

УДК 629.423.31

Экспериментальные исследования термомеханических напряжений в асинхронных электродвигателях локомотивов

М. А. Шрайбер

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шрайбер М. А. Экспериментальные исследования термомеханических напряжений в асинхронных электродвигателях локомотивов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 360–369. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-360-369

Аннотация

Цель: для предупреждения возникновения неисправностей обмоток тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов необходимо изучить процессы термомеханического старения изоляции, а также первичные признаки начала повреждения изоляционного материала обмоток. В данной статье исследование ускоренного старения изоляции проводится на сегментированных обмотках и развертке сердечника. **Методы:** для проведения экспериментов была предложена методика поэтапного выполнения испытаний. На первом этапе проводились предварительные исследования, в рамках которых оценивалась работоспособность и точность измерительного оборудования, калибровались измерительные схемы и тестировалось программное обеспечение системы сбора, передачи, обработки и отображения информации. На втором этапе были проведены эксперименты на лабораторных моделях, представляющих собой специально изготовленные натурные образцы. Третий этап включал эксплуатационные испытания на стенде взаимной нагрузки цеха капитального ремонта ТЭД. **Результаты:** в ходе исследований вычислены радиальная деформация зуба статора, окружная деформация в ярме сердечника статора, осевая деформация на задней стенке статора во время нагрева на 100 °С. Полученные данные могут быть использованы для повышения точности тепловых расчетов электрических машин переменного тока. **Практическая значимость:** для обеспечения надежности работы ТЭД крайне важно учитывать тепловые потоки при составлении режимных карт движения поездов и проведении тяговых расчетов. Невыполнение этого требования может привести к перегреву ТЭД, что, в свою очередь, значительно сокращает их срок службы и может вызвать аварийные ситуации.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, изоляция, надежность электрических машин, диагностика тяговых электродвигателей, термомеханическое старение изоляции

Введение

Состояние изоляции определяется множеством параметров, которые можно измерить с помощью штатных средств или в ходе дополнительных испытаний на работающем или отключенном тяговом электродвигателе (ТЭД). Поскольку о долговечности основных компонентов изоляции известно не так много, сложно дать точную оценку их надежности.

Однако на основе результатов физического моделирования можно сделать выводы об отдельных характеристиках изоляционных материалов [1–2].

Цель экспериментальных исследований — изучить процессы термомеханического старения изоляции ТЭД и признаки начала повреждения изоляции. В данной статье исследование ускоренного старения изоляции проводится на

сегментированных обмотках и развертке сердечника. Для проведения экспериментов была предложена методика поэтапного выполнения испытаний.

Основой экспериментальных исследований является приложение к материалу изоляции всех воздействующих на нее факторов в процессе эксплуатации ТЭД [3–5]. В идеальном случае эти факторы должны прикладываться одновременно, однако следует признать, что строгое выполнение этого правила не всегда практически возможно в лабораторных условиях. Более того, одновременное приложение воздействующих факторов сделает экспериментальные исследования недопустимо сложными и дорогостоящими.

Поэтому разработанная методика базируется на результатах циклических испытаний, в которых основным доминирующим фактором старения изоляции ТЭД является температура.

На первом этапе проводились предварительные исследования, в рамках которых оценивалась работоспособность и точность измерительного оборудования, калибровались измерительные схемы и тестировалось программное обеспечение системы сбора, передачи, обработки и отображения информации. Контрольные замеры подтвердили, что измерительный комплекс обеспечивает требуемую точность и может быть использован для экспериментальных исследований изоляции ТЭД.

На втором этапе были проведены эксперименты на лабораторных моделях, представляющих собой специально изготовленные натурные образцы. Полученные результаты позволили внести коррективы в созданные математические модели и окончательно определить технические решения для дальнейших экспериментальных работ.

Третий этап включал эксплуатационные испытания на стенде взаимной нагрузки цеха

капитального ремонта ТЭД сервисного локомотивного депо Твери — структурного подразделения Северо-Западного филиала ООО «ЛокоТех-Сервис» и тепловозе 2ТЭ116-986 секция Б ООО «ТрансОйл», оснащенной системой АСК. Испытания проводились в условиях обычной эксплуатации, без каких-либо ограничений. В ходе этих испытаний уточнялись отдельные параметры, касающиеся изменения температурных режимов работы ТЭД.

Параметры изоляции измерялись при комнатной температуре испытуемого образца и при каждом ее фиксированном значении. Диагностические измерения состояния изоляции проводились в начале исследований после каждых 100 циклов нагрева и после разрушения материала изоляции, когда число циклов составляло менее 500. Это дает возможность определить взаимосвязь между температурой, временем, конструкцией и механической нагрузкой системы электрической изоляции в обмотках.

Ускоренные испытания проводились для увеличения интенсивности воздействия термомеханических напряжений на старение изоляции обмоток и сокращение времени экспериментальных исследований. Результаты ускоренных испытаний часто используются для оценки срока службы изоляции ТЭД при нормальной эксплуатации.

Порядок проведения экспериментальных исследований термомеханических напряжений в сердечнике статора асинхронного электродвигателя

Для изучения деформаций сердечника был выбран статор асинхронного электродвигателя ВА80МВ2 мощностью 2,2 кВт, представленный на рис. 1.

Этот двигатель был оснащен тензометрическими датчиками и термодатчиками, которые

были установлены в наиболее напряженных местах. Выбор этой электрической машины для дальнейшего исследования был обусловлен тем, что она представляет собой типовую конструкцию с хорошо известными характеристиками, такими как геометрия и материалы.

В качестве измерителей деформаций и напряжений были использованы фольгированные константановые тензорезисторы серии Y, обладающие сопротивлением 1000 Ом, диапазоном рабочих температур от -70 до $+200$ °C и температурным коэффициентом сопротивления $1,15 \cdot 10^{-6}$ 1/K.

Два датчика температуры были установлены как можно ближе к тензометрическим датчикам — на наружной стороне сердечника и на вершине зуба. Это было сделано для учета процесса нагрева, поскольку температура на наружной стороне сердечника и на вершине зуба немного отличается.

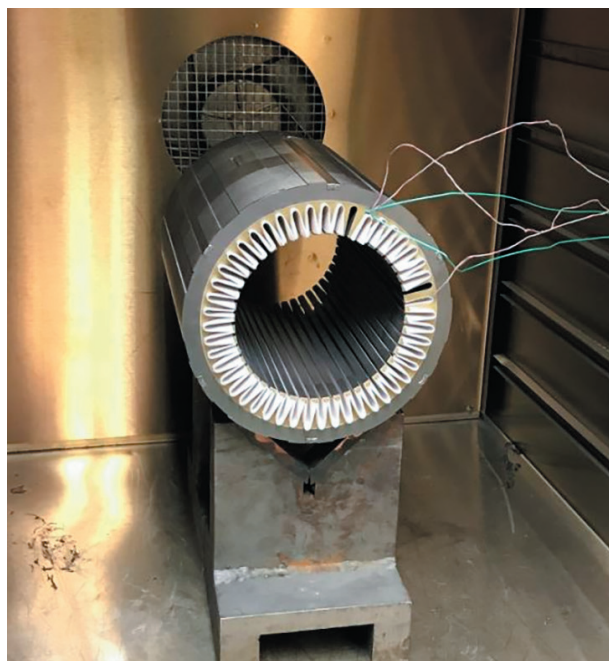


Рис. 1. Установка для исследования деформаций сердечника. Фото: М. А. Шрайбер

Чтобы определить наиболее критические места, где должны быть установлены тензометрические датчики, была создана модель зубцовой зоны [6–8]. На рис. 2 представлено расчетное распределение нормальных напряжений в зубцовой зоне сердечника электродвигателя при установившейся температуре 160 °C. Красная область, расположенная между двумя пазами, выделяется как зона с одной из самых высоких амплитуд приложенного напряжения.

В рамках планируемого эксперимента необходимо измерить градиент температуры и напряжение в этой области, которая на рис. 2 обозначена темно-синим цветом. Здесь были установлены тензометрические датчики и датчики температуры. Поскольку эксперимент носит динамический характер, то есть моделирует деформации, разные части статора будут нагреваться по-разному из-за его геометрии и различной массы в разных местах.

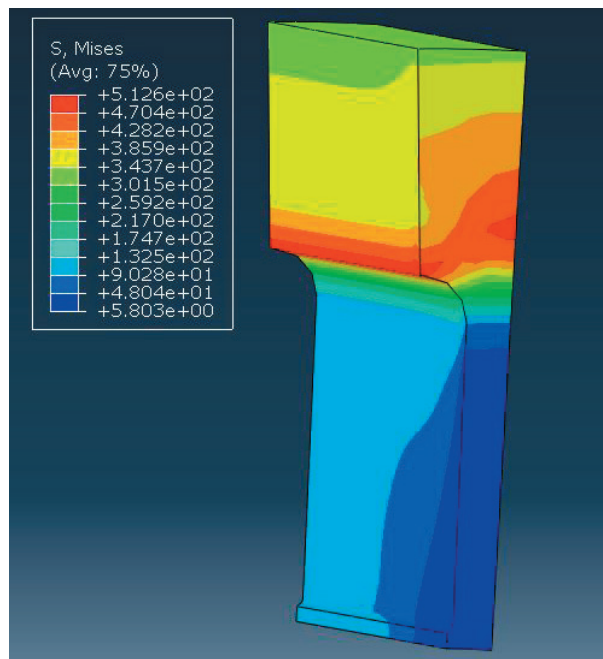


Рис. 2. Установившееся распределение напряжений зубцовой зоны сердечника электродвигателя

В результате геометрические размеры будут изменяться несинхронно.

В конструкции исследуемого объекта существуют две области, где температурные градиенты проявляются особенно ярко: это вершина зуба и задняя часть статора. В связи с этим один тензометрический датчик был размещен на поверхности сердечника, вблизи его верхнего края, а другой — на конце зуба статора. Такая конфигурация позволяет проводить измерения деформации как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях, что наглядно представлено на рис. 3.

В завершение процедуры установки тензометрических датчиков последний из них закрепляется на задней стороне сердечника статора с целью регистрации продольной деформации. Статор был помещен в печь, где его начальная температура составляла приблизительно $20\text{--}22^\circ\text{C}$. В ходе исследования были изучены три различных установившихся температурных режима и процесс нагрева между ними. Для этого печь вместе со статором нагревали в нескольких отдельных экспериментах до достижения установившихся режимов нагрева, которые составляли 50 , 100 и 150°C .

Испытательный стенд, разработанный и собранный собственными силами, позволяет воссоздавать и поддерживать требуемые тепловые циклы, контролируя параметры тока, температуру нагрева изоляционного материала и скорость принудительного охлаждения в ходе исследований (рис. 4).

Во время испытаний образец помещается в термошкаф — короб размером $1,5 \times 1,25 \times 0,75$ м, который со всех сторон изолирован минеральной ватой толщиной $0,045$ м и окружен внешним слоем алюминиевой фольги, что способствует снижению потерь теплоты за счет радиации. Для ускорения процесса охлаждения образцов термошкаф оснащен вентилятором.

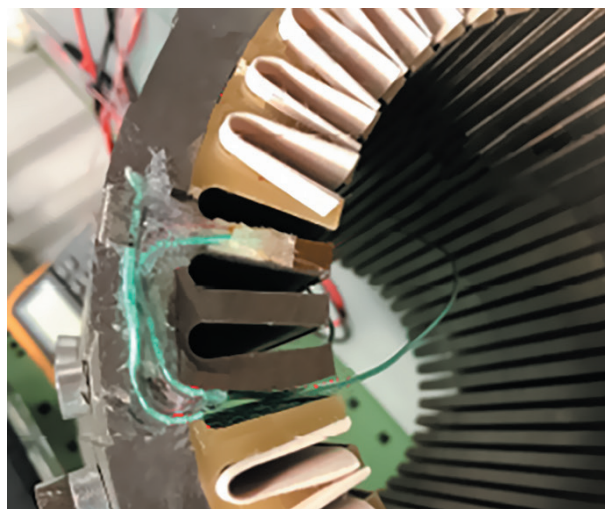


Рис. 3. Расположение тензометрических датчиков в зубцовой зоне статора.

Фото: М. А. Шрайбер

Логическая схема испытательного стенда, предназначенного для автоматизированного тестирования изоляции, требует настройки минимальной и максимальной температур нагрева, а также общего количества циклов, которые необходимо выполнить.

Циклическая температура достигается за счет управления электрическим током, протекающим по проводникам обмотки, и принудительного воздушного охлаждения, которое обеспечивается специально разработанным терморегулятором. Из-за ограничений используемого оборудования рабочие напряжение и ток на испытательном стенде были установлены на уровне 150 В и 40 А.

Для большей реалистичности медный проводник в этой установке выступает в роли источника теплоты, которая передается через систему электрической изоляции к сердечнику. Это приводит к тепловому расширению образца, что вызывает исследуемые механические напряжения. Нагрузки на электрическую изоляцию могут различаться в зависимости от характера тепловых циклов [9–10]. По сравнению



Рис. 4. Общий вид стенда для исследования изоляции. Фото: М. А. Шрайбер

с тепловым напряжением, создаваемым печью, испытательный стенд обеспечивает более точное распределение температуры, которое достовернее отражает процессы, происходящие в обмотках электрических машин в реальных условиях (рис. 5).

При использовании обмоток электрических машин протекающий по проводникам ток (зеленая линия) генерирует теплоту (красная линия), что приводит к повышению температуры обмотки, которая затем передается от проводников к сердечнику. Процедура испытания с переключением напряжения питания заключается в пропуске тока через обмотки для их нагрева, выдержке в течение 100 с для стабилизации температуры, а затем в охлаждении испытуемого объекта до температуры окружа-

ющей среды и повторной паузе для выравнивания температуры в элементах обмотки.

Для сбора данных в стендовой установке использовались модули Advantech. Всего было задействовано пять модулей с настроенными датчиками. Эти модули взаимодействовали друг с другом и с главным компьютером по шине RS-485.

Пользовательский интерфейс позволял задать желаемые параметры температуры, а также количество циклов повторения для автоматической реализации программы исследования. Также была предусмотрена возможность запуска и остановки программы в любой момент. Графический интерфейс, сбор и регистрация данных были настроены на работу с частотой дискретизации 1 Гц. По завер-

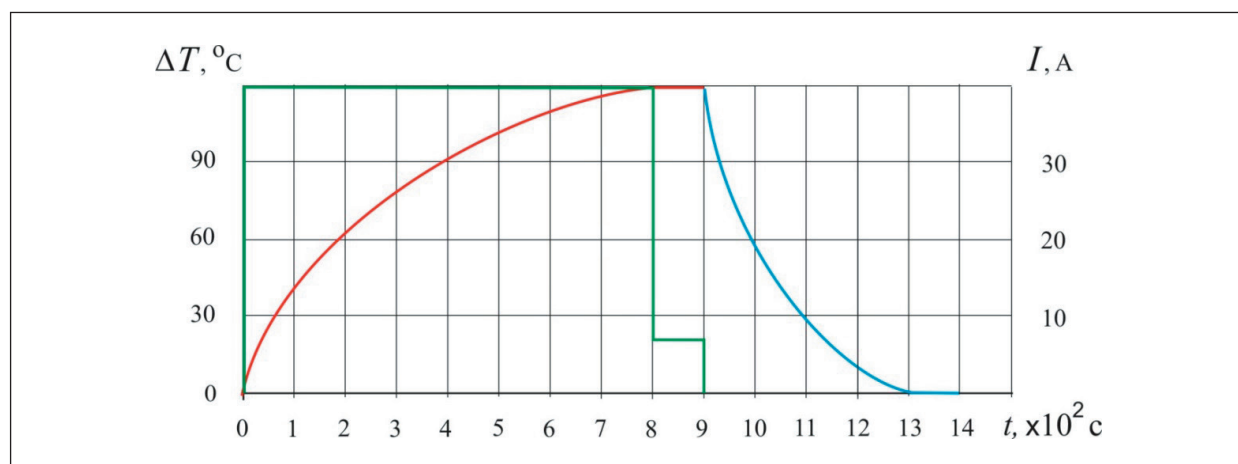


Рис. 5. Параметры цикла нагрева и охлаждения макета обмотки на стенде

шении исследования создавался файл журнала измерений для последующей обработки.

Результаты экспериментальных исследований нагрева статора

Далее приведены данные расчетных и измеренных значений температуры и деформаций, вычисленных с помощью разработанной модели в среде SolidWorks, и нагрева статора в печи до 50, 100 и 150 °С.

На рис. 6 показана зависимость изменения температуры нагрева статора как для экспериментальной, так и для имитационной модели, где по оси ординат отложена температура в градусах, а по оси абсцисс — время. Нагрев осуществляется от комнатной температуры до достижения установившейся температуры нагрева — 100 °С. Здесь и далее красная линия представляет экспериментальное изменение исследуемого параметра, а синяя — его расчетное изменение. На рис. 6 красная линия — это измеренное изменение температуры на ярме, синяя линия — это изменение узловой температуры в соответствующем месте на ярме для имитационной модели с течением времени.

Полученные зависимости показывают, что разработанная модель адекватно отображает

происходящие процессы в ходе нагревания сердечника электродвигателя. Максимальное расхождение измеренных и расчетных данных не превышает 7,6%.

Смоделированная и экспериментальная радиальная деформация зуба при изменении температуры нагрева представлена на рис. 7. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются друг с другом. Максимальное расхождение не превышает 4,4%.

На рис. 8 показана окружная/тангенциальная деформация в ярме сердечника для модели и эксперимента.

Максимальное расхождение достигает 8,3%. Это отклонение может быть объяснено результатом сдвига листов сердечника из-за нагрева, которое не учитывалось в разработанной модели.

На рис. 9 показана осевая деформация задней части сердечника статора для моделирования и эксперимента во время нагрева на 50 °С. Осевая длина статора исследуется, чтобы выяснить, является ли она критическим параметром, влияющим на амплитуды напряжений основных компонентов изоляции.

Экспериментальная осевая деформация на задней стенке статора по сравнению

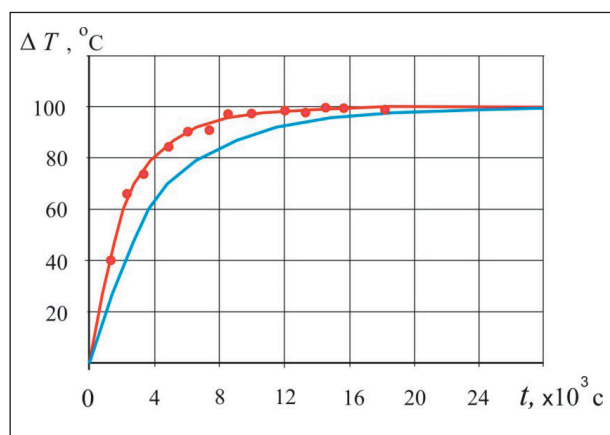


Рис. 6. Расчетное и экспериментальное изменение температуры сердечника во время нагрева на 100°C

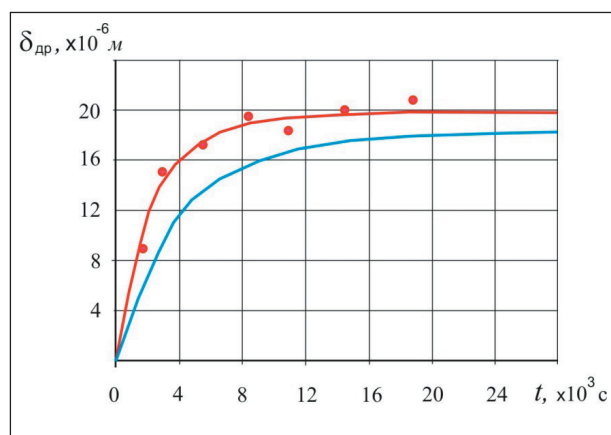


Рис. 7. Смоделированная и экспериментальная радиальная деформация зуба в результате нагрева на 100°C

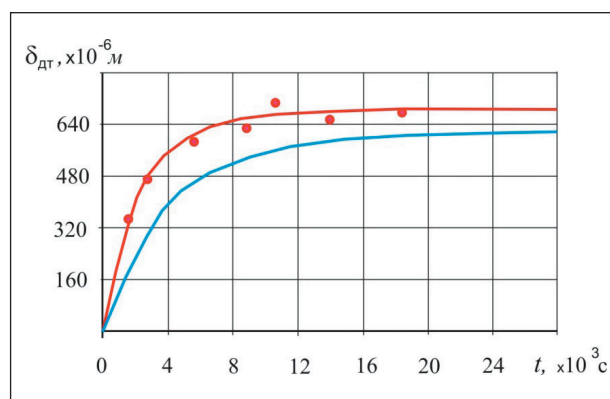


Рис. 8. Смоделированная и экспериментальная окружная деформация в ярме во время нагрева на 100°C

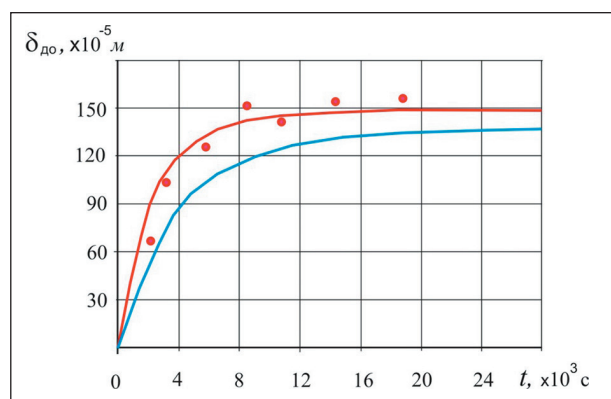


Рис. 9. Смоделированная и экспериментальная осевая деформация на задней стенке статора во время нагрева на 100°C

с моделированием имеет отклонение, достигающее 11,6% (рис. 9). Как и в предыдущем случае, это можно объяснить тем, что сердечник статора состоит из нескольких сотен стальных листов, изолированных лаком. Это может привести к другому значению коэффициента теплового расширения, который используется в имитационной модели. С учетом того, что данная зона расположена на противоположной стороне сердечника, ее деформация незначительно влияет на величину напряжений в материале изоляции обмотки.

В результате анализа полученных данных установлено, что разработанная твердотелая модель адекватно отражает протекающие процессы и хорошо согласуется с аналитическими выражениями для касательных и нормальных напряжений.

Выводы

1. Был разработан специальный стенд, который позволяет проводить испытания изоляционных материалов на тепломеханические повреждения и диагностировать их параметры

в условиях, приближенных к реальным. В ходе испытаний было проведено 500 циклов нагрева на 100 °С. После каждых 100 циклов нагрева проводились измерения параметров изоляции.

2. Была разработана схема подключения электрических цепей, контура охлаждения и проводных соединений для датчиков, установленных на стенде и залитых внутрь экспериментальной обмотки. Для обеспечения независимого и автоматизированного процесса испытаний была создана система автоматического управления работой испытательного стенда и сбора информации.

3. В результате испытаний были изучены важные характеристики элементов электрической машины, изменение которых может стать предпосылкой к возникновению отказа. К таким характеристикам относятся осевые и окружные деформации сердечника статора.

4. Практика убедительно показала, что для обеспечения надежности работы ТЭД крайне важно учитывать тепловой поток при составлении режимных карт движения поездов и проведении тяговых расчетов. Невыполнение этого требования может привести к перегреву ТЭД, что, в свою очередь, значительно сокращает срок их службы и может вызвать аварийные ситуации.

Список источников

1. Надежность изоляции электрических машин / А. И. Галушко [и др.]. М.: Энергия, 1979. 175 с.
2. Исмаилов Ш.К. Повышение ресурса изоляции электрических машин подвижного состава: монография. Омск, 2007. 391 с.
3. Кьюнг Л.К., Лурье С.А., Дудченко А.А. Об оценке трещиностойкости при межслойном разрушении слоистых композитов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18, № 1. 2012. С. 83–91.

4. Дудкин А.Н., Ким В.С., Марьин С.С. Исследование внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных лаках // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308, № 7. С. 171–174.

5. Шрайбер М.А. Развитие остаточных напряжений в изоляции тяговых электродвигателей при отверждении пропиточного состава // Транспорт Урала. 2024. № 1 (80). С. 35–40.

6. Киселев И.Г., Курилкин Д.Н., Шрайбер М.А. Тепловая модель асинхронного тягового электродвигателя тепловоза // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18, № 4. С. 460–468.

7. Курилкин Д.Н., Романова А.А., Шрайбер М.А. Моделирование механических напряжений в обмотках тяговых электродвигателей тепловозов. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2021. № 2. С. 46–48.

8. Шрайбер М.А. Моделирование воздействия неоднородности материала изоляции тяговых электрических машин на процессы роста усталостных трещин // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 3 (99). С. 42–45.

9. Шрайбер М.А. Влияние термомеханической нагрузки на старение изоляции тяговых электродвигателей тепловозов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, № 2. С. 242–248.

10. Шрайбер М.А. Исследование усталостного старения изоляции тяговых электродвигателей тепловозов при циклической нагрузке // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 4. С. 27–35.

Дата поступления: 07.04.2026

Решение о публикации: 01.05.2026

Контактная информация:

ШРАЙБЕР Марина Александровна — кандидат техн. наук, доцент; goshapti4ka@yandex.ru

Experimental Studies of Thermomechanical Stresses in Locomotive Asynchronous Electric Motors

M. A. Shrajber

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Shrajber M.A.* Experimental Studies of Thermomechanical Stresses in Locomotive Asynchronous Electric Motors // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 360–369. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-360-369 (In Russian)

Abstract

Purpose: to prevent faults in the windings of locomotive traction electric motors (TEMs), it is necessary to study the processes of thermomechanical aging of the insulation, as well as the initial signs of damage to the insulation material of the windings. In this article, the accelerated aging of the insulation is studied on segmented windings and core scans. **Methods:** a step-by-step test methodology was proposed for conducting experiments. In the first stage, preliminary studies were conducted to assess the performance and accuracy of the measuring equipment, calibrate the measurement circuits, and test the software of the information collection, transmission, processing, and display system. In the second stage, experiments were performed on laboratory models, which were specially designed prototypes. The third stage involved operational tests on the mutual load bench in the TED overhaul workshop. **Results:** in the course of research calculated the radial deformation of the stator tooth, the circumferential deformation in the stator core yoke, and the axial deformation on the rear wall of the stator during heating by 100 °C. The data obtained can be used to improve the accuracy of thermal calculations for AC electric machines. **Practical significance:** to ensure the reliability of the TED operation, it is extremely important to consider the heat flows when drawing up the train movement mode maps and conducting traction calculations. Failure to comply with this requirement can lead to overheating of the TED, which in turn significantly reduces their service life and can cause accidents.

Keywords: traction electric motors, insulation, reliability of electric machines, diagnostics of traction electric motors, thermomechanical aging of insulation

References

1. Galushko A.I., et al. Nadezhnost' izolyatsii elektricheskikh mashin [Reliability of the Insulation of Electric Machines], Moscow, Energy Publishing, 1979, 175 p. (In Russian)
2. Ismailov Sh.K. Povyshenie resursa izolyatsii elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava: monografiya [Increasing the Resource of the Insulation of Electric Machines of Rolling Stock: A Monograph], Omsk, 2007, 391 p. ISBN 5-94941-039-4 (In Russian)
3. K'yung L.K., Lur'e S.A., Dudchenko A.A. Ob otsenke treshchinostojkosti pri mezhslonnom razrushenii sloistykh kompozitov [On the Assessment of Crack Resistance in Interlayer Fracture of Layered

- Composites], *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksij* [Mechanics of Composite Materials and Structures], 2012, vol. 18, no. 1, pp. 83–91. (In Russian)
4. Dudkin A.N., Kim V.S., Mar'in S.S. Issledovanie vnutrennikh mekhanicheskikh napryazhenij v propitochnykh i zalivochnykh lakakh [Research of Internal Mechanical Stresses in Impregnating and Pouring Varnishes], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceeding of Tomsk Polytechnic University], 2005, vol. 308, no. 7, pp. 171–174. ISSN 1684-8519 (In Russian)
5. Shrajber M.A. Razvitie ostatochnykh napryazhenij v izolyatsii tyagovykh elektrodvigatel'ej pri otverzhdenii propitochnogo sostava [Development of

Residual Stress in the Insulation of Traction Electric Motors During the Curing of the Impregnation Composition], *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2024, no. 1 (80), pp. 35–40. (In Russian)

6. Kiselev I.G., Kurilkin D.N., Shrajber M.A. Teplovaya model' asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya teplovoza [Thermal Model of an Asynchronous Traction Electric Motor of a Diesel Locomotive], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 460–468. (In Russian)

7. Kurilkin D.N., Romanova A.A., Shrajber M.A. Modelirovanie mekhanicheskikh napryazhenij v obmotkakh tyagovykh elektrodvigatelyj teplovozov [Modeling of Mechanical Stresses in the Windings of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives], *Elektronika i elektrooborudovanie transporta [Electronics and Electrical Equipment of Transport]*, 2021, no. 2, pp. 46–48. (In Russian)

8. Shrajber M.A. Modelirovanie vozdejstviya neodnorodnosti materiala izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin na protsessy rosta ustalostnykh treshchin [Modeling the Effect of Heterogeneity of the Insulation Material of Traction Electrical Machines

on the Growth of Fatigue Cracks], *Vestnik Transporta Povolzhya [Bulletin of transport of the Volga region]*, 2023, no. 3 (99), pp. 42–45. (In Russian)

9. Shrajber M.A. Vliyanie termomekhanicheskoy nagruzki na starenie izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelyj teplovozov [Influence of Thermo-mechanical Load on the Aging of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 242–248. (In Russian)

10. Shrajber M.A. Issledovanie ustalostnogo stareniya izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelyj teplovozov pri tsiklicheskoj nagruzke [Research of the Fatigue Aging of the Traction Electric Motors of Diesel Locomotives under Cyclic Load], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2023, no. 4, pp. 27–35. (In Russian)

Received: April 07, 2026

Accepted: May 01, 2026

Author's information:

Marina A. SHRAJBER — PhD in Engineering, Associate Professor; goshapti4ka@yandex.ru