

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.423.31:621.3.048

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-236-245>EDN: <https://elibrary.ru/hgfzuw>

Повышение эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции тяговых электродвигателей на основе электрокинетических явлений

Е. А. Третьяков, О. В. Балагин, С. В. Живушко✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В период года с преобладанием отрицательных значений температуры окружающего воздуха существует высокая вероятность пробоя изоляции тяговых электродвигателей электровозов, при этом неизбежно снижение эксплуатационной надежности электровоза в целом. Примерно в 70 % случаев пробоя изоляции происходят из-за увлажнения обмоток и коллектора. Цель работы — исследование возможности повышения эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции коллекторных тяговых электродвигателей постоянного тока на основе электрокинетических явлений (электроосмоса) с отработкой фактических параметров процесса электроосмотической сушки.

Материалы и методы. Получены опытные данные на основе проведения испытаний на реальных тяговых электродвигателях в сервисном локомотивном депо. Для реализации технологии электроосмотической сушки применялось устройство для увлажнения обмоток и коллектора электродвигателя, разработанное авторами, а также штатные приборы для измерения сопротивления изоляции тяговых электродвигателей.

Результаты. Выполненные исследования показали, что электроосмотическую сушку целесообразно проводить при напряжении 3000 В; сушка эффективна при обдуве от электрокалориферных установок, совместное использование электроосмотической и электрокалориферной сушки за первые два-три часа повышает сопротивление изоляции на 20–40 %; электроосмотическая сушка показывает наибольшую скорость нарастания сопротивления изоляции при подключении ее к обмоткам с сопротивлением ниже 500 кОм; расход электроэнергии при использовании электроосмотической сушки совместно с электрокалориферной снижается на 60 %, а затраты времени — на 20 %.

Обсуждение и заключение. Технология сушки найдет применение в условиях сервисного локомотивного депо в цехах при проведении ТР-1 и при эксплуатации тягового электроподвижного состава в условиях низких значений температуры окружающего воздуха. Возможно применение сушки при горячем отстое электровозов, эффективность этого способа потребует опытного подтверждения. Применение предлагаемой технологии повышения сопротивления увлажненной изоляции позволит снизить количество отказов тяговых электродвигателей за счет использования электрокинетических явлений, обеспечивая повышение надежности электровозов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрический подвижной состав, тяговый электродвигатель, изоляция, электрокинетические явления, электроосмотическая сушка, надежность электровозов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Третьяков Е. Ф., Балагин О. В., Живушко С. В. Повышение эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции тяговых электродвигателей на основе электрокинетических явлений // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 236–245. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-236-245>.

✉ sergei.zhivushko@outlook.com (С. В. Живушко)

© Третьяков Е. Ф., Балагин О. В., Живушко С. В., 2023



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.31:621.3.048

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-236-245>

EDN: <https://elibrary.ru/hgfzuw>



Improving the operational reliability of electric locomotives by reducing the moisture content of electric traction motor insulation based on electrokinetic phenomena

Evgeny A. Tretyakov, Oleg V. Balagin, Sergei V. Zhivushko✉

Omsk State Transport University,
Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Seasons with dominant negative ambient temperatures increase the possibility of insulation failure of electric locomotive traction motors with the service reliability of electric locomotive inevitably plummeting as a whole. Wet commutator and windings result from approximately 70% of insulation failures. The paper examines ways of improving the service reliability of electric locomotives by reducing the moisture content in the insulation of DC commutator traction motors based on electrokinetic phenomena (electroosmosis) with testing the actual parameters of the electroosmotic drying.

Materials and methods. We obtained experimental data from tests on real electric traction motors in a locomotive service depot. The electroosmotic drying technology involved a device for moistening the electric motor commutator and windings developed by the authors, and standard tools for measuring the insulation resistance of electric traction motors.

Results. The research shows that electroosmotic drying is feasible at a voltage of 3000 V; drying is effective with electric heater blowing; electroosmotic and electric heat drying system together increase insulation resistance by 20–40% in the first two to three hours; electroosmotic drying shows the highest rate of increase in insulation resistance when connected to windings with a resistance below 500 kΩ; electroosmotic and electric heat drying system together use 60% less electricity and 20% less time.

Discussion and conclusion. The drying technology is useful in locomotive service depots, in workshops during TR-1 maintenance and when operating traction electric rolling stock in low ambient temperatures. The drying technology is applicable in hot storage of electric locomotives; the effectiveness of this method requires experimental confirmation. This technology for increasing the resistance of wet insulation would reduce electric traction motor failures using electrokinetic phenomena, increasing reliability of electric locomotives.

KEYWORDS: electric rolling stock, electric traction motor, insulation, electrokinetic phenomena, electroosmotic drying, reliability of electric locomotives

FOR CITATION: Tretyakov E. A., Balagin O. V., Zhivushko S. V. Improving the operational reliability of electric locomotives by reducing the moisture content of electric traction motor insulation based on electrokinetic phenomena. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):236-245. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-236-245>.

Введение. В периоды года с низкими значениями температуры окружающего воздуха у электровозов существует высокая вероятность пробоя изоляции тяговых электродвигателей (ТЭД) из-за образования инея на обмотках и коллекторе. Как следствие этого неизбежно снижение эксплуатационной надежности электровоза в целом. На рис. 1 изображены графики отказов ТЭД электровозов серии 2ЭС6 локомотивного депо Западно-Сибирской железной дороги в период с января 2022 по апрель 2023 г. Как видно, наибольшее количество повреждений происходит с октября-ноября по март, в период преобладания отрицательных температур окружающего воздуха. Примерно в 70 % случаев эти повреждения происходят из-за увлажнения обмоток и коллектора.

Для предотвращения пробоев во время горячего простоя производят поддержание требуемого уровня сопротивления изоляции ТЭД обдувом мотор-вентиляторами, вращающимися на низких частотах¹. Однако этот процесс также не исключает снижения сопротивления изоляции ТЭД электровозов ниже допустимых значений, поэтому производителем электровозов серии 2ЭС6 была реализована токовая сушка ТЭД под токоприемником с управлением через микропроцессорную систему управления и диагностирования [1]. Указанная сушка осуществляется током величиной 300 А для нагрева меди обмоток и элементов ТЭД. Недостатком токовой сушки является ускоренный процесс старения изоляции,

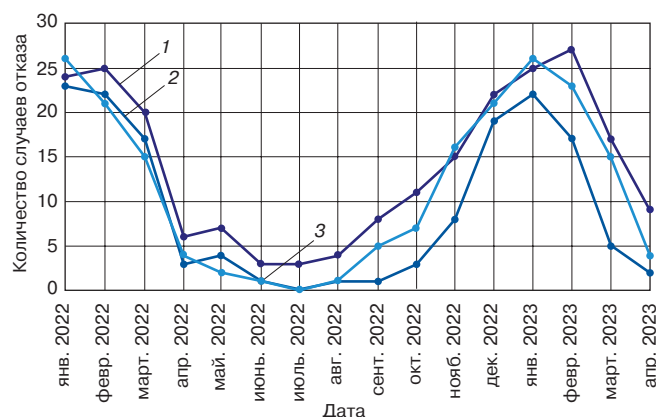


Рис. 1. Отказы ТЭД электровозов за период с 2022 по 2023 г. (повреждения узлов):

1 — якорь; 2 — дополнительные полюса и компенсационные обмотки; 3 — обмотки возбуждения

Fig. 1. Electric locomotive electric traction motor (ETM) failures in 2022–2023 (assemblies damage):

1 — anchor; 2 — additional poles and compensation windings; 3 — excitation windings

растрескивание, коробление, повышенный расход электрической энергии, а также необходимость небольшого передвижения по железнодорожному пути, поскольку ТЭД включены встречно, и их моменты не уравнивают друг друга. В условиях сервисного локомотивного депо в зимний период применяется электрокалориферная сушка, которая требует значительного расхода электроэнергии [2].

Известна технология выведения влаги из внутренних слоев изоляции за счет применения электрокинетических явлений — электроосмоса [3]. В научных работах [4–10] описывается подобный метод и устройства, которые позволяют без нагрева обмоток высушивать изоляцию промышленных асинхронных электродвигателей переменного тока 380 В средней мощности (до 22 кВт), силовых трансформаторов до 35 кВ и осуществлять их влагозащиту.

Для коллекторных ТЭД постоянного тока электровозов устройства электроосмотической сушки (ЭОС) не разрабатывались и не испытывались. Для ЭОС коллекторных ТЭД постоянного тока требуется обоснование параметров напряжения и технологии сушки увлажненной изоляции на основе теоретических и экспериментальных исследований.

Цель работы — исследовать возможности повышения эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции ТЭД на основе электрокинетических явлений с отработкой фактических параметров процесса электроосмотической сушки. Для этого авторами решались следующие задачи: экспериментально исследованы изменения свойств увлажненной изоляции ТЭД под воздействием ЭОС с разными параметрами прикладываемого напряжения; исследована эффективность ЭОС увлажненной изоляции ТЭД электровозов совместно с электрокалориферной сушкой при текущем ремонте в сервисном локомотивном депо в объеме ТР-1; определена область практического применения ЭОС в период отрицательных температур окружающего воздуха.

Материалы и методы. Как известно, электрокинетические явления — это перенос дисперсной фазы или дисперсной среды коллоидной системы относительно друг друга, происходящий под внешним электрическим полем [11–13]. Они связаны с тангенциальным движением жидкости вблизи заряженной поверхности и являются проявлениями электрических свойств поверхностей раздела в стационарных и изотермических условиях. Явление электроосмоса характеризуется «электрокинетическим потенциалом», или « ζ -потенциалом», т. е. разностью потенциалов на границах фаз между твердыми телами и жидкостями,

¹ Инструкция по прогреву электровозов при отстое на тракционных путях локомотивных депо и пунктах оборота: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 05.03.2013 № ЦТ-36р. 10 с. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1691997886&tid=ru&lang=ru&name=23e979feb44e2> (дата обращения: 16.04.2023).

что служит мерой электрического заряда частиц. Определяется ζ -потенциал уравнением Гельмгольца — Смолуховского [14]:

$$\zeta = \frac{4\pi\eta\chi\vartheta}{\varepsilon I}, \quad (1)$$

где η — вязкость среды, Па·с; χ — удельная электропроводность жидкости, См/м; ϑ — кинематическая вязкость жидкости, Па·с; ε — диэлектрическая проницаемость; I — сила тока, А.

Электроосмотическая скорость представляет собой равномерную скорость жидкости вдали от заряженной границы раздела. Постоянная линейная скорость жидкости также описывается выражением Гельмгольца — Смолуховского [15]:

$$u_{Es} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta}{\eta} E, \quad (2)$$

где ε_0 — электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м; E — напряженность внешнего электрического поля, В/м.

Как видно из выражения (2), скорость жидкости внутренних слоев изоляции зависит от напряженности электрического поля. Поэтому ЭОС целесообразно осуществлять при высоком напряжении, допустимом для изоляции ТЭД.

На первом этапе экспериментальных исследований изменения свойств увлажненной изоляции под воздействием ЭОС по утвержденной программе выполнялись испытания на отдельных ТЭД типа ЭДП-810, СТК-810, ЭК-810 и ДПТ-810. Для реализации задач исследования авторами был собран источник тока с возможностью изменения формы и амплитуды выходного напряжения (рис. 2).

Положительный потенциал источника пульсирующего напряжения подключается к обмоткам якоря, главных и добавочных полюсов, компенсационной обмотке; отрицательный — к корпусу ТЭД (рис. 2).

Увлажнение отдельных ТЭД осуществлялось с помощью отпаривателя-парогенератора типа Grand Master, как показано на рис. 3. В процессе увлажнения все технологические отверстия закрывались с помощью брезента для быстрого увлажнения обмоток и коллектора электродвигателя. Насадка парогенератора помещалась в вентиляционный люк (рис. 4), а поток нагнетаемого пара был направлен так, чтобы пар проходил между якорем и остовом и через отверстия в сердечнике якоря. Процесс увлажнения контролировался посредством измерения сопротивления изоляции обмоток ТЭД штатным прибором каждые 5 мин. Процесс увлажнения ТЭД, как правило, сопровождался снижением сопротивления изоляции со значений 300 МОм — 1,7 ГОм до 50 КОм — 1,5 МОм.

Процесс ЭОС увлажненной изоляции ТЭД без внешнего обдува осуществлялся при пульсирующем

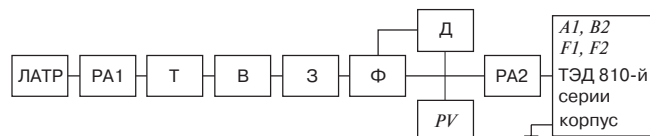


Рис. 2. Структурная схема источника ЭОС:
ЛАТР — линейный автотрансформатор; PA1, PA2 — амперметры; Т — повышающий трансформатор; В — высоковольтный выпрямитель; З — защитный предохранитель; Ф — фильтр-конденсатор; Д — делитель напряжения; PV — вольтметр

Fig. 2. Structural diagram of an electroosmotic drying source:
ЛАТР — linear autotransformer; PA1, PA2 — ammeters; Т — step-up transformer; В — high-voltage rectifier; З — protector; Ф — condenser filter; Д — voltage divider; PV — voltmeter



Рис. 3. ТЭД типа ДПТ-810 № 2032 в процессе его увлажнения:
1 — отпариватель-парогенератор типа Grand Master

Fig. 3. DPT-810 No. 2032 type ETM humidification process:
1 — Grand Master type steamer

напряжении 500, 1000, 1500, 3000 В, где переменная составляющая не превышала 10 %, вырабатывалась источником переменного напряжения с частотой 100 Гц и регулировалась применением различных величин емкости в фильтре.

Испытания проводились на двенадцати ТЭД. На рис. 5 представлены результаты увеличения сопротивления изоляции обмоток остова ТЭД типа ЭДП-810 № 2032 при пульсирующем напряжении 1000 В (частота переменной составляющей 100 Гц, амплитуда 230 В).

На рис. 6–8 представлены графики изменения сопротивления увлажненной изоляции ТЭД при различных напряжениях.

С увеличением величины подаваемого напряжения эффективность ЭОС увлажненной изоляции ТЭД возрастает.

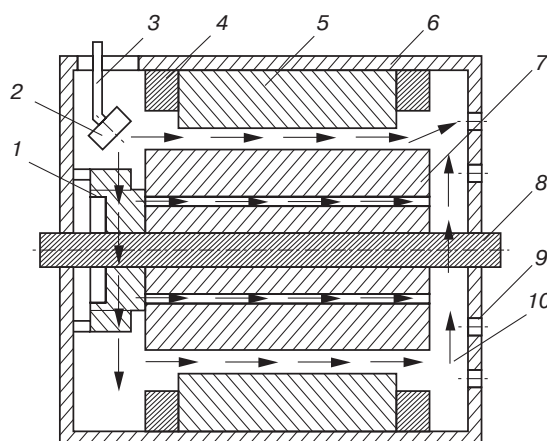


Рис. 4. Схема увлажнения на продольном разрезе двигателя типа ЭДП-810:

1 — коллекторно-щеточный узел; 2 — насадка парогенератора типа Grand Master; 3 — патрубок парогенератора; 4 — обмотка возбуждения; 5 — главный полюс; 6 — остов; 7 — сердечник якоря; 8 — вал; 9 — вентиляционные отверстия; 10 — потоки пара

Fig. 4. Moisturising diagram on a longitudinal section of an EDP-810 type ETM:

1 — commutator and brush assembly; 2 — Grand Master steamer mouth piece; 3 — steamer branch pipe; 4 — excitation winding; 5 — main pole; 6 — frame; 7 — anchor core; 8 — shaft; 9 — vent holes; 10 — steam flows

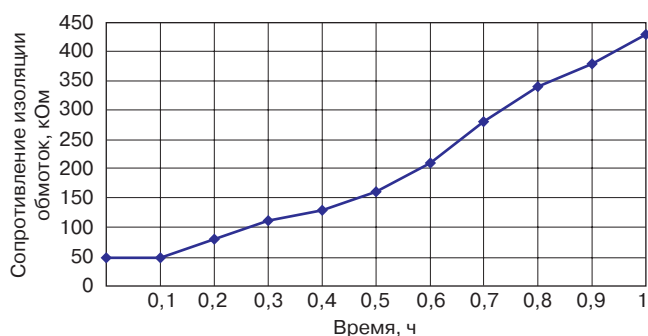


Рис. 5. Показания сопротивления изоляции обмоток остова ТЭД типа ЭДП-810 № 2032 при напряжении 1000 В

Fig. 5. EDP-810 No. 2032 type ETM frame winding insulation resistance indications at a voltage of 1000 V

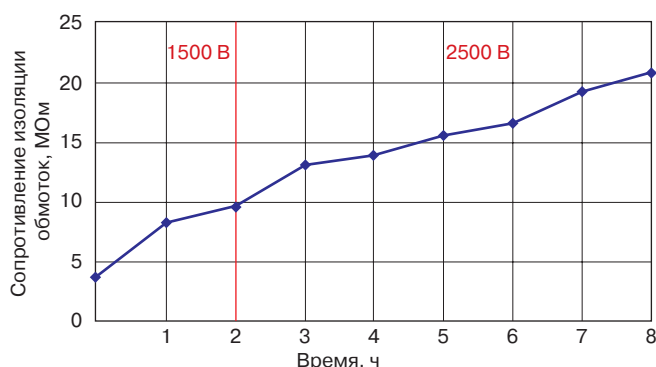


Рис. 6. Изменение сопротивления изоляции ТЭД типа ЭК-810 № 4746 при напряжениях 1500 и 2500 В

Fig. 6. Change in EK-810 No. 4746 type ETM insulation resistance at voltages of 1500 and 2500 V

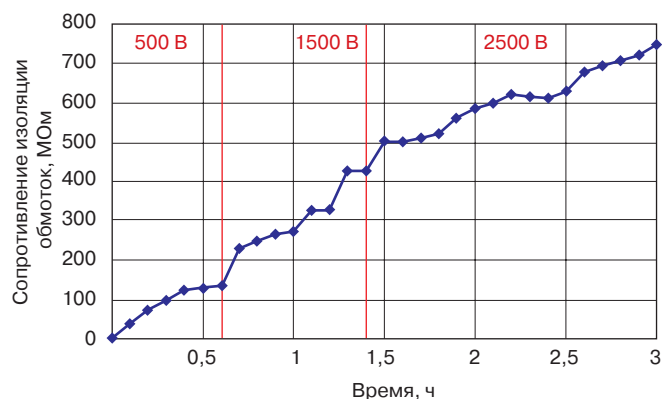


Рис. 7. Изменение сопротивления изоляции ТЭД типа СТК-810 № 2356 при напряжениях 500, 1500 и 2500 В

Fig. 7. Change in STK-810 No. 2356 type ETM insulation resistance at voltages of 500, 1500 and 2500 V

Для сравнения результатов ЭОС увлажненной изоляции ТЭД типа ЭДП-810 (рис. 5) с сушкой в естественных условиях отопляемого цеха был повторно увлажнен ТЭД типа ЭК-810 № 4746 до значения 1 МОм. На рис. 9 представлен график изменения сопротивления изоляции ТЭД при естественной сушке в отопляемом цеху.

В рамках решения задачи исследования эффективности ЭОС была выполнена опытная проверка ЭОС увлажненной изоляции ТЭД электровоза серии 2ЭС6 совместно с сушкой электрокалорифером. Электровоз был перемещен с открытого воздуха с отрицательной температурой в отопляемый цех сервисного депо для выполнения ТР-1.

Работа электрокалориферной установки осуществлялась согласно следующему циклу: 2 ч обдув холодным воздухом (с выключенным нагревательным элементом), 2 ч обдув горячим воздухом. Как правило, указанная сушка на практике осуществляется за 3–4 цикла. Основная задача электрокалориферной сушки — обеспечение значений сопротивления изоляции ТЭД и электрооборудования в измеряемой силовой цепи электровоза не ниже допустимых (к моменту завершения ТР-1 и выводу электровоза из стойла).

На рис. 10 представлены результаты измерений сопротивления изоляции ТЭД на электровозе 2ЭС6 № 317 в процессе сушки с помощью электрокалориферной установки.

Как видно из данных рис. 10, электрокалориферная сушка в рассматриваемом случае не обеспечивает сопротивление изоляции ТЭД 1–2 до требуемых значений (более 15 МОм) за 8 ч.

Согласно утвержденной программе эксперимента авторами выполнялась ЭОС изоляции одной группы ТЭД (1–2, 3–4, 5–6, 7–8) совместно с электрокалориферной сушкой. Указанная ЭОС осуществлялась

с помощью разработанного устройства при пульсирующем напряжении 3000 В.

Положительный потенциал выходного напряжения устройства ЭОС подключался к силовой шине ОЗ1, а отрицательный потенциал — к корпусу двигателя электровоза серии 2ЭС6 № 317 (рис. 11).

Результаты измерений сопротивления изоляции ТЭД электровоза 2ЭС6 № 642 при выполнении ЭОС совместно с электрокалориферной сушкой представлены на рис. 12. ЭОС выполнялась с подключением через 1 ч после начала измерений к 3–4 группе ТЭД.

Результаты измерений сопротивления изоляции ТЭД электровоза 2ЭС6 № 407 при выполнении ЭОС совместно с электрокалориферной сушкой представлены на рис. 13. ЭОС выполнялась с подключением через 1 ч после начала измерений к 3–4 группе ТЭД.

Результаты. По результатам выполненных исследований ЭОС увлажненной изоляции отдельных ТЭД и группы ТЭД при постановке электровозов серии 2ЭС6 в отапливаемый цех в период отрицательных значений температур окружающего воздуха можно сделать следующие выводы:

1. Напряжение, при котором необходимо выполнять ЭОС изоляции ТЭД 810-й серии, составляет 3000 В. В случае сопротивления изоляции обмоток ТЭД ниже 500 кОм требуется снижать прикладываемое напряжение ЭОС для ограничения тока утечки на заданном уровне.

2. Повышение интенсивности процессов ЭОС увлажненной изоляции ТЭД было отмечено только при обдуве изоляции воздухом от электрокалориферных установок.

3. При использовании ЭОС увлажненной изоляции ТЭД одновременно с электрокалориферной сушкой происходит наибольшее увеличение скорости восстановления сопротивления изоляции ТЭД в первые два-три часа после подключения устройства ЭОС, при этом сопротивление изоляции повышается на 20–40 %. В конце процесса сушки через 10–12 ч сопротивления всех групп ТЭД практически равны.

4. ЭОС наиболее эффективна при сопротивлении изоляции обмоток ТЭД ниже 500 кОм. При значениях сопротивления изоляции 15 МОм и выше ЭОС оказывает меньшее влияние, чем в области малых сопротивлений изоляции ТЭД.

5. Использование ЭОС совместно с электрокалориферной сушкой позволяет снизить расход электрической энергии до 60 % путем уменьшения подачи горячего воздуха в цикле работы электрокалориферной установки, а также за счет снижения времени сушки на 20 %. Расход электроэнергии на ЭОС составляет до 100 Вт на электровоз.

6. Применение предлагаемой технологии повышения сопротивления увлажненной изоляции позволит снизить количество отказов ТЭД за декабрь — март

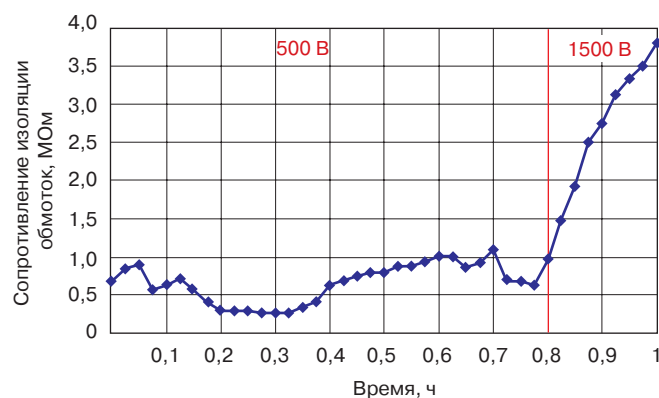


Рис. 8. Изменение сопротивления изоляции ТЭД типа ДПТ-810 № 5433 при напряжениях 500 и 1500 В

Fig. 8. Change in DPT-810 No. 5433 type ETM insulation resistance at voltages of 500 and 1500 V

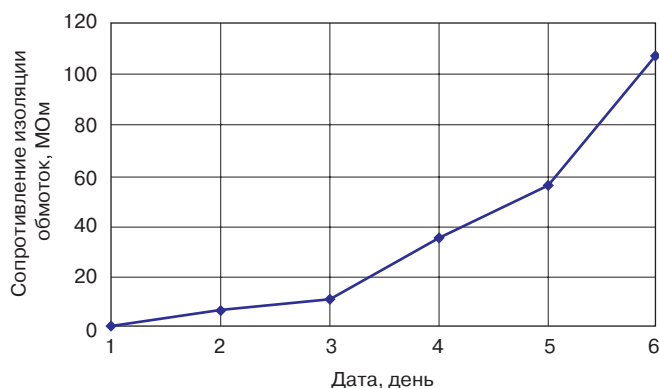


Рис. 9. Изменение сопротивления изоляции ТЭД типа ЭК-810 № 4746 при сушке естественным образом

Fig. 9. Change in EK-810 No. 4746 type ETM insulation resistance in natural drying

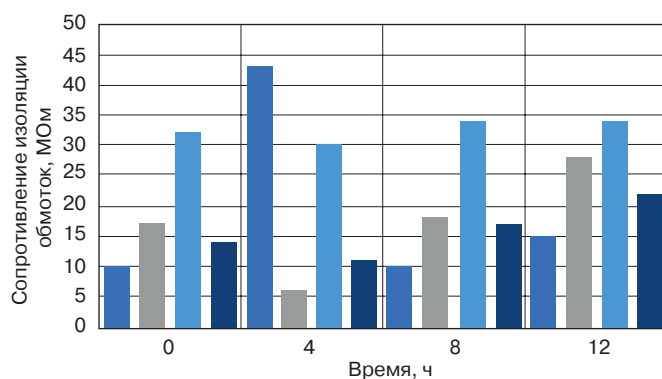


Рис. 10. Сопротивление обмоток изоляции ТЭД электровоза 2ЭС6 № 317 в процессе сушки с помощью электрокалориферной установки:

■ группа ТЭД 1–2 ■ группа ТЭД 3–4 ■ группа ТЭД 5–6 ■ группа ТЭД 7–8

Fig. 10. Electric locomotive 2ES6 No. 317 ETM insulation windings resistances while drying with an electric heat system:

■ Group ETM 1–2 ■ Group ETM 3–4 ■ Group ETM 5–6 ■ Group ETM 7–8

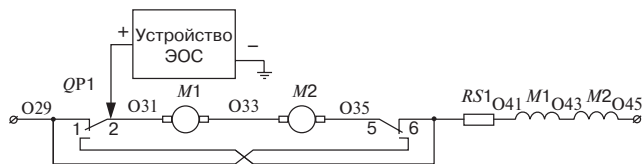


Рис. 11. Схема подключения устройства ЭОС к силовой схеме электровоза серии 2ЭС6 № 317:
QP1 — реверсор; M1, M2 — ТЭД; RS1 — шунт; O29, O31, O33, O35, O41, O43, O45 — номера проводников в схеме

Fig. 11. Connection diagram of the electroosmotic dryer to the power circuit of a 2ES6 No. 317 electric locomotive:
QP1 — reverser; M1, M2 — ETM; RS1 — shunt; O29, O31, O33, O35, O41, O43, O45 — numbers of conductors in the diagram

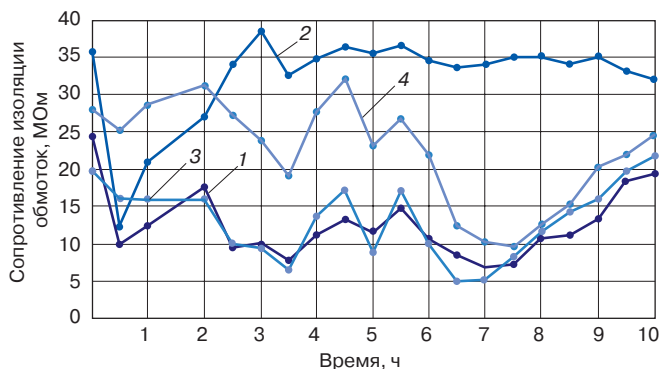


Рис. 12. Изменение сопротивления изоляции ТЭД электровоза 2ЭС6 № 642 при выполнении ЭОС совместно с электрокалориферной сушкой:
1 — группа ТЭД 1–2; 2 — группа ТЭД 3–4; 3 — группа ТЭД 5–6; 4 — группа ТЭД 7–8

Fig. 12. Change in 2ES6 No. 642 electric locomotive ETM insulation resistance in combined electroosmotic and electric heat drying system:
1 — Group ETM 1–2; 2 — Group ETM 3–4; 3 — Group ETM 5–6; 4 — Group ETM 7–8

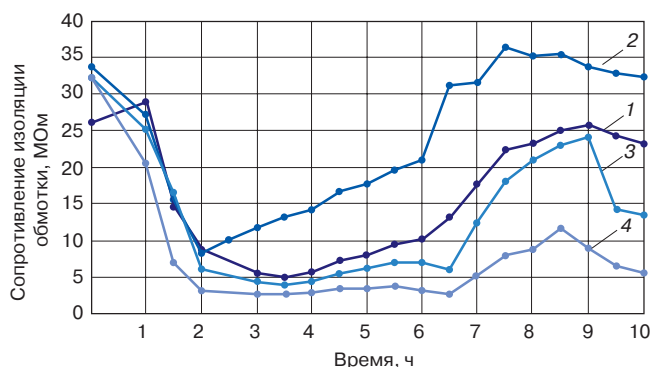


Рис. 13. Изменение сопротивления изоляции ТЭД электровоза 2ЭС6 № 407 при выполнении ЭОС совместно с электрокалориферной сушкой:
1 — группа ТЭД 1–2; 2 — группа ТЭД 3–4; 3 — группа ТЭД 5–6; 4 — группа ТЭД 7–8

Fig. 13. Change in 2ES6 No. 407 electric locomotive ETM insulation resistance in combined electroosmotic and electric heat drying system:
1 — Group ETM 1–2; 2 — Group ETM 3–4; 3 — Group ETM 5–6; 4 — Group ETM 7–8

(рис. 1) на 3–4 случая в месяц, обеспечивая повышение надежности электровозов.

Обсуждение. Авторы предлагают для практического применения ЭОС увлажненной изоляции ТЭД электровозов следующее:

1. ЭОС изоляции ТЭД электровозов совместно с электрокалориферной сушкой при осуществлении ТР-1 в условиях сервисного депо.

2. ЭОС изоляции ТЭД электровозов во время горячего простоя в период отрицательных температур окружающего воздуха.

Во втором случае технология ЭОС будет выполняться без сторонних приборов (устройств), только с использованием встроенных технических средств электровозов серии 2ЭС6. Положительный потенциал будет подаваться от контактной сети через токоприемник и далее в силовую цепь на обмотки ТЭД всех групп. Отрицательный потенциал напряжения контактной сети гальванически связан с корпусом ТЭД. На рис. 14 приведена силовая схема электровоза 2ЭС6 с указанием распространения положительного потенциала в режиме ЭОС.

Режим ЭОС будет проходить под контактной сетью при горячем простое электровозов (рис. 14). Напряжение подается на токоприемник ХА1, разъединитель QС1, быстродействующий выключатель QF1, дифференциальное реле КА1 и далее на обмотки ТЭД М1, М2, М3 и М4 — вся силовая схема будет образовывать положительный потенциал, рельсовая тяговая сеть — отрицательный потенциал. Поскольку во время эксплуатации электровоза используется независимое возбуждение, то для процесса ЭОС требуется переключить возбуждение на последовательное. Во время ЭОС для экономии электроэнергии пусковые реостаты R3 и R4 использоваться не будут, однако при слишком низком сопротивлении обмоток ТЭД напряжение можно ограничить с помощью замыкания соответствующих контакторов. Во время ЭОС электровоз передвигаться не будет. Пусковой реостат полностью выведен из работы. Положительный потенциал подается на ТЭД при замыкании контакторов: К1, К3, К27 QP1, QP3, К33, К2, К4, К28, QP2, QP4, К34. Ведомая секция замыкается по тому же принципу и питается от токоприемника ХА1. Регистрация уровня сопротивления изоляции происходит мегаомметрами МГМ-1 (на схеме UZ3, UZ4).

Данная ЭОС должна выполняться при работающих мотор-вентиляторах. Разработка технологии ЭОС изоляции обмоток ТЭД при горячем простое электровозов серии 2ЭС6 является темой дальнейших исследований авторов.

Применение указанной технологии сушки позволит повысить эксплуатационную надежность электроподвижного состава в целом за счет снижения отказов ТЭД в зимний период, как указано выше.

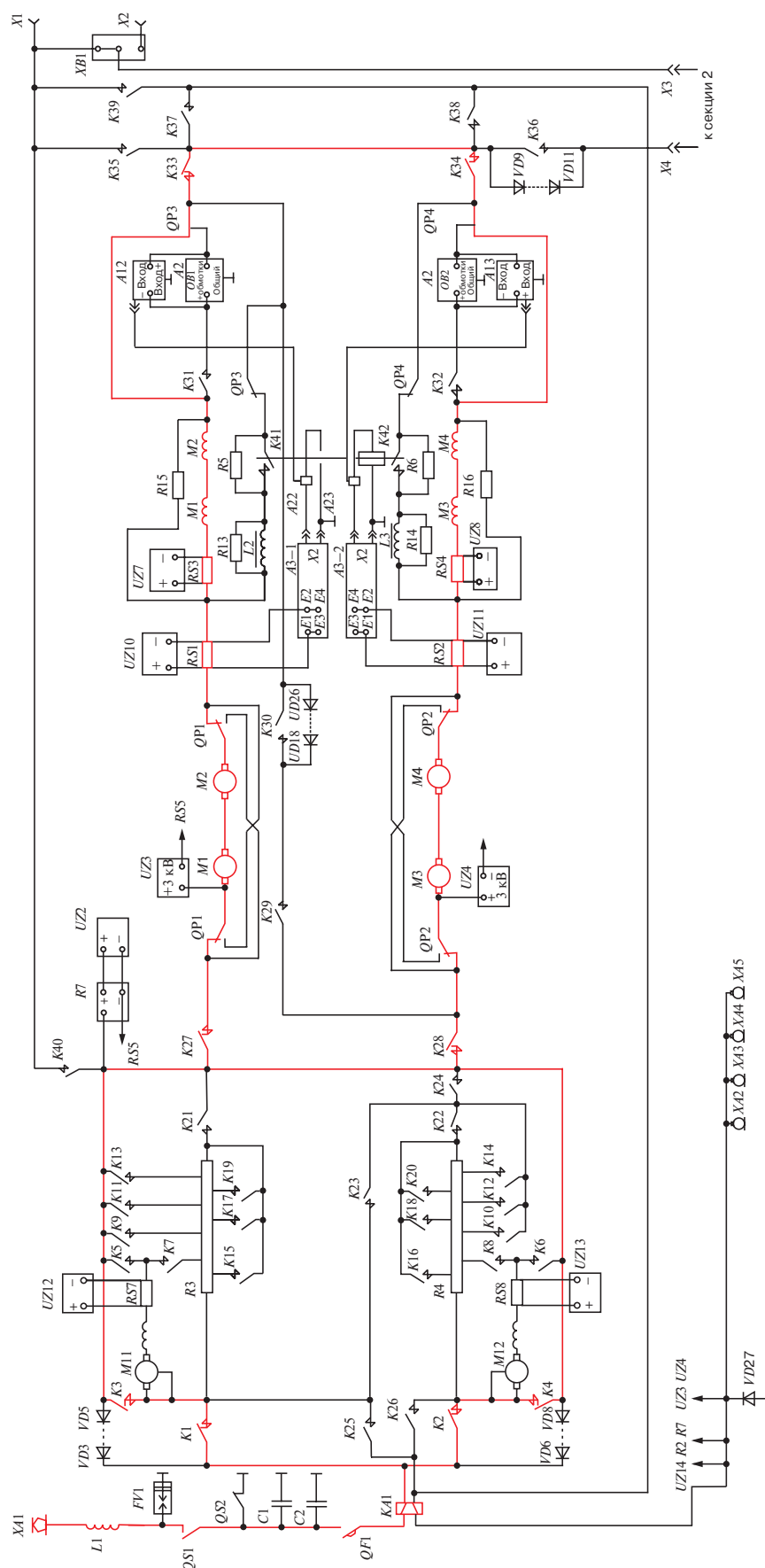


Рис. 14. Силовая схема электровоза 2ЭС6 в режиме проведения ЭОС

Fig. 14. Power circuit of 2ES6 electric locomotive in electroosmotic drying

Заключение. Результаты экспериментальных исследований показывают эффективность использования электрокинетических явлений для сушки коллекторных ТЭД постоянного тока 810-й серии электровозов одновременно с электрокалориферными установками в условиях сервисного локомотивного депо. Расход электроэнергии при использовании электроосмотической сушки совместно с электрокалориферной снижается на 60 %, а время сушки на 20 %. Применение предлагаемой технологии повышения сопротивления увлажненной изоляции ТЭД позволит снизить количество отказов на 3–4 случая в месяц за счет повышения срока службы и более высокого качества восстановления показателей изоляции в период отрицательных температур воздуха, обеспечивая повышение надежности электровозов в эксплуатации.

Предлагаемый авторами способ осуществления сушки на электровозе при горячем простое требует экспериментального подтверждения своей эффективности, что является темой дальнейшего исследования.

Благодарности: авторы выражают благодарность сервисному локомотивному депо дирекции тяги за предоставление всего необходимого оборудования для проведения эксперимента, а также рецензентам за полезные замечания, способствовавшие дальнейшему улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the locomotive service depot of the traction Directorate for providing all the necessary equipment for the experiment, as well as to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Патент № 2661333 Российская Федерация, МПК H02K 15/12 (2006.01). Способ сушки изоляции тяговых электродвигателей электровоза: № 2017109358: заявл. 20.03.2017; опубл. 16.07.2018 / Неустроев П. П., Шатравин К. М., Ушаков В. А.; патентообладатель ООО «Уральские локомотивы». 11 с. [Neustroev P. P., Shatravin K. M., Ushakov V. A. Patent No. 2661333. Russian Federation, MPK H02K 15/12 (2006.01). Method of drying the insulation of traction electric motors: No. 2017109358: appl. 20.03.2017, publ. 16.07.2018. 11 p. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/pfrel>.
2. Патент № 2324278 Российская Федерация, МПК H02K 15/12 (2006.01). Способ сушки изоляции электрических машин: № 2006143925: заявл. 11.12.2006; опубл. 10.05.2008 / Коноваленко Д. В., Упырь Р. Ю., Худонов А. М. 4 с. [Konovalenko D. V., Upry R. Yu., Khudonogov A. M. Patent No. 2324278. Russian Federation,

MPK H02K 15/12 (2006.01). Method for electric machine insulation drying: No. 2006143925: appl. 11.12.2006, publ. 10.05.2008. 4 p. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/zjeswd>.

3. Everett D. H. Manual of symbols and terminology for physico-chemical quantities and units. Appendix II: Definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry. *Pure and Applied Chemistry*. 1972;31(4):577–638. <https://doi.org/10.1351/pac197231040577>.

4. Немировский А. Е., Кичигина Г. А., Сергиевская И. Ю. Электроосмотическая сушка и влагозащита электрооборудования // Фёдоровские чтения—2017: XLVII Междунар. науч.-практ. конф. с элементами научной школы, Москва, 15–17 ноября 2017 г. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. С. 166–170 [Nemirovskiy A. E., Kichigina G. A., Sergievskaya I. Yu. Electroosmotic drying and moisture protection of electrical equipment. In: *Fyodorovskiye Recitals—2017: XLVII International Scientific and Practical Conf. with science school elements, 15–17 November 2017, Moscow*. Moscow, MEI Publishing; 2017. p. 166–170 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/xrdgod>.

5. Устройство электроосмотической сушки изоляции обмоток электродвигателей 0,4 кВ для экспериментальных исследований / А. Е. Немировский [и др.] // Фёдоровские чтения—2020: L Междунар. науч.-практ. конф. с элементами научной школы, Москва, 17–20 ноября 2020 г. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 285–290 [Nemirovskiy A. E., Kichigina G. A., Sergievskaya I. Yu., Mishchenko D. N. 0.4 kV Electric Motor Winding Electroosmotic Insulation Dryer for Experimental Research. In: *Fyodorovskiye Recitals—2020: International Scientific and Practical Conf. with science school elements, 17–20 November 2020, Moscow*. Moscow, MEI Publishing; 2020. p. 285–290 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/sqehwx>.

6. Повышение эффективности электроосмотической сушки изоляции активной части трансформаторов / А. Е. Немировский [и др.] // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ—2017): V Всерос. науч.-техн. конф. (к 50-летию юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники), Тольятти, 1–2 ноября 2017 г. Тольятти: Тольяттинский гос. ун-т, 2017. С. 399–407 [Nemirovskiy A. E., Uskov Ya. A., Politsyna V. O., Nikiforova O. M. Increasing the efficiency of electroosmotic drying of the insulation of the active part of transformers. In: *Challenges of electrical engineering, electrical power engineering and electrical technology (PEEE—2017): V All-Russian Scientific and Technical Conf. (to 50th Anniv. the Dept of Elec. Supply & Elec. Engineering of the Institute of Energy and Electrical Engineering), 1–2 November 2017, Togliatti*. Togliatti: Togliatti State Univ.; 2017. p. 399–407 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/zruckp>.

7. Иванов А. В. Электроосмотическая влагозащита электродвигателей // Электропитание. 2010. № 2. С. 63–64 [Ivanov A. V. Electroosmotic moisture protection of electric motors. *Power Supply*. 2010;(2):63–64 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yzmuoj>.

8. Немировский А. Е., Бугаков В. Г., Мороз Н. К. Устройство электроосмотической сушки изоляции электродвигателей, анализирующее амплитудно-частотные характеристики тока электроосмоса // Сборник научных трудов института: в 2-х т. Вологда: Вологодский политехн. ин-т, 1998. Т. 1. С. 78–82 [Nemirovskiy A. E., Bugakov V. G., Moroz N. K. An electroosmotic dryer of electric motor insulation, analysing the amplitude frequency response of the electroosmosis current. In: *Collection of the Institute's scientific papers: In 2 vols. Vol. 1*. Vologda: Vologda Polytechnic Institute; 1998. p. 78–82. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ylouvs>.

9. Кириллов С. В. Электроосмотическая сушка трансформаторов (опыт Мичуринской дистанции электроснабжения) // Локомотив. 2014. № 1 (685). С. 46 [Kirillov S. V. Electroosmotic drying of transformers (experience of the Michurinsk Power Supply Division). *Locomotive*. 2014;(1):46. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/rzttfj>.

10. Усков Я. А. Электроосмотическая сушка изоляции обмоток в трансформаторе // Материалы межрегиональной научной конференции X ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых, Вологда, 23 ноября 2016 г.: в 4 т. / Вологодский гос. ун-т.

Вологда: Вологодский гос. ун-т, 2016. Т. 1. С. 54–58 [Uskov Ya. A. Electroosmotic drying of winding insulation in a transformer. In: *Proceedings of the Interregional Scientific Conference X Annual Scientific Session of Postgraduate Students and Young Scientists, 23 November 2016, Vologda: In 4 vols. Vol. 1. Vologda, Vologda State University, 2016. p. 54–58 (In Russ.)*]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yilrdv>.

11. Mills I., Cvita T., Homann K., Kallay N., Kuchitsu K. *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*. Second ed. Oxford: International Union of Pure and Applied Chemistry; 1993. 165 p.

12. McNaught A. D., Wilkinson A. *Compendium of Chemical Terminology. IUPAC Recommendations*. Second ed. Hoboken: Blackwell Science; 1997. 464 p.

13. Delgado Angel V., Arroyo Francisco J. Electrokinetic Phenomena and Their Experimental Determination: An Overview. In: Delgado Angel V., ed. *Interfacial Electrokinetics and Electrophoresis*. Boca Raton: CRC Press; 2002. p. 1–54. <https://doi.org/10.1201/9781482294668>.

14. Kijlstra J., van Leeuwen H. P., Lyklema J. Effects of surface conduction on the electrokinetic properties of colloids. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*. 1992;88(23):3441–3449. <https://doi.org/10.1039/ft9928803441>.

15. Hunter R. J. *Zeta Potential in Colloid Science. Principles and Applications*. London: Academic Press; 1981. 386 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евгений Александрович ТРЕТЬЯКОВ,

д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, ул. Карла Маркса, д. 35), Author ID: 453775, <https://orcid.org/0000-0002-1570-5383>

Олег Владимирович БАЛАГИН,

канд. тех. наук, доцент, проректор по цифровой трансформации и связи с производством, доцент, кафедра локомотивов, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, ул. Карла Маркса, д. 35), Author ID: 267757, <https://orcid.org/0000-0001-7618-9397>

Сергей Владиславович ЖИВУШКО,

аспирант, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, ул. Карла Маркса, д. 35), Author ID: 1158103, <https://orcid.org/0009-0000-4238-512X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeny A. TRETYAKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Karl Marx St.), Author ID: 453775, <https://orcid.org/0000-0002-1570-5383>

Oleg V. BALAGIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Vice-rector for Digital Transformation and Relations with Industry, Department of Locomotives, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Karl Marx St.), Author ID: 267757, <https://orcid.org/0000-0001-7618-9397>

Sergei V. ZHIVUSHKO,

Postgraduate, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Karl Marx St.), Author ID: 1158103, <https://orcid.org/0009-0000-4238-512X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Евгений Александрович ТРЕТЬЯКОВ. Постановка цели и задач работы. Разработка алгоритмов исследования, оценка результатов и формирование выводов. Проведение экспериментальных исследований. Подготовка текста рукописи (30%).

Олег Владимирович БАЛАГИН. Обоснование применения электроосмотической сушки на тяговом подвижном составе при эксплуатации и ремонте (10%).

Сергей Владиславович ЖИВУШКО. Сбор исходных данных. Проведение экспериментальных исследований. Структурирование и оформление результатов. Редактирование текста (60%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Evgeny A. TRETYAKOV. Setting goals and objectives. Formation of research algorithms, evaluation of results and formation of conclusions. Conducting experimental studies. Preparation of the manuscript text (30%).

Oleg V. BALAGIN. Justification of the use of electroosmotic drying on traction rolling stock during operation and repair (10%).

Sergei V. ZHIVUSHKO. Collection of source data. Conducting experimental studies. Data collection, structuring and processing. Text editing (60%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 17.05.2023, рецензия от первого рецензента получена 29.05.2023, рецензия от второго рецензента получена 06.06.2023, принята к публикации 19.07.2023.

The article was submitted 17.05.2023, first review received 29.05.2023, second review received 06.06.2023, accepted for publication 19.07.2023.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.