

06.05.2024 УДК 629.423.31

## Исследование существующих методов сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей локомотива

М. Ю. Хажеева<sup>1</sup>, Е. Ю. Дульский<sup>1</sup>, П. Ю. Иванов<sup>1</sup>, В. А. Кручек<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Хажеева М. Ю., Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю., Кручек В. А. Исследование существующих методов сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 508–516. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-508-516

### Аннотация

**Цель:** рассмотреть вопрос о повышении надежности тяговых электродвигателей электровоза, которая зависит от различных факторов. Все внимание обращено на актуальность исследований методов сушки изоляции тяговых электродвигателей в настоящее время. Доказано многолетним трудом, что самой уязвимой частью двигателя является изоляция. Перечисляются все методы, которые направлены на решение поставленных задач. В статье описываются принцип действия и технология процессов в каждом из указанных методов. Из предложенных методов выводятся показатели эффективности с позиции технических и экономических результатов, также отмечаются некоторые их преимущества и недоработки. Статья основывается на сравнении различных методов, которые направлены на решение текущих проблем, связанных с повышением надежности тягового подвижного состава. Представлена статистика отказов тяговых двигателей за последние три года, описаны причины увлажненности изоляции силового оборудования электровоза. Перечислены основные методы и способы сушки увлажненной изоляции, используемые в локомотивных депо ВСЖД, дана характеристика каждого метода. **Методы:** применен метод статистических данных и аналитического обзора состояния на сегодняшний момент по процессу сушки изоляции тягового подвижного состава. **Результаты:** в статье перечислены проведенные исследования, эксперименты и результаты, оценивающие существующие методы и способы процессов сушки изоляции на подвижном составе. Разработан обновленный метод трехциклового сушки увлажненной изоляции электрических машин, который основан на использовании электрокалориферных установок и предусматривает осцилляционное энергоподведение. Поставлена задача по решению оптимальных способов удаления влажности изоляции тяговых электродвигателей электровозов на основе использования конвективного метода. **Практическая значимость:** на основании проведенных исследований подтверждена возможность использования предлагаемого трехциклового способа сушки увлажненной изоляции электрических машин, что позволяет снижать затраты электроэнергии на ремонт и время процесса сушки изоляции.

**Ключевые слова:** тяговой подвижной состав, сушка увлажненной изоляции, конвективный метод сушки, электрокалориферная установка, повышение надежности оборудования.

Как показывает анализ статистики отказов тягового подвижного состава, за последние годы существенная часть неисправностей оборудования приходится на тяговые двигатели. За рассматриваемый период (2021–2023 годы) особо часто наблюдаются отказы электрического и вспомогательного оборудования, фиксируются более 1500 случаев каж-

дый год, в сумме они составляют около 50 % от числа всех случаев. Результаты исследований данных о неисправностях электровозов по видам оборудования на Восточно-Сибирской железной дороге можно наблюдать на рис. 1–3. Доля неисправностей ТЭД в данный период держится в районе 11–14 % и насчитывает от 600 до 800 отказов в год [1].

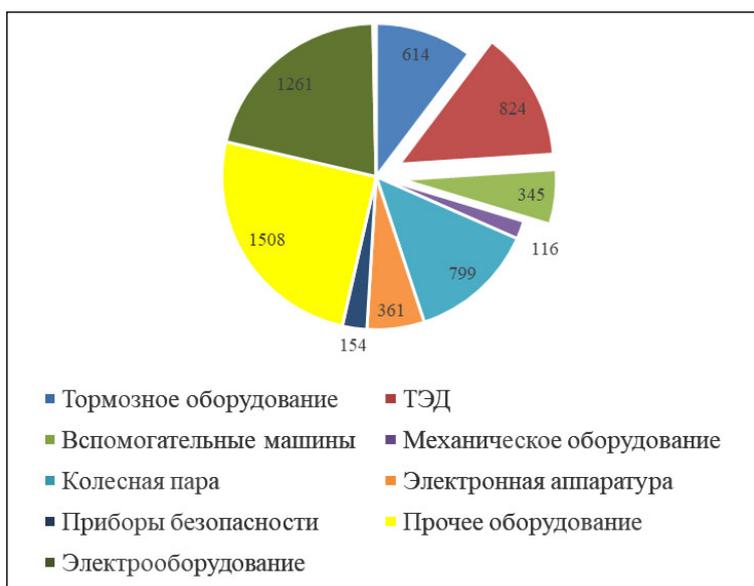


Рис. 1. Динамика отказов элементов тягового подвижного состава на ВСЖД за 2021 год

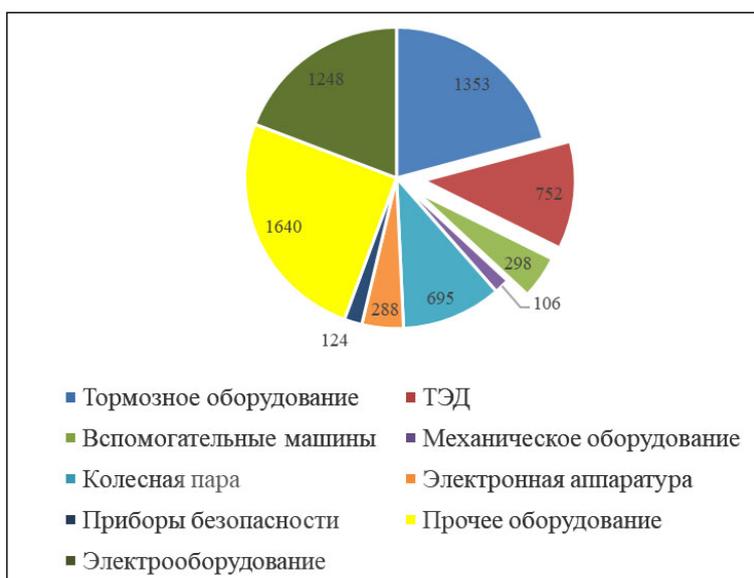
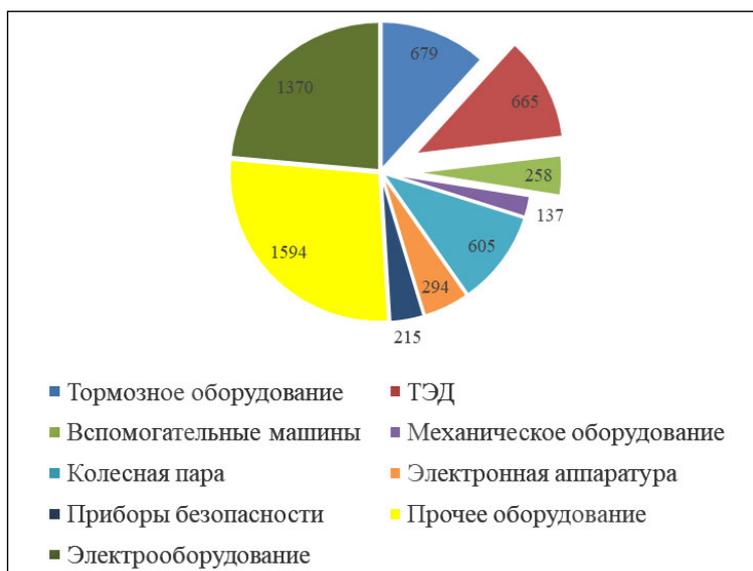


Рис. 2. Динамика отказов элементов тягового подвижного состава на ВСЖД за 2021 год



**Рис. 3.** Динамика отказов элементов тягового подвижного состава на ВСЖД за 2021 год

Из полученных диаграмм по отказам тяговых двигателей электровоза можно наблюдать достаточно стабильное распределение числа неисправностей оборудования тягового подвижного состава за последние годы эксплуатации.

Проблема увлажнения изоляции электрооборудования продолжает оставаться одной из главных причин неисправности тяговых двигателей на подвижном составе. Имеющиеся в настоящее время методы сушки изоляционных систем чрезвычайно трудоемки, сложны в исполнении при реальных условиях эксплуатации на ВСЖД. Поэтому одним из возможных перспективных направлений решения этой проблемы является совершенствование технологии проводимого ремонта и методов, а также постановка задач и нахождение пути по обеспечению надежности электрической прочности изоляции [2–3].

Повышенная влажность воздуха способствует повреждениям тяговых электрических двигателей, которые вызваны пробоем изоляции вследствие ее переув-

лажнения. При постановке электровоза в отапливаемое депо изоляцию тяговых электрических двигателей необходимо сушить. Практикой и наукой накоплен большой объем информации, который касается вопросов теории, технологий и способов сушки изоляции.

Процесс любого мероприятия, направленного на улучшение или сохранение изначальных характеристик какого-либо электрооборудования, представляется сложным и трудоемким. Одним из таких процессов является способ сохранения изоляции тяговых электродвигателей для нормального и долгосрочного использования. В настоящее время в локомотивных депо применяют следующие мероприятия по ремонту тяговых электродвигателей из-за увлажненности изоляции электрооборудования:

- 1) токовую сушку при низком напряжении;
- 2) сушку вентиляторами электровозов;
- 3) электроосмотическую сушку;
- 4) сушку специальными калориферными установками.

Токовая сушка изоляции тяговых электродвигателей осуществляется на основании использования технических средств самого тягового подвижного состава силами непосредственно самих работников. В данном случае задействована вся силовая цепь электровоза, при этом необходима стоянка на рельсовых путях под контактным проводом. Затем выборочно происходит сушка одного или нескольких групп тяговых электродвигателей секции или всего электровоза. Важно, что сушке подвергаются только тяговые электродвигатели с неблагоприятными для работы показателями по сопротивлению изоляции, другие необходимо отключить [4].

Работа силовой цепи тягового подвижного состава начинается с запуска пультом управления машиниста, поднятием токоприемника и включением быстродействующего выключателя. С точки зрения технологии взаимодействия всей цепи электровоза способ характеризуется четырьмя циклами пропускания тока в течение 30 мин. после 30 сек. кратковременной вентиляции паров воды (рис. 4). Из-за перепада температур происходит передача тепла от более нагретой меди обмотки к менее нагретому слою изоляции.

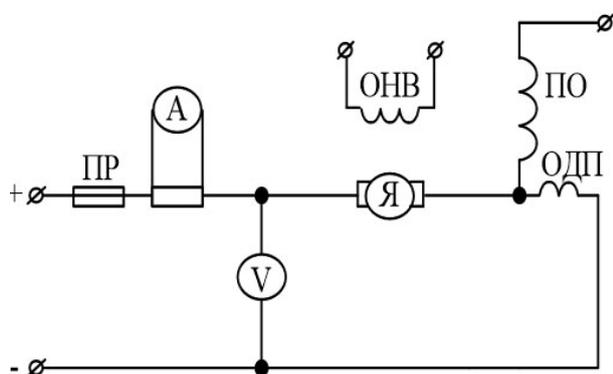


Рис. 4. Схема токового способа сушки изоляции ТЭД

Другой способ в сравнении с предыдущим является простым и обычным благодаря тому, что сушка производится с помощью вентиляторов самого тягового подвижного состава без применения сил персонала. Поэтому этот метод был придуман с целью упрощения удаления влаги из обмоток увлажненной изоляции. Процесс этот упрощен тем, что тепло передается в момент соприкосновения материала с высушиваемым материалом и последний как бы воспринимает испаряющуюся влагу. Благодаря испарению влаги с поверхности высушиваемого материала создается перепад влажности, за счет этого происходит перемещение влаги из внутренних слоев материала на поверхность. Однако исследования этого метода привели к выводу о неблагоприятных параметрах прочности изоляции, а именно по коэффициенту абсорбции [5].

Не наблюдается большого количества данных по этому процессу, практически отсутствуют наработки по причине узких возможностей развития. Известно, что при методе на основе использования вентиляторов электровоза важен режим сушки, который характеризуется скоростью передачи воздуха, значением влажности, начальной и конечной температурами. От параметров этих режимов будет зависеть, сколько времени займет сушка изоляции до момента полного восстановления и каковы будут диэлектрические и механические показатели высушиваемого материала.

Недостаток данного метода решения проблемы заключается в заторможенности процесса и отрицательном воздействии температурных перепадов в слоях изоляции. Метод сушки, применяемый в этой технологии, не обеспечивает возможности контроля

над параметрами теплоносителя, что приводит к значительному снижению качества сушки изоляционного материала. Но выход из строя тяговых двигателей происходит не только из-за воздействия резких перепадов температур во время эксплуатации. Важно также качество произведенного ремонта.

На железнодорожном транспорте применяют новые способы сушки изоляции электрооборудования, называемые электроосмотическими. Подробным изучением и совершенствованием данного метода, сбором данных и проведением экспериментов в локомотивном депо занимаются многие ученые других университетов. Результаты испытаний свидетельствуют о сокращении времени сушки, отсутствии отрицательных результатов.

Вытеснение влаги из системы изоляции электрооборудования электроосмотической сушкой происходит за счет сил электрического поля. Этот процесс является нетепловым, поэтому исключаются тепловое старение, термическая деструкция и локальные перегревы изоляции [6]. Электроосмотическая сушка осуществляется без нагрева электрооборудования при температуре окружающей среды. Сами устройства сушки и влагозащиты представляют собой небольшие аппараты, генерирующие на выходе импульсы напряжения специальной формы, амплитуды, частоты и скважности. Эти устройства имеют небольшую массу и габариты, входное напряжение 220 В, например, устройства типа УЭСИ-0,4 кВ, ВУЭОС-6-10 кВ, УЭСИ-6-10 кВ.

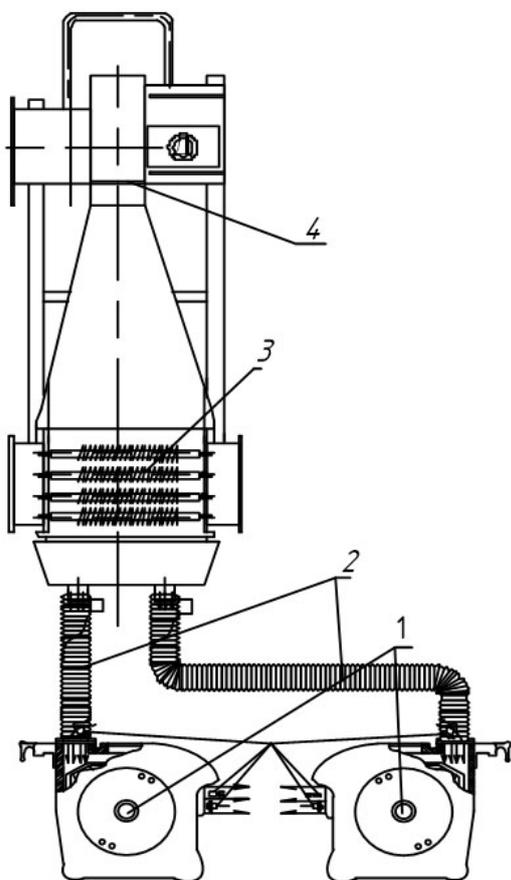
На практике показано, что процесс электроосмотической передачи влажности изоляции обмоток тягового электродвигателя электровоза остается достаточно продолжительным.

Активно применяется в локомотивных депо на пунктах технического обслуживания локомотивов метод сушки изоляции с использованием электрокалориферной установки. Этим методом долгое время занимаются сотрудники ИрГУПС на основе статических данных по увлажненности конструкций тягового электродвигателя. Метод пользуется широким интересом и требует новых способов энергоподвода при осуществлении сушки изоляции.

Специальные электрокалориферные установки предназначены для осуществления сушки увлажненной изоляции горячим воздухом после постановки локомотива в отопливаемый цех, оборудованный ремонтными стойлами [7]. Они просты в обслуживании, не ухудшают условий труда персонала и обеспечивают возможность относительно быстрого проведения ремонтных работ.

Электрокалорифер оборудован специальными воздуховодами для поступления горячего воздуха в слои изоляции, общий вид установки изображен на рис. 5. Для достижения эффективности сушки изоляции этим методом можно начать сушить с минимальных значений температуры воздуха и постепенно повышать в несколько раз. Данные манипуляции необходимы для того, чтобы не допустить больших перепадов температур в материале, уменьшить тормозящий эффект и обеспечить распределение потока влаги на поверхность.

При отправке электровоза на ремонт в депо возрастают перепады температур, что требует продолжительного подогрева. Стационарные калориферные установки используются для эффективного подогрева обмоток, они обеспечивают комфортные условия обслуживания, возможность осуществления ремонтных работ и улучшение условий труда рабочим [8].



**Рис. 5.** Схема сушки ТЭД при помощи электрокалориферной установки:  
1 — ТЭД; 2 — патрубки; 3 — ТЭНы;  
4 — электрокалориферная установка

На основе проведенных научных работ предложен амплитудно-широотно-прерывный способ энергоподвода. Происходит процесс постепенного регулирования температуры нагрева в слоях изоляции. Всего в этом методе описаны три последовательных цикла, благодаря которым достигается необходимое значение для изоляции.

В диссертационных работах был проведен анализ подобных установок и алгоритмов управления энергоподводом, указывающий на несколько существенных

недоработок с позиций ресурсоэнергосбережения [9–10]. Направление исследований задано в сторону использования широтно-прерывистого пути управления мощностями установки для каждого цикла. В результате получен прерывистый метод манипуляций энергоподводом на качественное восстановление характеристик изоляции электрооборудования. Это, в свою очередь, влияет на постепенное испарение влаги из изоляции и продолжительность осуществления процесса. По результатам выполненных задач разработан автоматизированный комплекс положительного воздействия на качество высушиваемого материала электрооборудования. Отмечается значительная экономия денежных средств локомотивного хозяйства за счет снижения потребления электроэнергии.

Недостаток данного метода заключается в больших перепадах температур, отсутствии управления процессом сушки циклами с переменным энергоподводом. В рамках оптимизации и более рационального использования энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте учеными ИрГУПС был разработан новый алгоритм работы электрокалориферной установки, позволяющий устранить имеющиеся недостатки. Метод с применением электрокалориферной установки был доработан с позиции управления процессом в целом. Подана заявка на патент № 2022132878 от 14.12.2022 года «Трехцикловой способ сушки увлажненной изоляции электрических машин». Данный метод сушки увлажненной изоляции может быть использован для всех типов тяговых двигателей, в частности, таких как НБ-418К, НБ-514, НБ-514К.

В работах предшественников уже отмечалось, что подобные методы, основанные на применении прерывистого управления, могут позволить сократить продолжительность сушки в целом, однако численное подтверждение этому возможно только по результатам экспериментальных исследований [9], которые запланированы в ближайшее время и будут отражены в следующих работах.

Таким образом, в данной статье рассмотрена актуальность исследований различных методов сушки увлажненной изоляции на тяговом подвижном составе. На основании проведенных исследований обосновано дальнейшее изучение выбранного направления для повышения надежности и безопасности тягового подвижного состава в условиях его эксплуатации. По сравнению с остальными методами сушки изоляции калориферный способ имеет преимущества по нескольким параметрам, которые необходимо продолжать улучшать.

В дальнейших работах будет представлен анализ существующих режимов энергоподводов электрокалориферных установок для сушки увлажненной изоляции, в частности прерывистых как наиболее энергоэффективных. Также планируется провести глубокий патентный поиск в выбранном направлении.

### Библиографический список

1. Соболев В. М., Левитский В. М. Режимы сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей // Электрическая и тепловозная тяга. 1975. № 1. С. 23–24.
2. Волков А. К., Суворов А. Г. Повышение эксплуатационной надежности тяговых двигателей / М.: Транспорт, 1988. 128 с.
3. Худоногов А. М., Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю. Зональные особенности распределения эксплуатационной надежности предельно нагруженного оборудования электровозов // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: материалы III Международной научно-практической конференции. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. С. 311–318.
4. Исмаилов Ш. К. Повышение ресурса изоляции электрических машин подвижного состава: монография // Омский государственный университет путей сообщения. Омск, 2007. 391 с.
5. Дульский Е. Ю. 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.
6. Немировский А. Е., Сергиевская И. Ю., Кичигина Г. А. Математическое моделирование процесса электроосмотической сушки изоляции электродвигателей // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2020. № 2 (60). С. 39–51.
7. Система мониторинга состояния изоляции / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева и др. // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 50–52.
8. Разработка автоматизированной системы ресурсосберегающего управления электрокалориферной установкой для сушки изоляции тяговых электрических машин / М. Ю. Хажеева, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский и др. // Известия Транссиба. 2021. № 3 (47). С. 61–68.
9. Коноваленко Д. В. Рациональные режимы сушки увлажненной изоляции обмоток тяговых электрических машин: специальность 05.22.07 «Рациональные режимы сушки увлажненной изоляции обмоток тяговых электрических машин»: дис. ... канд. техн. наук / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2007. 193 с.

10. Патент № 2494517 Российская Федерация, МПК Н02К 15/12. Трехциклового амплитудно-широтного прерывистый способ сушки изоляции электрических машин: № 2011150204/07: заявл. 09.12.2011; опубл. 27.09.2013 / Сидоров В. В., Лыткина Е. М., Коноваленко Д. В. и др. 6 с.

Дата поступления: 06.05.2024

Решение о публикации: 28.05.2024

**Контактная информация:**

ХАЖЕЕВА Марина Юрьевна —

аспирант; m.hkazheeva@mail.ru

ДУЛЬСКИЙ Евгений Юрьевич —

канд. техн. наук, доцент; e.dulskiy@mail.ru

ИВАНОВ Павел Юрьевич —

канд. техн. наук, доцент; p\_ivanov@ssdigit.ru

КРУЧЕК Виктор Александрович — докт. техн.

наук, профессор; victor.kruchek@yandex.ru

## Research of existing methods for drying wetted insulation of traction motors

**M. Yu. Khazheeva<sup>1</sup>, E. Yu. Dulskiy<sup>1</sup>, P. Yu. Ivanov<sup>1</sup>, V. A. Kruchek<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia

<sup>2</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** Khazheeva M. Yu., Dulskiy E. Yu., Ivanov P. Yu., Kruchek V. A. Research of existing methods for drying wetted insulation of traction motors // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 508–516. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-508-516

### Abstract

**Objective:** consider the issue of increasing the reliability of electric locomotive traction motors, which depends on various factors. This article examines the factor of the impact of climate conditions on the operation of a locomotive. All attention is paid to the relevance of research into methods for drying the insulation of traction motors at the present time. It has been proven over many years of work that the most vulnerable part of the engine is insulation. All methods that are aimed at solving the assigned problems are listed. The article describes the principle of operation and technology of processes in each of these methods. From the proposed methods, efficiency indicators are derived from the perspective of technical and economic results, and some of their advantages and disadvantages are also noted. The article is based on a comparison of various methods that are aimed at solving current problems associated with increasing the reliability of traction rolling stock. Statistics on traction motor failures over the past three years are presented, and the reasons for moisture in the insulation of electric locomotive power equipment are described. The main methods and methods for drying moistened insulation used in VSZhD locomotive depots are listed, and the characteristics of each method are given. **Methods:** the method of statistical data and analytical review of the current state of the process of drying the insulation of traction rolling stock was applied. **Results:** the article lists the studies, experiments and results that evaluate the existing methods and methods of insulation drying processes on rolling stock. An updated method of three-cycle drying of moistened insulation of electrical machines has been developed, which is based on the use of electric heating units and provides for oscillatory energy supply. The task has been set to solve the optimal methods for removing moisture from the insulation of traction motors of electric locomotives based on the use of the convective method. **Practical importance:** based on the conducted research, the possibility of using the proposed three-cycle method for drying moistened insulation of electrical machines has been confirmed, which allows reducing energy costs for repairs and the time of the insulation drying process.

**Keywords:** resource-saving control, electric heating unit, drying process, repair quality, traction motors, cloud storage.

## References

1. Sobolev V. M., Levitskij V. M. Rezhimy` sushki uvlazhnennoj izolyacii tyagovy`x e`lektrodvigatelej // E`lektricheskaya i teplovoznaya tyaga. 1975. № 1. S. 23–24. (In Russian)
2. Volkov A. K., Suvorov A. G. Povy`shenie e`kspluacionnoj nadezhnosti tyagovy`x dvigatelej / M.: Transport, 1988. 128 s. (In Russian)
3. Xudonogov A. M., Dul`skij E. Yu., Ivanov P. Yu. Zonal`ny`e osobennosti raspredeleniya e`kspluacionnoj nadezhnosti predel`no nagruzhennogo oborudovaniya e`lektrovozov // Razrabotka i e`kspluatsiya e`lektrotexnicheskix kompleksov i sistem e`nergetiki i nazemnogo transporta: materialy` III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Omsk: Omskij gos. un-t putej soobshheniya, 2018. S. 311–318. (In Russian)
4. Ismailov Sh. K. Povy`shenie resursa izolyacii e`lektricheskix mashin podvizhnogo sostava: monografiya // Omskij gosudarstvenny`j universitet putej soobshheniya. Omsk, 2007. 391 s. (In Russian)
5. Dul`skij E. Yu. E`ksperimental`ny`e issledovaniya osnovny`x e`lektrotexnicheskix parametrov izolyacii tyagovy`x dvigatelej e`lektrovozov pri sushke razny`mi sposobami / Dul`skij E. Yu., P. Yu. Ivanov, A. M. Xudonogov i dr. // Transport Urala. 2020. № 3 (66). S. 72–75. (In Russian)
6. Nemirovskij A.E., Sergievskaya I. Yu., Kichigina G. A. Matematicheskoe modelirovanie processa e`lektroosmoticheskoy sushki izolyacii e`lektrodvigatelej // Vesti vy`sshix uchebny`x zavedenij Chernozem`ya. 2020. № 2 (60). S. 39–51. (In Russian)
7. Sistema monitoringa sostoyaniya izolyacii / E. Yu. Dul`skij, P. Yu. Ivanov, A. A. Xamnaeva i dr. // Zheleznodorozhny`j transport. 2021. № 3. S. 50–52. (In Russian)
8. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy` resur-sosberegayushhego upravleniya e`lektroklorifernoj ustanovkoj dlya sushki izolyacii tyagovy`x e`lektricheskix mashin / M. Yu. Xazheeva, A. M. Xudonogov, E. Yu. Dul`skij i dr. // Izvestiya Transsiba. 2021. № 3 (47). S. 61–68. (In Russian)
9. Konovalenko D. V. Racional`ny`e rezhimy` sushki uvlazhnennoj izolyacii obmotok tyagovy`x e`lektricheskix mashin: special`nost` 05.22.07 “Racional`ny`e rezhimy` sushki uvlazhnennoj izolyacii obmotok tyagovy`x e`lektricheskix mashin”: diss. ... kandid. texn. nauk / Irkutskij gos. un-t putej soobshheniya. Irkutsk, 2007. 193 s. (In Russian)
10. Patent № 2494517 Rossijskaya Federaciya, MPK N02K 15/12. Trexciklovoj amplitudno-shirotnoprery`visty`j sposob sushki izolyacii e`lektricheskix mashin: № 2011150204/07: zayavl. 09.12.2011: opubl. 27.09.2013 / Sidorov V. V., Ly`tkina E. M., Konovalenko D. V. i dr. 6 s. (In Russian)

Received: 06.05.2024

Accepted: 28.05.2024

### Author's information:

Marina Yu. KHAZHHEVA —

Postgraduate Student; m.hkazheeva@mail.ru

Evgeniy Yu. DULSKIY —

PhD in Engineering, Associate Professor;

e.dulskiy@mail.ru

Pavel Yu. IVANOV —

PhD in Engineering, Associate Professor;

p\_ivanov@ssdigit.ru

Victor A. KRUCHEK — Dr. Sci. in Engineering,

Professor; victor.kruchek@yandex.ru