

Совершенствование системы контроля параметров в процессе сушки изоляции обмоток тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6

А. Н. Калякулин, М. В. Анахова, А. С. Тычков✉

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Российская Федерация

✉ al2000@rambler.ru

Резюме

В статье рассмотрен процесс сушки обмоток тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 с помощью калориферной установки. Анализ процесса сушки позволил выявить следующие недостатки: высокий риск влияния человеческого фактора как на сам процесс сушки, так и на измерение параметров; перегрев верхних слоев изоляции из-за несвоевременного отключения калориферов и, как следствие, образование микротрещин в верхних слоях изоляции; низкая энергетическая эффективность, а, значит, и увеличение расходов на электроэнергию. Для повышения эффективности сушки предлагается автоматизировать процесс работы калориферной установки при помощи внедрения схемы на базе современных силовых полупроводниковых приборов. Для текущего контроля параметров изоляции тяговых электродвигателей во время сушки предлагается использовать штатные мегаомметры МГМ-1 электровоза 2ЭС6, что позволит вести регистрацию и анализ исследуемых величин. Предлагаемая в данной статье система автоматического контроля состояния изоляции в процессе сушки на калориферной установке позволит: автоматизировать измерение сопротивления изоляции, что будет способствовать в режиме реального времени объективно оценить физическое состояние обмоток и принять своевременное решение о необходимости корректировки, продолжения или прекращения сушки; сократить продолжительность процесса сушки изоляции на калориферной установке; фиксировать оперативную информацию по параметрам изоляции тяговых электродвигателей в процессе сушки для его анализа и оптимизации.

Ключевые слова

тяговый электродвигатель, изоляция обмоток, калориферная установка, сопротивление изоляции, коэффициент абсорбции

Для цитирования

Калякулин А. Н. Совершенствование системы контроля параметров в процессе сушки изоляции обмоток тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 / А. Н. Калякулин, М. В. Анахова А. С. Тычков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 114–122. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).114-122

Информация о статье

поступила в редакцию: 21.03.2022 г.; поступила после рецензирования: 24.03.2022 г.; принята к публикации: 25.03.2022 г.

Improvement of the parameter control system in the process of drying the insulation of the windings of traction electric motors of electric locomotives 2ES6

A. N. Kalyakulin, M. V. Anakhova, A. S. Tychkov✉

Samara State Transport University, Samara, the Russian Federation

✉ al2000@rambler.ru

Abstract

The article deals with the process of drying the windings of traction electric motors of the electric locomotive 2ES6 using a calorifier installation. Analysis of the drying process revealed the following shortcomings: a high risk of the influence of the human factor, both on the drying process and on the process of measuring parameters; overheating of the upper layers of insulation due to untimely shutdown of the radiators and, as a result, the formation of microcracks in the upper layers of the insulation; low energy efficiency, which means increased energy costs. To increase the efficiency of drying, it is proposed to automate the process of operation of the calorifier unit by introducing a circuit based on modern power semiconductor devices. For the current control of the traction electric motors insulation parameters during drying, it is proposed to use the standard MGM-1 megohmmeters of the 2ES6 electric locomotive, which will allow recording and analyzing the studied values. The system of automatic control of the insulation condition proposed in this article during the drying process on the heater installation will allow: to automate the measurement of insulation resistance, which will allow in real time to objectively assess the physical condition of the windings and make a timely decision on the need to adjust, continue or stop drying; to shorten the duration of the insulation drying process on the heater installation; to fix the operational information on the insulation parameters of traction motors during the drying process for subsequent analysis and optimization of the process.

Keywords

traction motor, insulation, humidification, drying, parameters, insulation resistance, absorption coefficient

For citation

Kalyakulin A. N., Anakhova M. V., Tychkov A. S. Sovershenstvovanie sistemy kontrolya parametrov v protsesse sushki izolatsii obmotok tyagovykh elektrodvigateli elektrovozov 2ES6 [Improvement of the parameter control system in the process of drying the insulation of the windings of traction electric motors of electric locomotives 2ES6]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No.1 (73), pp. 114–122. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).114-122

Article info

Received: 21.03.2022; revised: 24.03.2022; accepted: 25.03.2022.

Введение

Изоляция обмоток тяговых электродвигателей (ТЭД) испытывает последствия различных видов воздействий: механических, электрических, тепловых. Увлажнение изоляции – фактор, отягчающий влияние указанных нагрузок, особенно характерный для зимних периодов эксплуатации с повышенным уровнем осадков и приводящий к снижению электрических свойств и уменьшению уровня диэлектрической прочности [1, 2].

Применение аппаратов защиты, средств технического диагностирования и контроля параметров состояния элементов ТЭД локомотивов помогают выявить последствия снижения диэлектрических свойств изоляции в виде неисправностей различных элементов ТЭД, но не позволяют восстановить и повысить качество самой изоляции [3, 4].

Проблема увлажнения изоляции актуальна для электровозов серии 2ЭС6 в виду наличия конструктивных недостатков защиты ТЭД от попадания атмосферных осадков. На переувлажнение изоляции влияет время нахождения электровоза в отстое [5]. Последствия увлажне-

ния обмоток – это «плавающее» значение сопротивления изоляции ТЭД. На рис. 1 представлен график «плавающей» изоляции: снижение сопротивления изоляции тяговых двигателей № 3-4 с 30 МОм до 13,92 МОм, дальнейшее восстановление сопротивления до 23 МОм и снижение до 15,5 МОм. График получен путем выгрузки из файла регистратора параметров микропроцессорной системы управления и диагностики (РПМ) электровоза 2ЭС6 № 889.

При таком значении сопротивления невозможно реализовать максимальную силу тяги, так как система управления электровозом отключает двигателя с низким сопротивлением изоляции. В самых тяжелых случаях тяговый двигатель может выйти из строя, о чем свидетельствуют распределение причин неплановых ремонтов ТЭД электровозов 2ЭС6 за 2020 г. [6, 7].

Анализ существующего технологического процесса сушки изоляции тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6

Основной существующий технологический процесс сушки ТЭД определен нормативными документами ОАО «РЖД» [8], а также

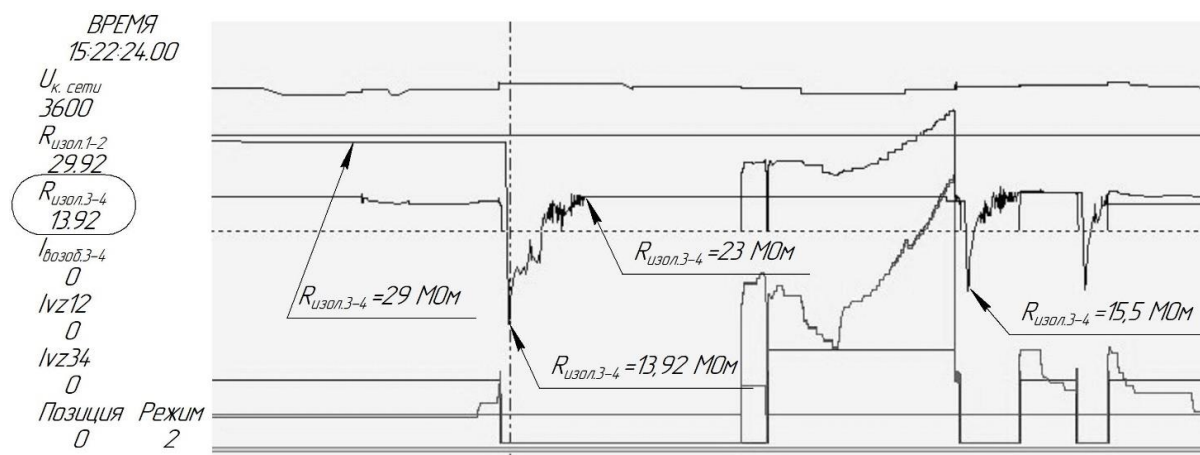


Рис. 1. Выгрузка из файла регистратора параметров микропроцессора электровоза 2ЭС6 № 889

Fig.1. Unloading from the microprocessor parameter logger file of electric locomotive 2ES6 no 889

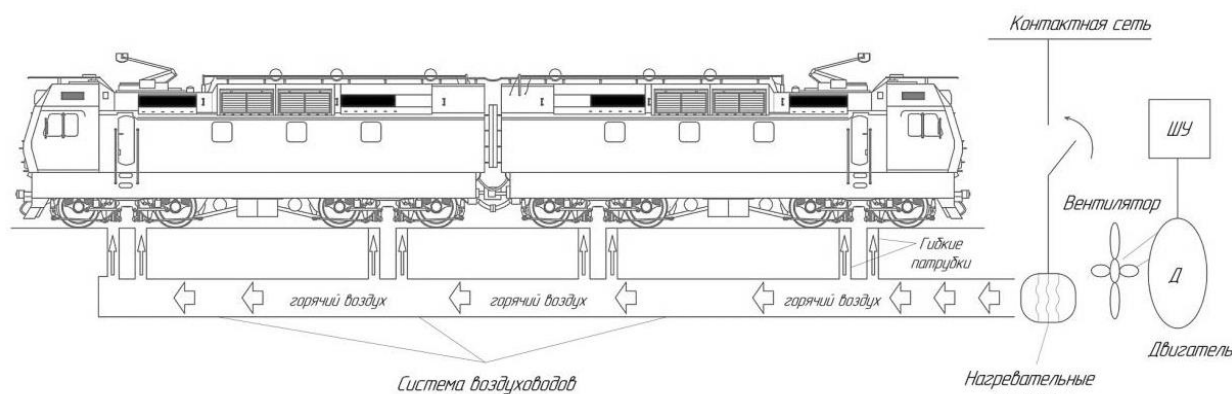


Рис. 2. Схема работы калориферной установки
Fig. 2. The scheme of operation of the heater installation

Руководством по эксплуатации электровоза 2ЭС6 [9]. Для сушки изоляции обмоток тяговых двигателей можно применять горячий воздух от стационарных калориферных установок, постоянный электрический ток низкого напряжения от специального источника и комбинированный способ – одновременно горячим воздухом и током низкого напряжения. Каждый способ имеет свои преимущества и недостатки [10, 11]. Широко распространен первый способ – сушка от стационарного калорифера на ремонтной позиции, схема которого приведена на рис. 2.

Постоянный электрический ток напряжением 3 кВ (от контактной сети), проходя по нагревательным элементам, выделяет тепло. В качестве нагревательных элементов используется тугоплавкий металл, как правило, это пусковые сопротивления, демонтированные с электровозов. Подключение нагревательных элементов к контактной сети производится вручную при помощи рубильника. Сотрудники, выполняющие данную операцию, должны быть специально обучены и относиться к категории оперативно-ремонтного персонала. Перед каждым включением рубильника должен оформляться наряд-допуск на выполнение работ повышенной опасности. Горячий воздух с поверхности нагревательных элементов поступает в систему воздухопроводов при помощи вентилятора, приводом которого является электродвигатель переменного тока (380 В), запуск электродвигателя осуществляется при помощи нажатия кнопки шкафа управления. Затем горячий воздух подается через гибкие патрубки воздухопроводов к нижним смотровым люкам тягового двигателя.

Недостатки существующего технологического процесса сушки изоляции ТЭД следующие:

1. Процесс происходит при участии ремонтного персонала, тем самым высоки риски влияния человеческого фактора как на сам процесс сушки, так и на измерение параметров.

2. Перегрев верхних слоев изоляции из-за неотключения калориферов и образование микротрещин в верхних слоях изоляции, при этом ТЭД повреждаются до такого уровня, что для восстановления требуется капитальный ремонт. Практика показывает, что включение вентилятора без калорифера чаще не выполняется, что обусловлено отвлечением оперативно-ремонтного персонала на другие срочные деповские работы.

3. Низкая энергетическая эффективность установки и, значит, повышенные расходы на электроэнергию и увеличение времени простоя на сушке.

С целью исключения указанных недостатков предлагается автоматизировать как управление калориферными установками, так и измерение контролируемых параметров таким образом, чтобы оба этих процесса проходили при минимальном участии человека.

Разработке новых способов сушки изоляции электромашин и конструкций установок для сушки посвящено большое количество научных работ [12–18]. В данном исследовании предлагается усовершенствовать процесс сушки изоляции ТЭД с использованием калориферных установок, которые в настоящее время используются в сервисных локомотивных депо ООО «СТМ-Сервис».

Автоматизация существующего технологического процесса сушки изоляции тягового электродвигателя электровозов 2ЭС6

Процесс сушки изоляции ТЭД согласно [8] имеет несколько периодов:

1. Включение вентилятора без нагрева
 $t = 20$ мин.

2. Включение вентилятора и калорифера
 $t = 60$ мин.

3. Замер сопротивления по истечении 60 минут сушки.

4. Включение вентилятора без нагрева
 $t = 30$ мин.

5. Пункты 2-4 повторяются до принятия сопротивлением изоляции постоянной величины.

Так как влага находится, в основном, в поверхностных слоях изоляции обмотки, то в период интенсивного нагрева большая ее часть удаляется в первых циклах процесса сушки. Чередование периодов интенсивного нагрева изоляции с хорошей вентиляцией позволяет использовать эффект внутреннего термовлагопереноса и завершить процесс с повышением уровня энергетической мощности в каждом цикле сушки с минимальными затратами энергии и на сравнительно низком температурном режиме, что, в свою очередь, не только значительно сокращает расход энергии, но и обеспечивает более высокий уровень диэлектрических свойств изоляции после сушки, а также уменьшает показатели ее старения. Циклическое подключение нагревательных элементов к контактной сети (3 кВ) может быть реализовано с помощью одного или нескольких тиристоров, включенных последовательно. Если тиристоры включены последовательно, то, по закону Кирхгофа, обратное напряжение, приложенное к тиристорам, поделится на количество тиристоров, включенных в цепь. У каждого тири-

стора своя вольтамперная характеристика, следовательно, при протекании через них одного и того же обратного тока, напряжения на тиристорах будут различными. В более тяжелом состоянии оказывается тиристор с меньшим временем восстановления запирающих свойств, к нему будет прикладываться суммарное напряжение всей системы (3 000 В), что приведет к самопроизвольному открытию тиристора или пробоем его структуры, поэтому перед включением тиристоров в последовательную цепь проводят их подбор по восстанавливающим и запирающим свойствам специальным устройством или указанная проверка выполняется заводом-изготовителем по предварительному согласованию. Оба варианта в условиях сервисного локомотивного депо выполнить затруднительно.

Вместо цепочки последовательно соединенных тиристоров предлагается использовать более мощный тиристор модели Т283-2500, повторяющееся импульсное обратное напряжение которого в зависимости от класса прибора может составлять 3 000–3 400 В. Стоимость одного такого тиристора больше стоимости комплекта тиристоров, рассчитанных на меньшее напряжение, однако его использование экономически выгодно, так как отпадает необходимость разработки и приобретения специальной электрической схемы для защиты последовательно соединенных тиристоров от неравномерного распределения напряжения.

Для отвода тепла от тиристора следует применить охладитель модели О473, управлять моментами включения и выключения тиристора Т283-2500 следует при помощи драйвера ДРТ11-5-6ФПК-1, причем все комплектующие производятся ПАО «Электровыпрямитель». С учетом предлагаемых изменений установка будет скомпонована следующим образом (рис 3).

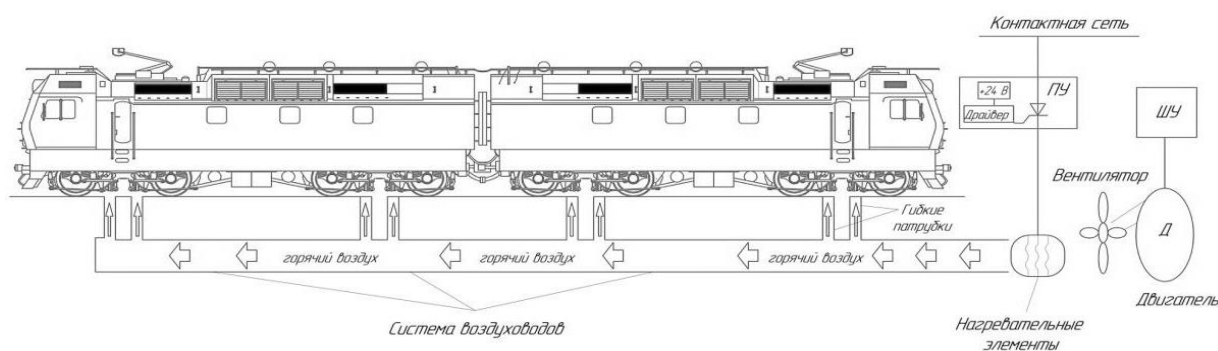


Рис. 3 Схема сушильной установки после автоматизации
Fig. 3. The scheme of the drying plant after automation

дующим аналого-цифровым преобразованием сигналов и расчетом сопротивления изоляции. Важно, что МГМ-1 имеет встроенное программное обеспечение MGM1ver6.0, с помощью которого самостоятельно производится расчет сопротивления изоляции. Никаких дополнительных усилителей или дешифраторов кодов не требуется, передача «готового» сигнала осуществляется по интерфейсу RS-485. Мегомметры имеют следующие разъемы «+3 000 В» и «-3 000 В» для подключения плюса и минуса от силовой цепи, а также «X1» и «X2», которые предназначены для подачи питания, а также передачи сигнала о значении сопротивления изоляции по интерфейсу RS-485 на удаленную систему сбора информации.

Суть предлагаемого алгоритма заключается в подключении источника питания +50 В к мегомметрам МГМ-1 тяговых двигателей № 1–2, № 3–4, № 5–6 и № 7–8, передаче значения сопротивления по интерфейсу RS-485 от мегомметров на персональный компьютер с выводом информации в виде графиков на монитор диспетчера по ремонту сервисного локомотивного депо (рис. 5). Источник питания через реле времени, настроенное на время 95 с, «включено», 10 мин. «выключено», подает постоянное напряжение +50 В на питание измерителей изоляции тяговых двигателей. Так обеспечивается интервал замера сопротивления не один раз в 60 мин., а 1 раз в 10 мин. Подача +50 В обеспечивает включение мегомметров, непосредственно измерение – подачу испытательного напряжения на электрические цепи и обработку сигнала с последующей передачей.

Стандартная конфигурация персонального компьютера не имеет интерфейс RS-485, но включает COM-порт, имеющий интерфейс RS-232. Поэтому по интерфейсу RS-485 информация о состоянии изоляции поступает на преобразователь интерфейса. Преобразователь интерфейса соединяется с персональным компьютером стандартным кабелем с COM-портом. Персональный компьютер получает информацию с мегомметров под руководством программного обеспечения. Графики состояния изоляции тяговых двигателей строятся программным обеспечением по осям «время» – «сопротивление изоляции».

По значению сопротивления изоляции можно судить об удалении влаги, своевременно отключить калориферную установку от электровоза или перекрыть подачу горячего воздуха к паре двигателей, тем самым исключив «пересушивание» изоляции и образование микротрещин на её поверхности. При достижении сопротивления изоляции 20 МОм на паре ТЭД программное обеспечение подаст сигнал о необходимости прекращения сушки на указанных ТЭД. Дежурным работником осуществляется перекрытие воздуха к высушенной паре. При достижении сопротивления изоляции значения 20 МОм на всем электровозе, программное обеспечение снимает питание с драйвера тиристора, обеспечивая его закрытие и отключение нагревательных элементов от контактной сети. Окончательное выключение вентиляторов производится дежурным работником отключением кнопки шкафа управления – выключается вентилятор обдува. Таким образом, предлагае-

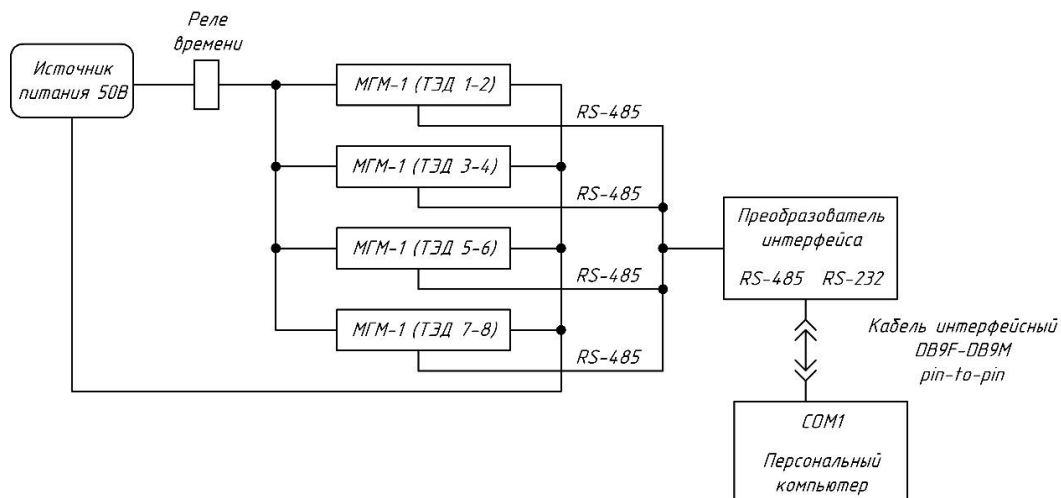


Рис. 5. Схема замера параметров изоляции

Fig. 5. The scheme of measurement of insulation parameters

мое программное обеспечение позволит отследить значение параметров изоляции с интервалом в 10 мин.

В качестве дальнейшей перспективы предложенного пути совершенствования процесса сушки увлажненной изоляции является разработка технической возможности вычисления коэффициента абсорбции. Также в качестве совершенствования конструкции сушильной установки в дальнейшем предлагается дооснастить ее электрическими заслонками дистанционного управления для перекрытия определенной пары ТЭД по значению коэффициента абсорбции.

Автоматизация измерения таких параметров изоляции ТЭД, как сопротивление и коэффициент абсорбции позволит в режиме реального времени объективно оценивать физическое состояние обмоток и в случае необходимости принять своевременное решение о продолжении или прекращении процедуры сушки.

Анализ экономической целесообразности

Экономическое обоснование целесообразности применения данного устройства следует из анализа финансовых поступлений и потерь.

Как известно, отказ ТЭД может вызывать простой электровоза, что ведет к финансовым потерям. При плотном графике движения возможна задержка до четырех составов на один аварийный случай. Среднее значение величины убытков от сбоя графика движения поездов может составить до 220 тыс. руб.

Для оценки экономического эффекта это устройство классифицируется как работа, предотвращающая ущерб. Использование разработки приводит к экономии эксплуатационных расходов, снижению затрат на ремонты ТЭД, повышению производительности труда (табл.).

Отток денежных средств на внедрение технологического процесса приблизительно составит 265 тыс. руб. Это стоимость самого устройства.

Целесообразность внедрения основана на снижении расходов и убытков при ремонте и эксплуатации ТЭД. Так как предлагаемое решение восстановит параметры изоляции, сократит время сушки, ожидается следующее:

- снижение расходов на плановые ремонты;
- снижение расходов от времени простоя электровоза на неплановых ремонтах;

Финансовый итог от снижения расходов сократит отток денежных средств от внедрения.

Для оценки экономического эффекта проведен расчет себестоимости сушки изоляции ТЭД до внедрения с учетом взносов в фонды при программе ремонта 800 ед. (средний парк электровозов в сто единиц в депо) $C_1 = 1\,180\,473,27$ руб.

Неплановые ремонты составляют 15% случаев в год от программы ремонта (800 единиц ТЭД). С учетом этого себестоимость сушки изоляции ТЭД составит $C_1 = 1\,357\,544,27$ руб.

Себестоимость сушки ТЭД после внедрения калориферной установки снизится за счет автоматизации процесса и сокращения времени сушки и будет равна $C_2 = 632\,597,50$ руб.

Капитальные вложения (в том числе стоимость оборудования, монтаж) $K_2 = 265\,000$ руб.

Приведенные затраты $Z_1 = 1\,357\,544,27$ руб.; $Z_2 = 632\,597,50 + 0,15 \cdot 265\,000 = 672\,347,50$ руб.

Годовой экономический эффект составит $\Theta = 1\,357\,544,27 - 672\,347,50 = 685\,196,77$ руб.

Наличие экономического эффекта говорит о целесообразности внедрения нового метода сушки изоляции ТЭД. Срок окупаемости при этих условиях равен:

$T = 265\,000 / (1\,357\,544,27 - 632\,597,5) \approx 0,4$ года.

Экономический эффект достигается за счет снижения оттока средств на плановые и неплановые ремонты по восстановлению работоспособности ТЭД. Это происходит за счет автоматизации процесса сушки изоляции, оптимизации самого процесса по времени, более тонкой настройки установки и повышения производительности труда.

Заключение

Исходя из сказанного, сделан вывод о необходимости внедрения предлагаемой установки.

Предлагаемый процесс сушки обмоток электровозов 2ЭС6 позволит:

- автоматизировать измерения сопротивления и коэффициента абсорбции, что будет способствовать объективной оценке физического состояния обмоток и принятию своевременного решения о продолжении или прекращении сушки;
- сократить продолжительность процесса сушки изоляции на калориферной установке;
- фиксировать оперативную информацию по параметрам изоляции ТЭД в процессе сушки для последующего анализа и оптимизации процесса.

Список литературы

1. Гордеев И.П., Калякулин А.Н., Тычков А.С. Исследование диэлектрических параметров изоляции силовых цепей электровозов // Наука и образование транспорту. 2014. № 1. С. 13-15.
2. Диагностирование тяговых электродвигателей локомотивов с учетом диэлектрических свойств изоляции / А.Н. Калякулин, А.Ю. Балакин, А.С. Тычков, П.В. Шепелин // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (в 3-х частях). Омск, 10–11 декабря 2015 года. Омск: ОмГУПС, 2015. Т. 1. С. 231–236.
3. Калякулин А.Н., Тычков А.С., Анахова М.В. Анализ схем включения реле защиты от заземления в силовых цепях тепловозов // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 1(67). С. 11-16.
4. Калякулин А.Н., Тычков А.С., Силаев В.А. Выравнивание рабочего напряжения в изоляции обмоток тяговых электродвигателей тепловозов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 375-387.
5. Влияние увлажнения на безотказность изоляции ТЭМ электровозов / Ю.И. Попов, В.П. Смирнов, С.И. Баташов, Р.С. Чубов // Труды международной интернет-конференции «Современные проблемы железнодорожного транспорта». Москва, 07 апреля 2020 года. М. : Российский университет транспорта, 2020. С. 425-428.
6. Яковлев К.Н., Саланов А.Е. Анализ случаев неплановых видов ремонта электровозам серии 2ЭС6 в Свердловской дирекции тяги // Материалы Международной научно-практической конференция «Синтез науки и образования как механизм перехода к постиндустриальному обществу». Таганрог, 12 апреля 2021 года. Уфа: ООО «ОМЕГА САЙНС», 2021. С. 50-55.
7. Буйнов А.П., Худояров Д.Л., Тюшев И.А. Разработка алгоритма диагностики тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 «Синара» // Транспорт Урала. 2021. № 4(71). С. 74-79. DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-74-79.
8. Распоряжение ОАО «РЖД» от 20 января 2012 г. № 77р «Об утверждении Инструкции по подготовке к работе и техническому обслуживанию электровозов в зимних и летних условиях».
9. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Часть 9. Техническое обслуживание и текущий ремонт. 2ЭС6.00.000.000 РЭ8. Екатеринбург: Уральские локомотивы, 2011. 326 с.
10. Экспериментальные исследования основных электротехнических параметров изоляции тяговых двигателей электровозов при сушке разными способами / Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.М. Худоногов [и др.] // Транспорт Урала. 2020. № 3(66). С. 72-75. DOI 10.20291/1815-9400-2020-3-72-75.
11. Сравнительные экспериментальные исследования основных электротехнических параметров изоляции электрооборудования после сушки различными способами / В.А. Кручек, Е.Ю. Дульский, А.А. Воробьев, Е.И. Макарова // Электротехника. 2021. № 2. С. 18-20.
12. Пат. 2324278 Рос. Федерация. Способ сушки изоляции электрических машин / Д.В. Коноваленко, Р.Ю. Упырь, А.М. Худоногов. № 2006143925 ; заявл. 11.12.2006 ; опубл. 10.05.2008, Бюл. № 13. 4 с.
13. Пат. 2494517 Рос. Федерация. Трехциклового амплитудно-широко-прерывный способ сушки изоляции электрических машин / В.В. Сидоров, Е.М. Лыткина, Д.В. Коноваленко [и др.]. № 2011150204 ; заявл. 09.12.2011 ; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27. 6 с.
14. Пат. 2398340 Рос. Федерация. Установка для сушки изоляции обмоток электрических машин / Д.В. Коноваленко, А.М. Худоногов, Е.К. Ревизоров. № 2009106314; заявл. 24.02.2009 ; опубл. 27.08.2010, Бюл. №24. 6 с.
15. Пат. 2525296 Рос. Федерация. Селективный способ сушки увлажненной или пропитанной изоляции обмоток якоря тяговых электрических машин инфракрасным излучением и устройство для его реализации / А.М. Худоногов, Е.М. Лыткина, Е.Ю. Дульский [и др.]. № 2012143541; заявл. 11.10.2012 ; опубл. 10.08.2014, Бюл. №22. 6 с.
16. Пат. 2569337 Рос. Федерация. Инфракрасно-конвективно-вакуумный способ сушки изоляции обмоток магнитной системы остова тяговой электрической машины и устройство для его реализации / А.М. Худоногов, Е.М. Лыткина, Е.Ю. Дульский [и др.]. № 2012145098; заявл. 23.10.2012 ; опубл. 20.11.2015, Бюл. №32. 6 с.
17. Dulsky E.Yu., Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Khudonogov I.A. A functional approach to the analysis of technological processes of using thermal radiation in the process of repairing insulation of electric locomotive equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, May 21–24, 2019. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012019. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012019.
18. Sidorova A., Cheremukhin A., Semenov D., Astakhova T. Algorithm for Determining the State of Impregnated Paper Insulation of High-Voltage Cables // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. Vol. 20. No 4. P. 20190002. DOI 10.1515/ijeeps-2019-0002.

References

1. Gordeev I.P., Kalyakulin A.N., Tychkov A.S. Issledovanie dielektricheskikh parametrov izolyatsii silovykh tsepei elektrovozov [Investigation of dielectric insulation parameters of electric locomotive power circuits]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education for transport]. 2014, no 1, pp. 13-15.
2. Kalyakulin A.N., Balakin A.Yu., Tychkov A.S., Shepelin P.V. Diagnostirovanie tyagovykh elektrodvigatelei lokomotivov s uchetom dielektricheskikh svoystv izolyatsii [Diagnostics of traction electric motors of locomotives taking into account the dielectric properties of insulation]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava» (v 3-kh chastyakh)* [Proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation «Technological support of repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock» (in 3 parts)]. Омск, 2015. Vol. 1, pp. 231-236.
3. Kalyakulin A.N., Tychkov A.S., Anakhova M.V. Analiz skhem vklyucheniya rele zashchity ot zazemleniya v silovykh

tsepyakh teplovozoov [Analysis of circuits for switching on the grounding protection relay in the power circuits of diesel locomotives]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region]. 2018, no 1(67), pp. 11–16.

4. Kalyakulin A.N., Tychkov A.S., Silaev V.A. Vyravniwanie rabocheho napryazheniya v izolyatsii obmotok tyagovykh elektrodvigatelyei teplovozoov [Equalization of the operating voltage in the insulation of the windings of traction electric motors of locomotives]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences]. 2019, no 2, pp. 375–387.

5. Popov Yu.I., Smirnov V.P., Batashov S.I., Chubov R.S. Vliyanie uvlazhneniya na bezotkaznost' izolyatsii TEM elektrovzoov [The effect of humidification on the reliability of insulation of TEM electric locomotives]. *Trudy mezhdunarodnoi internet-konferentsii «Sovremennye problemy zhelezнодорожного транспорта»* [Proceedings of the International Internet conference «Modern problems of railway transport»]. Moscow, 2020, pp. 425–428.

6. Yakovlev K.N., Salanov A.E. Analiz sluchaev neplanovykh vidov remonta elektrovzoov serii 2ES6 v Sverdlovskoy direktsii tyagi [Analysis of cases of unplanned types of repair of electric locomotives of the series 2ES6 in the Sverdlovsk Directorate of Traction]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sintez nauki i obrazovaniya kak mekhanizm perekhoda k postindustrial'nomu obshchestvu»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Synthesis of Science and Education as a Mechanism of Transition to Post-Industrial Society»]. Ufa, 2021, pp. 50–55.

7. Buynosov A.P., Khudoyarov D.L., Tyushev I.A. Razrabotka algoritma diagnostiki tyagovykh elektrodvigatelyei elektrovzoov 2ES6 «Sinara» [Development of an algorithm for diagnosing traction electric motors of electric locomotives 2ES6 «Sinara»]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2021, no 4(71), pp. 74–79. DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-74-79.

8. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 20 yanvarya 2012 g. № 77r «Ob utverzhdenii Instruktsii po podgotovke k rabote i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu elektrovzoov v zimnikh i letnikh usloviyakh» [Order of JSC «Russian Railways» dated January 20, 2012 no 77r «About the approval of the Instruction on preparation for operation and maintenance of electric locomotives in winter and summer conditions»].

9. Elektrovoz gruzovoi postoyannogo toka 2ES6 s kollektornymi tyagovymi elektrodvigatelyami. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' 9. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i tekushchii remont. 2ES6.00.000.000 RE8. [DC freight electric locomotive 2ES6 with brushed traction motors. Instruction Manual. Part 9. Maintenance and current repairs. 2ES6.00.000.000 UM8]. Ekaterinburg: Ural'skie lokomotivy Publ., 2011. 326 p.

10. Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Novikov N.N., Divinets M.A. Eksperimental'nye issledovaniya osnovnykh elektrotekhnicheskikh parametrov izolyatsii tyagovykh dvigatelei elektrovzoov pri sushke raznymi sposobami [Experimental studies of the main electrotechnical parameters of insulation of traction motors of electric locomotives at the drying of different ways]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2020, no 3(66), pp. 72–75, DOI 10.20291/1815-9400-2020-3-72-75.

11. Kruchek V.A., Dulskii E.Yu., Vorobyov A.A., Makarova E.I. Sravnitel'nye eksperimental'nye issledovaniya osnovnykh elektrotekhnicheskikh parametrov izolyatsii elektrooborudovaniya posle sushki razlichnymi sposobami [Comparative experimental studies of the main electrotechnical parameters of insulation of electrical equipment after drying by various ways]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2021, no 2, pp. 18–20.

12. Konovalenko D.V., Upry' R.Yu., Khudonogov A.M. Patent RU 2324278 C1, 10.05.2008.

13. Sidorov V.V., Lytkina E.M., Konovalenko D.V., Khudonogov A.M., Garev N.N., Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Patent RU 2494517 C2, 27.09.2013.

14. Konovalenko D.V., Khudonogov A.M., Revizorov E.K. Patent RU 2398340 C1, 27.08.2010.

15. Khudonogov A.M., Lytkina E.M., Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Garev N.N., Vyzhimova V.N. Patent RU 2525296 C2, 10.08.2014.

16. Khudonogov A.M., Lytkina E.M., Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Garev N.N., Vyzhimova V.N. Patent RU 2569337 C2, 20.11.2015.

17. Dulskii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Khudonogov I.A. A functional approach to the analysis of technological processes of using thermal radiation in the process of repairing insulation of electric locomotive equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, May 21–24, 2019. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012019. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012019.

18. Sidorova A., Cheremukhin A., Semenov D., Astakhova T. Algorithm for Determining the State of Impregnated Paper Insulation of High-Voltage Cables // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. Vol. 20. No 4. P. 20190002. DOI 10.1515/ijeeps-2019-0002.

Информация об авторах

Калякулин Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрического транспорта, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, e-mail: Alexeiruz@yandex.ru

Анахова Марина Вениаминовна, канд. техн. наук, доцент кафедры электрического транспорта, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, e-mail: amv-63@mail.ru

Тычков Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрического транспорта, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, e-mail: al2000@rambler.ru

Information about the authors

Alexei N. Kalyakulin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Electric Transport», Samara State Transport University, Samara, e-mail: Alexeiruz@yandex.ru

Marina V. Anakhova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Electric Transport», Samara State Transport University, Samara, e-mail: amv-63@mail.ru

Alexander S. Tychkov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Electric Transport», Samara State Transport University, Samara, e-mail: al2000@rambler.ru