

Научная статья

УДК 621.313.04

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-213-220

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

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВЗОВ С УЧЕТОМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ И ПРОВОДНИКОВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

В. И. Киселев✉, **Т. О. Вахромеева**, **А. И. Федянин**Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Вопрос обеспечения работоспособного состояния тягового электродвигателя постоянного тока является актуальным ввиду его масштабного применения на тепловозах, в том числе и современных мощных, работающих на линиях с повышенными массами поездов. В настоящее время в локомотивном хозяйстве сложилось довольно сложное положение из-за выхода из строя тяговых электродвигателей тепловозов по причинам снижения сопротивления изоляций обмоток якорей электродвигателей и последующих их пробоев: до 28% от общего числа отказов электродвигателей приходится на пробой корпусной изоляции и межвиткового замыкания якоря и 13% — на случаи понижения сопротивления изоляционного материала.

Материалы и методы. В работе рассмотрены основные направления научных изысканий по исследованию причин нарушения целостности изоляции, которые приводят к внеплановым ремонтам тяговых электродвигателей. Теоретическое обоснование первопричин разрушения изоляции основывается на значимости учета коэффициентов теплового линейного расширения меди и изолирующих ее материалов. С целью исследования термодинамических процессов в обмотке тягового электродвигателя разработана расчетная конечно-элементная модель витка обмотки, уложенного в паз сердечника якоря. Модель обмотки представлена отдельно проводником и изоляцией, между которыми заданы условия контакта. Проводнику расчетной модели от протекания тока сообщен нагрев до 120 °С. Математический аппарат, заложенный в расчетную программу MSC.Patran — Nastran, позволил оценить деформацию проводника относительно изоляции в результате линейного приращения из-за теплового расширения.

Результаты. С помощью метода математического моделирования и на основании результатов конечно-элементного анализа наглядно показано подтверждение теоретического обоснования. Различие удлинений при нагревании проводника якоря электродвигателя и изоляции, полученное методом математического моделирования, составляет 0,6 мм и является значительным для обмотки (состоящей из проводника и изоляции), которую принято рассматривать единым целым телом.

Обсуждение и заключение. Полученный результат показывает необходимость более детальных исследований для подбора технологии исполнения изоляции тягового электродвигателя постоянного тока. Применение изоляционных материалов обмотки якоря с коэффициентами теплового линейного расширения, равными коэффициенту теплового расширения меди проводников обмотки, позволит повысить надежность тяговых электродвигателей тепловозов в эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловоз, тяговый электродвигатель, отказ тягового электродвигателя, коэффициент теплового линейного расширения, изоляция, надежность

Для цитирования: Киселев В. И., Вахромеева Т. О., Федянин А. И. Повышение надежности тяговых электродвигателей тепловозов с учетом теплофизических параметров изоляции и проводников обмотки якоря // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 213–220. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-213-220>.

✉ kiselev40@mail.ru (В. И. Киселев)

© Киселев В. И., Вахромеева Т. О.,
Федянин А. И., 2022

Original article

UDK 621.313.04

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-213-220

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

INCREASING RELIABILITY OF TRACTION ELECTRIC MOTORS OF DIESEL LOCOMOTIVES TAKING INTO ACCOUNT THERMOPHYSICAL PARAMETERS OF INSULATION AND ARMATURE WINDING CONDUCTORS

Valentin I. Kiselev✉, Tat'yana O. Vakhromeeva, Aleksey I. Fedyanin

Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The issue of ensuring the operable state of the DC traction motor is relevant due to its large-scale use on diesel locomotives, including modern powerful motors, operating on lines with increased train masses. At present, a rather difficult situation has developed in the locomotive industry with the failure of diesel locomotive traction electric motors due to a decrease in the insulation resistance of the armature windings of the electric motors and their subsequent breakdowns: up to 28% of the total number of failures of electric motors are due to breakdown of the hull insulation and interturn short circuit of the armature and 13% of cases are due to reduction in the resistance of the insulating material.

Materials and methods. The paper considers the main directions of scientific research on the causes of insulation integrity failure, which lead to unscheduled repairs of traction motors. The theoretical substantiation of the root causes of insulation destruction is based on the importance of taking into account the coefficients of thermal linear expansion of copper and its insulating materials. In order to study thermodynamic processes in the winding of a traction motor, a computational finite element model of a winding coil laid in the groove of the armature core has been developed. The winding model is represented separately by a conductor and insulation, between which contact conditions are specified. The conductor of the calculation model heats up to 120 °C from the current flow. Mathematical apparatus embedded in the MSC calculation program, Patran – Nastran, made it possible to evaluate the deformation of the conductor relative to the insulation as a result of a linear increment due to thermal expansion.

Results. With the help of mathematical modelling and based on the results of finite element analysis, the confirmation of the theoretical justification is clearly shown. The difference in elongation during heating of the motor armature conductor and insulation, obtained by mathematical modelling, is 0.6 mm and is significant for the winding (consisting of a conductor and insulation), which is usually considered as a single whole body.

Discussion and conclusion. The obtained result shows the need for more detailed studies to select the technology for the insulation of the DC traction motor. The use of insulating materials for the armature winding with coefficients of thermal linear expansion equal to the coefficient of thermal expansion of the copper conductors of the winding will improve the reliability of traction electric motors of diesel locomotives in operation.

KEYWORDS: diesel locomotive, traction motor, traction motor failure, coefficient of thermal linear expansion, insulation, reliability

For citation: Kiselev V. I., Vakhromeeva T. O., Fedyanin A. I. Increasing reliability of traction electric motors of diesel locomotives taking into account thermophysical parameters of insulation and armature winding conductors. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):213-220. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-213-220>.

✉ kiselev40@mail.ru (V. I. Kiselev)

© Kiselev V. I., Vakhromeeva T. O.,
Fedyanin A. I., 2022

Введение. Несмотря на перспективные планы по использованию асинхронного тягового привода на мощных тепловозах, тяговые электродвигатели (ТЭД) постоянного тока пока сохраняют свои лидирующие количественные показатели. Увеличивающийся объем перевозок приводит к дополнительным нагрузкам на тяговые электрические машины, которые и без того работают в сложных эксплуатационных условиях: перепадов температуры окружающей среды, срыва сцепления, вибрации, загрязненного взвесью пыли охлаждающего воздуха.

Основным типом тягового привода грузовых тепловозов является привод I класса, или привод с опорно-осевым подвешиванием электродвигателя. При движении тепловоза на двигатель воздействуют динамические ударные нагрузки величиной до 10–20g из-за неровности пути [1, 2]. Механические возмущения в широком частотном диапазоне, а также переходные процессы в цепи электродвигателя являются источниками вибраций его узлов. В качестве преобладающих повреждений ТЭД (до 42 %) следует выделить понижение сопротивления изоляции якорных и полюсных обмоток, пробой и межвитковые замыкания обмотки якоря и полюсных обмоток [3].

Динамические возмущения могут возникать и в результате процессов, протекающих в механической части тягового привода тепловоза (например, относительные перемещения и ускорения якоря ТЭД, вызванные износом зубчатых колес редуктора и моторно-якорных подшипников).

Динамические напряжения влияют на крепление обмоток, вызывают их вибрацию, что приводит к развитию трещин и разрывов в проводниках, а также повышенному механическому износу изоляции.

Актуальным остается вопрос сохранения работоспособного состояния изоляции. Разработаны современные методы контроля и диагностирования состояния межвитковой изоляции [4], затрагиваются вопросы адекватного функционирования системы планово-предупредительных ремонтов: несоответствие норм межремонтных пробегов тепловозов и пробегов установленных на них ТЭД приводит к тому, что в ряде случаев при постановке тепловоза на текущий ремонт ТР-3 электродвигателю фактически необходимо делать капитальный ремонт, предусмотренный правилами ремонта только в условиях завода. Требуется выкатка электродвигателя из-под тепловоза и отправка его на завод, что сопряжено со значительными материальными затратами [5].

В настоящее время разрабатываются алгоритмы предиктивной диагностики для обнаружения повреждений электрических машин с целью своевременной постановки тепловоза на внеплановый ремонт для

предотвращения выхода из строя ТЭД в пути следования и предупреждения их отказов и неплановых ремонтов [6].

В [7] авторы предлагают пересмотреть систему диагностики ТЭД тепловозов и дополнить ее новым диагностическим параметром неравномерности вращения якоря.

Необходимость поиска кардинальных решений проблемы выхода из строя ТЭД по причине повреждения изоляции очевидна, и есть научные разработки, подтвержденные исследованиями, призванные предотвратить разрушение изоляции из-за несоответствия ее класса нагревостойкости действительному перегреву обмоток [8]. Такая модернизация ТЭД подразумевает повышение класса изоляции более чем на один класс по ГОСТ 2582–2013 [9] — до класса *H* вместо *F*. Предполагается также организовывать системный сбор дополнительных параметров изоляции на плановых технических обслуживаниях тепловозов с их последующей обработкой и классификацией для предиктивной диагностики изоляции ТЭД.

Принимаемые в системе эксплуатации тепловозов меры по совершенствованию качества изоляционных материалов, пропиточных лаков, разработке новых видов пропиток (ультразвуковой, вакуумной с двойным вакуумированием и т.д.) не решают проблемы в целом [10]. Затраты на устранение этих видов дефектов составляют порядка 40 % от стоимости ТЭД.

Результаты исследования. Для разрешения вопроса неплановых ремонтов ТЭД тепловозов следует подробнее рассмотреть изменение тепловых процессов в электромеханической системе якоря [11, 12].

Причина значительного числа отказов ТЭД по пробую или снижению сопротивления изоляции состоит в том, что коэффициенты теплового линейного расширения меди обмоток якоря и изолирующих ее материалов различны и отличаются в 4–5 раз (таблица, рис. 1) [13, 14]. При тепловом воздействии на детали происходит их расширение с изменением линейных размеров (рис. 2). Показателем линейной деформации от термического воздействия является коэффициент теплового линейного расширения [15].

На основании теоретических выкладок делаем вывод о том, что для надежной работы соединения токопроводящих материалов (в данном случае меди обмотки якоря) и ее изоляции коэффициенты теплового линейного расширения должны быть равны (или сопоставимы), что в действительности (в эксплуатации и теоретических исследованиях) не принимается во внимание. Таким образом, различия в значениях коэффициентов теплового линейного расширения указанных материалов неизбежно ведут к образованию трещин в изоляции, попаданию в образовавшиеся трещины продуктов износа коллектора, образованию

Таблица

Коэффициенты теплового линейного расширения
изоляционных и электротехнических материалов ТЭД

Table

Thermal linear expansion coefficients
of the insulating and conducting materials of the traction electric motors

Материал	Коэффициент теплового линейного расширения α , $^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot 10^{-6}$
ABS — стекло, армированное волокнами	30,4
Медь	16,6
Слюда	3,0
Сталь	13,0
Эпоксидная смола, литая резина и незаполненные продукты из них	55,0
Мусковит	9,0
Флогопит	8,2
Миканит	8,0
Стекломиканит	12,4
Микалента	10,5
Микафоллий	6,7
Лакоткань	10,4
Стекломикалент	6,3
Асфальто-масляный лак № 447	9,1
Лак ЭФ-5	9,1
Лак К-44	8,8
Лак МЛ-92	7,0
Компаунд ПК-11	12,3
Лента Элмикатерм 524019	6,1
Пленка Синтофлекс 515	8,0
Сталь электротехническая	12,0
Полиэфирно-эпоксидный лак ПЭ-933	7,0

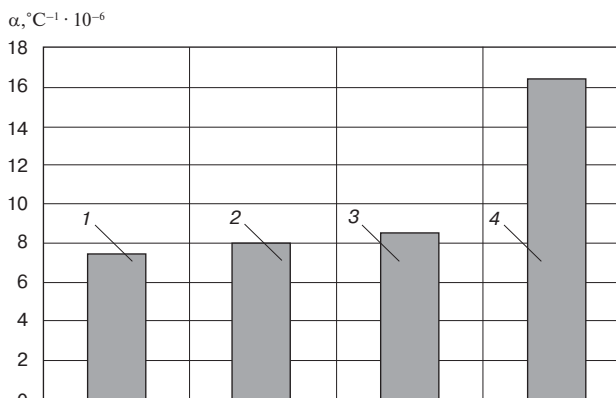


Рис. 1. Коэффициенты теплового линейного расширения меди и изолирующих ее материалов (класс нагревостойкости H):
1 — витковая изоляция (ПМ-40); 2 — корпусная изоляция (ЛИКО-ТТ); 3 — пазовая изоляция (Синтофлекс 818); 4 — медь

Fig. 1. Thermal linear expansion coefficients of copper and the insulating materials (thermal resistance class H):
1 — turn insulation (PM-40); 2 — body insulation (LIKO-TT);
3 — slot insulation (Sintoflex 818); 4 — copper

мостиков утечки тока и, наконец, пробоем изоляции, что с учетом увеличения допускаемых новыми классами изоляции превышений температуры проводников обмоток усугубляет проблему надежности ТЭД [13].

На основании этих данных определены удлинения при нагревании элементов обмотки якоря электродвигателя и изолирующих ее материалов относительно петушков коллектора, т. е. от точки сварки обмотки с коллектором.

Тем не менее результат этого явления зарегистрировать в эксплуатации не представляется возможным. В этом случае следует использовать метод математического моделирования. Использование аналитических (математических) методов исследования позволяет расширить возможности изучения рабочих процессов в ТЭД с учетом условий эксплуатации [16, 17].

На базе построенной геометрической модели (рис. 3) разработана расчетная модель (рис. 4) витка петлевой обмотки, уложенного в пазы якоря. В расчетной модели были сделаны следующие допущения: шихтованный сердечник якоря заменен на цельную модель; рассматривался сектор сердечника якоря с пазом, в который уложена половина витка обмотки; сердечник якоря на другой половине обмотки заменен граничными условиями; коллекторные пластины заменены граничными условиями.

При создании расчетной модели были использованы конечные элементы типа Tet10, число степеней свободы составило 304 708. Математический аппарат, включенный в решатель Nastran, предполагает обязательное наличие граничных условий на конечно-элементной модели, чтобы определить начальные условия, относительно которых будет вычислено линейное приращение. Граничные условия должны адекватно описывать положение обмотки на якоре ТЭД. Следует отметить, что рассматривается квазистатическое положение якоря: он находится в покое, вращательное движение отсутствует. На рис. 4 отмечены поверхности, по которым заданы граничные условия расчетной модели. Концы проводника припаяны к коллекторным пластинам (рис. 4, поз. 1), поэтому поверхностям выводов обмотки задано ограничение по перемещению по трем степеням свободы. Обмотка зафиксирована банджом из специальной стеклоленты — по поверхностям сопряжения обмотки со стеклобанджом задано ограничение по перемещению по трем степеням свободы (рис. 4, поз. 2). Обмотка в пазах удерживается стеклотекстолитовым клином — по поверхности сопряжения обмотки с клином задано ограничение по перемещению по трем степеням свободы (рис. 4, поз. 3). Сердечник напрессован на вал якоря: неподвижное соединение сердечника и вала также моделируется граничными условиями — ограничением по перемещению по трем степеням сво-

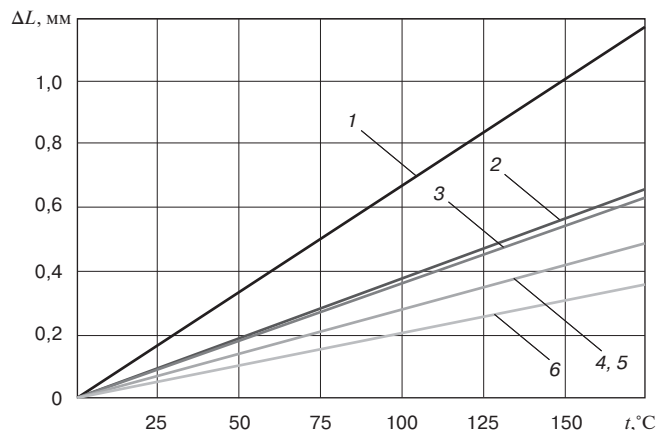


Рис. 2. Удлинение задней части обмотки якоря, сердечника и слоев изоляции в пазу якоря ТЭД относительно петушков коллектора:

1 — медный проводник; 2 — сердечник якоря;
3 — пазовая изоляция; 4, 5 — корпусная и витковая изоляция;
6 — пропиточный состав

Fig. 2. Elongation of the rear part of the armature winding, core and insulation layers in the groove of the traction electric motors armature relative to the commutator neck:

1 — copper conductor; 2 — armature core; 3 — slot insulation;
4, 5 — case and turn insulation; 6 — impregnating compound

боды (рис. 4, поз. 5). Благодаря заданию граничных условий по перемещению обмотки и сектора якоря нет необходимости моделировать отдельными телами стеклобандаж, клин, коллекторные пластины и вал якоря.

Задача решена в 2 этапа. На 1-м этапе произведен расчет нагрева проводника обмотки под действием протекающего по нему электрического тока. Расчет выполнен в модуле MD Nastran Thermal MSC Software [18]. Температура нагрева обмотки задана равной 120 °С, т. е. в пределах, установленных для изоляции класса нагревостойкости F [9]. Результаты 1-го этапа были использованы в качестве входных данных для 2-го.

На 2-м этапе достигнута цель исследования: определена деформация обмотки и изоляции из-за расширения под воздействием тепла от протекающего по обмотке электрического тока. Расчет на 2-м этапе выполнен в модуле MD Nastran Structural MSC Software.

Результат исследования показал, что значительным удлинениям из-за теплового расширения медного проводника подвергается лобовая часть обмотки (рис. 5).

Изоляция подвергается тепловому расширению под действием нагрева от протекания тока по проводникам, в том числе и в лобовых частях, где обмотка испытывает наибольшие деформации (рис. 6).

При прохождении через якорную обмотку электрического тока медные проводники обмотки удлиняются в большей степени, чем изоляционный

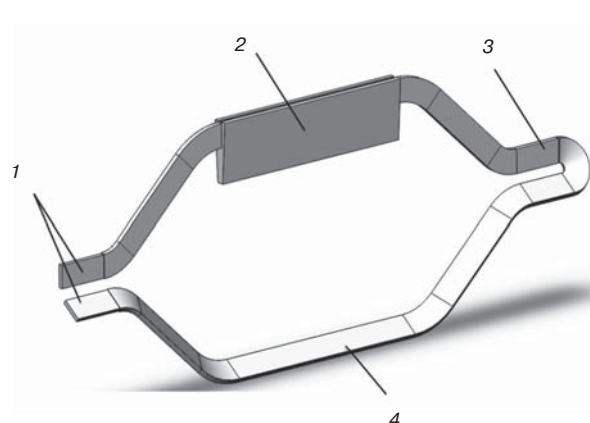


Рис. 3. Геометрическая модель витка обмотки, уложенного в пазы якоря:

1 — выводы обмотки для присоединения к коллекторным пластинам; 2 — сектор сердечника якоря; 3 — лобовая часть обмотки; 4 — виток обмотки с изоляцией

Fig. 3. Geometric model of a winding loop laid in the armature grooves: 1 — winding leads for connection to commutator plates; 2 — armature core sector; 3 — frontal part of the winding; 4 — winding loop with insulation

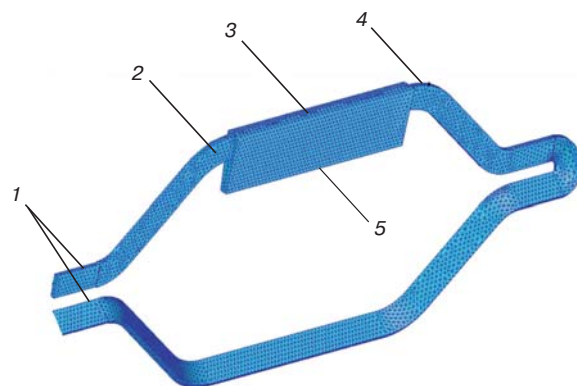


Рис. 4. Расчетная модель с указанными граничными условиями:

1 — припайка выводов обмотки к коллекторным пластинам;
2, 4 — стеклобандаж; 3 — клин; 5 — напрессовка сердечника якоря на вал ТЭД

Fig. 4. Calculation model with the indicated boundary conditions:

1 — soldering the winding leads to the commutator plates;
2, 4 — glass binding; 3 — wedge; 5 — pressing sleeve of the armature core onto the traction electric motors shaft

материал (рис. 6). Защитная изоляция не может деформироваться на величину, достаточную для компенсации теплового расширения медной обмотки. Как следствие, изолирующий материал растрескивается при деформации. В трещины проникает влажный воздух и конденсат, продукты износа коллекторно-щеточного узла. Так появляются каналы утечки тока от обмотки через изоляцию, что создает предпосылки для пробоя изоляции якоря, приводящего к выходу ТЭД из строя.

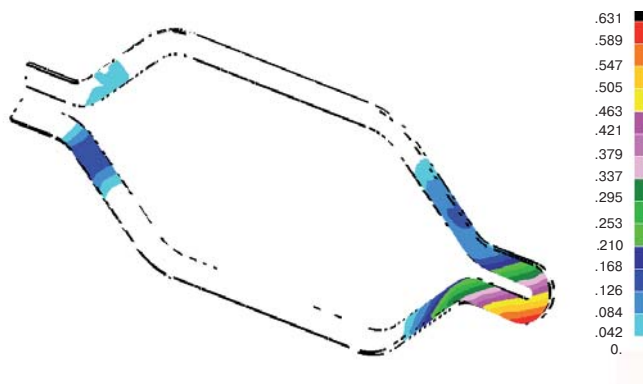


Рис. 5. Деформации медной обмотки (указаны в миллиметрах)

Fig. 5. Deformation of the copper winding (indicated in millimetres)

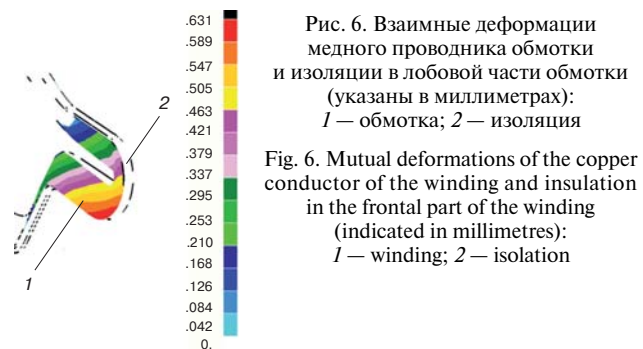


Рис. 6. Взаимные деформации медного проводника обмотки и изоляции в лобовой части обмотки (указаны в миллиметрах): 1 — обмотка; 2 — изоляция

Fig. 6. Mutual deformations of the copper conductor of the winding and insulation in the frontal part of the winding (indicated in millimetres): 1 — winding; 2 — isolation

Заключение. Несоответствие в 4–5 раз коэффициентов теплового линейного расширения меди обмоток якорей и изолирующих ее материалов является одним из основных факторов низкой надежности работы изоляции обмоток якорей ТЭД и служит причиной отказа ТЭД в эксплуатации ранее сроков, заявляемых заводами-изготовителями.

Для устранения выходов из строя ТЭД по причине пробоя изоляции и понижения ее сопротивления необходимо применение изоляционных материалов с коэффициентом теплового линейного расширения, равным коэффициенту теплового линейного расширения меди.

С целью реализации предложений необходимо проведение широких фундаментальных исследований по созданию изоляционных материалов с коэффициентом теплового линейного расширения, равным по значению коэффициенту расширения изолируемых токопроводящих элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Influence of Process Parameters on Dynamics of Traction Motor Armature / S. Shantarenko [et al.] // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 54. P. 961–971.

2. Механическая часть тягового привода: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / И. В. Бирюков [и др.]. М.: Транспорт, 1992. 440 с.

3. Федянин А. И. Актуальные проблемы надежности тяговых электродвигателей локомотивов в эксплуатации // *Локомотивы. Электрический транспорт — XXI век: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф.* (Санкт-Петербург, 10–12 ноября 2020 г.) / Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I. СПб.: ПГУПС, 2020. С. 19.

4. Шкодун П. К., Галеев А. Д. Анализ современных методов диагностирования повреждений изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава // *Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы XI науч. конф., посвящ. Дню российской науки* / Омский государственный университет путей сообщения. Омск: ОмГУПС, 2017. С. 96–101.

5. Санников А. С., Чубарев В. Е., Колмаков В. О. Статистика и виды отказов тяговых электродвигателей электровозов // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019. Issue 17. P. 74–76. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-17-74-76>.

6. Буйносов А. П., Худояров Д. Л., Тюшев И. А. Разработка алгоритма диагностики тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 СИНАРА // *Транспорт Урала*. 2021. Т. 71, № 4. С. 74–79.

7. Диагностирование тяговых электродвигателей по неравномерности вращения якоря / Б. Е. Боднар [и др.] // *Наука та прогрес транспорту*. 2013. Т. 45, № 3. С. 13–21.

8. Похор Д. И. Результаты эксплуатационных испытаний опытной системы изоляции класса «Н» тяговых двигателей тепловозов и ее контроль средствами мобильной диагностики // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2021. № 4. С. 35–46.

9. ГОСТ 2582–2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 1969-ст: дата введения 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 66 с.

10. Данковцев В. Т., Киселев В. И., Четвергов В. А. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов. М.: Маршрут, 2007. 326 с.

11. Грищенко М. А. Анализ теплового состояния обмотки якоря тягового электродвигателя // *Транспорт Урала*. 2009. Т. 20, № 1. С. 73–76.

12. Грищенко М. А. Математическое моделирование процесса теплопередачи в ядре тягового электродвигателя тепловоза // *Известия Петербургского университета путей сообщения (Известия ПГУПС)*. 2010. Т. 22, № 1. С. 33–44.

13. Киселев В. И., Файзибаев Ш. С., Федянин А. И. Надежность тяговых электродвигателей локомотивов // *Железнодорожный транспорт*. 2020. № 10. С. 48–49.

14. Киселев В. И. Повышение надежности тяговых электродвигателей локомотивов // *Железнодорожный транспорт*. 2017. № 6. С. 66–67.

15. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. 294 с.

16. Henaon H., Kia S. H., Capolino G.-A. Torsional-Vibration Assessment and Gear-Fault Diagnosis in Railway Traction System // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58, no. 5. P. 1707–1717.

17. Грищенко М. А. Повышение остаточного ресурса якорей тяговых электродвигателей за счет ограничения максимальной температуры обмоток: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. СПб., 2010. 156 с.

18. MSC. Nastran 2004. Reference Manual / MSC Software Corporation. [S. l.], 2004. 990 p.

REFERENCES

1. Shantarenko S., Kuznetsova V., Ponomareva E., et al. Influence of Process Parameters on Dynamics of Traction Motor Armature. *Transportation Research Procedia*. 2021;(54):961-971.

2. Biryukov I. V., Savos'kin A. N., Burchak G. P., et al. Mekhanicheskaya chast' tyagovogo privoda [The mechanical part of the traction drive]. Moscow: Transport Publ.; 1992. 440 p. (In Russ.).
3. Fedyanin A. I. Aktual'nye problemy nadezhnosti tyagovykh elektrodvigateley lokomotivov v ekspluatatsii [Actual problems of reliability of traction electric motors of locomotives in operation]. Lokomotivy. Elektricheskii transport – XXI vek [Locomotives. Electric transport – XXI century]. Procs. of the VII Intern. sci.-tech. conf. (St. Petersburg, November 10–12, 2020). St. Petersburg: PGUPS Publ.; 2020. P. 19. (In Russ.).
4. Shkodun P. K., Galeev A. D. Analiz sovremennykh metodov diagnostirovaniya povrezhdeniy izolyatsii tyagovykh elektrodvigateley podvizhnogo sostava [Analysis of modern methods for diagnosing damage to the insulation of rolling stock traction electric motors]. Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte [Innovation projects and technologies in education, industry and transport]. Procs. of the XI scientific. conf., dedicated to the Day of Russian Science. Omsk: OmGUPS Publ.; 2017. P. 96–101. (In Russ.).
5. Sannikov A. S., Chubarev V. E., Kolmakov V. O. Statistika i vidy otkazov tyagovykh elektrodvigateley elektrovozov [Statistics and types of failures of electric locomotive traction motors]. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019;(17):74–76. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-17-74-76>. (In Russ.).
6. Buynosov A. P., Khudoyarov D. L., Tyushev I. A. Razrabotka algoritma diagnostiki tyagovykh elektrodvigateley elektrovozov 2ES6 SINARA [Development of an algorithm for diagnosing traction electric motors of electric locomotives 2ES6 SINARA]. *Transport Urala = Transport of the Urals*. 2021;71(4):74–79. (In Russ.).
7. Bodnar' B. E., Ochkasov A. B., Chernyayev D. V., Shevchenko Ya. I. Diagnostirovanie tyagovykh elektrodvigateley po neravnomernosti vrashcheniya yakorya [Diagnosis of traction electric motor at irregularity in speed of anchor rotation]. *Nauka ta progres transportu = Science and Transport Progress*. 2013;45(3):13–21. (In Russ.).
8. Pokhor D. I. Rezul'taty ekspluatatsionnykh ispytaniy opytной sistemy izolyatsii klassa "H" tyagovykh dvigateley teplovozov i ee kontrol' sredstvami mobil'noy diagnostiki [Results of operational tests of an experimental insulation system of class "H" of traction engines of diesel locomotives and its control by means of mobile diagnostics]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy = Bulletin of scientific research results*. 2021;(4):35–46. (In Russ.).
9. GOST 2582–2013. Mashiny elektricheskies vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Rotating electrical traction machines for rail and road vehicles. General technical specifications]. Int. standard. Introduced as Russian nat. standard on November 22, 2013 No. 1969-st: introduction date 2015-01-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. 66 p. (In Russ.).
10. Dankovtsev V. T., Kiselev V. I., Chetvergova V. A. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont lokomotivov [Maintenance and repair of locomotives]. Moscow: Marshrut Publ.; 2007. 326 p. (In Russ.).
11. Grishchenko M. A. Analiz teplovogo sostoyaniya obmotki yakorya tyagovogo elektrodvigatelya [Analysis of the thermal state of the armature winding of a traction motor]. *Transport Urala = Transport of the Urals*. 2009;20(1):73–76. (In Russ.).
12. Grishchenko M. A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa teploperedachi v yakore tyagovogo elektrodvigatelya teplovoza [Mathematical modeling of the heat transfer process in the armature of a locomotive traction electric motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta puty soobshcheniya (Izvestiya PGUPS) = Proceedings of Petersburg Transport University*. 2010;22(1):33–44. (In Russ.).
13. Kiselev V. I., Fayzibaev Sh. S., Fedyanin A. I. Nadezhnost' tyagovykh elektrodvigateley lokomotivov [Reliability of locomotive traction electric motors]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2020;(10):48–49. (In Russ.).
14. Kiselev V. I. Povyshenie nadezhnosti tyagovykh elektrodvigateley lokomotivov [Improving the reliability of locomotive traction electric motors]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2017;(6):66–67. (In Russ.).
15. Novikova S. I. Teplovoe rasshirenie tverdykh tel [Thermal expansion of solids]. Moscow: Nauka Publ.; 1974. 294 p. (In Russ.).
16. Henaio H., Kia S. H., Capolino G.-A. Torsional-Vibration Assessment and Gear-Fault Diagnosis in Railway Traction System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011;58(5):1707–1717.
17. Grishchenko M. A. Povyshenie ostatochnogo resursa yakorey tyagovykh elektrodvigateley za schet ogranicheniya maksimal'noy temperatury obmotok [Increasing the residual life of traction motor armatures by limiting the maximum temperature of the windings]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis: 05.22.07. St. Petersburg; 2010. 156 p. (In Russ.).
18. MSC. Nastran 2004. Reference Manual. MSC Software Corporation. [S. l.]; 2004. 990 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Валентин Иванович КИСЕЛЕВ,

профессор, кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9),
Author ID: 707815, <https://orcid.org/0000-0001-7601-4351>

Татьяна Олеговна ВАХРОМЕЕВА,

доцент, кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,
vakhromeeva.tatiana@yandex.ru, Author ID: 795098,
<https://orcid.org/0000-0002-1705-8044>

Алексей Игоревич ФЕДЯНИН,

аспирант, кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,
lekha.fedyanin@yandex.ru, Author ID: 1158832,
<https://orcid.org/0000-0002-2161-6782>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valentin I. KISELEV,

Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.),
Author ID: 707815, <https://orcid.org/0000-0001-7601-4351>

Tat'yana O. VAKHROMEVA,

Associate Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St., vakhromeeva.tatiana@yandex.ru),
Author ID: 795098, <https://orcid.org/0000-0002-1705-8044>

Aleksey I. FEDYANIN,

Postgraduate, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St., lekha.fedyanin@yandex.ru), Author ID: 1158832,
<https://orcid.org/0000-0002-2161-6782>

ВКЛАД АВТОРОВ

Валентин Иванович КИСЕЛЕВ. Формирование направления исследования, его актуальности, целесообразности. Фундаментальное исследование свойств изоляционных материалов электрических машин. Теоретическое формулирование перво-причины разрушения изоляции, заключающейся в несоответствии коэффициентов теплового расширения медного проводника и изолирующих материалов обмотки якоря (70%).

Татьяна Олеговна ВАХРОМЕЕВА. Анализ научных работ, посвященных решению вопроса повышения надежности работы тяговых электродвигателей в эксплуатации. Разработка геометрической и расчетной моделей обмотки якоря, уложенной в паз сердечника якоря. Выполнение термодинамического расчета методом конечных элементов. Анализ результатов расчета (20%).

Алексей Игоревич ФЕДЯНИН. Анализ неисправностей тяговых электродвигателей постоянного тока. Анализ научных работ, посвященных вопросам термодинамических процессов, протекающих в электрических машинах (10%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Valentin I. KISELEV. Choosing the research direction, substantiating its relevance, expediency. Fundamental study of the properties of insulating materials of electrical machines. Theoretical formulation of the root cause of the destruction of the insulation, which consists in the discrepancy between the coefficients of thermal expansion of the copper conductor and the insulating materials of the armature winding (70%).

Tat'yana O. VAKHROMEYEVA. Analysis of scientific papers devoted to solving the issue of improving the reliability of traction motors in operation. Development of geometric and calculation

models of the armature winding, laid in the groove of the armature core. Performing a thermodynamic calculation by the finite element method. Analysis of calculation results (20%).

Aleksey I. FEDYANIN. Analysis of failures in DC traction motors. Analysis of scientific papers devoted to the issues of thermodynamic processes occurring in electrical machines (10%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 20.04.2022, первая рецензия получена 23.04.2022, вторая рецензия получена 18.05.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 20.04.2022, first review received 23.04.2022, second review received 18.05.2022, accepted for publication 29.08.2022.



ПАТЕНТЫ ВНИИЖТ

РАСЧЕТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОБЩЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ КУЗОВА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА «ОЛИМП»

М. И. Мехедов, А. В. Кузнецов,
А. А. Крылов, С. Н. Наumenко

РПК «ОЛИМП» представляет собой программное обеспечение, применение которого дает возможность автоматизировать расчет величины общего коэффициента теплопередачи K по минимальному количеству экспериментальных данных, полученных за первые 11 часов проведения теплотехнических испытаний в соответствии с методикой, утвержденной в Соглашении о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок.



Знание величины K позволяет грузоотправителю осуществить обоснованный выбор изотермического транспортного средства (ИТС) и отдать предпочтение той технологии перевозки скоропортящегося груза, которая обеспечит сохранность его качества при доставке.

РПК «ОЛИМП» предназначен для испытательных центров, аккредитованных на проведение теплотехнических испытаний специальных транспортных средств. Программное обеспечение содержит нормативную и методическую базу по проведению теплотехнических испытаний и автоматически создает стандартные формы выходных протоколов.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ
№ 2022617514 от 21.04.2022

Более подробная информация на сайте:
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48492411>

По вопросам использования интеллектуальной собственности обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».
Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru