функциональную зависимость, можно ориентировочно посчитать, сколько топлива затрачивается на проведение испытаний (таблица 1).

Расход топлива на проведение обкаточных реостатных испытаний (РИ) тепловозов 2ТЭ116

Позиция контроллера машиниста	Мощность генератора P_r , кВт	Удельный эффективный расход топлива g_e , г/кВт·ч	$t_{\text{раб}}$, ч	Расход топлива, Q , кг
1	89	577,8	0,42	21,4
2	120	496,4	0,25	14,9
3	187	457,0	0,25	26,7
4	239	420,2	0,50	50,2
6	506	303,6	0,58	89,6
7	598	307,0	0,17	30,6
8	758	274,4	0,33	69,3
9	899	268,1	0,25	60,3
10	1028	243,2	0,33	83,3
11	1145	271,8	0,67	207,5
12	1315	259,0	0,08	28,4
13	1513	260,7	0,25	98,6
14	1626	260,4	0,25	105,9
15	1821	258,1	1,17	548,3
Итого				1435,0

При полной обкатке ДГУ в соответствии с требованиями ТО и ТР тепловозов 2ТЭ116 в течение 5 час 5 мин [7] суммарный расход топлива на обкаточных режимах под нагрузкой составит 1435 кг (см. таблицу).

Тепловой баланс тепловозного дизеля с газотурбинным наддувом показывает, что в среднем лишь 41,5 % тепла, получаемого при сгорании топлива, превращается в эффективную работу, а потери с выпускными газами составляют приблизительно от 32 до 40 %. Предполагая, что эффективность использования тепла сгоревшего топлива соотносится с расходной характеристикой ДГУ тепловоза (см. рисунок 1), ориентировочное значение количества тепловой энергии, уходящей с выпускными газами при проведении полных РИ, составляет более 1,5 Гкал.

Традиционными схемами утилизации теплоты являются парогазовые схемы, когда в выходной системе ДВС устанавливают котел-утилизатор, обеспечивающий выработку водяного пара [7]. Для условий работы в депо можно использовать прямоточные кожухотрубные газодынные теплообменные аппараты с использованием тепловых аккумуляторов (рисунок 2).

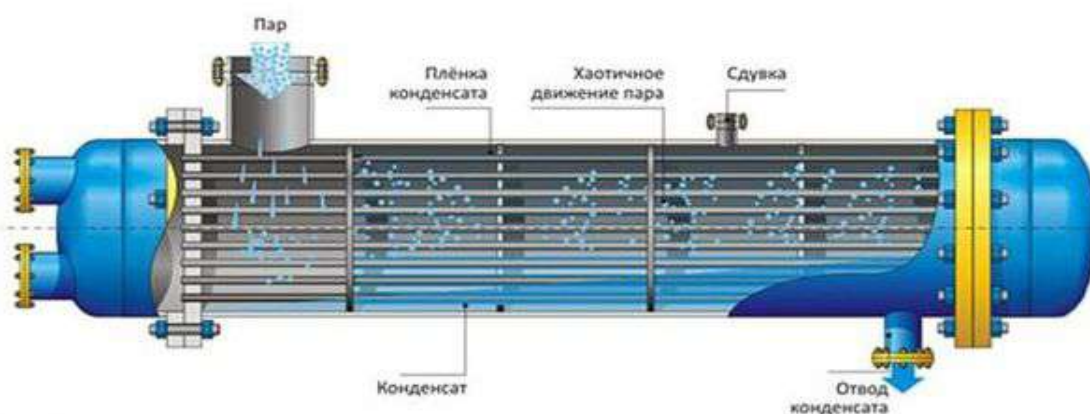


Рисунок 2 – Кожухотрубный теплообменник

В последние годы все большее развитие получают установки непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую (рисунок 3).

Современная наука постоянно ищет новые и новые полупроводниковые композиции, и прогресс в этой области обеспечивается не столько теорией, сколько практикой, ввиду сложности физических процессов, происходящих в термоэлектрических материалах.

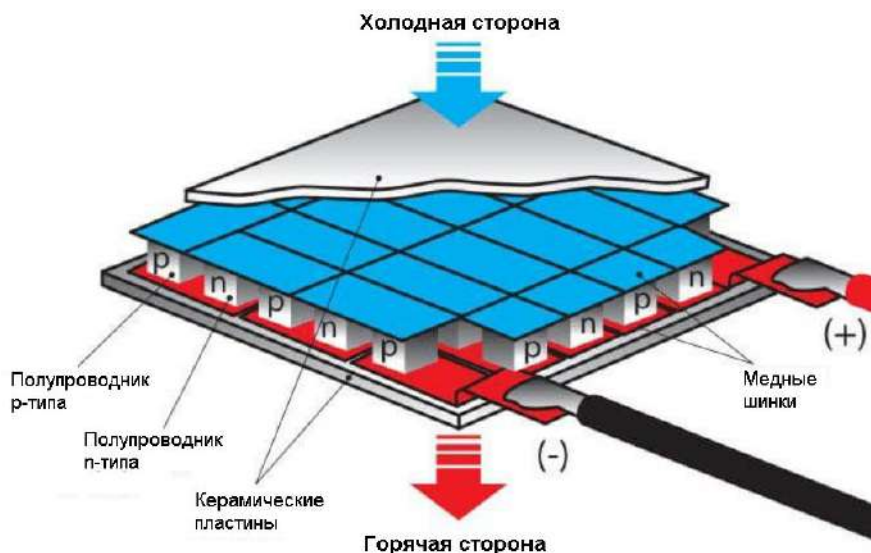
Новейшие модификации термоэлектрических генераторов способны выдерживать нагрев верхней его части до 600 °С при температуре основания в 100 °С. Это позволяет при разнице в 500 °С конвертировать мощность в 7,2 Вт при площади устройства всего в 4 см² [8].

Вид генерации варьируется во всем мире, что приводит к широкому диапазону цен на электроэнергию. Выбор метода преобразования тепловой энергии в электрическую и его экономическая целесообразность зависят от потребностей в энергоносителях, наличия природного топлива и достаточности площадки строительства.

В журнале «Локомотив» опубликована статья «Источники энергии – термоэлектрические генераторы» [9], в которой предлагается утилизировать тепло уходящих газов с помощью установки на тепловозах термоэлектрических генераторов. Использование подобных устройств непосредственно на локомотиве затруднено по ряду причин. В первую очередь это ограниченное внутреннее пространство современного автономного локомотива, вспомогательное оборудование которого непрерывно увеличивается. Немаловажен и тот факт, что нет потребителя утилизированной энергии на локомотиве.



а



б

Рисунок 3 – Термоэлектрический генератор:
а – общий вид; б – принцип действия

Однако в большинстве сервисных локомотивных депо по ремонту тепловозов имеются станции реостатных испытаний. При установке кожухотрубных теплообменных аппаратов (КТА) или термоэлектрических генераторов на станциях реостатных испытаний в СЛД можно воспользоваться сооружениями, аналогичными пунктам экологического контроля (ПЭКом) (рисунок 4, а, б), поскольку последние приспособлены для отбора проб выпускных газов тепловоза при проведении реостатных испытаний.



а



б

Рисунок 4 – Пункты экологического контроля на станциях реостатных испытаний тепловозов

Поскольку в последние годы ПЭКи во многих депо не используются по прямому назначению, то КТА можно устанавливать непосредственно на их месте. При этом весогабаритные характеристики установки не имеют критического значения.

По результатам проведенных патентных исследований, поиска и обзора специальной литературы выполнена классификация систем утилизации тепловой энергии отработавших газов после двигателей внутреннего сгорания (рисунок 5) [10].



Рисунок 5 – Способы утилизации и использования тепловой энергии отработавших газов ДВС

Из предлагаемой классификации видно, что системы утилизации выпускных газов тепловозных ДВС, находящихся в стационарном положении при проведении нагрузочных испытаний, целесообразно развивать как минимум по двум направлениям:

применением прямоточных кожухотрубных газодводяных теплообменных аппаратов с использованием тепловых аккумуляторов;

применением термоэлектрических генераторов стационарного типа.

Необходимо отметить также, что особенностью возможного применения установок по утилизации ВЭР от дизельных двигателей тепловозов при нагрузочных испытаниях является цикличность процесса работы на разных нагрузочных испытательных режимах, что для полноценного их функционирования в СЛД потребует применения аккумулирующих систем, а также дублирования (при длительном простое стенда нагрузочных испытаний) традиционными источниками энергии.

Список литературы

1. Сайт «Инновационный дайджест» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rzd-expo.ru/innovation/resource_saving/resource_saving/index.php (дата обращения: 22.09.2019).
2. Глухов, С. В. Утилизация вторичных энергетических ресурсов при проведении реостатных испытаний [Текст] / С. В. Глухов, В. Ф. Тарута, М. В. Глухова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 3 – С. 68 – 72.
3. Пат. 2519529 Российская Федерация, МПК F02G5/02. Устройство для выработки электрической энергии с использованием тепла отработавших газов [Текст] / Шатц А., Лимбек З., Брюкк Р., Ходгзон Я. (DE); заявитель и патентообладатель Эмитек Гезельшафт Фюр Эмиссионстехнологи МБХ (DE). – № 2010151473/06; заявл. 13.05.2009 опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.
4. Сайт «Электрик-инфо» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://elektrik.info/main/news/946-effektivnoe-preobrazovanie-tepla-termogenerator-gmz-energy.html> (дата обращения: 22.09.2019).

5. Игин, В. Н. Энергоэффективность локомотивов: планирование и прогнозирование [Текст] / В. Н. Игин // Локомотив. – 2016. – №4. – С. 10 – 13.
6. Четвергов, В. А. Опыт разработки и внедрения технических средств для оценки качества ремонта и настройки ДГУ тепловоза при реостатных испытаниях [Текст] / В. А. Четвергов, А. И. Володин, В. З. Даминов. – М.: Транспорт, 1986. – 53 с.
7. Выбор схемы утилизации тепла отработавших газов поршневых ДВС и оценка полезного теплоиспользования в составе когенерационной установки [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2015. – №1 С. – 114 – 119.
8. Эффективное преобразование тепла в электричество с помощью термогенераторов GMZ Energy [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://elektrik.info/main/news/946-effektivnoe-preobrazovanie-tepla-termogenerator-gmz-energy.html> (дата обращения: 22.09.2019).
9. Митронов, М. В. Источники энергии – термоэлектрические генераторы [Текст] / М. В. Митронов // Локомотив. – 2013. – № 9. – С. 23, 24.
10. Яркин, А. В. Повышение эффективности строительных мобильных машин путем утилизации тепла отработавших газов: Автореф... дис. канд. техн. наук. – Тюмень, 2005. – 20 с.

References

1. *Innovatsionnyy daydzhest. Programma resursosberezheniya* (Innovative Digest. Resource Saving Program). Access Point: http://www.rzd-expo.ru/innovation/resource_saving/resourcce_saving/index.php (Revised: 22.09.2019).
2. Glukhov S. V. Utilization secondary energy resources during rheostatic tests [Utilizaciya vtorichny'x e'nergeticheskix resursov pri provedenii reostatny'x ispy'taniy]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 3, pp. 68 – 72.
3. Shatz A., Limbek Z., Bryukk R., Xodgzon Ya. *Patent RU 2519529*. 10.06.2014.
4. *Elektrik Info. Termoelektricheskiy generator*. (Electrician info. Thermoelectric generator). Access Point: <http://elektrik.info/main/news/946-effektivnoe-preobrazovanie-tepla-termogenerator-gmz-energy.html> (Revised: 22.09.2019).
5. Igin V. N. Locomotive energy efficiency: Planing and forecasting [E'nergoe'ffektivnost' lokomotivov: planirovanie i prognozirovanie]. *Lokomotiv – The Locomotive*, 2016, no. 4, pp. 10 – 13.
6. Chetvergov V. A., Volodin A. I., Daminov V. Z. *Opy't razrabotki i vnedreniya texnicheskix sredstv dlya ocen-ki kachestva remonta i nastrojki DGU teplovoza pri reostatny'x ispy'taniyax* (Experience in the development and implementation of technical means for assessing the quality of repair and tuning of diesel engine diesel engine during rheostatic tests). Moscow: Transport, 1986, 53 p.
7. Vedruchenko V. R., Krajnov V. V., Zhdanov N. V. Choice of a scheme for utilizing the heat of exhaust gases from reciprocating internal combustion engines and evaluating useful heat use as part of a cogeneration unit. [Vy'bor sxemy' utilizacii tepla otrabotavshix gazov porshnevny'x DVS i ocenka poleznogo teploispol'zovaniya v sostave kogeneracionnoj ustanovki]. *Omskij nauchny'j vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 114 – 119.
8. *Elektrik Info. E'ffektivnoe preobrazovanie tepla v e'lektrichestvo s pomoshh'yu termogeneratorov GMZ Energy*. (Efficiently convert heat to electricity with GMZ Energy). Access Point: <http://elektrik.info/main/news/946-effektivnoe-preobrazovanie-tepla-termogenerator-gmz-energy.html> (Revised: 22.09.2019).
9. Mitronov M. V. Energy Sources – Thermoelectric Generators [Istochniki e'nergii – termoe'lektricheskie generatory]. *Lokomotiv – The Locomotive*, 2013, no. 9, pp. 23 – 24.
10. Yarkin A. V. *Povy'shenie e'ffektivnosti stroitel'ny'x mobil'ny'x mashin putem uti-lizacii tepla otrabotavshix gazov* (Improving the efficiency of mobile construction vehicles by utilizing exhaust heat). Doctor's thesis abstract, Tyumen, 2005, 20 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тарута Виктор Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-06-17.

E-mail: TarutaVF@gmail.com

Глухов Сергей Витальевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-06-23.

E-mail: svgluk@mail.ru

Глухова Мария Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-06-23.

E-mail: Marta_omgups@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Тарута, В. Ф. Утилизация вторичных энергетических ресурсов при нагрузочных испытаниях тепловозов [Текст] / В. Ф. Тарута, С. В. Глухов, М. В. Глухова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 70 – 77.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Taruta Victor Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-06-17.

E-mail: TarutaVF@gmail.com

Glukhov Sergey Vitalyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-06-23.

E-mail: svgluk@mail.ru

Glukhova Marya Victorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-06-23.

E-mail: Marta_omgups@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Taruta V. F., Glukhov S. V., Glukhova M. V. Utilization of secondary energy resources load testing of locomotives. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 70 – 77 (In Russian).

УДК 699.865

Е. М. Резанов¹, П. В. Петров²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Общество с ограниченной ответственностью «Сибирская проектная компания» (ООО «СПК»), г. Омск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТЕПЛЕНИЯ СТЕН ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКАЕМОЙ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация. Предложена оптимизация утепления ограждающих конструкций стен зданий, учитывающая взаимосвязь конструктивных, теплотехнических, режимных параметров и экономических показателей. Целью исследования является определение оптимального значения толщины утепления теплоизоляционным материалом объекта, с учетом отпускаемой ему тепловой энергии. В проведенном исследовании использовались методы математического моделирования теплообмена, оптимизационной задачи. Приведены результаты исследования влияния толщины теплоизоляционного материала на технико-экономическую эффективность потребления зданием энергетических ресурсов и материальных затрат. Результаты показали снижение тепловых потерь через ограждающие конструкции, расхода потребления тепловой и электрической энергии на систему «отопление, вентиляция» и приведенных затрат.

Ключевые слова: теплоизоляция, толщина, эффективность, затраты, тепловая энергия, электроэнергия.

Evgeniy M. Rezanov¹, Pavel V. Petrov²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;

²Limited Liability Company «Siberian Design Company» (LLC «SPK»), Omsk, the Russian Federation

INCREASING THE EFFICIENCY OF WARMING OF BUILDING WALLS TAKING INTO ACCOUNT THE REGULATION OF THE RELEASED HEAT ENERGY

Abstract. Optimization of insulation of walling of building walls is proposed, taking into account the relationship of structural, heat engineering, operating parameters and economic indicators. The purpose of research is to determine the optimal value of the thickness of the insulation with the heat-insulating material of the object, taking into account the thermal energy released to it. The study used methods of mathematical modeling of heat transfer, an optimization problem. The results of the study of the influence of the thickness of the insulating material on the technical and economic efficiency of the building's consumption of energy resources and material costs are presented. The results showed a decrease in heat losses through the building envelope, consumption of heat and electric energy for the heating, ventilation system and reduced costs.

Keywords: thermal insulation, thickness, efficiency, costs, thermal energy, electricity.

Сбережение энергетических ресурсов и материальных затрат является одним из направлений развития энергетики. Потребность в сбережении вызвана истощением природных ресурсов, экологическими проблемами. Оптимизация капитальных и эксплуатационных расходов в системах теплоснабжения объектов наиболее выгодна при выборе оптимального варианта, характеризуемого наименьшими затратами [1 – 3]. Поэтому актуальным вопросом является определение наиболее эффективных теплотехнических параметров утепления ограждающих конструкций зданий, учитывающих взаимосвязь с процессами регулирования энергетических ресурсов, затрачиваемых на систему «отопление, вентиляция и кондиционирование».

Объекты железнодорожной инфраструктуры (административные, общественные и производственные здания) подключены к инженерным сетям энергообеспечения теплотехнических систем. Указанные объекты имеют высокие эксплуатационные затраты на системы отопления, вентиляции и электроснабжения.

Применение теплоизоляционных материалов для утепления стен – основное мероприятие по повышению эффективности теплового режима зданий [4 – 6]. Однако это ведет к увеличению затрат на тепловую изоляцию, поэтому целесообразно определять оптимальную толщину утепления стен зданий.

Основной задачей является разработка эффективной методики расчета утепления стен зданий, способствующей определению минимальных капиталовложений и эксплуатационных расходов, с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии. Возможность решения данной задачи позволит уменьшить затраты на энергетические ресурсы.

Значение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии (рисунок 1) можно найти исходя из минимума суммарных приведенных дисконтированных затрат на ограждающие конструкции стен здания $I_{ст}$ (р./год), при приравнении к нулю частных зависимых $Q_{ст}$ и $K_{ст}$ от $\delta_{ут}$ производных функции по оптимизируемому параметру [3]:

$$\frac{dI_{ст}}{d\delta_{ут}} = (86400z_{от}\Pi_{т} + b) \frac{dQ_{ст}}{d\delta_{ут}} + (E_{ст} + H) \frac{dK_{ст}}{d\delta_{ут}} = 0, \quad (1)$$

где $\delta_{ут}$ – толщина утепляющего слоя теплоизоляционного материала ограждающей конструкции стен здания, м; $z_{от}$ – продолжительность отопительного периода, сут/год; $\Pi_{т}$ – средняя годовая стоимость тепловой энергии, р./Дж; b – комплекс величин, учитывающий регулирование отпускаемой тепловой энергии; $Q_{ст}$ – тепловые потери через наружные стены,

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

B_T ; $E_{ст}$ – коэффициент эффективности инвестиций в утепление тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания, 1/год; H – норма отчислений в относительных единицах на амортизацию и ежегодное обслуживание системы теплового потребления здания, 1/год; $K_{ст}$ – капиталовложение в сберегающие мероприятия по утеплению тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания, р.

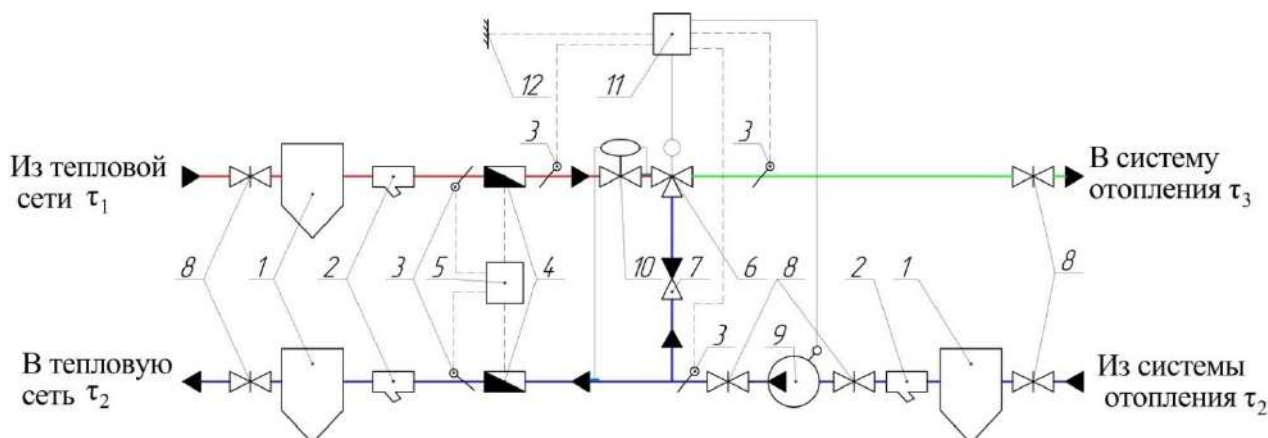


Рисунок 1 – Принципиальная схема узла регулирования отпускаемой тепловой энергии системы «отопление, вентиляция и кондиционирование» здания:

- 1 – грязевик; 2 – фильтр; 3 – датчик температуры; 4 – расходомер; 5 – тепловой вычислитель; 6 – трехходовой регулирующий клапан; 7 – обратный клапан; 8 – отключающая арматура; 9 – насос; 10 – регулятор перепада давления; 11 – регулятор по температурам; 12 – датчик температуры наружного воздуха

Решение уравнения (1) можно представить в виде:

$$\delta_{ут}^{опт} = -R_{уст} \lambda_{ут} + \sqrt{\frac{(86400 z_{от} \Pi_T + b) \lambda_{ут} (\sum F_{ст,i} (t_{b,i} - t_{от}) n_i)}{r_0 \eta (E_{ст} + H) \Pi_{ут} F_{ст}}}; \quad (2)$$

$$b = \frac{\Pi_n k H_n \gamma Z_n N_n^{раб}}{\rho_b C_b (\tau_3 - \tau_2) \eta_n \eta_p}; \quad (3)$$

$$\tau_1 = t_b + \Delta t \bar{Q}_0^{0,8} + (\delta \tau - 0,5 \Theta, \frac{\bar{Q}_0}{G_0}; \quad (4)$$

$$\tau_2 = t_b + \Delta t \bar{Q}_0^{0,8} - 0,5 \Theta \frac{\bar{Q}_0}{G_0}; \quad (5)$$

$$\tau_3 = t_b + \Delta t \bar{Q}_0^{0,8} + 0,5 \Theta \frac{\bar{Q}_0}{G_0}; \quad (6)$$

$$\bar{Q}_0 = \left(\frac{t_b - t_{от}}{t_b - t_{нх}} \right), \quad (7)$$

где $\delta_{ут}^{опт}$ – оптимальная толщина утепляющего слоя теплоизоляционного материала стен здания, м; $R_{уст}$ – установленное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции стен здания, $(m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$; $\lambda_{ут}$ – теплопроводность утепляющего слоя теплоизоляционного материала ограждающей конструкции стен здания, $Вт/(m \cdot ^\circ C)$; $F_{ст,i}$ – площадь поверхности наружных ограждающих конструкций стен здания i -й зоны помещения, m^2 ; $t_{b,i}$ – средняя температура внутреннего воздуха i -й зоны помещения здания, $^\circ C$; n_i – коэффициент, зависящий от положения i -й зоны наружной поверхности ограждающей конструкции стен здания по отношению к наружному воздуху; $t_{от}$ – среднесуточная температура наружного воздуха за отопительный период, $^\circ C$; r_0 – коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции; η – коэффициент расхождения усредненности по площади условного сопротивле-

ния теплопередаче стен здания при утеплении его снаружи теплоизоляционным материалом; $\Pi_{\text{ут}}$ – стоимость 1 м³ утепляющего теплоизоляционного материала, р./м³; $F_{\text{ст}}$ – общая площадь поверхности наружных ограждающих конструкций стен здания после утепления его тепловой изоляцией, м²; $\Pi_{\text{н}}^{\text{эл}}$ – средняя годовая стоимость электрической энергии потребления перекачивающим насосом, р./(Вт·ч); $Z_{\text{н}}$ – продолжительность работы насоса в течение суток, ч; $N_{\text{н}}^{\text{раб}}$ – число рабочих дней в году насосного оборудования, 1/год; k – коэффициент запаса; $H_{\text{н}}$ – напор, развиваемый насосом, м; γ – удельный вес перекачиваемой жидкости, Н/м³; $\eta_{\text{п}}$ – коэффициент полезного действия передачи; $\eta_{\text{р}}$ – коэффициент полезного действия насоса; $\rho_{\text{в}}$ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; $C_{\text{в}}$ – теплоемкость перекачиваемой жидкости, Дж/кг·°C; τ_1 – текущая температура жидкости в подающем трубопроводе тепловой сети, °C; τ_3 – текущая температура перекачиваемой жидкости в подающем трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», °C; τ_2 – текущая температура перекачиваемой жидкости в обратном трубопроводе системы «отопление, вентиляция и кондиционирование», °C; $t_{\text{в}}$ – средняя расчетная температура внутреннего воздуха помещений здания, °C; Δt – расчетный температурный напор в нагревательных приборах отопительной системы, °C; $\bar{Q}_0$ – относительная нагрузка системы «отопление, вентиляция и кондиционирование»; $t_{\text{нх}}$ – температура наружного воздуха в наиболее холодный период года, °C; $\delta\tau$ – расчетный температурный перепад в сети, °C; Θ – расчетный температурный перепад в отопительной системе, °C; $\bar{G}_0$ – относительный расход воды на систему «отопление, вентиляция и кондиционирование»:

- при качественном регулировании $\bar{G}_0=1$,
- при количественном регулировании

$$\bar{G}_0 = \frac{\bar{Q}_0}{1 + \frac{\Delta t}{\delta\tau - 0,5 \cdot \Theta} \cdot (1 - \bar{Q}_0^{0,8})}, \quad (8)$$

- при качественно-количественном регулировании

$$\bar{G}_0 = \bar{Q}_0^{0,33}. \quad (9)$$

На основании уравнений (1) – (9), свода правил «Тепловая защита зданий» [5] и методики [6] разработано программное обеспечение «Определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания» [7].

Расход отпускаемой тепловой энергии зданию на систему «отопление, вентиляция и кондиционирование» $Q_{\text{от}}$ (Вт) можно записать из баланса теплового потребления [5 – 9] в виде:

$$Q_{\text{от}} = G_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot (\tau_3 - \tau_2) = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{ч}} + Q_{\text{ок}} + Q_{\text{дв}} + Q_{\text{пол}} + Q_{\text{инф}} + Q_{\text{тс}} - Q_{\text{с}} - Q_{\text{т}}, \quad (10)$$

где $G_{\text{в}}$ – расход перекачиваемой жидкости в системе «отопление, вентиляция и кондиционирование», м³/с; $Q_{\text{ч}}$ – тепловые потери через чердачные перекрытия (покрытия), Вт; $Q_{\text{ок}}$ – тепловые потери через светопрозрачные конструкции (оконные блоки, зенитные фонари и витражи), Вт; $Q_{\text{дв}}$ – тепловые потери через наружные двери и ворота, Вт; $Q_{\text{пол}}$ – тепловые потери через пол, Вт; $Q_{\text{инф}}$ – тепловые потери за счет инфильтрации и вентиляции, Вт; $Q_{\text{тс}}$ – тепловые потери трубопроводной системой «отопление, вентиляция и кондиционирование», проходящей через неотапливаемые помещения, Вт; $Q_{\text{с}}$ – тепловые поступления от солнечной радиации, Вт; $Q_{\text{т}}$ – бытовые тепловыделения в здании, Вт.

Годовой расход электрической энергии на привод насосного оборудования при регулировании отпускаемой тепловой энергии (Вт·ч/год) [8]

$$\Xi_{\text{н}} = Z_{\text{н}} \cdot N_{\text{н}}^{\text{раб}} \cdot P_{\text{н}}, \quad (11)$$

где P_n – средняя мощность работы насосного оборудования, Вт,

$$P_n = \frac{k \cdot Q_{от} \cdot H_n \cdot \gamma}{\rho_n \cdot C_n \cdot (\tau_3 - \tau_2) \cdot \eta_n \cdot \eta_p} . \quad (12)$$

Проведение численных исследований проводилось при реконструкции производственного здания с административно-бытовой вставкой Западно-Сибирской дирекции по тепловодоснабжению ОАО «РЖД», г. Омск, станция Омск-Пассажирский, Нобелевский тупик, 4 [10 – 12]. По проекту реконструкции здание состоит из технологических залов с расположенным в нем оборудованием и административно-бытовой вставкой. Административно-бытовой блок отделен от котельных залов существующими кирпичными стенами, дверями.

Отопление котельного зала осуществляется с помощью отопительно-воздушных агрегатов и за счет тепловых избытков от основного оборудования.

Система отопления административно-бытовой вставки двухтрубная с нижней разводкой, отпуск тепловой энергии осуществляется насосом (рекомендовано с частотным регулированием), а теплоотдача нагревательных приборов производится с помощью термостатических клапанов. Удаление воздуха осуществляется воздухоотводчиками в отопительных приборах и в верхних точках системы. Для балансировки системы отопления применяются балансировочные клапаны, установленные на каждом стояке системы отопления. Тепло в систему «отопление, вентиляция» поступает от котлоагрегатов с расчетным температурным графиком 95/70 °С. Средняя годовая стоимость тепловой энергии 0,3 р./МДж и средняя годовая стоимость электрической энергии потребления перекачивающим насосом 3,2 р./(кВт·ч) [12].

Система вентиляции котельного зала – приточная механическая вентиляция из расчета трехкратного воздухообмена и компенсации воздуха, идущего на горение, забираемого из помещения котельной. В помещениях административно-бытовой вставки предусмотрена естественная система вентиляции.

Кондиционирование предусматривает установку настенных моделей кондиционеров, что позволяет индивидуально регулировать параметры микроклимата помещений в рамках общего режима работы на охлаждение.

Наружные стены по проекту реконструкции административно-бытовой вставки [12]: кирпичная кладка толщиной 0,51 м с коэффициентом теплопроводности 0,5 Вт/(м·°С); рекомендованы теплоизоляционные сэндвич-панели из минеральных плит на основе базальтового волокна – 0,1 м, 0,044 Вт/(м·°С); ветрозащитная мембрана – 0,0015 м, 0,4 Вт/(м·°С).

Численные исследования влияния изменения толщины теплоизоляционных сэндвич-панелей из минеральных плит на основе базальтового волокна с коэффициентом теплопроводности 0,044 Вт/(м·°С) и стоимостью 1190 р./м³ [11] на технико-экономическую эффективность, показали: уменьшение затрат $I_{ст}$ при количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии с оптимальной толщиной 0,096 м (рисунок 2); снижение тепловых потерь через наружные стены $Q_{ст}$, расхода тепловой энергии здания на систему «отопление, вентиляция» $Q_{от}$ (рисунок 3) и электрической энергии на перекачиваемую жидкость в системе «отопление, вентиляция» $\mathcal{E}_n$ (рисунок 4).

На рисунках 2 – 4 приняты следующие обозначения:

$I_{ст}^{кач}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен здания при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, р./год;

$I_{ст}^{кач-кол}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен здания при качественно-количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, р./год;

$I_{ст}^{кол}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен при количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, р./год;

$\mathcal{E}_n^{кач}$ – расчетный годовой расход электрической энергии на привод насосного оборудования при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, Вт·ч/год;

$\mathcal{E}_n^{\text{кач-кол}}$ – расчетный годовой расход электрической энергии на привод насосного оборудования при качественно-количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, Вт·ч/год;

$\mathcal{E}_n^{\text{кол}}$ – расчетный годовой расход электрической энергии на привод насосного оборудования при количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, Вт·ч/год.

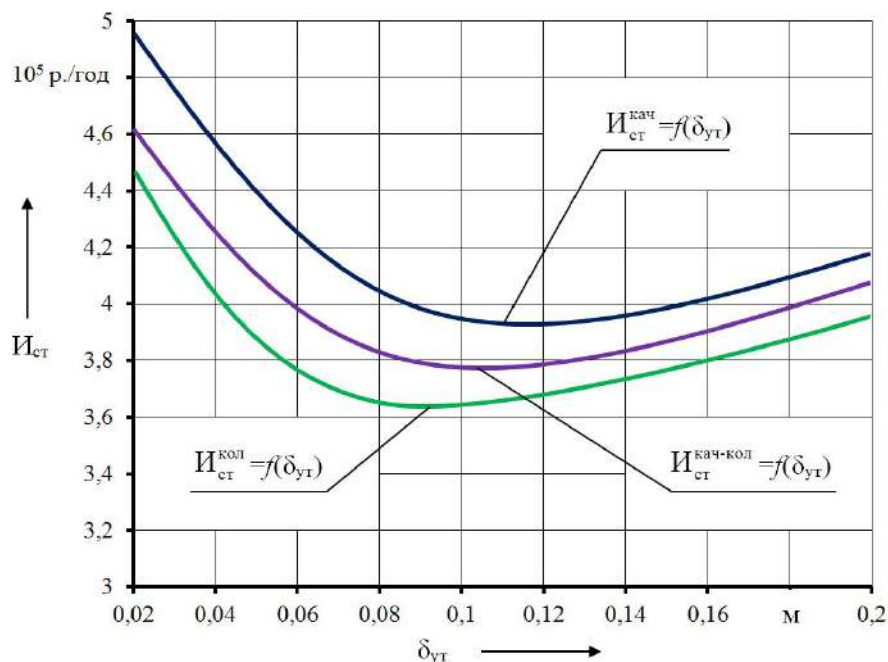


Рисунок 2 – Зависимости $I_{\text{ст}}^{\text{кач}}$, $I_{\text{ст}}^{\text{кач-кол}}$ и $I_{\text{ст}}^{\text{кол}}$ от $\delta_{\text{ут}}$

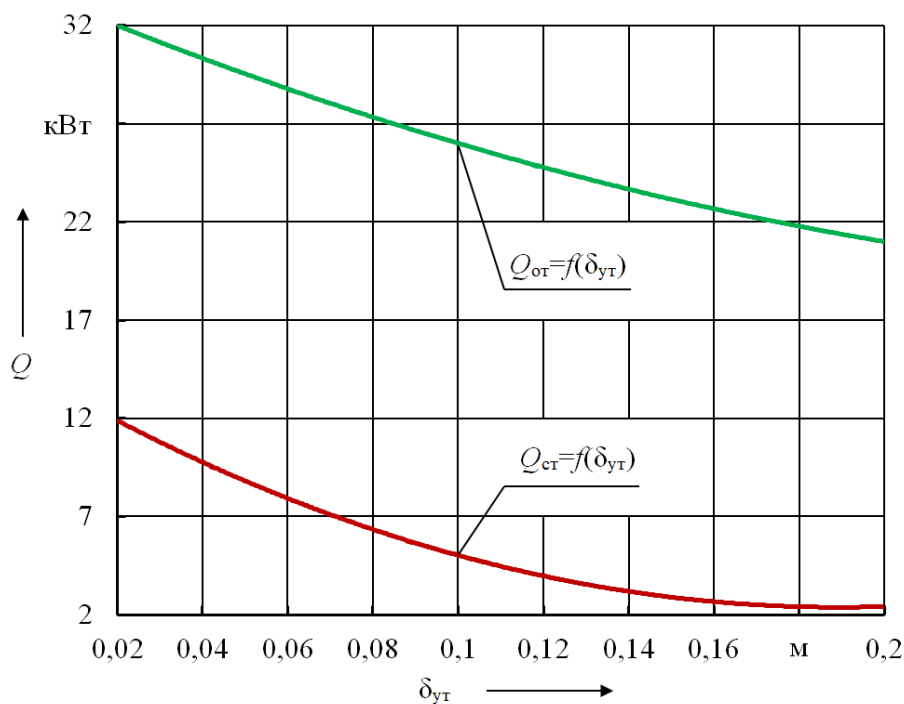


Рисунок 3 – Зависимости $Q_{\text{ст}}$, $Q_{\text{от}}$ от $\delta_{\text{ут}}$

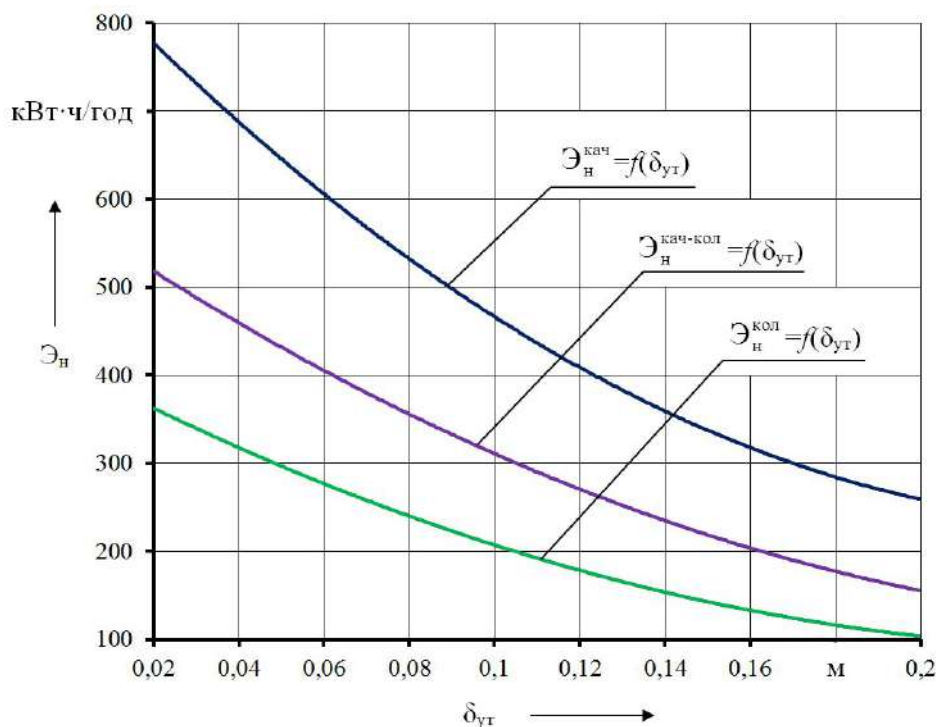


Рисунок 4 – Зависимости $\mathcal{E}_n^{\text{кач}}$, $\mathcal{E}_n^{\text{кач-кол}}$ и $\mathcal{E}_n^{\text{кол}}$ от $\delta_{\text{ут}}$

Результаты численного исследования (см. рисунки 2 – 4) подтверждают рациональность применения технико-экономической оптимизации утепления стен здания: получен минимум приведенных затрат при снижении расхода тепловых потерь через ограждающие конструкции, потребления тепловой и электрической энергии на систему «отопление, вентиляция». Рекомендации были приняты в проект реконструкции производственного здания с административно-бытовой вставкой Западно-Сибирской дирекции по тепловодоснабжению ОАО «РЖД».

Проведенные исследования свидетельствуют о целесообразности использования предложенных разработок, способствующих определению оптимальной толщины утепления теплоизоляционным материалом стен объектов, нахождению минимальных приведенных затрат, выгодному выбору способа регулирования отпускаемой тепловой энергии и направлены на повышение класса энергоэффективности зданий.

Список литературы

1. Hong, T. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings / Tianzhen Hong, Le Yang, David Hill, et al. // Applied Energy. – 2014. – № 126. – P. 90 – 106.
2. Оптимизация затрат при проектировании и эксплуатации тепловых схем и систем теплоснабжения потребителей [Текст] / В. Р. Ведрученко, П. В. Петров и др. // Промышленная энергетика / ЗАО «НТФ «Энергопрогресс». – М. – 2013. – № 2(143). – С. 23 – 27. Режим доступа: <http://www.promen.energy-journals.ru/index.php/PROMEN/article/view/168/112> (дата обращения: 04.12.2019).
3. Определение оптимальной толщины тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий при капитальном ремонте [Текст] / В. Р. Ведрученко, Е. М. Резанов и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2015. – № 3(143). – С. 254 – 258. Режим доступа: http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2015/3_143_2015/201-258tehn_7.pdf (дата обращения: 04.12.2019).
4. Cheng Y., Nin J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation // Building and Environment. – 2012. – Vol. 47. – P. 13 – 22.

5. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий [Электронный ресурс]. – М.: Стандартинформ, 2012. – 96 с. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения: 04.12.2019).

6. Методика эффективного расчета утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий при проведении капитального ремонта [Электронный ресурс] / Е. М. Резанов, П. В. Петров и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2016. – № 6 (150). – С. 109 – 113. Режим доступа: http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2016/6_150_2016/64-113elektro.pdf (Дата обращения: 04.12.2019).

7. Свидет. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2016616691 Российская Федерация. Определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания [Текст] / заявитель и патентообладатель П. В. Петров. – № 2016614064; заявл. 20.04.2016; опубл. 20.07.2016. Режим доступа: <https://www1.fips.ru/Archive/EVM/2016/2016.07.20/DOC/RUNW/000/002/016/616/691/DOCUMENT.PDF> (дата обращения: 04.12.2019).

8. Шилкин, Н. В. Методы повышения тепловой эффективности зданий и их экономическая оценка [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.23.03 / Шилкин Николай Васильевич. – Москва, 2007. – 174 с.

9. Фролова, А. А. Выбор теплозащиты офисных зданий с учетом энергетических и экономических показателей систем климатизации [Электронный ресурс]: Дис... канд. техн. наук: 05.23.03 / Фролова Анастасия Анатольевна. – Москва, 2017. – 147 с. Режим доступа: <https://docplayer.ru/75068255-Frolova-anastasiya-anatolevna-vybor-teplozashchity-ofisnyh-zdaniy-s-uchetom-energeticheskikh-i-ekonomicheskikh-pokazateley-sistem-klimatizacii.html> (дата обращения: 04.12.2019).

10. Реконструкция котельной ТЧ станции Омск-Пассажирский. Западно-Сибирская дирекция по тепловодоснабжению [Текст] / Проектная документация: 154-14-05-03-ИОС4 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха, тепловые сети» / АО «НПП «Омэнергопром»: разработали Р. В. Корепов и др., согласовал Е. А. Евтушенко. – Омск, 2015. – 17 с.

11. Реконструкция котельной ТЧ станции Омск-Пассажирский Западно-Сибирская дирекция по тепловодоснабжению [Текст] / Проектная документация: 154-14-05-03-СД «Смета на строительство объектов капитального строительства» // АО «НПП «Омэнергопром»: разработали Р. В. Корепов и др., согласовал Е. А. Евтушенко. – Омск, 2015. – 62 с.

12. Реконструкция котельной ТЧ станции Омск-Пассажирский. Западно-Сибирская дирекция по тепловодоснабжению [Текст] / Проектная документация: 154-14-05-03-ЭЭ «Мероприятия по обеспечению соблюдения требований энергетической эффективности и требований оснащенности зданий, строений и сооружений приборами учета используемых энергетических ресурсов» // АО «НПП «Омэнергопром»: разработали Р. В. Корепов и др., согласовал Е. А. Евтушенко. – Омск, 2015. – 39 с.

References

1. Hong, T. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings / Tianzhen Hong, Le Yang, David Hill, et al. // *Applied Energy*. – 2014. – № 126. – P. 90 – 106.

2. Vedruchenko V. R., Petrov P. V. et al. Cost optimization in the design and operation of thermal circuits and heat supply systems for consumers [Optimizaciya zatrat pri proektirovanii i e'kspluatcii teplovy'x sxem i sistem teplosnabzheniya potrebitelej]. *Promy'shlennaya e'nergetika – Industrial power engineering*, 2013, no. 2 (143), pp. 23 – 27. Access mode: <http://www.promen.energy-journals.ru/index.php/PROMEN/article/view/168/112> (Revised: 04.12.2019).

3. Vedruchenko V. R., Rezanov E. M. et al. Determination of the optimum thickness of the thermal insulation of the building envelope during overhaul [Opredelenie optimal'noj tolshhiny' teplovoj izolyacii ograzhdayushhix konstrukcij zdaniy pri kapital'nom remonte]. *Omskij nauchny'j vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2015. no. 3 (143). pp. 254 – 258. Access mode: http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2015/3_143_2015/201-258tehn_7.pdf (Revised: 04.12.2019).

4. Cheng Y., Nin J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation // Building and Environment, 2012, Vol. 47, P. 13 – 22.
5. *Teplovaya zashhita zdaniy* (Thermal protection of buildings, SP 50.13330.2012), Moscow, Standartinform, 2012, 96 p. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200095525> (Revised: 04.12.2019).
6. Rezanov E. M., Petrov P. V. Methodology for the effective calculation of insulation of external walling of buildings during major repairs [Metodika e'ffektivnogo rascheta utepleniya naruzhny'x ograzhdayushhix konstrukcij sten zdaniy pri provedenii kapital'nogo remonta]. *Omskij nauchny'j vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2016, no. 6 (150), pp. 109 – 113. Access mode: http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2016/6_150_2016/64-113elektro.pdf (Revised: 04.12.2019).
7. Petrov P. M. *Svidet. o gos. reg. programmy` RU № 2016616691*, 20.07.2016. Access mode: <https://www1.fips.ru/Archive/EVM/2016/2016.07.20/DOC/RUNW/000/002/016/616/691/DOCUM ENT.PDF> (Revised: 04.12.2019).
8. Shilkin N. V. *Metody` povы'sheniya teplovoj e'ffektivnosti zdaniy i ix e'konomicheskaya ocenka* (Methods for increasing the thermal efficiency of buildings and their economic evaluation). Doctor's thesis, Moscow, 2007, 174 p.
9. Frolova A. A. *Vy`bor teplozashhity` ofisny'x zdaniy s uchetom e`nergeticheskix i e`konomicheskix pokazatelej sistem klimatizacii* (The choice of thermal protection for office buildings, taking into account the energy and economic indicators of air conditioning systems). Doctor's thesis, Moscow, 2017, 174 p. Access mode: <https://docplayer.ru/75068255-Frolova-anastasiya-anatolevna-vybor-teplozashchity-ofisnyh-zdaniy-s-uchetom-energeticheskix-i-ekonomicheskix-pokazatelej-sistem-klimatizacii.html> (Revised: 04.12.2019).
10. *Rekonstrukciya kotel`noj TCh stancii Omsk-Passazhirskij Zapadno-Sibirskaya direkcija po teplovodosnabzheniyu* [Reconstruction of the boiler room of the PM station Omsk-Passenger West-Siberian Directorate for Heat Supply] / Proektnaya dokumentaciya: 154-14-05-03-IOS4 «Otoplenie, ventilyaciya i kondicionirovanie vozduxa, teplovy'e seti» // AO «NPP «Ome`nergoprom»: razrabotal R. V. Korepov i dr., soglasoval E. A. Evtushenko. Omsk, 2015, 17 p.
11. *Rekonstrukciya kotel`noj TCh stancii Omsk-Passazhirskij Zapadno-Sibirskaya direkcija po teplovodosnabzheniyu* [Reconstruction of the boiler room of the PM station Omsk-Passenger West-Siberian Directorate for Heat Supply] / Proektnaya dokumentaciya: 154-14-05-03-SD «Smeta na stroitel'stvo ob`ektov kapital'nogo stroitel'stva» // AO «NPP «Ome`nergoprom»: razrabotal R. V. Korepov i dr., soglasoval E. A. Evtushenko. Omsk, 2015, 62 p.
12. *Rekonstrukciya kotel`noj TCh stancii Omsk-Passazhirskij Zapadno-Sibirskaya direkcija po teplovodosnabzheniyu* [Reconstruction of the boiler room of the PM station Omsk-Passenger West-Siberian Directorate for Heat Supply] / Proektnaya dokumentaciya: 154-14-05-03-E`E` «Meropriyatiya po obespecheniyu soblyudeniya trebovanij e`nergeticheskoy e'ffektivnosti i trebovanij osnashhennosti zdaniy, stroenij i sooruzhenij priborami ucheta ispol'zuemy'x e`nergeticheskix resursov» // AO «NPP «Ome`nergoprom»: razrabotal R. V. Korepov i dr., soglasoval E. A. Evtushenko. Omsk, 2015, 39 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Резанов Евгений Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: rezanovel@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rezanov Evgeniy Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. of Engineering Sciences, assistant professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: rezanovel@mail.ru

Петров Павел Владимирович

Общество с ограниченной ответственностью
«Сибирская проектная компания» (ООО «СПК»).

Карла Либкнехта ул., д. 35, г. Омск, 644099,
Российская Федерация.

Заместитель директора по техническим вопросам
ООО «СПК».

Petrov Pavel Vladimirovich

Limited Liability Company «Siberian Design Com-
pany» (LLC «SPK»).

35, Karl Liebknecht st., Omsk, 644099, the Russian
Federation.

Deputy Director for Technical Issues, LLC SPK.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Резанов, Е. М. Повышение эффективности утеп-
ления стен зданий с учетом регулирования отпускаемой
тепловой энергии [Текст] / Е. М. Резанов, П. В. Петров // *Известия Транссиба* / Омский гос. ун-т путей сообще-
ния. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 77 – 86.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Rezanov E. M., Petrov P. V. Increasing the efficiency
of warming of building walls taking into account the reg-
ulation of the released heat energy. *Journal of Transsib
Railway Studies*, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 77 – 86
(In Russian).

УДК 621.577

О. В. Хороших, А. П. Стариков, И. И. Кадцын

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Аннотация. Работа посвящена исследованию систем теплообеспечения изолированных объектов стан-
ций ОАО «РЖД», подбору наиболее энергоэффективного и экономически целесообразного способа теплообес-
печения. Показана конкурентоспособность нетрадиционных систем теплообеспечения, таких как геотер-
мальное отопление. На основе экспериментальных данных получены экономические показатели работы су-
ществующих теплоисточников и рассчитаны эксплуатационные затраты для альтернативных вариантов
теплообеспечения. Определена конфигурация теплоисточника, позволяющая повысить технико-экономические
показатели за счет внедрения возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: тепловой насос, геотермальное отопление, энергоэффективность, энергосбережение,
коэффициент трансформации теплового насоса, грунтовый тепловой насос.

Olga V. Khoroshikh, Alexander P. Starikov, Ivan I. Kadcyn

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

STUDY OF POSSIBILITY OF IMPROVEMENT OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF HEAT SUPPLY OF INDIVIDUAL CONSUMERS

Abstract. The work is devoted to the study of heat supply systems of isolated facilities of Russian Railways JSC
stations, selection of the most energy-efficient and economically feasible method of heat supply. The competitiveness of
non-traditional heat systems such as geothermal heating is shown. On the basis of experimental data, economic indica-
tors of operation of existing heat sources are obtained and operating costs for alternative heat supply options are cal-
culated. The configuration of heat sources is determined, which allows increasing technical and economic indicators
due to the introduction of renewable energy sources.

Keywords: heat pump, geothermal heating, energy efficiency, energy conservation, the transformation ratio of the
heat pump, geothermal heat pump.

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов для теплообеспечения
объектов в условиях сибирского климата представляет собой одну из актуальных проблем.
Одним из перспективных путей решения данной проблемы является применение энергосбе-
регающих технологий и оборудования, использующих нетрадиционные возобновляемые ис-

точники энергии (НВИЭ) [1]. Применение систем теплообеспечения с использованием геотермального отопления в различных сферах может носить не только локальный технико-экономический эффект, но и стать инструментом повышения энергетической эффективности в масштабах крупных компаний. Основными преимуществами использования данных систем являются снижение эксплуатационных расходов, уменьшение себестоимости выработки тепловой энергии и локальное сокращение выбросов вредных веществ в окружающую среду.

На протяжении последних трех лет ОАО «РЖД» активно реализует программу энергосбережения. В результате удельная энергоемкость производственной деятельности компании снизилась на 25 % в основном за счет внедрения автоматизации, совершенствования систем тепло- и электроснабжения [7].

В настоящей работе рассматриваются и анализируются существующие вариации теплообеспечения станций ОАО «РЖД» в Сибирском федеральном округе. Для этого исследуем различные способы теплообеспечения отдельных изолированных объектов предприятий Западно-Сибирской железной дороги и выполним оценку целесообразности внедрения новых технических средств и технологий.

Цель работы: выполнить экономический и энергетический анализ существующих источников теплоснабжения; определить наиболее выгодный источник выработки тепловой энергии.

Рассмотрим отапливаемые здания (объекты хозяйственного назначения) на четырех станциях Западно-Сибирской железной дороги, расположенных в Омской области. Проведем анализ и сравнение годового уровня эксплуатационных затрат для следующих видов отопления:

- существующие системы теплоснабжения (котельные на жидком и твердом топливе);
- газовое отопление;
- электроотопление;
- геотермальное отопление на базе грунтового теплового насоса.

Основные критерии качества работы систем теплообеспечения:

- эффективность использования существующих источников;
- наличие выбросов, загрязняющих окружающую среду;
- надежность и безаварийность подача тепловой энергии;
- снижение себестоимости выработки тепловой энергии;
- снижения затрат на текущий и капитальный ремонт.

Оценку экономической эффективности выполним в соответствии с принятыми методиками [12, 13].

Данные по действующим системам отопления, расход натурального топлива и тепловая нагрузка указаны в таблице 1.

Два объекта из рассматриваемых имеют системы теплообеспечения на жидкотопливных дизельных котельных, два – на твердотопливных угольных котельных. В соответствии с тарифами на энергоресурсы от 1 марта 2017 и 2018 гг. были рассчитаны эксплуатационные затраты на каждую систему отопления. Отдельно отметим затраты на обслуживание котельных на угольном и дизельном топливе, относящиеся к фонду оплаты труда кочегаров, которые по каждому объекту за год составляют приблизительно 275 тыс. руб. в год, и соответственно по всем четырем станциям составят 1 098 тыс. руб. в год.

Использование существующих способов отопления технически, экономически и экологически неэффективно ввиду высоких эксплуатационных затрат на дизельное топливо, требований к хранению и доставке, высокого уровня выброса вредных веществ в продуктах горения. Для перевода станций на более экологичный и экономичный способ теплоснабжения рассмотрим газовые котельные, электроотопление и котельные на базе геотермального отопления.

Действующие системы теплоснабжения станций были оценены по имеющимся данным. Расчеты альтернативных способов были выполнены для газового теплоснабжения, электро-

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

отопления и систем на базе грунтовых тепловых насосов. Ввиду отсутствия данных о стоимости получения технических условий, стоимости прокладки газовой магистрали и данных о затратах на ремонт действующих систем в расчетах экономических показателей не брались следующие данные: первоначальные капиталовложения, затраты на ремонт действующих систем теплообеспечения. Основными критериями анализа являются уровень эксплуатационных затрат с учетом ежегодного роста цен на энергоресурсы и экологические показатели источника тепла.

В качестве нетрадиционных источников тепловой энергии рассматриваются многофункциональные грунтовые тепловые насосы типа «рассол – вода», позволяющие обеспечить отопление, вентиляцию, кондиционирование и горячее водоснабжение (ГВС). Эффективность работы тепловых насосов для теплоснабжения автономных потребителей показана в работах [4, 10, 11]. Анализ работы грунтовых тепловых насосов в условиях оптимального режима был выполнен в статьях [9 – 11]. Тепловые насосы серии DHP-R ECO со встроенными тэнами дополнительного нагрева при пиковых нагрузках продемонстрировали хорошие показатели работы и низкие эксплуатационные затраты в условиях Омского региона.

Таблица 1 – Исходные данные действующих систем теплообеспечения станций

№ п/п	Здания станций ОАО «РЖД»	Действующая котельная на станции									
		вид топлива	тепловая мощность, Гкал/ч	потребление тепла, Гкал/год	расчетная потребность в топливе т н. т.	фактическое потребление топлива, тн. т.	фонд оплаты труда, руб.	тариф 2017 г., руб./т	затраты на топливо за 2017-2018 отопитель- ный период, руб.	тариф 2018 г., руб./т	затраты на топливо за 2018 – 2019 отопи- тельный период, руб.
Станция 1											
1	Здание котельной	уголь	0,011	40,353	423,9	319	274560	2 500	1 072 060	2 500	1 072 060
2	Дефектоскопия		0,015	53,626							
3	Мастерские		0,054	183,037							
4	Гараж		0,075	104,181							
5	Гараж депо		0,030	99,486							
6	Цех смотрителя		0,115	389,553							
7	Гараж		0,040	107,731							
8	Административ- ное		0,055	188,351							
Итого			0,395	1166,318	423,9	319	274560	2500	1072060	2500	1072060
Станция 2											
1	Вокзал	дизельное	0,108	386	47,1	50,1	274560	37 000	2 128 260	45 200	2 539 080
Станция 3											
1	Вокзал	дизельное	0,081	268	32,3	21,3	274560	37 000	1 062 660	45 200	1 237 320
Станция 4											
1	Гараж	уголь	0,060	166,174	168,5	140	274560	2 500	624 560	2 500	624 560
2	Дом связи		0,084	297,362							
Итого			0,144	463,537	168,5	140	274560	2 500	624 560	2 500	624 560

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

Эффектообразующие факторы от внедрения тепловых насосов:

снижение себестоимости тепловой энергии за счет использования низкопотенциального тепла грунта;

устранение перетопов за счет автоматического регулирования температурных параметров помещения в зависимости от наружной температуры;

сокращение расходов на эксплуатацию (трудовых и материальных) по сравнению с существующими котельными.

Для получения достоверных расчетных значений эксплуатационных затрат теплового насоса введем понятие усредненного коэффициента теплового насоса – $K_{т.н.}$. Данный коэффициент получим путем обработки статистических данных эксплуатационных затрат действующих систем теплоснабжения на базе грунтовых тепловых насосов в Томской и Омской областях. $K_{т.н.}$ – коэффициент потребления электроэнергии тепловым насосом мощностью 1 кВт за 1 ч работы. Необходимость ввода $K_{т.н.}$ обусловлена опытным путем, поскольку рассмотренные тепловые насосы за период отопительного сезона большее время используют менее 50 % от своей номинальной мощности. И значение $K_{т.н.}$ составит 0,368. Тепловой насос работает в автоматизированном режиме только на поддержание заданной температуры в обратной подаче отопительного контура и (или) заданного микроклимата отапливаемого помещения. Расчетные значения показателей работы систем на базе грунтовых тепловых насосов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные данные систем теплообеспечения на базе грунтовых тепловых насосов

№, п/п	Станции ОАО «РЖД»	Тепловой насос								
		мощность установки, Гкал/ч	годовое потреб- ление, Гкал	тип теплого на- со- са	стоимость установки, руб.	тепловая мощность, кВт	потребляемая мощ- ность, кВт	эксплуатационные затраты, Квт·ч	Годовые эксплуа- тационные затра- ты, руб.	
									2017 – 2018	2018 – 2019
Станция 1										
1	Здание котельной	0,011	40,353	грунто- вый	872 757	16,5	3,84	7 421,96	21 598	21 895
2	Дефектоскопия	0,015	53,626		1 138 733	20	4,76	9 210,51	26 803	27 171
3	Мастерские	0,054	183,037		4 211 456	80	19,20	37 136,79	108 068	109 554
4	Гараж	0,075	104,181		5 855 080	104	21,40	41 392,05	120 451	122 107
5	Гараж депо	0,030	99,486		2 378 824	42	9,60	18 568,40	54 034	54 777
6	Цех смотрителя	0,115	389,553		8 963 132	160	38,40	74 273,59	216 136	219 107
7	Гараж	0,040	107,731		3 137 149	60	15,40	29 786,80	86 680	87 871
8	Административное	0,055	188,351		4 309 625	80	19,20	37 136,79	108 068	109 554
Итого		0,395	1 166,318		30 866 756	562,5	131,80	254 926,90	741 837	752 034
Станция 2										
1	Вокзал	0,108	386,000	грун- товый	8 440 589	150	34,6	66 923,60	194 747,67	197 425
Станция 3										
1	Вокзал	0,081	268,000	грун- товый	6 330 442	115	26,9	29 097,21	84 672,88	85 837
Станция 4										
1	Гараж	0,060	166,174	грун- товый	4 668 399	72	17,3	33 461,80	97 373,83	98 712
2	Дом связи	0,084	297,362		6 590 008	120	28,8	55 705,19	162 102,10	164 330
Итого:		0,144	463,537		11 258 407	192	46,1	89 166,99	259 476	263 043

Выполнены расчеты первоначальных капиталовложений на установку геотермального теплообеспечения объектов и эксплуатационных затрат с учетом коэффициента усреднения. Затраты на сокращение теплопотерь объектов, а именно утепление зданий, не включены в стоимость, поскольку данные меры являются необходимостью для достижения энергоэффективности объектов независимо от источников теплообеспечения.

В таблице 3 отображены данные, полученные в ходе эксперимента, и расчетные данные эксплуатационных затрат действующих и альтернативных способов теплообеспечения для каждого из исследуемых объектов: газовое отопление, электроотопление, геотермальное отопление.

Таблица 3 – Годовые эксплуатационные затраты

№, п/п	Объект	Действующий способ отопления, руб.	Газовое отопление, руб.	Тепловой насос грунтовый, руб.	Электроотопление, руб.
1	Станция 1	1 072 060	1 659 085	930 573	4 125 219
2	Станция 2	2 539 080	326 514	307 979	1 365 266
3	Станция 3	1 237 320	210 754	191 556	947 905
4	Станция 4	624 560	545 560	369 843	1 639 511
Итого		5 473 020	2 741 913	1 799 950	8 077 901

По сравнению с существующими способами теплообеспечения объектов суммарно по всем четырем станциям получили следующие показатели:

газовое отопление позволит снизить эксплуатационные расходы минимум на 50 % в год;

геотермальное отопление позволит снизить эксплуатационные расходы минимум на 67,1 % в год;

электроотопление по эксплуатационным затратам обойдется дороже действующих способов на 47,6 % в год.

Для станции 1 наиболее низкими эксплуатационными затратами является вариант с геотермальным отоплением, для станций 2 и 3 – любой из предложенных альтернативных способов, для станции 4 целесообразно рассмотреть геотермальное отопление. При условии действующих тарифов на энергоресурсы, экономия эксплуатационных затрат в случае перевода на газовое отопление всех четырех станций составит 2 731 тыс. руб. в год, в случае внедрения систем отопления на базе грунтовых тепловых насосов составит 3 673 тыс. руб. ежегодно. При переводе системы на газовое отопление ежегодная экономия составит 2 731 тыс. рублей. Электроотопление является самым дорогостоящим способом теплообеспечения объектов. Отметим, что сроки окупаемости геотермального отопления достаточно велики по сравнению с газовыми котельными. Срок окупаемости суммарно по всем станциям составит порядка 15,5 лет: станция 1 – более 25 лет, станция 2 – 4 года, станция 3 – 6 лет, станция 4 – более 25 лет.

Из расчетов эксплуатационных затрат по разным видам энергоисточников – газ, уголь, дизельное топливо, электроотопление и геотермальное отопление – для четырех объектов ОАО «РЖД» отметим, что геотермальное отопление на базе тепловых насосов грунтового исполнения в настоящее время является самым экономичным способом, но самым дорогостоящим по первоначальным капиталовложениям.

На рисунке 1 в виде гистограмм изображены данные годовых эксплуатационных затрат действующих и альтернативных способов теплообеспечения для каждой станции отдельно.

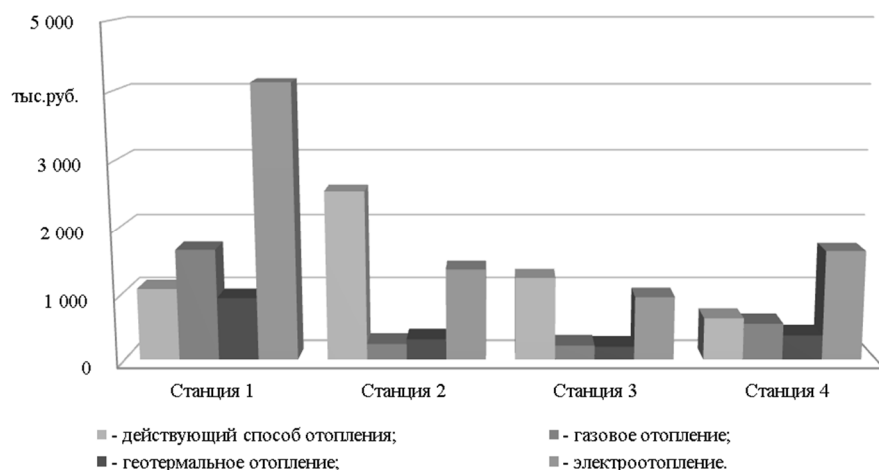


Рисунок 1 – Сравнение годовых эксплуатационных затрат различных способов теплообеспечения

Рассмотрим показатели эксплуатационных затрат в перспективе на 10 лет с учетом ежегодного удорожания энергоресурсов для действующих и альтернативных способов теплообеспечения по каждой станции отдельно. Уровень ежегодного удорожания газа составляет минимум 3,7 %, электроэнергии – в среднем 5,5 %, угля и дизельного топлива – на 10% ежегодно. Графики эксплуатационных затрат изображены на рисунках 2 – 5 по четырем станциям соответственно.

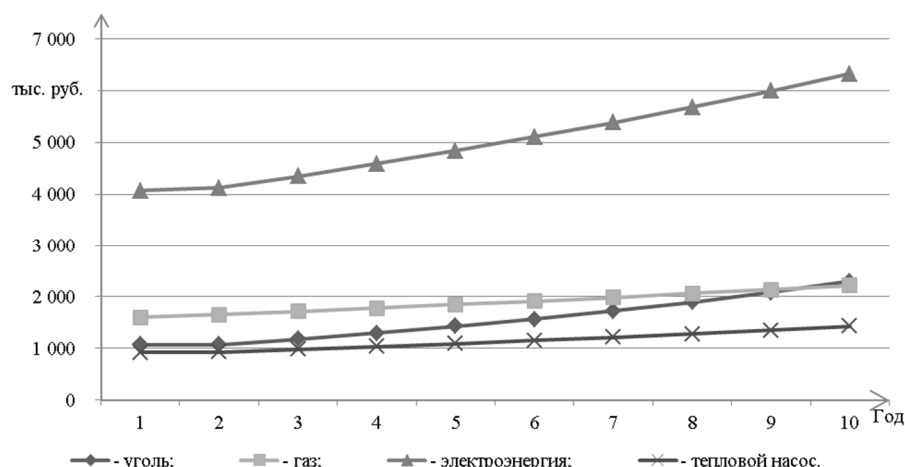


Рисунок 2 – Уровень эксплуатационных затрат на ближайшие 10 лет станции 1

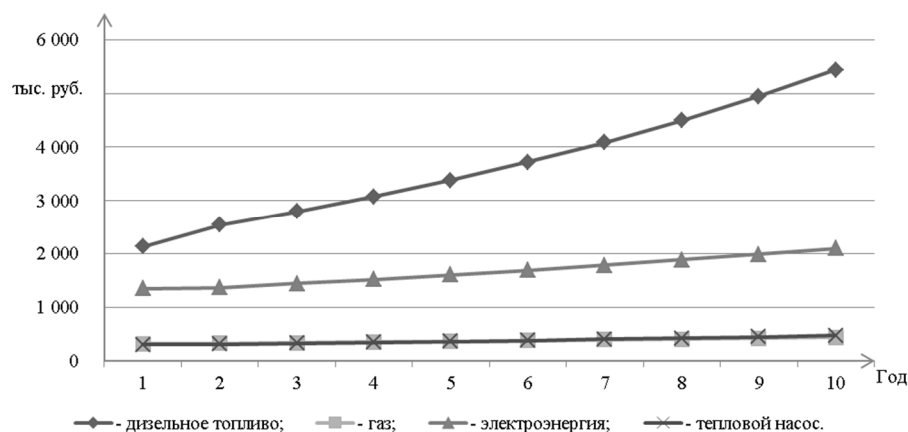


Рисунок 3 – Уровень эксплуатационных затрат на ближайшие 10 лет станции 2

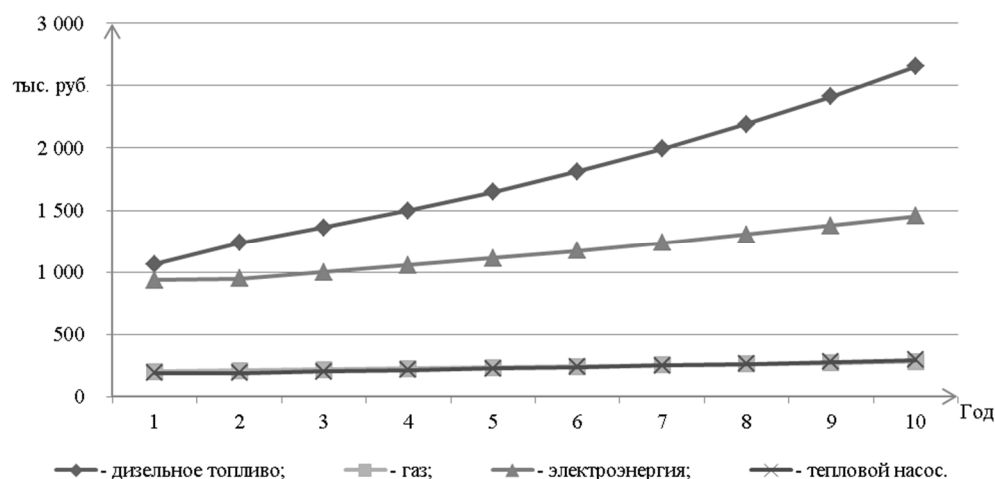


Рисунок 4 – Уровень эксплуатационных затрат на ближайшие 10 лет станции 3

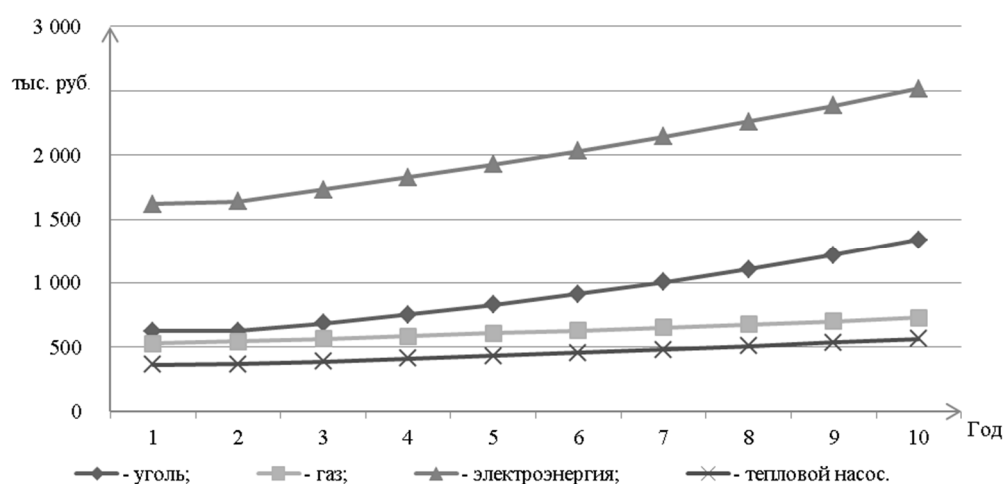


Рисунок 5 – Уровень эксплуатационных затрат на ближайшие 10 лет станции 4

В перспективе на ближайшие 10 лет с учетом ежегодного удорожания энергоносителей использование природного газа в качестве топлива для индивидуальных систем отопления будет экономичнее, поскольку ежегодный рост цены на газовое топливо всего 3,7 % по сравнению с электроэнергией – 5,5 %.

В зависимости от индивидуальных условий поставки газа и электроэнергии с учетом технической возможности подключения и удаленности точки доступа к сетям использование геотермальных тепловых насосов может стать самым дешевым способом отопления. Отметим, что первоначальные капиталовложения на установку геотермального отопления в среднем составляет 56 тыс. руб. на 1 кВт тепловой мощности. Первоначальные капиталовложения для геотермального отопления можно снизить на 30 – 45 % за счет ввода бинарных режимов работы грунтовых тепловых насосов [9]. Также существенного снижения расходов на электроэнергию (до 25 %) при геотермальном отоплении можно добиться вводом двух- или трехтарифных счетчиков электроэнергии с учетом более интенсивной работы отопительных приборов в ночное время.

На основании проведенного анализа по экспериментальным объектам можно сделать следующие выводы:

- 1) действующие системы теплообеспечения железнодорожных станций и других обособленных объектов являются экономически малоэффективными;
- 2) необходимость внедрения технологий снижения вредных выбросов в атмосферу при сжигании топлива существенно снизит экономическую эффективность котельных;
- 3) наиболее выгодной системой отопления является газовая;

4) при отсутствии возможности централизованного газоснабжения по техническим либо экономическим причинам наиболее выгодной системой отопления становится геотермальная с использованием теплового насоса.

Из рассмотренных технико-экономических характеристик существующих источников теплоснабжения становится очевидно, что системы отопления на основе геотермальных тепловых насосов являются конкурентоспособными по сравнению с традиционными системами отопления. А учитывая большой ресурс современной холодильной техники и значительную степень автоматизации, широкие возможности контроля и управления рабочими процессами, в том числе дистанционно, можно утверждать, что использование геотермальных тепловых насосов для теплообеспечения индивидуальных потребителей перспективно.

Список литературы

1. Велькин, К. Л. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах: Монография [Текст] / В. И. Велькин / Уральский федеральный ун-т. – Екатеринбург, 2015. – 226 с.
2. Виссарионов, В. И. Методика расчета энергетического комплекса для тепло- и электроснабжения автономного потребителя на базе возобновляемых источников энергии [Текст] / В. И. Виссарионов, А. Н. Дорошин // Вестник МЭИ. – МЭИ. – М. – 2012. – № 5. С. 52 – 58.
3. Гомелаури, А. И. Эффективность внедрения теплонасосных установок [Текст] / А. И. Гомелаури, О. З. Визиришвили // Теплоэнергетика. – 1986 – № 11. – С. 28 – 30.
4. Доброхотов, В. И. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Проблемы и перспективы [Текст] / В. И. Доброхотов, Э. Э. Шпильрайн // Теплоэнергетика. – 1996. – №5. – С. 2 – 9.
5. Жидович, И. С. Системный подход к оценке эффективности тепловых насосов [Текст] / И. С. Жидович // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 4 (20). – С. 53 – 55.
6. Малая энергетика и нетрадиционные источники энергии: их роль и место в энергетике Сибири в ближайшие годы и на перспективу [Текст] / В. Н. Пармон, А. П. Бурдукови др. // Малая энергетика. – 1994. – Т. 38. – № 3. – С.
7. Программа энергосбережения и повышение энергетической эффективности ОАО «РЖД» на 2016 – 2018 годы. – М., 2016.
8. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника [Текст]: Справочник Под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – Кн. 4. – 588 с.
9. Хороших О.В. Определение режимов наиболее эффективной работы тепловых насосов в условиях омского региона [Текст] / О. В. Хороших, А. П. Стариков // Повышение энергоэффективности объектов энергетики и систем теплоснабжения: Материалы всерос. науч.-техн. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 6 – 11.
10. Хороших, О. В. Повышение энергоэффективности объектов энергетики и систем теплоснабжения [Текст] / О. В. Хороших, А. П. Стариков, А. Н. Громов // Повышение эффективности объектов теплоэнергетики и систем теплоснабжения: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 29, 30.
11. Хороших, О. В. Особенности применения тепловых насосов в Западно-Сибирском регионе [Текст] / О. В. Хороших, А. П. Стариков // Повышение эффективности объектов теплоэнергетики и систем теплоснабжения: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 213 – 220.
12. Методические рекомендации по расчету экономической эффективности новой техники и технологий, объектов интеллектуальной собственности и рационализаторских предложений (утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2538р от 28.11.2008г.). – М., 2008.
13. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов (утв. Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике № ВК 477 от 21.06.1999 г.). – М., 1999.

References

1. Velkin K. L. *Metodologiya rascheta kompleksny'x sistem VIE` dlya ispol'zovaniya na avtonomny'x ob`ektax: Monografiya* (Methodology for calculating complex renewable energy systems for use on autonomous objects: Monograph). Yekaterinburg: UrFU, 2015, 226 p.
2. Vissarionov V. I., Doroshin A. N. The methodology for calculating the energy complex for heat and power supply of an autonomous consumer based on renewable energy sources [Metodika rascheta e`nergeticheskogo kompleksa dlya teplo- i e`lektrosnabzheniya avtonomnogo potrebitelya na baze vozobnovlyayemy'x istochnikov e`nergii]. *Vestnik MÈI – Vestnik MPEI*, 2012, no. 5, pp. 52 – 58.
3. Gomelauri A. I., Vizirishvili O. Z. The effectiveness of the implementation of heat pump installations [E`ffektivnost` vnedreniya teplonasosny'x ustanovok]. *Teploènergetika – Thermal Engineering*, 1986, no. 11, pp. 28 – 30.
4. Dobrokhoto V. I., Shpilrain E. E. The effectiveness of the implementation of heat pump installations [Netradicionny'e vozobnovlyayemy'e istochniki e`nergii. Problemy` i perspektivy`]. *Teploènergetika – Thermal Engineering*, 1986, no. 11, pp. 28 – 30.
5. Zhidovich I. S. A systematic approach to assessing the effectiveness of heat pumps [Sistemny`j podkhod k oçenke e`ffektivnosti teplovy'x nasosov]. *Novosti teplosnabzheniya – Heat Supply News*, 2002, no. 4 (20), pp. 53 – 55.
6. Parmon V. N., Burdukov A. P., Belyaev L. C. et al. Small-scale energy and non-traditional energy sources: their role and place in Siberian energy in the coming years and in the future [Malaya e`nergetika i netradicionny'e istochniki e`nergii: ix rol` i mesto v e`nergetike Sibiri v blizhajshie gody` i na perspektivu]. *Malaya e`nergetika – Small energy*, 1994, vol. 38, no. 3. pp.
7. Programma e`nergoberezheniya i povыshenie e`nergeticheskoy e`ffektivnosti OAO «RZhD» na 2016 – 2018 gody` (The program of energy conservation and improving energy efficiency of JSC Russian Railways for 2016 – 2018). Moscow, 2016.
8. Grigor`ev V. A., Zorin V. M. et al. *Promыshlennaya teploe`nergetika i teplotexnika* (Industrial heat and power engineering). Moscow.: Energoatomizdat, 1991, Book 4, 588 p.
9. Khoroshikh O. V., Starikov A. P. Determining the modes of the most efficient operation of heat pumps in the conditions of the Omsk region [Opredelenie rezhimov naibolee e`ffektivnoj raboty` teplovy'x naso-sov v usloviyax omskogo regiona]. *Povyshenie e`nergoe`ffektivnosti ob`ektov e`nergetiki i sistem teplosnabzheniya: Materialy` vseros. nauch.-texn. konf. Omskij gos. un-t putej soobshcheniya* (Improving energy efficiency of energy facilities and heat supply systems: conference proceedings, OSTU). – Omsk, 2018, pp. 6 – 11.
10. Khoroshikh O. V., Starikov A. P., Gromov A. N. Improving the energy efficiency of energy facilities and heat supply systems [Povyshenie e`nergoe`ffektivnosti ob`ektov e`nergetiki i sistem teplosnabzheniya]. *Povyshenie e`ffektivnosti ob`ektov teploènergetiki i sistem teplosnabzheniâ.* "Mezhvuzovskij tematičeskij sbornik nauchnyh trudov. Omskij gos. universitet putej soobshcheniâ" (Improving the efficiency of heat power facilities and heat supply systems: interuniversity thematic collection of scientific papers, OSTU). – Omsk, 2016, pp. 29–30.
11. Khoroshikh O. V., Starikov A. P. Features of the use of heat pumps in the West Siberian region [Osobennosti primeneniâ teplovyh nasosov v Zapadno-Sibirskom regione]. "Povyshenie e`ffektivnosti ob`ektov teploènergetiki i sistem teplosnabzheniya." *Mezhvuzovskij tematičeskij sbornik nauchnyh trudov. Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniâ* (Improving the efficiency of heat power facilities and heat supply systems: interuniversity thematic collection of scientific papers, OSTU). – Omsk, 2017, pp. 213 – 220.
12. *Metodicheskie rekomendacii po raschetu e`konomicheskoy e`ffektivnosti novoj texniki i texnologij, ob`ektov intellektual`noj sobstvennosti i racionalizatorskikh predlozhenij* (Guidelines for calculating the economic efficiency of new equipment and technology, intellectual property and rationalization proposals), Moscow, approved order of JSC "Russian Railways" no. 2538r dated 28.11.2008.

13. *Metodicheskie rekomendacii po ocenke investitsionny'kh proektov* (Guidelines for the evaluation of investment projects), Moscow, approved. Ministry of economy of the Russian Federation, Ministry of Finance of the Russian Federation, State Committee of the Russian Federation for construction, architecture and housing policy no. VK 477 of 21.06.1999.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хороших Ольга Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирантка кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Телефон: +7-983-528-54-31.

E-mail: bmk.omsk@yandex.ru

Стариков Александр Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Телефон: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: StarikovAP@omgups.ru

Кадцын Иван Ильич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7-913-963-20-13.

E-mail: kii55@bk.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Хороших, О. В. Исследование возможности улучшения технико-экономических показателей теплообеспечения индивидуальных потребителей / О. В. Хороших, А. П. Стариков, И. И. Кадцын // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 86 – 95.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khoroshikh Olga Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Heat power engineering», OSTU.

Phone: +7-983-528-54-31.

E-mail: bmk.omsk@yandex.ru

Starikov Alexander Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor, head of the department «Heat power engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: StarikovAP@omgups.ru

Kadtcyn Ivan Ilyich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Heat power engineering», OSTU.

Phone: +7913-963-20-13.

E-mail: kii55@bk.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Khoroshikh O. V., Starikov A. P., Kadtcyn I. I. Study of possibility of improvement of technical and economic indicators of heat supply of individual consumers. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 86 – 95 (In Russian).

УДК 621.311.1:621.317.1

С. А. Горовой¹, А. В. Симаков², В. И. Скороходов¹

¹Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация;

²Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ПОТОКА МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКА

Аннотация. В последнее время для анализа сложных нелинейных процессов все большее внимание уделяется математическому аппарату вейвлет преобразования. Обусловлено это тем, что в отличие от традиционного преобразования Фурье вейвлет-преобразование предоставляет информацию об исследуемом сигнале в частотно-временной области. Целью исследования является анализ и моделирование несинусоидального нестационарного режима на основе пакетного вейвлет-преобразования, применение данного метода для передачи цифрового потока данных исследуемого сигнала. Моделирование проведено при помощи программного комплекса Simulink. В результате проведенного исследования установлено, что пакетное вейвлет-преобразование с высокой точностью позволяет определить наличие высших гармоник в системе электроснабжения, показана эффективность применения вейвлет-преобразования для сжатия цифрового потока данных исследуемого сигнала.

Ключевые слова: система электроснабжения, высшие гармоники, вейвлет-преобразование, пакетное вейвлет-преобразование, нестационарный режим, несинусоидальный режим.

Sergey A. Gorovoy¹, Alexander V. Simakov², Vyacheslav I. Skorokhodov¹

¹Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation;

²Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF THE NON-SINUSOIDAL MODE OF OPERATION OF THE SYSTEM OF POWER SUPPLY ON THE BASIS OF THE WAVELET OF DIGITAL FLOW TRANSFORMATION OF INSTANT VALUES OF CURRENT

Abstract. Recently, for the analysis of complex nonlinear processes, more and more attention is paid to the mathematical apparatus of wavelet transform. This is due to the fact that unlike the traditional Fourier transform, the wavelet transform provides information about the signal under study in the time-frequency domain. The purpose of research is to analyze and simulate a non-sinusoidal non-stationary mode based on the packet wavelet transform, the use of this method for transmitting the digital data stream of the signal under study. The simulation was carried out using the software package Simulink. In the study found that packet wavelet transform with high precision allows to determine the presence of higher harmonics in the power system, the efficiency of using wavelet transform to compress digital data stream of the test signal.

Keywords: power supply system, higher harmonics, wavelet transform, packet wavelet transform, unsteady mode, non-sinusoidal mode

На современных промышленных предприятиях все большее распространение получают нагрузки, вольт-амперные характеристики которых нелинейны. Эти приемники электрической энергии потребляют несинусоидальный ток, тем самым искажают кривую напряжения сети. Вопросу изучения высших гармоник посвящена работа [1], в которой автор подробно описывает одну из основных проблем качества электроэнергии системы электроснабжения промышленных предприятий. Наличие высших гармоник в системе электроснабжения влечет за собой ряд негативных факторов: увеличение дополнительных потерь в токоведущих частях и, как следствие, их перегрев, выход из строя изоляции токоведущих частей, уменьшение срока службы электрооборудования, возникновение резонансных режимов. Все эти факторы ухудшают надежность и эффективность системы энергоснабжения и ведут к экономическому ущербу.

Данная проблема явилась причиной проявления интереса к вопросу измерения, анализа, контроля и моделирования несинусоидальных режимов. Традиционным математическим аппаратом для анализа несинусоидальных сигналов является преобразование Фурье. Данный метод хорошо себя зарекомендовал при анализе стационарных сигналов, однако на практике нагрузка чаще всего имеет нестационарный режим работы.

Проанализируем нестационарный несинусоидальный режим работы электроэнергетической сети двумя методами: преобразованием Фурье и вейвлет-преобразованием. Анализируемый сигнал тока зададим следующей системой уравнений:

$$i(t) = \begin{cases} I_{m1} \sin(2\pi ft + \varphi_1) & 0 \leq t \leq 0,1; \\ I_{m1} \sin(2\pi ft + \varphi_1) + I_{m3} \sin(6\pi ft + \varphi_3) & 0,1 \leq t \leq 0,2 \end{cases} \quad (1)$$

где $I_{m1} = I_{m3} = 1 \text{ А}$, $f = 50 \text{ Гц}$.

Полученный сигнал тока представлен на рисунке 1. На рисунках 2 – 4 приведены результаты анализа.

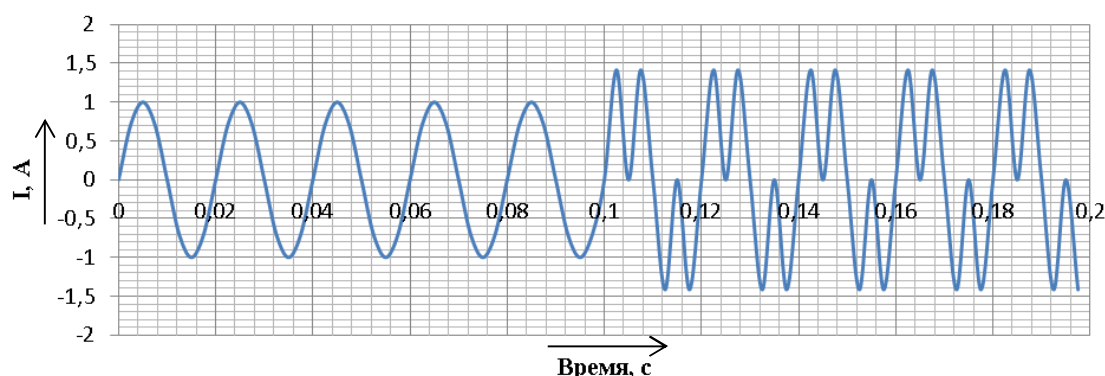


Рисунок 1 – Нестационарный несинусоидальный ток в узле нагрузки

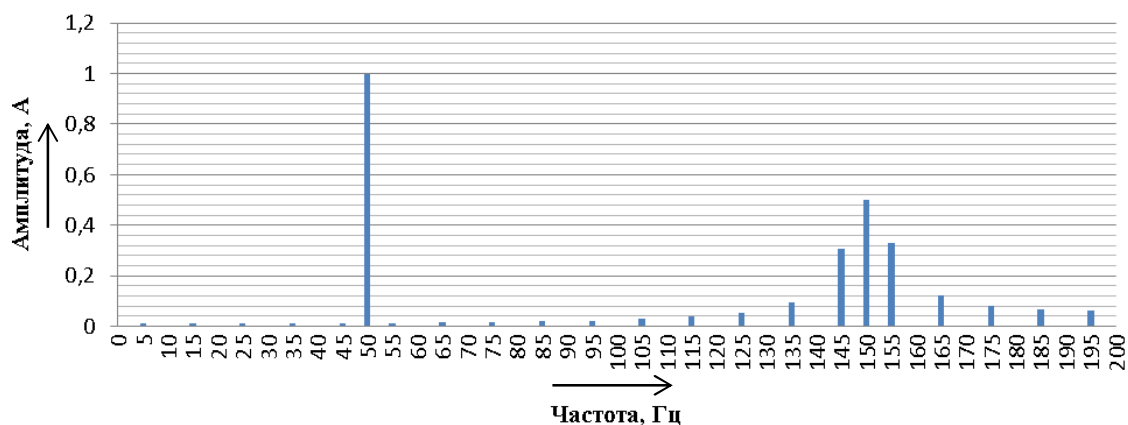


Рисунок 2 – Частотный спектр тока, полученный преобразованием Фурье

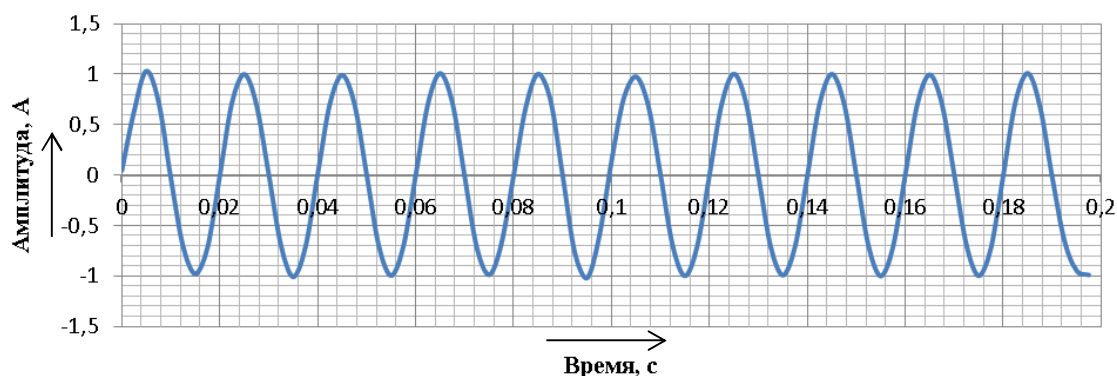


Рисунок 3 – Ток основной частоты (50 Гц), восстановленный по вейвлет-коэффициентам

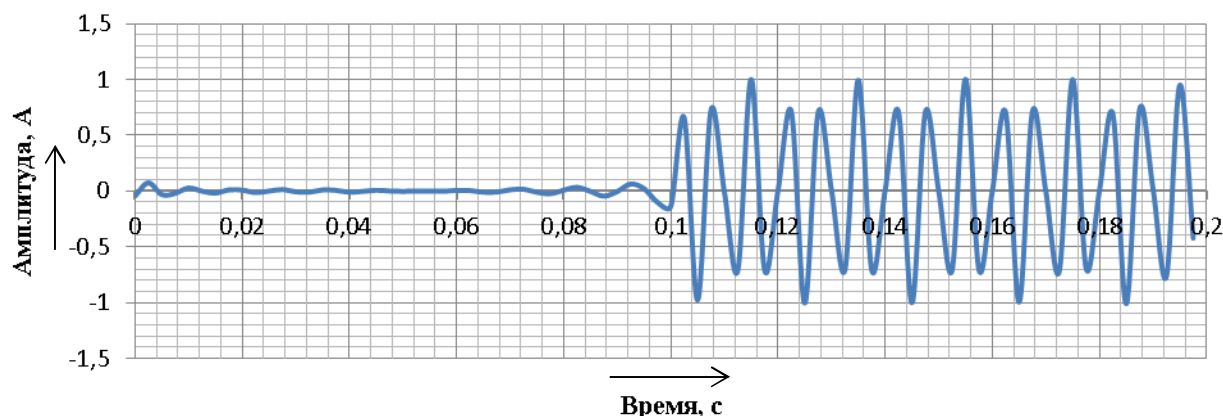


Рисунок 4 – Ток частоты 150 Гц, восстановленный по вейвлет-коэффициентам

Анализируя нестационарный режим работы, преобразование Фурье не дает хорошей локализации по частоте и времени одновременно, обусловлено это принципом неопределенности Гейзенберга [2]. На рисунке 2 виден так называемый «эффект растекания спектра», из-за чего возникает погрешность в определении амплитуд токов и теряется информация о времени (длительности) присутствия того или иного частотного компонента в исследуемом сигнале, в то время как вейвлет-преобразование дает достаточно хорошую локализацию в частотно-временной области.

В работе [3] авторы провели оценку гармонического состава тока и напряжения на шинах 0,4 кВ подстанции 6/0,4 кВ и предоставили результаты негативного влияния высших гармоник. В последнее время появляется большое количество научных работ, посвященных анализу искажения напряжения электроэнергетических систем на основе вейвлет-преобразования. В работе [4] авторы используют вейвлет-преобразование для гармонического анализа формы кривой напряжения. Авторы работы [5] предлагают проводить анализ показателей качества электроэнергии на основе непрерывного вейвлет-преобразования. Данный математический аппарат применяется и для анализа коротких замыканий [6]. Используя вейвлет-преобразование, можно рассчитать дополнительные потери от высших гармоник [7, 8].

Электрэнергетика является одним из приоритетных и значимых направлений в стране. В стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации (постановление Правительства РФ от 3 апреля 2013 № 511-р (ред. от 18.07.2015)) [9] основной целью является долгосрочное обеспечение надежного, качественного и доступного энергоснабжения потребителей РФ. Одной из основных задач единой технической политики является «внедрение передовых технологий эксплуатации с использованием современных средств диагностики, мониторинга, технических и информационно-измерительных систем» [9, с. 6].

Решением поставленных задач может стать внедрение дистанционного контроля, реализуемого с помощью системы «умные сети» Smart Grid. Данная система позволит увеличить надежность системы электроснабжения, сократить технические и коммерческие потери при транспортировке электрической энергии.

В связи с развитием технологии «Цифровая подстанция» возникает необходимость в цифровой обработке данных для обмена информации о режимах работы системы электроснабжения и ее компонентов. Данные условия определяют актуальность использования цифровой энергетики. Требуется внедрение новых и модернизация существующих алгоритмов для цифровой обработки сигналов, на базе которых будут основываться новые программно-информационные комплексы для анализа режима работы системы и показателей качества электроэнергии.

Сказанное выше подтверждает план мероприятий «Дорожная карта», который был утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2018 г.

№ 830-р [10]. Одним из мероприятий плана «Дорожная карта», который будет осуществляться поэтапно с 2018 по 2035 гг., является «Определение условий реализации проектов по улучшению надежности и качества электроснабжения потребителей за счет внедрения новых технологий и оптимизации деятельности сетевых организаций...» [10, с. 13].

В решении поставленной задачи уместно применение математического аппарата вейвлет-преобразования, который, как было описано выше, очень хорошо справляется с анализом гармонического состава и контролем показателей качества электроэнергии в любых динамически изменяющихся режимах работы системы электроснабжения.

Различают три вида вейвлет-преобразования: непрерывное, дискретное и пакетное. Вейвлет-преобразование осуществляется по следующей формуле [2]:

$$\hat{F}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (2)$$

где, $\psi_{j,k}(t)$ – функция материнского вейвлета. Если учесть, что a и b – дискретные значения – $a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$ и $m, n \in \mathbb{Z}$, получается [3]:

$$\hat{F}_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int f(t) \psi\left(\frac{t}{a_0^m} - nb_0\right) dt. \quad (3)$$

В данной работе для расчета высших гармоник предлагается использовать пакетное вейвлет преобразование. Поскольку непрерывное вейвлет-преобразование не подходит для цифровой обработки сигнала, а дискретное вейвлет-преобразование подразумевает разложение только аппроксимирующей части, то информация высокочастотной составляющей сигнала предоставляется не в полном объеме.

Любой дискретный сигнал тока или напряжения может быть представлен в виде суммы вейвлет коэффициентов:

$$i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k} \varphi_{j,k}(t), \quad (4)$$

где j – уровень вейвлет-разложения; k – номер узла вейвлет-разложения, $\varphi_{j,k}(t)$ – базисная функция. На каждом уровне разложения происходит децимация сигнала. На нулевом уровне аппроксимирующей частью является весь сигнал целиком. Далее на первом уровне разложения он делится на аппроксимирующую и детализирующую составляющие. Полученные на первом уровне разложения аппроксимирующий и детализирующий вейвлет-пакеты снова подвергаются делению на грубую и детализирующую составляющие. При этом на каждом уровне разложения вдвое увеличивается количество вейвлет-пакетов и во столько же уменьшается количество коэффициентов, содержащихся в них. Таким образом, получаем набор вейвлет-пакетов, отвечающий за свой диапазон частот, это позволяет использовать пакетное вейвлет-преобразование для гармонического анализа тока и напряжения.

Реальная экспериментальная проверка и анализ режимов работы таких сложных объектов, к которым относится электроэнергетическая система, представляет собой достаточно трудоемкую и дорогостоящую задачу, поэтому на данном этапе работы существенную роль может оказать замена реального объекта его компьютерной моделью. В данной работе разработана модель нестационарного несинусоидального режима электроэнергетической сети. Моделирование осуществлено в программном комплексе Simulink. Однолинейная электрическая схема объекта моделирования представлена на рисунке 5.

На рисунке 5 представлена схема электроснабжения потребителя, имеющего в своем составе нелинейную нагрузку. Питание от энергосистемы до нагрузки осуществляется кабелем ВВГ 4×95. Напряжение питания $U = 380$ В. Линейная нагрузка $S = 158$ В·А. Нелинейная нагрузка разделена на две. Первая нелинейная нагрузка подключена постоянно, здесь в качестве нагрузки используется электрооборудование, работающее на основе трехфазной мостовой схемы 6-пульсного вентильного преобразователя.

Порядок гармоник, генерируемых данным видом выпрямителя, определяется по выражению [1, с. 50]:

$$v = kp \pm 1, \quad (5)$$

где p – пульсность преобразователя; $k=1,2,3,\dots$

Согласно выражению, представленному автором в работе [1], допустим, выпрямитель генерирует 5-ю и 7-ю гармоники. Амплитудный спектр сетевого тока также представлен в работе автором.

Вторая нелинейная нагрузка представлена промышленным трехфазным сварочным аппаратом, работающим в повторно-кратковременном режиме. Продолжительность нагрузки сварочного аппарата $ПВ = 40\%$. Допустим, сварочный аппарат генерирует 11-ю и 13-ю гармоники. Амплитуды гармоник тока от сварочного аппарата были определены по кривым, которые представил в своей работе автор Жежеленко И. В. [1, с. 87].

Анализ и расчет имитационной модели, представленной на рисунке 6, проводился для тока фазы А. Для удобства расчетное время моделирования t принято 60 с. В результате моделирования получаем нестационарный несинусоидальный сигнал тока фазы А.

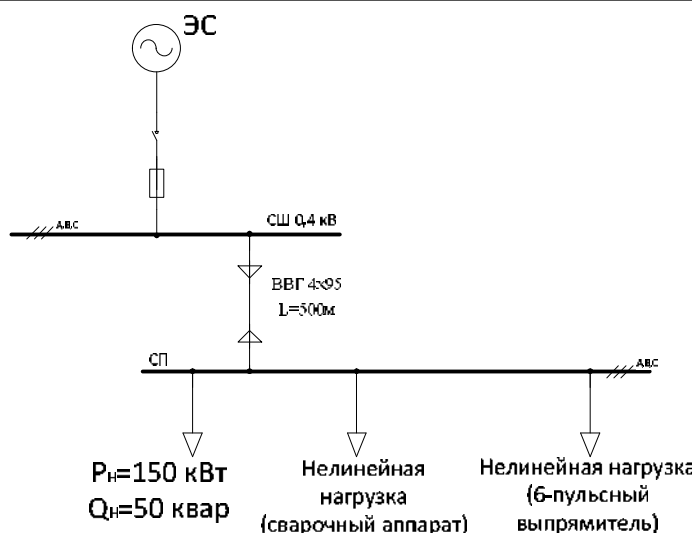


Рисунок 5 – Однолинейная электрическая схема объекта моделирования

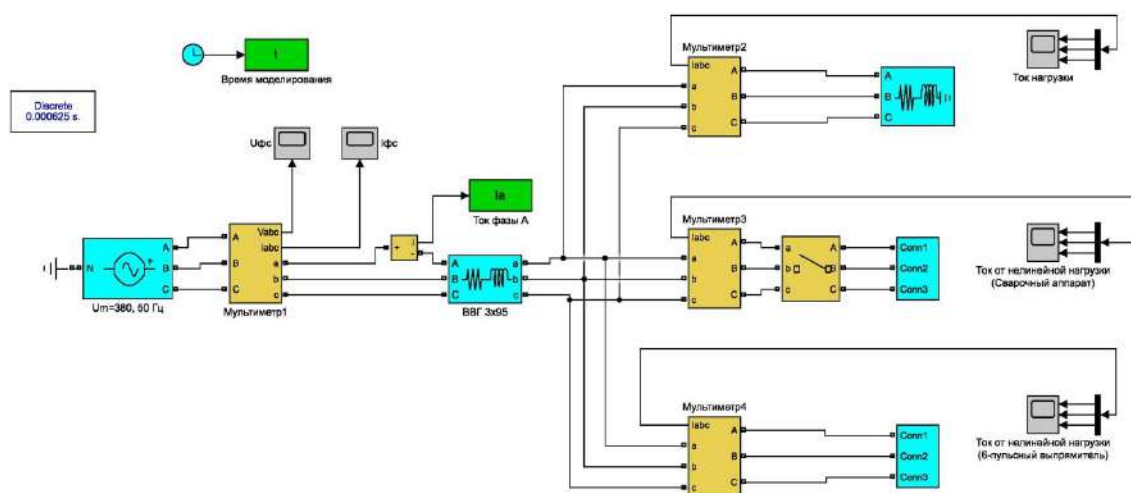


Рисунок 6 – Имитационная модель

Для наглядности наличия высших гармоник в сигнале и изменения режима нагрузки, обусловленного режимом работы сварочного аппарата, на рисунке 7 представлен тот же сиг-

нал в интервале от 35,9 до 36,1 с. Экспортируем полученные мгновенные значения тока фазы А для дальнейших расчетов.

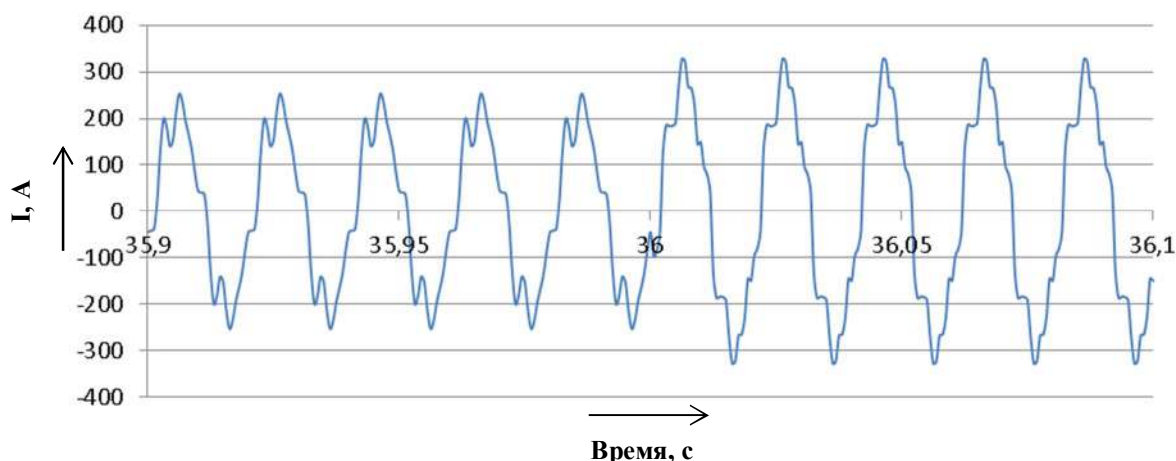


Рисунок 7 – Сигнал тока фазы А, в интервале времени от 35,9 до 36,1 с

Произведем анализ полученного в результате моделирования сигнала методом пакетного вейвлет-преобразования. Максимальная частота в частотном спектре исследуемого сигнала равняется 650 Гц (13-я гармоника). В соответствии с теоремой Котельникова частота дискретизации сигнала определяется по выражению [2, с. 35]:

$$f_d > f_m \cdot 2, \quad (6)$$

где f_m – максимальная частота исследуемого сигнала. Таким образом, для передачи сигнала без потерь принимаем частоту дискретизации f_d равной 1600 Гц. В соответствии с заданной частотой дискретизации количество мгновенных значений тока $N = t \cdot f_d = 60 \cdot 1600 = 96000$ точек. Получаем, что на нулевом уровне пакетного вейвлет-разложения $J = 0$, исходный сигнал тока содержит в себе спектр частот в диапазоне 0 – 800 Гц и состоит из 96000 значений. На рисунке 8 представлено дерево разложения сигнала тока методом пакетного вейвлет-преобразования. Разложение проведено до 3 уровня ($J = 3$), проводить разложение дальше не имеет практического смысла, так как основной сигнал заключен в частоте 50 Гц, которая находится в диапазоне $0 \leq f \leq 100$ Гц.

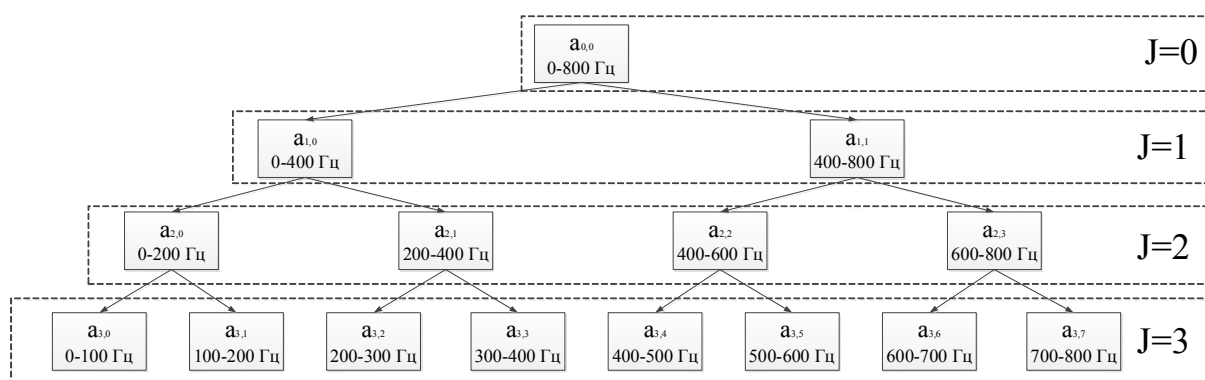


Рисунок 8 – Дерево пакетного вейвлет-преобразования

Для исследования сигнала математическим аппаратом вейвлет-преобразования значимым фактором является правильный выбор оптимального материнского вейвлета. Расчет производился с использованием нескольких материнских вейвлетов для выбора наиболее подходящего для исследования данного сигнала, результаты расчета сведены в таблицу. Для каждого вейвлет-пакета на 3-м уровне разложения энергия спектра представлена относительной величиной от энергии полного спектра.

Энергия спектра и среднеквадратичное отклонение при восстановлении исследуемого сигнала фазы А различными типами вейвлетов

Тип вейвлета	Энергия спектра коэффициентов, % от общей энергии								Среднеквадратичное отклонение σ , А
	$a_{3,0}$	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	$a_{3,4}$	$a_{3,5}$	$a_{3,6}$	$a_{3,7}$	
Хаара	47,8354	20,6211	2,3553	0,3685	0,4913	0,4782	0,5056	0,3446	0,1349
Добеши 10	96,1170	0,1137	2,2162	0,9758	0,2230	0,2956	0,0585	$4,1914 \cdot 10^{-5}$	0,0760
Добеши 24	96,1377	0,0086	2,3832	1,0731	0,1027	0,1898	0,1049	$3,9374 \cdot 10^{-5}$	0,0630
Добеши 42	96,1377	0,0014	2,3916	1,1334	0,0423	0,1908	0,1027	$3,8266 \cdot 10^{-5}$	0,0579

Из результатов, представленных в таблице, видно, что оптимальным вейвлетом является вейвлет Добеши 42, он имеет наименьшее среднеквадратичное отклонение исходного и восстановленного сигнала и максимальный спектр локальной энергии в частотном коридоре.

Локальная энергия спектра узлов $a_{3,5}$ и $a_{3,6}$ незначительна. Набор коэффициентов данных узлов отвечает за коридоры с диапазоном частот, которые генерирует сварочный аппарат (550 и 650 Гц). Для оценки эффективности степени сжатия данных с помощью пакетного вейвлет-преобразования произведем восстановление сигнала тока фазы А по одиночной ветви вейвлет-коэффициентов. Ввиду незначительности величины локальной энергии спектра коэффициент $a_{1,1}$ первого уровня разложения примем равным нулю. Таким образом, восстановление сигнала осуществим по коэффициенту $a_{1,0}$, который отвечает за частоты генерируемые преобразователем (250, 350 Гц) и основную частоту сети (50 Гц).

Для оценки адекватности данного решения был произведен анализ восстановленного сигнала тока фазы А. Исходный сигнал тока фазы А состоял из 96000 значений, вейвлет-коэффициент $a_{1,0}$, по которому произведена реконструкция сигнала, состоит из 48000 значений. В результате коэффициент сжатия сигнала составляет $96000/48000 = 2$ раза. Для визуальной оценки восстановленного сигнала, отобразим на одном графике исходный и восстановленный сигнал, рисунок 9.

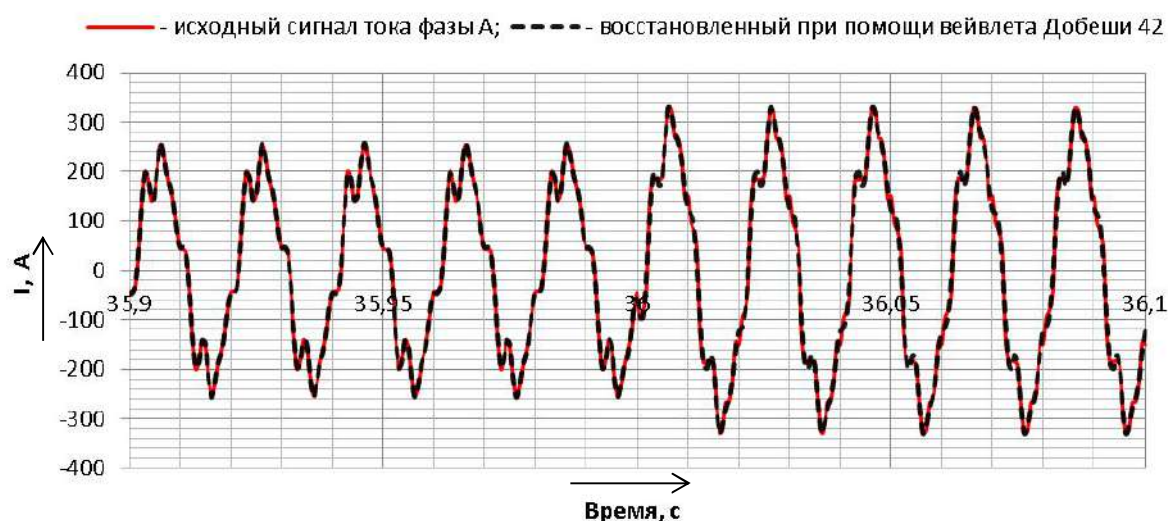


Рисунок 9 – Исходный и восстановленный сигналы тока фазы А в интервале от 35,9 до 36,1 с

Для оценки качества восстановленного сигнала необходимо оценить среднеквадратичное отклонение восстановленного и исходного сигналов по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (i_k - \hat{i}_k)^2}{\sum_{k=1}^n i_k^2}}, \quad (7)$$

где i_k и $\hat{i}_k$ – исходный и восстановленный сигналы тока соответственно.

Результаты расчета среднеквадратичного отклонения для разных типов вейвлет функций представлены в таблице. Количественная оценка восстановленного сигнала выражена на рисунке 10, где представлена абсолютная погрешность реконструкции сигнала.

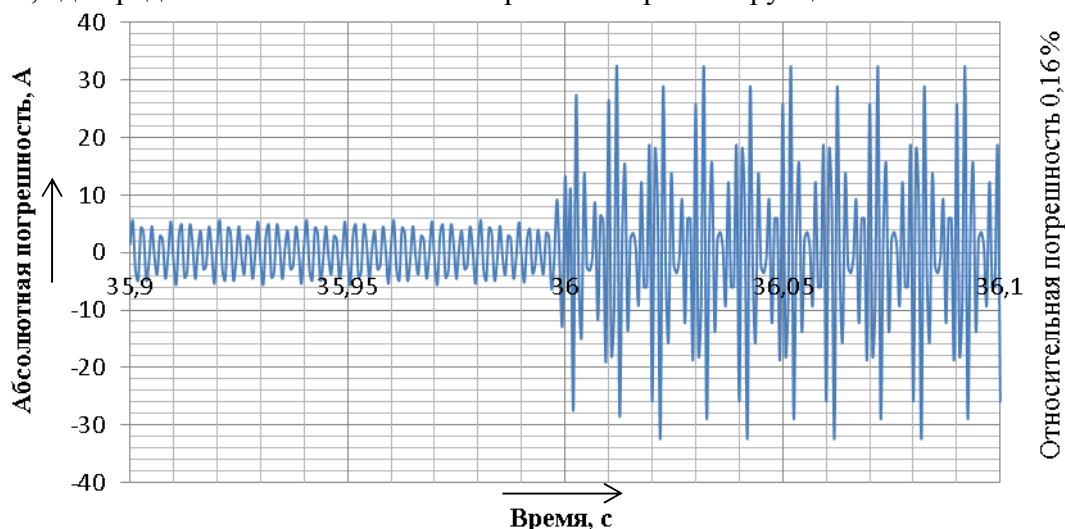


Рисунок 10 – Абсолютная погрешность восстановления, в интервале от 35,9 до 36,1 с

Наименьшее среднеквадратичное отклонение было получено при использовании вейвлета Добеши 42, оно составило 0,0579. Как видно из рисунка 10, абсолютная погрешность не превышает 30 А, а относительная погрешность составила 0,16 %.

Использование пакетного вейвлет-преобразования позволяет с достаточной точностью определить наличие гармонической составляющей в сигнале, предоставив информацию в частотно-временной области, благодаря чему появляется возможность оценки энергии локального спектра коридора частот, что позволяет сократить количество передаваемой информации. На основании этого можно сделать вывод о том, что мгновенные значения тока могут быть подвергнуты вейвлет разложению, сжатию, с целью передачи цифрового потока данных в рамках программы «Цифровая подстанция». Полученные мгновенные значения тока фазы А (96000 значений) могут быть переданы цифровым потоком данных в виде вейвлет-коэффициентов $a_{1,0}$ первого уровня разложения (48000 значений) и затем восстановлены с достаточной степенью точности. Наиболее подходящим для анализа сигнала в данной работе является вейвлет Добеши 42, среднеквадратичное отклонение составило 0,0579.

Список литературы

1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
2. Яковлев, А. Н. Введение в вейвлет-преобразования: Учебное пособие [Текст] / А. Н. Яковлев / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2003. – 104 с.
3. Алферов, И. В. Анализ аварийности и причин выхода из строя конденсаторных установок в системе электроснабжения нефтегазодобывающего месторождения [Текст] /

И. В. Алферов, В. М. Зырянов, Н. А. Митрофанов // Вестник Иркутского государственного технического университета / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск. – 2019. – №1. – С. 63 – 74.

4. Poisson, O. Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform / O. Poisson, P. Rioual, M. Meunier // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – vol. 15, issue 3. – P. 1039 – 1044.

5. Долингер, С. Ю. Применение вейвлет-анализа для определения показателей качества электрической энергии [Текст] / С. Ю. Долингер, А. Г. Люtareвич // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2010. – № 1 (87). – С. 136 – 140.

6. Argyropoulos, P. E. Wavelet customization for improved fault-location quality in power networks / P. E. Argyropoulos, H. Lev-Ari // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – vol. 30, issue 5. – P. 2215 – 2223.

7. Осипов, Д. С. Расчет потерь энергии в кабельной линии электропередачи при наличии нелинейной нагрузки методом пакетного вейвлет-преобразования [Текст] / Д. С. Осипов, Д. В. Коваленко, Б. Ю. Киселев // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2016. – № 4 (148). – С. 84 – 89.

8. Анализ дополнительных потерь от высших гармоник в сетях 380 В с помощью алгоритмов пакетного вейвлет преобразования [Текст] / Д. С. Осипов, Н. Н. Долгих и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2018. – № 6 (162). – С. 76 – 82.

9. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 апреля 2013 г. № 511-р; в ред. постановления Правительства Российской Федерации от 29 ноября 2017 г. № 2664-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2017. – № 49. – Ст. 7526. – С. 21027 – 21029.

10. План мероприятий («Дорожная карта») по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации Национальной технологической инициативы по направлению «Энерджинет»: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2018 г. № 830-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2018. – № 19. – Ст. 2803. – С. 10087 – 10097.

References

1. Zhezhelenko I. V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniia prompredpriiati* (Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises). Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000, 331 p.

2. Yakovlev A. N. *Vvedenie v veivlet-preobrazovaniia* (Introduction to wavelet transforms). Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2003, 104 p.

3. Alferov I. V., Zyrianov V. M., Mitrofanov N. A. Analysis of accidents and causes of failure of capacitor units in the power supply system of oil and gas fields [Analiz avariinosti i prichin vykhoda iz stroia kondensatornykh ustanovok v sisteme elektrosnabzheniia neftegazodobyvaiushchego mestorozhdeniia]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2019, no. 1, pp. 63 – 74.

4. Poisson O., Rioual P., Meunier M. Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, issue 3, pp. 1039 – 1044.

5. Dolinger S. Yu., Lutarevich A. G. The use of wavelet analysis to determine indicators of the quality of electric energy [Primenenie veivlet-analiza dlia opredeleniia pokazatelei kachestva elektricheskoi energii]. *Omskiy nauchnyy vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2010, no. 1 (87), pp. 136 – 140.

6. Argyropoulos P. E. Wavelet customization for improved fault-location quality in power networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, issue 5, pp. 2215 – 2223.

7. Osipov D. S., Kovalenko D. V., Kiselev B. Iu. Calculation of energy losses in a cable power line in the presence of a nonlinear load using the packet wavelet transform method [Raschet poter' energii v kabel'noi linii elektropredachi pri nalichii nelineinoi nagruzki metodom paketnogo

vevleit-preobrazovaniia]. *Omskiy nauchnyy vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2016, no. 4 (148), pp. 84 – 89.

8. Osipov D. S., Dolgikh N. N., Gorovoy S. A., Poplavskaya V. E. Analysis of additional losses from higher harmonics in 380 V networks using packet wavelet transform algorithms [Analiz dopolnitel'nykh poter' ot vysshikh garmonik v setiakh 380 V s pomoshch'iu algoritmov paketnogo veivlet preobrazovaniia]. *Omskiy nauchnyy vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 6 (162), pp. 76 – 82.

9. *Strategiia razvitiia elektrosetevogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii* [Development Strategy for the Electric Grid Complex of the Russian Federation]: approved by order of the Government of R. F. of April 3, 2013 no. 511-r: as amended Government Decisions Russian Federation of November 29, 2017 no. 2664-r, S. Legislation Russian Federation, 2017, no. 49, Article 7526, pp. 21027 – 21029.

10. *Plan meropriiati («Dorozhnaia karta») po sovershenstvovaniiu zakonodatel'stva i ustraneniuiu administrativnykh bar'erov v tseliakh obespecheniia realizatsii Natsional'noi tekhnologicheskoi initsiativy po napravleniiu «Enerdzhinets»* [Action Plan (“Road Map”) to improve legislation and remove administrative barriers in order to ensure the implementation of the National Technology Initiative in the “Energy” direction]: approved by order of the Government of Russian Federation of April 28, 2018 no. 830-r, S. Legislation Russian Federation, 2018, no. 19, Article 2803, pp. 10087 – 10097.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горовой Сергей Анатольевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ОмГТУ.

E-mail: Gorovoysergey97@gmail.com

Симаков Александр Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

E-mail: Simak_off97@mail.ru

Скороходов Вячеслав Игорьевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ОмГТУ.

E-mail: Skorohodov154@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorovoy Sergey Anatolevich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mera st., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Undergraduate student of the department «Power supply for industrial enterprises», OmSTU.

E-mail: Gorovoysergey97@gmail.com

Simakov Alexandr Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Electrical machines and general electrical engineering », OSTU.

E-mail: Simak_off97@mail.ru

Skorokhodov Vyacheslav Igor'evich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mera st., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Undergraduate student of the department «Power supply for industrial enterprises», OmSTU.

E-mail: Skorohodov154@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Горовой, С. А. Анализ несинусоидального режима работы системы электроснабжения на основе вейвлет преобразования цифрового потока мгновенных значений тока [Текст] / С. А. Горовой, А. В. Симаков, В. И. Скороходов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 96 – 105.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gorovoy S. A., Simakov A. V., Skorokhodov V. I. Analysis of the non-sinusoidal mode of operation of the system of power supply on the basis of the wavelet of digital flow transformation of instant values of current. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 96 – 105 (In Russian).

УДК 621.182:662.76(043.3)

А. К. Кайсаров, К. Б. Кызыров

Карагандинский государственный технический университет (КарГТУ), г. Караганда, Республика Казахстан

ОБРАБОТКА ПЛАЗМЫ С НИЗКИМ УРОВНЕМ РЕАКТИВНОГО УГЛЯ

Аннотация. Уголь является одним из основных источников энергии XXI в. Для повышения эффективности сжигания угля разрабатываются новые плазменно-энергетические технологии. Сегодня пылеугольные ТЭЦ во всем мире генерируют более 50 % электрической и тепловой энергии, доля угля в топливном балансе ТЭЦ растет. В то же время качество углей снижается. Традиционные методы снижения расхода мазута на теплоэлектроцентралях (повышение дисперсности помола пыли, высокий предварительный нагрев воздушной смеси и вторичного воздуха и др.), используемые для улучшения воспламенения топлива и стабилизации горения, исчерпали себя, поэтому радикальное повышение эффективности использования топлива может быть связано только с разработкой и освоением абсолютно новых технологий.

Плазменная технология, по-видимому, является наиболее перспективной среди альтернативных технологий, доступных для решения указанных выше проблем. Данная технология обеспечивает существенное повышение экономической эффективности и улучшение экологических показателей электростанций, работающих на твердом топливе.

Ключевые слова: энергия, сжигание угля, КПД котлов, плазменно-энергетические технологии, топливный баланс.

Abylkhaiyr K. Kaisarov, Kairulla B. Kyzyrov

Karaganda state technical university (KSTU), Karaganda, Republic of Kazakhstan

TREATMENT OF PLASMA WITH A LOW LEVEL OF REACTIVE COAL

Abstract. Coal is one of the main sources of energy of the 21st century. New plasma-energy technologies are being developed to improve the efficiency of coal combustion. Today, pulverized coal CHP plants worldwide generate more than 50% of electric and thermal energy, the share of coal in the fuel balance of the CHP is growing. At the same time, the quality of coal is reduced. Traditional methods of reducing fuel oil consumption at thermal power plants (increasing the dispersion of the grinding dust, high preheating of the air mixture and secondary air, etc.) used to improve fuel ignition and burning stabilization, have exhausted themselves, therefore a radical increase in fuel efficiency can only be associated with the development and development of completely new technologies.

Plasma technology seems to be the most promising among the alternative technologies available to solve the above problems. This technology provides a significant increase in economic efficiency and environmental performance of power plants operating on solid fuel.

Keywords: energy, coal combustion, efficiency of boilers, plasma-energy technologies, fuel balance.

На тепловых электростанциях при сжигании сильно балластированных углей, которые не могут гореть сами по себе, особенно в условиях минимальных нагрузок, необходимо обеспечить максимальную интенсификацию пылеугольного пламени с мазутом. В этом случае доля мазута в общем объеме тепла, выделяемого в топке котла, может составлять до 30 %. Сжигание угля с мазутом в указанных пропорциях приводит к интенсивной высоко-температурной коррозии экранов, резкому снижению выгорания частиц твердого топлива (его несгоревшая часть выбрасывается вместе с золой и дымом), химическому недожиганию, увеличению количества выбросов загрязняющих веществ (по сравнению с углем мазут содержит в два раза больше серы), увеличению частоты аварий с пароперегревателями. В результате это приводит к снижению КПД котлов. Высокое содержание серы в мазуте приводит к образованию сульфидов, которые:

выбрасываются в атмосферу с целью вызвать ее загрязнение;

образуют сернистую кислоту, которая атакует металлические конструкции котлов и дымоходов;

вступают в реакцию с пылевидным шлаком с образованием очень сильной накипи на внутренних частях котлов и пароперегревателей.

По этим причинам котлы тепловых электростанций должны подвергаться капитальному ремонту в среднем один раз в два года (стоимость капитального ремонта равна стоимости нового котла). Затраты, понесенные на приобретение мазута, а также затраты, связанные с обслуживанием мазутодобывающих объектов, составляют около 3 \$/т. Мировая тенденция к лучшей переработке нефти приводит к снижению доли мазута до 5 %. Учитывая высокую стоимость мазута, сокращение его поставок, снижение эффективности и эксплуатационной надежности котлов при совместном сжигании мазута и угля, все большую актуальность приобретает технология безмасляного розжига и интенсификации пылевидной угольной смеси в топках котлов с использованием плазмотронов.

Для повышения эффективности сжигания угля разрабатываются новые плазменно-топливные системы, которые являются ключевым элементом плазменно-энергетических технологий. Среди них пылеугольные горелки, оснащенные электродуговыми плазмотронами, и комбинированные плазменные газификаторы, предназначенные для обогрева электростанций. Плазменно-топливные системы обеспечивают безмасляное зажигание пылеугольных котлов, стабилизацию пламени и, как следствие, одновременное снижение механического недожога топлива и образования оксидов и сульфидов азота.

Плазменно-энергетические технологии основаны на плазменной термохимической обработке угля для подготовки его к сжиганию. Эта обработка заключается в нагревании топливовоздушного заряда (аэросмеси) электродуговой плазмой до температуры образования летучих угольных компонентов и частичной газификации углеродного остатка. Поэтому независимо от качества угля это обеспечивает высокорективное двухкомпонентное топливо (горючий газ и коксовый остаток). Когда это топливо подается в топку, оно воспламеняется при смешивании со вторичным воздухом и затем горит устойчиво, не требуя сжигания дополнительного топлива (мазута или природного газа), традиционно используемого для зажигания котлов и стабилизации пламени низкосортных энергетических углей.

Целью настоящего исследования явилось изучение возможности снижения требуемой теплоемкости плазменной струи для обеспечения стабилизированного горения пылевидно-угольной смеси и увеличения скорости горения низкорективных углей с использованием технологически значимых плазменных эффектов.

Плазменное зажигание угля основано на электротермохимической подготовке топлива к сжиганию, в результате чего образуются горючий газ и коксовый остаток. Эта особенность показана на рисунке 1 [1].

Из рисунка 1 следует, что концентрация горючих компонентов ($CO + H_2 + CH_4$) растет с увеличением температуры процесса, достигая 50 – 70 % от концентрации газовой фазы ($T = 900 - 1200 \text{ K}$). Это способствует их интенсивному самовоспламенению при смешивании с

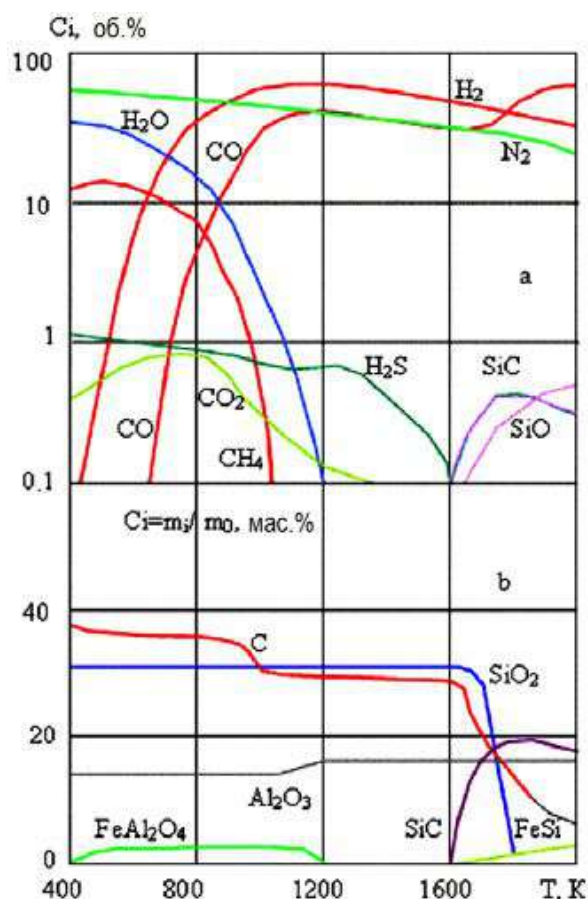


Рисунок 1 – Состав газовой (а) и конденсированной (б) фаз двухкомпонентного высокорективного топлива, где m_i – масса i -го компонента и m_0 – масса аэросмеси

основным топливоздушным зарядом. Концентрация оксидов ($H_2O + CO_2$) снижается до 0,1 % с ростом температуры. Процесс стабилизации горения низкорективных углей включает в себя нагрев небольшой части топливоздушного заряда электродуговой плазмой до температуры полного выхода летучих компонентов и частичную газификацию коксового остатка. В результате из меньшей части топливоздушного заряда, прошедшего через зону электродугового разряда (независимо от качества исходного топлива), получают высокорективное двухкомпонентное топливо, способное при смешивании с ним воспламенить основной поток топливоздушного заряда и стабилизировать процесс горения пламени. На этом принципе основаны три плазменно-энергетические технологии, такие как безмасляное зажигание пылеугольных котлов, интенсификация пылеугольного пламени и стабилизация выхода жидкого шлака в печах с удалением жидкого шлака [2].

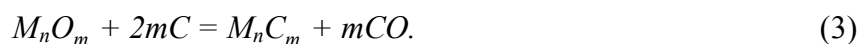
Комбинированная плазменная парогазовая газификация углей основана на сочетании плазменной активации горения небольшой части топлива (2 – 3 %) с использованием внешнего источника тепла (плазмотрона) и последующего ступенчатого воспламенения остальной топливоздушной шихты с использованием активированной части угля. Тепловой эффект выгорания этой топливоздушной шихты служит для компенсации эндотермического эффекта паровой газификации основной части угля. В этом случае последние могут составлять 70 – 80 % всего топлива в комбинированном плазменном газификаторе.

Суть плазменной паровой газификации заключается в том, что с помощью дуговых плазмотронов органическая масса угля преобразуется в высококалорийный синтез-газ ($CO + H_2$), не содержащий оксидов азота и серы. В этом случае наблюдается эндотермический эффект реакций паровой газификации угля:



полностью компенсируется химической энергией топлива, воспламеняемого электродуговой плазмой.

При комплексной переработке углей в плазменных реакторах пароугольная смесь нагревается плазмой до температуры полной газификации. Это предполагает превращение органической массы угля в синтез-газ ($CO + H_2$) и одновременное восстановление оксидов минеральной массы угля по следующим реакциям:



Здесь M – металл, или металлоид, содержащийся в минеральной массе угля, а n и m – стехиометрические коэффициенты в уравнениях реакций (2) и (3).

Реакции (2) и (3) приводят к образованию ценных компонентов (товарного кремния, углеродного кремния, ферросилиция и др.) в конденсированных продуктах переработки угля помимо горючего газа (CO) [3].

Новые плазменно-энергетические технологии повышения эффективности использования угля и снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу могут быть разработаны путем объединения указанных технологий [4].

На рисунке 2 показаны плазмотрон и схема его установки на пылеугольную горелку. Плазмотрон является основным элементом плазменно-топливной системы, он генерирует низкотемпературную плазму.

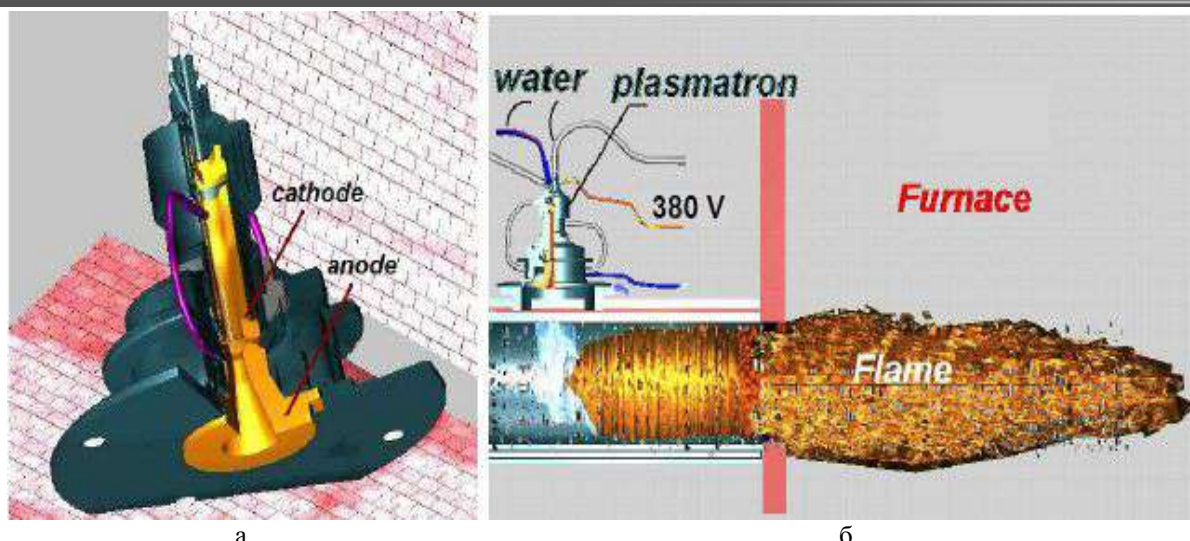


Рисунок 2 – Плазматрон (а) и схема его монтажа на прямооточной пылеугольной горелке (б)

Этот плазматрон содержит медные электроды с водяным охлаждением (катод и анод). Плазменный газ – это воздух, продуваемый через электроды. Регулируемый диапазон мощности плазматрона составляет от 100 до 350 кВт. Плазматрон имеет следующие размеры: высота – 0,4 – 0,5 м, диаметр – 0,2 – 0,25 м. Его масса составляет 25 – 30 кг.

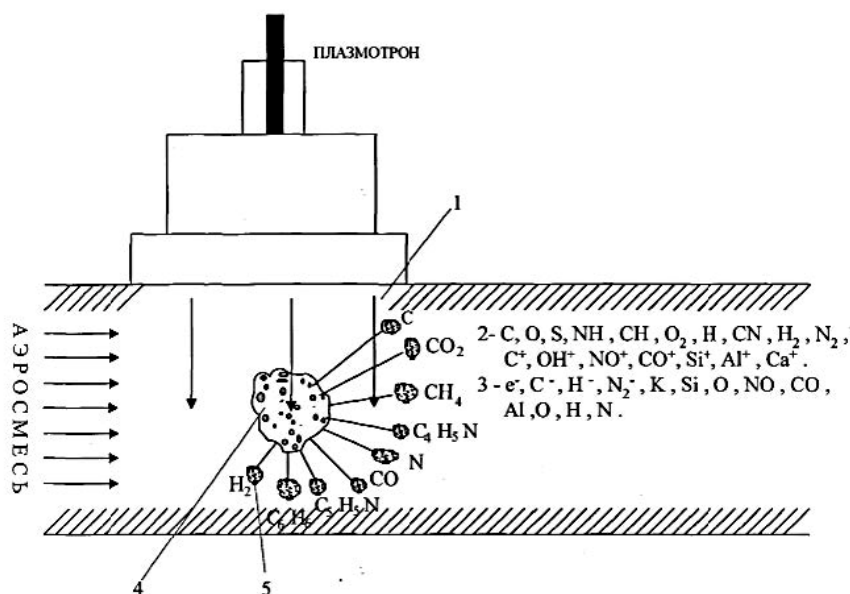


Рисунок 3 – Особенности взаимодействия дуговой плазмы с топливовоздушным зарядом в плазмотопливной системе зажигания угля (муфель с плазмотроном)

На рисунке 3 показаны особенности взаимодействия топливовоздушного заряда с дуговой плазмой в системе «плазма – топливо» (муфельная горелка с плазмотроном). Частицы угля с начальным размером 50 – 100 мкм подвергаются в плазме тепловому удару. В результате они распадаются на фрагменты, каждый из которых имеет размер 5 – 10 мкм. Это приводит к интенсивному образованию летучих элементов (CO , CO_2 , H_2 , N_2 , CH_4 , C_6H_6 и др.) и ускоряет процесс окисления горючих компонентов топлива в три – четыре раза [5 – 7].

Рисунок 4 показывает результаты экспериментов по снижению выбросов NO_x и механического недожога топлива при плазменном воспламенении углей.

Как видно из рисунка 4, при работе плазмотрона в режиме плазменной стабилизации пламени эмиссия NO_x уменьшается в два раза, а механическое недожигание уменьшается в четыре раза. Одной из причин повышения реакционной способности топлива, обеспечивающей снижение механического недожога, является тепловой взрыв частиц угля при их взаимодействии с электродуговой плазмой [8].

На рисунке 5 показана экспериментальная зависимость относительного расхода энергии плазмотроном от выхода летучих компонентов воспламененного угля для различных тепловых электростанций.

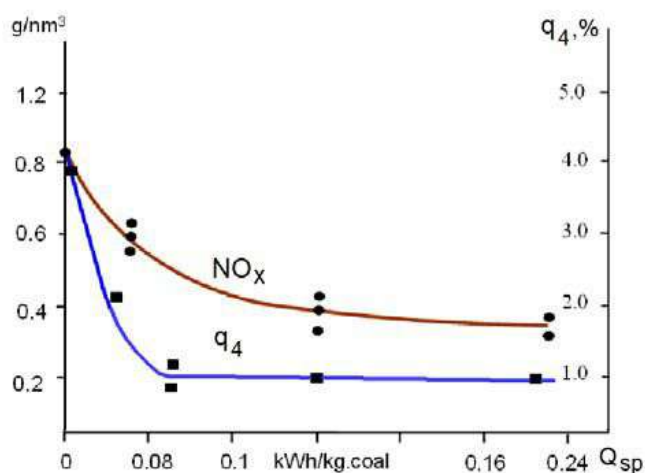


Рисунок 4 – Влияние мощности плазмотрона (P) и удельного расхода энергии (Q_{sp}) на снижение образования NO_x и механического недожога топлива (q_4) при плазменном зажигании пылеугольного пламени

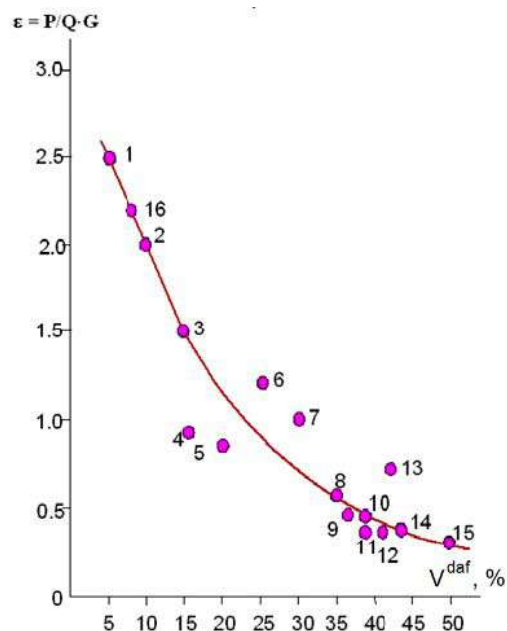


Рисунок 5 – Экспериментальная зависимость относительной мощности плазмотрона от выхода летучих компонентов воспламененного угля для различных тепловых электростанций: 1 – Корея; 2, 12 – Украина; 3 – Китай; 4, 5, 8, 10, 11, 15 – Россия; 6 – Казахстан; 7 – США; 13 – Монголия; 14 – Киргизия; 15 – Эстония; 16 – Словакия; P – электрическая мощность плазмотрона; Q – теплота сгорания угля; G – расход угля в муфеле с плазмотроном

Модель горения пылевидного угля в плазменно-реакторном реакторе (рисунок 6) учитывает струйный характер газодисперсного потока до точки его соприкосновения со стенками канала, фазовые переходы в частицах (испарение воды и плавление золы), обратное влияние частиц на газовый поток, ускоряющий и нагревающий их, и лучистый теплообмен между частицами и стенками. Считается, что расплавленная зола в тонкодисперсном состоянии «сдувается» с частиц угля в газовый поток, где она мгновенно приобретает свою скорость и температуру. Отложение золы на стенках канала игнорируется. Горение частиц описывается законом Аррениуса, учитывающим конечную скорость диффузии окислителя к поверхности частиц.

Данная модель квазиодномерна. Это позволяет обеспечить струйный характер пылевоздушного потока в плазменно-реактивном реакторе. Усреднение в модели производится не по всему сечению канала, как в случае одномерных моделей, а по меньшему сечению струи, растущей вдоль потока.

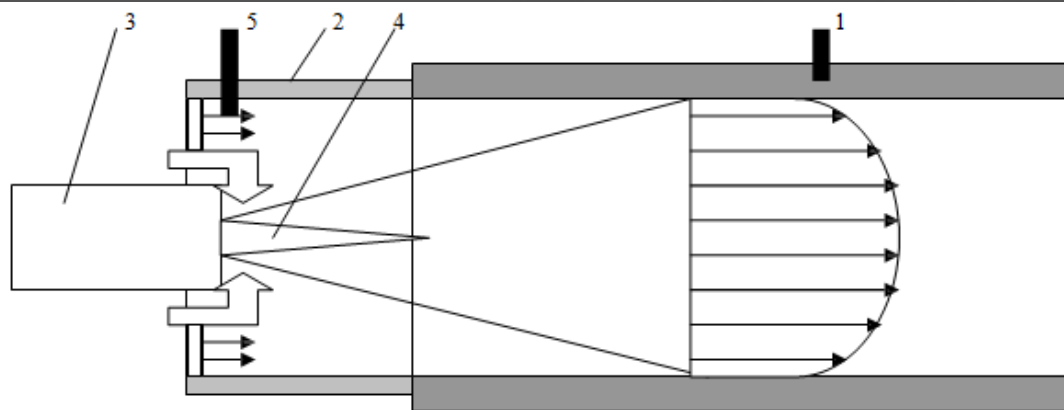


Рисунок 6 – Схема плазменно-реактивного реактора:

1 – глушитель; 2 – кварцевая труба; 3 – плазмотрон; 4 – воздушная плазменная струя; 5 – вторичный воздух

Кроме того, указанная модель учитывает зависимость скорости этого роста от параметров рабочего процесса. Этот расчет дает более реалистичные значения температуры и скоростей (следовательно, времени пребывания в реакторе) газа и частиц. Кроме того, такой расчет допускает тот факт, что вторичный воздух добавляется к струе вдоль потока более или менее равномерными порциями, а не легко контактирует с топливом во всем его объеме. В начальной области струи наблюдается недостаток окислителя. Таким образом, термическая подготовка рабочей шихты осуществляется именно в этой области. Полный контакт вторичного воздуха с топливом достигается только в конце струи и в струйной части потока. В результате расчетов было установлено следующее. Тепловая мощность плазменной струи может быть увеличена в 15 – 20 раз при конверсии углерода $\alpha_c = 0,3 - 0,6$ за счет варьирования значений параметров процесса. Пылеугольное пламя на выходе содержит большое количество крупных частиц угля с температурой 1000 – 1500 °С и скоростью 40 – 80 м/с. Газообразная часть пламени имеет более низкие температуру и скорость, состоит в основном из азота, ее горючими компонентами являются оксид углерода и водород [9, 10].

Расчеты позволяют сделать вывод о том, что поперечное вдувание пылеугольного пламени, инициированного в плазменно-угольном реакторе (см. рисунок 6), в основной поток воспламененного пылеугольного угля (как показано на рисунках 2 и 3) обеспечивает заметное (в несколько раз) повышение его эффективности по сравнению с плазменной струей той же тепловой мощности. Поскольку объем и дальность действия пылеугольного пламени значительно больше, то оно будет иметь большую область взаимодействия с воспламененной угольной пылью. Кроме того, пламя содержит достаточно большое количество крупных частиц кокса, нагретых до высокой температуры. Проникая глубоко в уносящий поток, эти частицы воспламеняются при контакте с содержащимся в нем кислородом, тем самым усиливая воспламеняющее и стабилизирующее действие пламени.

Можно сделать выводы о том, что плазменно-топливные системы улучшают сжигание угля и повышают экологическую и экономическую эффективность использования угля, когда он используется вместо газа и мазута, в топливном балансе пылеугольных тепловых электростанций. Плазменно-энергетические технологии включают в себя безмасляные (безгазовые) способы розжига котлов и интенсификации пылеугольного пламени, стабилизации выхода жидкого шлака в печах с удалением жидкого шлака, плазменной газификации и комплексной переработки углей.

Наиболее распространенными преимуществами плазменно-энергетических технологий являются снижение выбросов NO_x и SO_x за счет подавления образования оксидов серы и азота и повышение эффективности сжигания твердого топлива за счет уменьшения механического недожога. Например, при производстве 1 кВт·ч электроэнергии или 1 Гкал

тепловой энергии сжигается меньшее количество топлива, выделяется меньше CO_2 и сокращаются выбросы NO_x и SO_x в случае использования плазменно-топливных систем. Другими словами, удельные выбросы парниковых газов на единицу вырабатываемой электрической или тепловой энергии существенно снижаются.

Список литературы

1. Мессерле, В. Электротермохимическая подготовка угля к сжиганию [Текст] / В. Мессерле, З. Сакипов, Ш. Ибраев. – Алматы: Наука, 1993. – 259 с.
2. Карпенко, Е. Современное состояние и перспективы использования плазменно-энергетических технологий в теплоэнергетике [Текст] / Е. Карпенко, В. Мессерле // Материалы 6-й Междунар. конф. по технологиям и сжиганию для чистой окружающей среды «Чистый воздух». – Порту. – Португалия, 2001. – V. II. – С. 791 – 794.
3. Плазменная комплексная переработка энергетических углей [Текст] / А. Устименко, Ф. Локвуд и др. // Материалы 6-й Междунар. конф. по технологиям и сжиганию для чистой окружающей среды «Чистый воздух». – Порту. – Португалия, 2001. – V. III. – С. 1473 – 1480.
4. Плазменно-энергетические технологии использования твердого топлива на тепловых электростанциях [Текст] / В. Мессерле, Е. Карпенко и др. // Материалы 6-й Междунар. конф. по технологиям и сжиганию для чистой окружающей среды «Чистый воздух». – Порту. – Португалия, 2001. – V. III. – С. 1465 – 1468.
5. Петров, С. В. Плазма – катализатор горения низкореективных углей [Текст] / С. В. Петров, А. Г. Сааков // Мир техники и технологий. – 2002. – № 7. – С. 40, 41.
6. Петров, С. В. Плазма – катализатор горения низкореективных углей [Текст] / С. В. Петров, А. Г. Сааков // 16-й междунар. симпозиум по плазмохимии. – Таормина-Италия. – 2003. – С. 346 – 356.
7. Петров, С. Математическое моделирование плазменной обработки низкореективных углей [Текст] / С. Петров, Л. Котляров, В. Яценко // Междунар. конф. по физике низкотемпературной плазмы. – Киев. – 2003. – С. 235 – 245.
8. Плазменно-энергетические технологии для улучшения экологических и экономических показателей сжигания и газификации пылевидного угля [Текст] / Г. Ю. Даутов, А. Н. Тимошевский и др. // Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии: Проблемы и перспективы. – Новосибирск: Наука, 2004. – Т. 20. Низкотемпературная плазма. – С. 341 – 366.
9. Применение плазменного воспламенения твердых топлив на Алматинской ТЭЦ-2 [Текст] / В. Е. Мессерле, А. Б. Устименко и др. // Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Сер. химическая. – 2011. – № 3 (63). – С. 168 – 172.
10. Моделирование и испытания плазменно-топливных систем на котле БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 [Текст] / В. Е. Мессерле, Е. И. Карпенко и др. // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2012. – № 2 (37). – С. 21 – 27.

References

1. Messerle V., Sakipov Z., Ibraev Sh. *Elektrotermohimicheskaya podgotovka uglya k szhiganiyu* (Electrotechnicheskaya preparation of coal for burning). Almaty: Science, 1993, 259 p.
2. Karpenko E., Messerle V. Current state and prospects of using plasma-energy technologies in heat power engineering. [Sovremennoe sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya plazmenno-energeticheskikh tekhnologij v teploenergetike]. *Materialy shestoj Mezhdunarodnoj konferencii po tekhnologiyam i szhiganiyu dlya chistoj okruzhayushchej sredy «Chistyj vozduh»* (Proceedings of the sixth international conference on technologies and combustion for a clean environment «Clean air»). – Porty, Portugal, 2001, V. II, pp. 791 – 794.

3. Ustimenko A., Lokvud F., Karpenko E., Messerle V. Plasma complex processing of energy coals. [Plazmennaya kompleksnaya pererabotka energeticheskikh uglej]. *Materialy shestoj Mezhdunarodnoj konferencii po tekhnologiyam i szhiganiyu dlya chistoj okruzhayushchej sredy «Chistyj vozduh»* (Proceedings of the sixth international conference on technologies and combustion for a clean environment «Clean air»). – Porty, Portugal, 2001, V. III, pp. 1473 – 1480.
4. Messerle V., Karpenko E., Lokvud F., Ustimenko A. Plasma-energy technologies of solid fuel use at thermal power plants. [Plazmenno-energeticheskie tekhnologii ispol'zovaniya tverdogo topliva na teplovyh elektrostanciyah]. *Materialy shestoj Mezhdunarodnoj konferencii po tekhnologiyam i szhiganiyu dlya chistoj okruzhayushchej sredy «Chistyj vozduh»* (Proceedings of the sixth international conference on technologies and combustion for a clean environment «Clean air»). – Porty, Portugal, 2001, pp. 1465 – 1468.
5. Petrov S. V., Saakov A. G. Plasma-catalyst of combustion of coal disconnecting. [Plazma-katalizator gorenija nizkoreaktivnyh uglej]. *Mir tekhniki i tekhnologij – The world of engineering and technology*, 2002, no. 7, pp. 40 – 41.
6. Petrov S. V., Saakov A. G. Plasma-catalyst of combustion of coal disconnecting. [Plazma-katalizator gorenija nizkoreaktivnyh uglej]. *16-j Mezhdunarodnyj simpozium po Plazmohimii* (16th international Symposium on plasma chemistry). – Taormina-Italy, 2003, pp. 346 – 356.
7. Petrov S., Kotlyarov L., Yacenko V. Mathematical modeling of plasma treatment of low-reactive coals. [Matematicheskoe modelirovanie plazmennoj obrabotki nizkoreaktivnyh uglej]. *Mezhdunarodnaya konferenciya po fizike nizkotemperaturnoj plazmy* (International conference on low-temperature plasma physics). – Kiev, 2003, pp. 235 – 245.
8. Dautov G. Yu., Timoshevskij A. N., Uryukov B. A. et al. *Plazmenno-energeticheskie tekhnologii dlya uluchsheniya ekologicheskikh i ekonomicheskikh pokazatelej szhiganiya i gazifikacii pylevidnogo uglya. – Generaciya nizkotemperaturnoj plazmy i plazmennye tekhnologii: Problemy i perspektivy* (Plasma-energy technologies for improving environmental and economic indicators of combustion and gasification of pulverized coal. – Generation of low-temperature plasma and plasma technologies: Problems and prospects). Novosibirsk: Nauka, 2004, vol. 20, pp. 341 – 366.
9. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Tyutebaev S.S. et al. Application of plasma ignition of solid fuels at Almaty CHP-2. [Primenenie plazmennogo vosplameneniya tverdyh topliv na Almatinskoj TEC-2]. *Vestnik KazNU im.al'-Farabi – Bulletin of the Treasury.al-Farabi*, Chemical series, 2011. no. 3 (63), pp. 168 – 172.
10. Messerle V. E., Karpenko E. I., Ustimenko A. B. et al. Modeling and testing of plasma-fuel systems on the boiler BKZ-420 of Almaty CHP-2. [Modelirovanie i ispytaniya plazmenno-toplivnyh sistem na kotle BKZ-420 Almatinskoj TEC-2]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologij i upravleniya – Bulletin of the East Siberian state University of technology and management*, 2012, no. 2 (37), pp. 21 – 27.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кайсаров Абылхайыр Канатович

Карагандинский государственный технический университет.

Нурсултан Назарбаев пр., д. 56, г. Караганда, 100000, Республика Казахстана.

Магистрант кафедры «Энергетические системы», КарГТУ.

Тел.: +7 (7212) 56-44-22.

E-mail: abul_29_95@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kaisarov Abylkhaiyr Kanatovich

Karaganda State Technical University.

Nursultan Nazarbayev Ave., 56, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan.

Master student of the department "Energy Systems", KSTU.

Phone: +7 (7212) 56-44-22.

E-mail: abul_29_95@mail.ru

Кызыров Кайрулла Бейсенбаевич

Kyzyrov Kairulla Beisenbaevich

Карагандинский государственный технический университет.

Нурсултан Назарбаев пр., д. 56, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан.

Кандидит технических наук, профессор кафедры «Энергетические системы», КарГТУ.

Тел.: +7 (7212) 56-44-22.

Karaganda State Technical University.

Nursultan Nazarbayev Ave., 56, Karaganda, 100000,

Republic of Kazakhstan.

Ph. D. in Engineering, professor of the department "Energy Systems", KSTU.

Phone: +7 (7212) 56-44-22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Кайсаров, А. К. Обработка плазмы с низким уровнем реактивного угля [Текст] / А. К. Кайсаров, К. Б. Кызыров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 106 – 114.

Kaisarov A. K., Kyzyrov K. B. Treatment of plasma with a low level of reactive coal. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 106 – 114 (In Russian).

УДК 656.259.9: 621.315.2

В. А. Володарский, А. Е. Гаранин

Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Красноярск, Российская Федерация

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Аннотация. Предложена математическая модель оптимизации технического содержания, позволяющая при заданной глубине восстановления ресурса определять оптимальную периодичность капитальных ремонтов и замены кабельных линий, а также оптимальное количество капитальных ремонтов за период срока службы кабельных линий.

Ключевые слова: ресурс, глубина восстановления, ремонт, замена, математическая модель, оптимизация.

Vladislav A. Volodarsky, Alexander E. Garanin

Irkutsk State Transport University (ISTU), Affiliated Branch of Irkutsk State Transport University in Krasnoyarsk, Krasnoyarsk, the Russian Federation

TO THE QUESTION OF CABLE LINES MAINTENANCE OPTIMIZATION

Abstract. The results of mathematical modeling of the optimization of maintenance cable lines are presented in article. The results can be used to calculate the optimal frequency and number of major repairs and substitutions of cable lines.

Keywords: operating lifetime, recovery, repair, replacement, mathematical model, optimization.

С 01.07.2014 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации межгосударственный стандарт ГОСТ 32192-2013 [1], устанавливающий термины и определения основных понятий в области надежности железнодорожной техники и распространяющийся на железнодорожную технику, включая объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Согласно этому стандарту под техническим содержанием понимается совокупность технических и организационных действий, направленных на поддержание и (или) возвраще-

ние железнодорожной техники в работоспособное состояние и (или) восстановление ее ресурса.

Неотъемлемым составным элементом любой системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) [2] (электрической централизации стрелок и светофоров, системы интервального регулирования движения поездов на перегонах, диспетчерской централизации и диспетчерского контроля за движением поездов и др.) являются кабельные линии (КЛ).

Для СЖАТ заводами кабельной продукции выпускается широкая номенклатура кабелей для сигнализации, централизации и блокировки с полиэтиленовой изоляцией в пластмассовой оболочке согласно ГОСТ Р 51312-99 [3], определяемая условиями прокладки и назначением [4]. При производстве к кабелю предъявляются многочисленные требования, включая электрическое сопротивление изоляции токопроводящих жил, которое должно составлять не менее 5000 и 4000 МОм на 1000 м длины для кабелей без гидрофобного и с гидрофобным заполнением сердечника соответственно.

После укладки кабельной линии в процессе эксплуатации в результате механических повреждений кабельных линий при неблагоприятных внешних факторах, например, таяние снега и наличие большого количества влаги, изоляция жил кабеля понижается.

Кабельные линии с позиций обеспечения надежности относятся к протяженным объектам с множеством последовательно соединенных различных элементов. Характерная особенность таких объектов – восстановление работоспособности только ограниченных неисправных участков без обновления ресурса КЛ в целом. Например, в процессе эксплуатации кабельных линий согласно требованиям [5] проводится их техническое обслуживание (ТО). Однако при выполнении ТО в виде осмотров, проверок, испытаний и измерений устанавливается только техническое состояние КЛ. По их результатам при необходимости проводится минимальный ремонт для восстановления работоспособности КЛ.

Согласно Инструкции по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки [5] проводятся измерения сопротивления изоляции жил кабеля с минимальным отключением монтажа мегаомметром на 500 В, которые в соответствии с Инструкцией по обеспечению безопасности движения поездов при технической эксплуатации устройств и систем СЦБ (ЦШ-530-11) [6] относятся к работам, выполняемым с разрешения дежурного по станции и с предварительной записью в Журнале осмотра путей, стрелочных переводов, устройств СЦБ, связи и контактной сети без выключения устройств СЦБ.

Сопротивления изоляции жил кабеля с минимальным отключением монтажа должно быть не менее 5 и 2,5 МОм для одиночной и спаренной стрелки соответственно, а также 2 и 20 МОм для релейных и питающих концов рельсовых цепей с дроссель-трансформаторами и с изолирующими путевыми трансформаторами соответственно.

Если сопротивление изоляции цепи не удовлетворяет норме, то производятся дополнительные измерения сопротивления изоляции кабельной линии с отключением монтажа, которое должно составить не менее 100 и 40 МОм для кабеля с пропитанной бумажной или полиэтиленовой и полихлорвиниловой изоляцией соответственно, пересчитанное на 1 км длины.

Если сопротивление изоляции жилы кабеля с отключенным монтажом составит менее 15 МОм в пересчете на 1 км длины, то кабель должен ремонтироваться или заменяться в течение пяти суток с момента обнаружения понижения изоляции.

В соответствии с Инструкцией [6] замена, ремонт кабеля или отдельных его жил к стрелке и монтажа в стрелочном электроприводе относится к работе, выполняемой с выключением устройств СЦБ и записью в Журнале осмотра путей, стрелочных переводов, устройств СЦБ, связи и контактной сети.

При этом согласно ГОСТу [7] при выполнении капитального ремонта (КР) происходит восстановление ресурса устройств до определенного уровня. Полное восстановление ресурса происходит только при замене устройств.

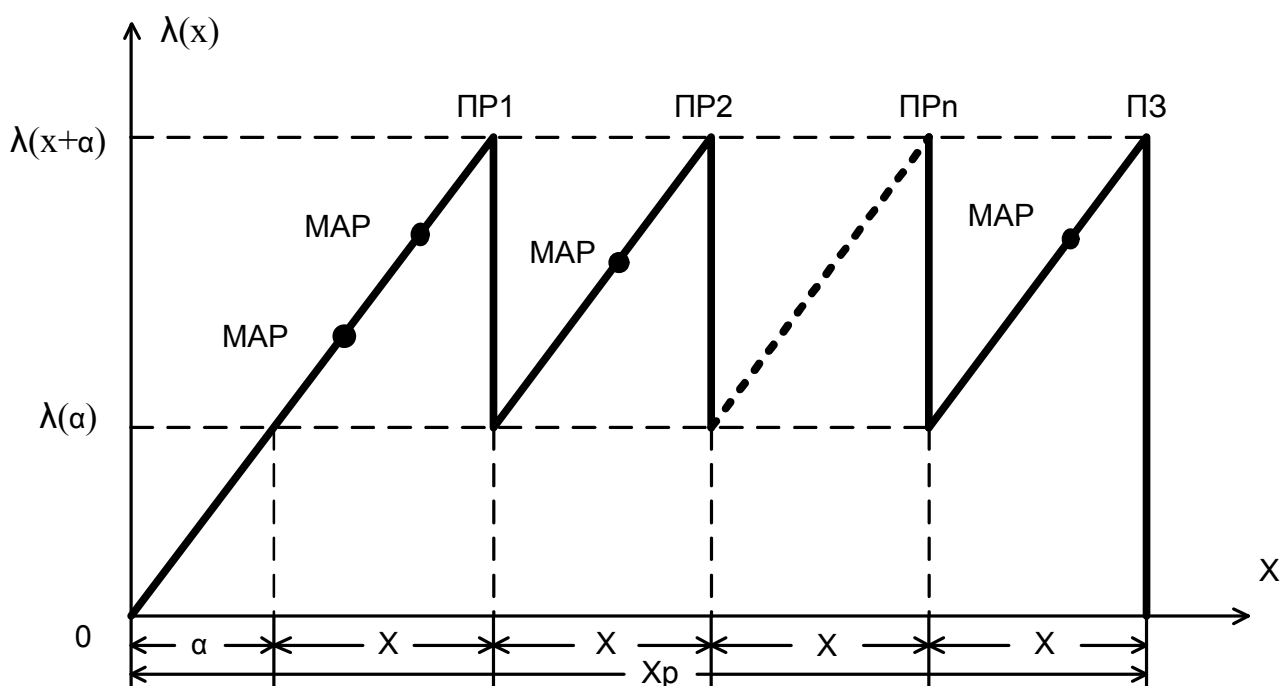
В настоящее время в теории надежности [8, 9] разработаны методические вопросы оптимизации предупредительных замен (ПЗ) с аварийными заменами (АЗ), когда полностью восстанавливаются первоначальная надежность устройств, или ПЗ с минимальным аварийным ремонтом (МАР) при отказах. В перечисленных публикациях учитываются только два крайних случая глубины восстановления ресурса: никакого обновления, когда выполняется МАР, и полное обновление, когда выполняется АЗ или ПЗ. Практический же интерес представляют промежуточные значения глубины восстановления ресурса между этими крайними случаями.

Цель статьи – разработка математической модели оптимизации технического содержания кабельных линий как протяженных объектов, отличающуюся учетом глубины восстановления ресурса.

Для учета глубины восстановления ресурса предлагается использовать согласно [10] параметр $a = T_{\text{др}} - T_{\text{мр}}$, означающий «возраст» КЛ после проведения капитального ремонта, где $T_{\text{др}}$ и $T_{\text{мр}}$ – доремонтный и межремонтный ресурсы соответственно [10]. В дальнейшем при разработке математических моделей оптимизации технического содержания для оценки глубины восстановления ресурса целесообразно использовать безразмерный параметр $\alpha = a/T_{\text{др}}$. Если $\alpha = 0$, то это означает, что проведена замена КЛ. Если проводится КР, например, через время τ , то «возраст» КЛ уменьшается от τ до $\alpha\tau$.

В процессе устранения отказов восстанавливается только отдельный поврежденный участок КЛ, что практически не изменяет текущих показателей надежности кабельной линии как протяженного объекта в целом.

Характер изменения интенсивности отказов (ИО) от времени эксплуатации при этой стратегии представлен на рисунке.



Изменение интенсивности отказов в случае предупредительных КР и замены с минимальным аварийным ремонтом

После проведения минимальных аварийных ремонтов интенсивность отказов не изменяется. После проведения предупредительных капитальных ремонтов (ПР) с периодичностью x

и глубиной восстановления ресурса α интенсивность отказов снижается до значения $\lambda(\alpha)$, а после проведения ПЗ с периодичностью x_p – до нуля. Интенсивность отказов в момент проведения ПР и ПЗ составляет $\lambda(x + \alpha)$. Здесь значения x и x_p измеряются в единицах ресурса.

Математическая модель оптимизации технического содержания при этой стратегии определяется по выражению

$$y = (1 + n\gamma + \varepsilon \int_0^{x_p} \lambda(x) dx) / x_p, \quad (1)$$

где y – относительные удельные эксплуатационные затраты; γ – параметр стоимости капитального ремонта; ε – параметр стоимости минимального аварийного ремонта; λ – интенсивность отказов.

Количество отказов на интервале $0 - x_p$ определится так:

$$\int_0^{x_p} \lambda(x) dx = \int_0^{\alpha} \lambda(x) dx + (n+1) \int_{\alpha}^{x+\alpha} \lambda(x) dx = n \ln P(\alpha) - (n+1) \ln P(x + \alpha), \quad (2)$$

где P – вероятность безотказной работы.

Подставив значения $\int_0^{x_p} \lambda(x) dx$ из (2) в (1) и учитывая, что $x_p = \alpha + (n+1)x$, получим математическую модель вида

$$y = \frac{1 + n\gamma + \varepsilon(n \ln P(\alpha) - (n+1) \ln P(x + \alpha))}{\alpha + (n+1)x}. \quad (3)$$

Рассмотрим два частных случая модели (3).

При $n = 0$, когда $\alpha = 0$ (проводятся только замены, которые полностью восстанавливают первоначальный ресурс), получим математическую модель вида

$$y = (1 - \varepsilon \ln P(x)) / x,$$

которая известна как модель предупредительных замен с минимальным аварийным ремонтом при отказе [8];

при $n \rightarrow \infty$ (проводятся только капитальные ремонты, которые частично восстанавливают первоначальный ресурс) после раскрытия неопределенности в выражении (3) получим математическую модель вида

$$y = (\gamma - \varepsilon(\ln P(x + \alpha) - \ln P(\alpha))) / x,$$

которая известна как модель предупредительных капитальных ремонтов с минимальным аварийным ремонтом при отказе [10].

С использованием выражения (3) при заданных значениях n и α оптимальная периодичность предупредительного капитального ремонта x_0 и минимум удельных эксплуатационных затрат y_0 определим из условия $\partial y / \partial x = 0$ как

$$(\alpha + (n+1)x_0) \lambda(x_0 + \alpha) + (n+1) \ln P(x_0 + \alpha) - n \ln P(\alpha) = (1 + n\gamma) / \varepsilon; \quad (4)$$

$$y_0 = \varepsilon \lambda(x_0 + \alpha).$$

Периодичность КР может быть определена по выражению:

$$x = (x_p - \alpha)/(n + 1). \quad (5)$$

Тогда

$$x + \alpha = (x_p + n\alpha)/(n + 1). \quad (6)$$

Подставив полученные значения x и $x + \alpha$ из (5) и (6) в выражение (3), преобразуем его к виду

$$y = \left(1 + n\gamma + \varepsilon \left(n \ln P(\alpha) - (n + 1) \ln P\left(\frac{x_p + n\alpha}{n + 1} \right) \right) \right) / x_p \quad (7)$$

С использованием выражения (6) при заданных значениях n и α оптимальную периодичность предупредительных замен x_{p0} и минимум удельных эксплуатационных затрат найдем из условия $\partial y / \partial x_p = 0$ как

$$x_{p0} \lambda \left(\frac{x_{p0} + n\alpha}{n + 1} \right) + (n + 1) \ln P\left(\frac{x_{p0} + n\alpha}{n + 1} \right) - n \ln P(\alpha) = (1 + n\gamma) / \varepsilon; \quad (8)$$

$$y_0 = \varepsilon \lambda \left(\frac{x_{p0} + n\alpha}{n + 1} \right).$$

С использованием выражения (6) при заданных значениях x_p и α оптимальное количество капитальных ремонтов n_0 определим из условия $\partial y / \partial n = 0$ как

$$\frac{x_p - \alpha}{n_0 + 1} \lambda \left(\frac{x_p + n_0\alpha}{n_0 + 1} \right) + \ln P\left(\frac{x_p + n_0\alpha}{n_0 + 1} \right) - \ln P(\alpha) = \gamma / \varepsilon. \quad (9)$$

На основе изложенного можно сделать следующие выводы.

1. При оптимизации технического содержания кабельных линий их необходимо рассматривать как протяженные объекты с учетом глубины восстановления ресурса.
2. Для учета глубины восстановления ресурса после проведения капитального ремонта целесообразно использовать параметр, определяемый как разница между доремонтным и межремонтным ресурсом, отнесенная к доремонтному ресурсу кабельных линий.

Предлагаемая математическая модель оптимизации технического содержания позволяет при заданной глубине восстановления ресурса определять оптимальную периодичность предупредительных капитальных ремонтов и замены кабельных линий, а также оптимальное количество капитальных ремонтов за период срока службы кабельных линий.

Список литературы

1. ГОСТ 32192-2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 28 с.

2. ГОСТ Р 53431-2009. Автоматика и телемеханика железнодорожная. Термины и определения [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.
3. ГОСТ Р 51312-99. Кабели для сигнализации и блокировки с полиэтиленовой изоляцией в пластмассовой оболочке. Технические условия [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 22 с.
4. Методические указания по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. Номенклатура кабелей связи, сигнально-блокировочных, силовых и контрольных, применяемых при разработке проектов [Текст] / Гипротрансигнальсвязь. – СПб., 2005. – 280 с.
5. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 126 с.
6. Инструкция по обеспечению безопасности движения поездов при технической эксплуатации устройств и систем СЦБ ЦШ-530-11 [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2011. – 148 с.
7. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2017. – 14 с.
8. Барлоу, Р. Математическая теория надежности [Текст]: Пер. с англ. под ред. Б. В. Гнеденко. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.
9. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход [Текст]: Пер. с нем. / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
10. Володарский, В. А. К вопросу оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств [Текст] / В. А. Володарский // Надежность. – 2011. – № 2. – С. 49 – 59.

References

1. *Nadejnost v jeleznodorojnoj tehnikе. Osnovnie ponatia. Termini i opredelenia, GOST 32192-2013* (Dependability in railway technics. General concepts. Terms and definitions, InterState Standard 32192-2013). Moscow: Standartinform, 2014, 28 p.
2. *Avtomatika i telemehanika jeleznodorojnaya. Termini i opredelenia, GOST 53431-2009*. (Railway automatics and telemechanics. Terms and definitions, InterState Standard 53431-2009). Moscow: Standartinform, 2010. 20 p.
3. *Kabeli dla signalizatsii i blokirovki s polietilenovoi izolasiei v plastmassovoi obolochke. Tehnicheskie uslovie, GOST 51312-99* (Polyethylene insulated and plastic sheathed block-signalling cables. Specifications, InterState Standard 51312-99). Moscow: Standartinform, 2004. 22 p.
4. *Metodicheskie ukazania po proektirovaniy ystroistv avtomatiki, telemehaniki i svazi na jeleznodorojnom transporte. Nomenklatura kabelei svazi, signalmo-blokirovochnih, silovih, i kontolnih, primenaenih pri razrabotke proektov, I-290-03* (The instruction of the engineering of the Railway automatics and telemechanics. Telecommunication, block-signalling, power cables for Railway Transport), St. Petersburg, Roszheldorprojet, 2005, 280 p.
5. *Instrukcia po tehničeskomu obslujivaniyu i remontu ustroistv i system signalizatsii, sentralizatsii i blokirovki* (Maintenance and repair instruction of the means of railway signaling, centralization and blocking. Order №3168p of the Joint Stock Company «Russian Railways»), Moscow, JSC «RZhD», 2015, 126 p.
6. *Instrukcia po obespecheniu bezopasnosti dvijenja poezdov pri tehničeskoi ekspluatatsii ustroistv i system signalizatsii, sentralizatsii i blokirovki* (The traffic safety for maintenance and repair instruction of the means of railway signaling, centralization and blocking. Order №2055p of the Joint Stock Company «Russian Railways»), Moscow, JSC «RZhD», 2011, 148 p.
7. *Sistema tehničeskogo obslujivanja i remonta tehniki. Termini i opredelenia, GOST 18322-2016* (Maintenance and repair system of engineering. Terms and definitions. InterState Standard 18322-2016). Moscow: Standartinform, 2017. 14 p.
8. Barlow R., Proschan F. *Matematicheskaia teoriia nadezhnosti* (Mathematical theory of reliability). Moscow: Soviet radio, 1969, 488 p.

9. Baihelt F., Franken P. *Nadejnost i tehicheskoe obslujivanie. Matematicheskiy podhod* (Dependability and Maintenance. Mathematical theory). Moscow: Radio and telecom, 1988, 392 p.
10. Volodarsky V. A. Optimization of preventive replacement and technical equipment repairs [K voprosu optimizatsii predupreditel'nykh zamen i remontov tehicheskikh ustroystv]. *Nadezhnost` – Dependability*, 2011, no. 2 (45), pp. 49 – 59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Володарский Владислав Афанасьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Ладо Кецовели ул., д. 89, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Системы обеспечения движения поездов», КРИЖТ ИрГУПС.

Тел.: +7 (391) 248-16-44.

E-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru

Гаранин Александр Евгеньевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Ладо Кецовели ул., д. 89, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы обеспечения движения поездов», КРИЖТ ИрГУПС.

Тел.: +7 (391) 248-16-44.

E-mail: alexandergaranin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volodarsky Vladislav Afanasievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

89, Keshoveli st., Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.

Ph. D., Professor of the department «Railway Traffic Support Systems», Affiliated Branch of Irkutsk State Transport University in Krasnoyarsk.

Phone: +7 (391) 248-16-44.

E-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru

Garanin Alexander Evgenievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

89, Keshoveli st., Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.

Ph. D., Associate Professor of the department «Railway Traffic Support Systems», Affiliated Branch of Irkutsk State Transport University in Krasnoyarsk

Phone: +7 (391) 248-16-44.

E-mail: alexandergaranin@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Володарский, В. А. К вопросу оптимизации технического содержания кабельных линий [Текст] / В. А. Володарский, А. Е. Гаранин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 114 – 120.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Volodarsky V. A., Garanin A. E. To the question of cable lines maintenance optimization. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 114 – 120 (In Russian).

УДК 662.613.002.61

В. К. Гаак¹, А. Ю. Финиченко¹, А. В. Гаак²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Акционерное общество «Объединенная теплоэнергетическая компания» (АО «ОТЭК»), г. Москва, Российская Федерация

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация. В статье описываются технологические мероприятия по подавлению образования вредных выбросов от объектов энергетики, использующих органическое топливо – природный газ, уголь и мазут. Предложены методы очистки дымовых газов от основных загрязняющих веществ. Представлены аппараты очистки большого объема дымовых газов повышенной концентрации золы и технологии сжигания топлива.

Ключевые слова: вредные выбросы, топливо, скруббер, эмульгатор, электрофильтр, рукавный фильтр, кипящий слой, окислы азота, зола.

Victor K. Gaak¹, Aleksandra U. Finichenko¹, Anton V. Gaak²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;

²United Heat Power Company joint-stock company (OTEC), Moscow, the Russian Federation

MAIN DIRECTIONS OF INCREASE IN ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF THERMAL POWER

Abstract. In article the technological actions for suppression of formation of harmful emissions from power objects using organic fuel are described – natural gas, coal and fuel oil. The methods of purification of combustion gases of the main pollutants are offered. Devices of cleaning of large volume of combustion gases of the increased concentration of ashes, and technology of combustion of fuel are presented.

Keywords: harmful emissions, fuel, scrubber, emulsifier, the electric precipitator, the hose filter, the boiling layer, nitrogen oxides, ashes.

Для производства тепловой энергии на теплоэнергетических предприятиях используют органическое топливо – природный газ, уголь и мазут. В европейской части России наибольшее применение получил природный газ как основное топливо и мазут как резервное топливо. В районах Дальнего Востока и Сибири для производства тепловой энергии в основном используется уголь и мазут, реже – природный газ.

Количество вредных выбросов от объектов энергетики составляет: золотвердые частицы – 38 %, окислы серы – 35 %, окислы азота – 40 %. Энергетика по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу вышла в России на второе место после автотранспорта. Загрузка мощностей тепловых электростанций в Сибири в последние годы возросла из-за снижения загрузки гидроэлектростанций по причине маловодности рек. Наибольшие проблемы складываются на электростанциях, сжигающих многозольный уголь, который имеет зольность выше 40 %. Теплоэнергетические установки, сжигающие мазут, имеют проблемы по очистке дымовых газов от окислов серы [1]. Предприятия, использующие природный газ, условно считаются безвредными, в то время как они выбрасывают в атмосферу наибольшее количество окислов азота.

Летучая зола, выходя из дымовой трубы, рассеивается на большую территорию, величина которой зависит от природных условий. Зола – мелкие взвешенные вещества, которые откладываются в легких человека и вызывают заболевания органов дыхания.

Окислы серы при попадании в атмосферу оказывают вредное влияние на глаза и органы дыхания человека.

Окислы азота – это бесцветный газ, не имеющий запаха, который воздействует на органы дыхания и совместно с углеводородами образует смог в окружающей среде.

В связи с возникающими неблагоприятными условиями при производстве тепловой энергии стоит задача по снижению выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду.

Наибольшее распространение использования твердого топлива (угля) для выработки тепловой энергии получило сжигание его на теплоэнергоцентралях (ТЭЦ), где совместно с тепловой энергией вырабатывается электрическая энергия. Сжигание угля производится на котельных агрегатах большой мощности, что позволяет использовать для очистки дымовых газов от золы эффективные золоуловители. КПД современных установок улавливания золы из дымовых газов достигает 99,95 %.

Улавливание золы на теплоэнергетических установках осуществляется сухим и мокрым способами. Сухой способ очистки газов от золы позволяет использовать золу в строительной индустрии как строительный материал, заменяющий песок или щебень, обладающий вяжущими свойствами. Мокрый способ очистки позволяет одновременно очистить дымовые газы от золы и окислов серы.

Наибольшее распространение получили установки по очистке дымовых газов от золы: скруббер ВТИ, эмульгатор, электрофильтр, рукавный фильтр, комбинированная система очистки с использованием одновременно мокрой и сухой систем очистки.

Скруббер (мокрая система очистки) (рисунок 1) имеет конструкцию в виде цилиндра 1, в который дымовые газы входят по касательной 2 и из закрученного потока тяжелые частицы золы прижимаются к стенке, где они смачиваются водой из форсунок 4, 5 расположенных по периметру установки. Частицы золы, впитавшие в себя влагу, под своим весом оседают в нижнюю часть скруббера, где смываются водой 3 и далее транспортируются на шламоотвал. КПД очистки от золы в такой установке достигает 96 – 98 % и до 40 % от окислов серы [2]. Недостатком такого способа очистки является большой расход золы, влагоунос, который приводит к коррозии выходных газоходов и дымовой трубы.

Эмульгатор (мокрая система) является новой системой улавливания золы по принципу завихрения потока на лопатках завихрителя и смачивания его распыленной водой или водным раствором извести (возможно использование едкого натра). Завихритель представляет собой, устройство цилиндрической формы, в которое встроены закручивающие поток лопатки треугольной формы, изготовленные из титана [3]. Над завихрителем устанавливают трубы водораспределения для орошения потока.

Поток дымовых газов, входя в корпус эмульгатора (рисунок 2), закручивается на лопатках завихрителя и при смачивании водой образует пенную смесь, в которой за счет турбулизации увеличивается контакт зольных частиц с мелкими пузырьками пены, обладающими большой контактной поверхностью, повышающей степень улавливания золы. Отработанная жидкость с уловленной золой сливается через лопаточный аппарат в золосмывной аппарат.

На некоторых установках малой мощности используют батарейные эмульгаторы (несколько завихрителей малого диаметра в одном корпусе), что позволяет использовать лопатки, изготовленные из высокопрочного коррозионно-стойкого пластика.

Эффективность улавливания золы в эмульгаторах достигает 99,5 %.

Недостатком донного золоуловителя является то, что после него дымовые газы выходят с низкой температурой 40 – 50 °С и повышенной влажностью. Для устранения данных проблем на выходе из эмульгатора устанавливают сепаратор для улавливания влаги на выходе из аппарата и подогреватель дымовых газов с подачей горячего воздуха.

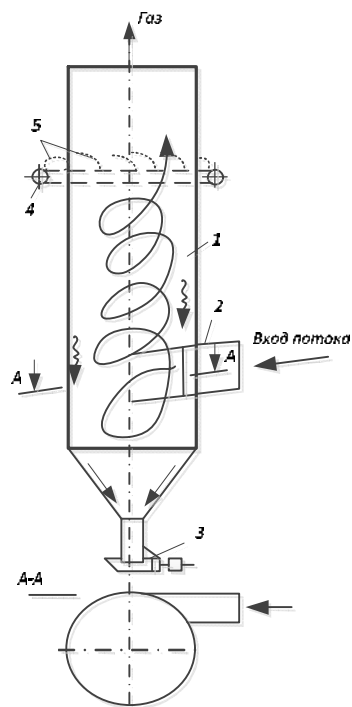


Рисунок 1 – Скруббер

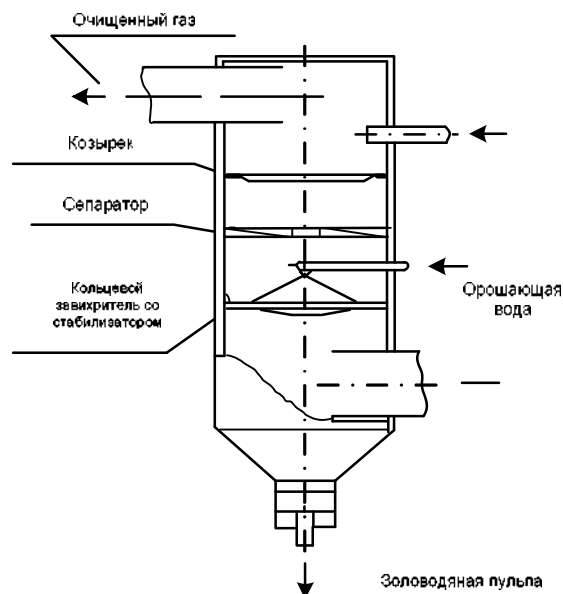


Рисунок 2 – Эмульгатор

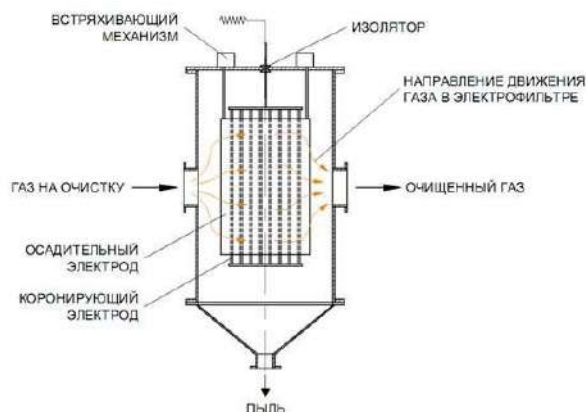


Рисунок 3 – Электрофильтр

горизонтальные и вертикальные; осадительные электроды изготавливаются в виде пластин или труб. Как правило, используют электрофильтры, имеющие три – пять полей осаждения, что сказывается на эффективности улавливания золы.

Электрофильтр состоит из изолированного корпуса, где размещены электроды; устройство для вывода золы из электрофильтра; узлы подачи в электрофильтр тока высокого напряжения с изоляторными коробками. Для равномерного распределения потока дымовых газов в активной части электрофильтра на входе в корпус устанавливают газораспределительную решетку.

На эффективность улавливания золы влияет качество угля, сжигаемого в котельных агрегатах, и свойства золы. Так, зола Экибастузского угля имеет высокое электрическое сопротивление и при прохождении ее через поле электрофильтра создается эффект «обратной короны», который снижает процесс получения электрического заряда частицами золы [5].

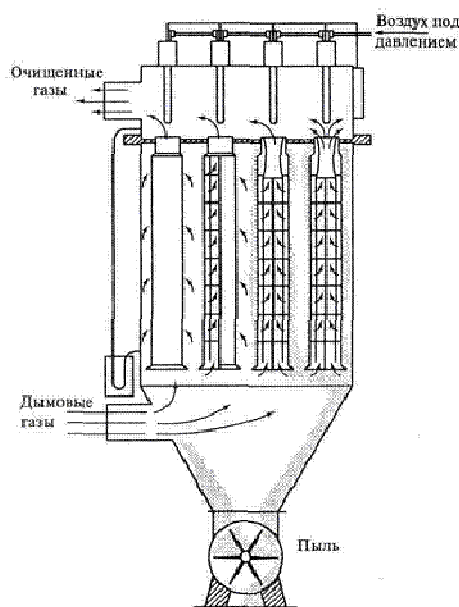


Рисунок 4 – Рукавный фильтр

дает в бункер и удаляется.

Тканевые рукава изготавливают из термо- и химически-стойкого материала, обладающего стойкими свойствами к износу, например: шерсть, войлок, лавсан, стекловолокно и др.

Электрофильтр – это устройство, в котором загрязненный поток проходит через элект-рическое поле между коронирующими и осадительными электродами, на которое подается постоянный ток напряжением до 100 кВ. Частицы золы, проходя между электродами, заряжаются отрицательным зарядом и движутся к осадительным электродам, имеющим положительный заряд, оседая на их поверхности (рисунок 3). Электрофильтры могут использоваться для очистки дымовых газов с большой концентрацией золы. КПД очистки достигает более 99 % [4]. Электрофильтры подразделяются по конструкции на

эффективность работы электрофильтров влияет режим встряхивания электродов путем использования ударно-молотковых механизмов. Промежутки между встряхиваниями должны увеличиваться для каждого последующего поля. Данный метод работы системы встряхивания позволяет уменьшить повторный унос золы при отряхивании электродов.

Недостатки использования электрофильтра: большие габариты устройства, металлоемкость, сложность конструкции, высокие затраты на оборудование и монтаж.

Рукавный фильтр представляет собой корпус для прохода дымовых газов, в котором расположены тканевые мешки (рукава) цилиндрической формы, одетые на проволочный каркас, расположенные вертикально либо горизонтально (рисунок 4). Частицы золы, проходя через ткань, оседают на ней. Для очистки рукавов от золы их периодически встряхивают или обдувают сжатым воздухом, зола осе-

Эффективность улавливания золы достигает 99,5 %.

Необходимо отметить, что в России использование рукавных фильтров для очистки дымовых газов в теплоэнергетике началось недавно. Рукавный фильтр с вертикальным расположением рукавов установлен на Рефтинской ГРЭС, а фильтр с горизонтальным расположением рукавов – на Омской ТЭЦ-5 [6]. Использование рукавного фильтра при сжигании мнгогозольного угля показало высокую эффективность.

Недостатками в работе рукавных фильтров являются высокое гидравлическое сопротивление, малый срок службы рукавов, необходимость наличия байпасного газохода помимо рукавного фильтра на период растопки котла и перехода на резервное топливо.

Опыт эксплуатации газоочистного оборудования показал, что при эксплуатации газоочистного оборудования на ТЭЦ при производстве тепловой энергии целесообразно использовать комбинированные устройства очистки газов от золы:

скруббер + электрофильтр (данная схема позволит снизить затраты на оборудование электрофильтра из-за уменьшения габаритов и используется на многих теплоэнергетических установках),

электрофильтр + рукавный фильтр (данная схема эффективно работает при высокой зольности сжигаемого угля за счет увеличения срока службы и эффективности очистки дымовых газов) [7].

Схемы очистки дымовых газов «электрофильтр + рукавный фильтр» в настоящее время не используются. При исследовании работы газоочистного оборудования при сжигании твердого топлива выявлено, что на первых двух полях электрофильтра улавливается 65 – 70 % золы и запыленность потока дымовых газов снижается с 64,6 до 22,8 г/нм³, что позволяет установить на выходе из него две секции рукавного фильтра, которые повысят эффективность очистки до 99,98 %.

Использование данной схемы очистки дымовых газов позволит повысить степень улавливания золы до максимальных величин, снизить затраты на систему золоулавливания, уменьшить нагрузку на фундамент каркаса газоочистки, повысить надежность работы рукавов и срок их использования из-за снижения запыленности потока на входе в рукавную секцию [8].

Эффективность работы газоочистного оборудования при переходе на комбинированную систему очистки можно рассмотреть на примере системы «электрофильтр + рукавный фильтр».

Так как в качестве первой ступени комбинированной системы очистки дымовых газов было выбрано два поля электрофильтра ЭГБМ-2-50-12-6-4, то для дальнейшего проектирования необходимо определить эффективность работы этого фильтра.

Для выбора рукавного фильтра второй ступени необходимо определить запыленность дымовых газов после первой ступени [9]. Из опыта эксплуатации электрофильтров следует отметить, что степень улавливания золы газораспределительной решеткой составляет примерно 10 %, а первым и вторым полями – 35 % и 15 % соответственно.

Зная начальную концентрацию золы в газе C_n на входе в установку, равную 60 г/нм³, можно рассчитать концентрацию золы в газе за двухпольным электрофильтром.

Запыленность дымовых газов после газораспределительной решетки, г/нм³, определяется по формуле:

$$C_{\text{реш}} = C_n \cdot (1 - 0,1) \quad (1)$$

$$C_{\text{реш}} = 60 \cdot (1 - 0,1) = 54 \text{ г / нм}^3.$$

Концентрация дымовых газов после первого поля электрофильтра, г/нм³,

$$C_{\text{пол}} = C_{\text{реш}} - C_n \cdot 0,35 \quad (2)$$

$$C_{\text{пол}} = 54 - 60 \cdot 0,35 = 33 \text{ г / нм}^3.$$

Запыленность дымовых газов после второго поля электрофилтра, г/нм^3 , определяется так:

$$C_{\text{шпол}} = C_{\text{пол}} - C_{\text{н}} \cdot 0,15 \quad (3)$$

$$C_{\text{шпол}} = 33 - 60 \cdot 0,15 = 24 \text{ г / нм}^3.$$

Следовательно, концентрация дымовых газов на входе в рукавный фильтр составляет 24 г/нм^3 . Эффективность работы электрофилтра, %, рассчитывается по формуле:

$$\eta_{\text{эф}} = 100 - \frac{C_{\text{шпол}}}{C_{\text{н}}} \cdot 100 \quad (4)$$

$$\eta_{\text{эф}} = 100 - \frac{24}{60} \cdot 100 = 60 \text{ \%}.$$

Степень очистки дымовых газов двумя полями электрофилтра составляет 60 %.

При расчете рукавного фильтра определяется удельная газовая нагрузка, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ на секцию:

$$q = q_{\text{н}} c_1 c_2 c_3 c_4 c_5, \quad (5)$$

где $q_{\text{н}}$ – нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли и ее склонности к агломерации, для дымовых газов, содержащих золу, данный коэффициент составляет 1,7 [10];

c_1 – коэффициент, характеризующий особенность регенерации фильтрующих элементов, для импульсной регенерации составляет 1,0 [11];

c_2 – коэффициент, учитывающий влияние концентрации пыли на удельную газовую нагрузку, при концентрации пыли 24 г/нм^3 данный коэффициент составляет 0,95 [11];

c_3 – коэффициент, учитывающий влияние дисперсного состава пыли в газе, по справочным данным его значение равно 1,4 [10];

c_4 – коэффициент, учитывающий влияние температуры газа, для расчета принимается равным 0,73 [10];

c_5 – коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки, принимаем равным 1,0 [10].

$$q = 1,7 \cdot 1,0 \cdot 0,95 \cdot 1,4 \cdot 0,73 \cdot 1,0 = 1,65 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{мин}).$$

Расчет рукавных фильтров для газов сводится к определению требуемой площади поверхности S , м^2 , фильтра по формуле:

$$S = \frac{Q_{\text{г}}}{60 \cdot q}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{г}}$ – объемный расход дымовых газов, $\text{м}^3/\text{ч}$, из эксплуатационных данных котлоагрегата № 3, принимается равным $485000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

$$S = \frac{485000}{60 \cdot 1,65} = 4897,99 \text{ м}^2.$$

Рассчитав необходимую площадь поверхности фильтрации, определим компоновку рукавного фильтра.

В качестве материала рукавов используется лавсан. Термостойкость данного материала составляет $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ при пористости 75 % и влагоемкости 0,4 %. Стойкость к действию кислот обозначается как «хорошая», а к действию щелочей – «удовлетворительная» [10].

Форма рукавов – эллиптическая. Размер рукава $150 \times 35 \times 2500$ мм [10]. Расположение рукавов принимается горизонтальным. Площадь поверхности фильтрования одного рукава, m^2 , рассчитывается по выражению:

$$S_p = 4 \frac{\pi ab + (a-b)^2}{a+b} \cdot h_p, \quad (7)$$

где a – большая полуось рукава эллиптической формы, м;

b – малая полуось рукава эллиптической формы, м;

h_p – высота рукава, м.

$$S_p = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 75 \cdot 10^{-3} \cdot 17,5 \cdot 10^{-3} + (75 \cdot 10^{-3} - 17,5 \cdot 10^{-3})^2}{75 \cdot 10^{-3} + 17,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 2,5 = 0,81 m^2.$$

Необходимое количество рукавов в рукавном фильтре определяется исходя из значения требуемой площади поверхности фильтрования и округляется до целого числа:

$$N_p = \frac{S}{S_p}; \quad (8)$$

$$N_p = \frac{4897,99}{0,81} \approx 6048 \text{ шт.}$$

Количество модулей в корпусе рукавного фильтра принимается равным четырем. Каждый модуль включает в себя шесть секций. Секция состоит из 252 рукавов.

Таким образом, общая площадь фильтрации данного фильтра составит $4899 m^2$, что удовлетворяет рассчитанной необходимой площади.

Чертеж общего вида секции рукавного фильтра представлен на рисунке 5. Эффективность работы рукавного фильтра, %, определяется по формуле:

$$\eta_{p.f} = 100 - \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{пол}}} \cdot 100\% \quad (9)$$

где $C_{\text{вых}}$ – необходимая концентрация золы на выходе из газоочистной установки, принимается равно $0,05 \text{ г/нм}^3$.

$$\eta_{p.f} = 100 - \frac{0,05}{24} \cdot 100 \% = 99,79 \%.$$

Рукавный фильтр с определенными параметрами обеспечивает эффективность очистки дымовых газов не ниже 99,79 %.

Для регенерации рукавного фильтра используется импульсная продувка рукавов. Данный вариант наиболее предпочтителен, так как не увеличивается количество воздуха в системе.

Импульсную регенерацию выполняют без отключения секций. Продолжительность импульса – 0,1 – 0,2 с, частота – 10 импульсов в минуту, давление сжатого воздуха – 500 – 600 кПа. Расход сжатого воздуха составляет 0,1 – 0,2 % от количества очищенного газа (воздуха) [10].

При определении экономической эффективности затрат капиталовложения на установку комбинированной системы очистки дымовых газов определено, что затраты на новую газоочистную установку снижаются на 20 %, хотя КПД повышается до 99,98 %.

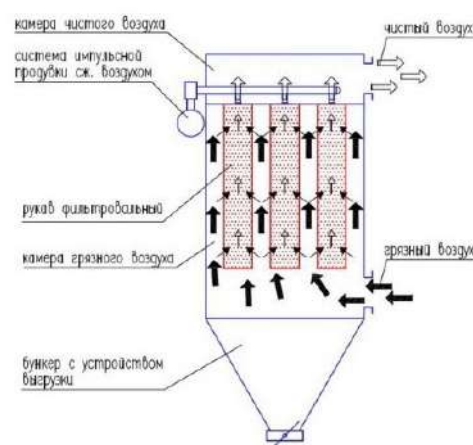


Рисунок 5 – Рукав фильтра с системой продувки

Список литературы

1. Жабо, В. В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС [Текст] / В. В. Жабо. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
2. Отчет результатов проведения испытания электрофильтра котлов № 1 и № 2 Омской ТЭЦ-5 [Текст] / Омскэнергонадзор. – Омск, 1996. – 145 с.
3. Беспалов, В. И. Природоохранные технологии на ТЭС [Текст] / В. И. Беспалов, С. У. Беспалова, М. А. Вагнер / Томский политехнический ун-т. – Томск, 2010. – 240 с.
4. Внуков, А. К. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов: Справочник [Текст] / А. К. Внуков. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 176 с.
5. Беспалова, С. У. Охрана воздушного бассейна от выбросов ТЭС: Учебное пособие [Текст] / С. У. Беспалова, Н. Н. Галашов / Томский политехнический ин-т. – Томск, 1985. – 240 с.
6. Русанова, Л. А. Справочник по пыли- и золоулавливанию [Текст] / Л. А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 312 с.
7. Вяхирева, Р. И. Экологические аспекты устойчивого развития теплоэнергетики России [Текст] / Р. И. Вяхирева. – М.: Ноосфера, 2000. – 76 с.
8. Отчет результатов проведения испытания рукавного фильтра котла № 9 Омской ТЭЦ-5 [Текст] / Кварц-групп. – Омск, 2016. – 98 с.
9. Руководство по эксплуатации № 14-018_2/РЭ «Рукавный фильтр с плоскими горизонтальными фильтровальными элементами» [Текст]. – М., 2013.
10. Бракович, И. С. Расчет рукавного фильтра [Текст] / И. С. Бракович, В. Д. Сизов, В. Н. Короткий / Белорусский нац. техн. ун-т: Минск, 2011. – 27 с.

References

1. Zhabo V. V. *Okhrana okruzhaiushchei sredy na TES i AES* (Environmental protection on thermal power plants and nuclear power plants). Moscow: Energoatomizdat, 1992, 240 p.
2. *Otchet rezul'tatov provedeniia ispytaniia elektrofilitra kotlov № 1 i № 2 Omskoi TETS-5* (Report of results of carrying out test of the electric precipitator of a copper No. 1 and No. 2 of the Omsk on thermal power plants-5). Omsk, Omskenergonaladka, 1996, 145 p.
3. Bepalov V. I. *Prirodooxranny'e tekhnologii na TE'S* (Nature protection technologies on thermal power plant). Tomsk, TPU, 2010, 240 p.
4. Vnukov A. K. *Zashhita atmosfery` ot vy`brosov e`nergoob`ektov: Spravochnik* (It is sewn up the atmospheres from emissions of power facilities: reference book). Moscow: Energoatomizdat, 1992, 176 p.
5. Bepalova S. U. *Okhrana vozdushnogo bassejna ot vy`brosov TE'S: Uchebnoe posobie* (Protection of the air basin from emissions of thermal power plant: manual). Tomsk, TPI, 1985, 240 p.
6. Rusanova L. A. *Spravochnik po py`le- i zoloulavlivaniyu* (Handbook of dust and ash collection). Moscow: Energoatomizdat, 1998, 312 p.
7. Vyakhireva R. I. *E`kologicheskie aspekty` ustojchivogo razvitiya teploe`nergetiki Rossii* (Ecological aspects of sustainable development of power system of Russia). Moscow: Noosphere, 2000, 76 p.
8. *Otchet rezul'tatov provedeniya ispy`taniya rukavnogo fil'tra kotla № 9 Omskoj TE'Cz-5* (Report of results of carrying out test of the hose filter of a copper No. 9 of the Omsk on thermal power plants-5). Omsk, Kvarts-group, 2016, 98 p.
9. *Rukovodstvo po e`kspluatacii № 14-018\_2/RE` «Rukavny`j fil'tr s ploskimi gorizonta`lny`mi fil'troval`ny`mi e`lementami»* (Operation manual No. 14-018_2/RE Hose filter with flat horizontal filtering elements). Moscow, 2013.
10. Brakovich I. S., Sizov V. D., Korotkii V. N. *Raschet rukavnogo fil'tra* (Calculation of the hose filter). Minsk, BNTU, 2011, 27 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гаак Виктор Климентьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-06-23.

E-mail: GaakVK@omgups.ru

Финиченко Александра Юрьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-06-23.

E-mail: Finichenko@mail.ru

Гаак Антон Викторович

Акционерное общество «Объединенная теплоэнергетическая компания» (АО «ОТЭК»).

Погорельский пер., д. 7, стр. 2, г. Москва, 119017, Российская Федерация.

E-mail: GaakVK@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гаак, В. К. Основные направления повышения экологической эффективности тепловой энергетики [Текст] / В. К. Гаак, А. Ю. Финиченко, А. В. Гаак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4 (40). – С. 120 – 128.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gaak Victor Klimentyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D. in Engineering, Professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: GaakVK@omgups.ru

Finichenko Aleksandra Yurevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: Finichenko@mail.ru

Gaak Anton Victorovich

United Heat Power Company joint-stock company (OTEC).

Pogorelsky Lane 7, p. 2, Moscow, 119017, the Russian Federation.

E-mail: GaakVK@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gaak V. K., Finichenko A. Yu., Gaak A. V. Main directions of increase in environmental efficiency of thermal power. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 120 – 128 (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 (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, подписуемые 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»

№ 4 (40) 2019

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 27.12.2019.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 27.12.2019.

