

УДК 621.313

## Исследование усталостного старения изоляции тяговых электродвигателей тепловозов при циклической нагрузке

М. А. Шрайбер

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

**Для цитирования:** Шрайбер М. А. Исследование усталостного старения изоляции тяговых электродвигателей тепловозов при циклической нагрузке // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 27-35. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-27-35

### Аннотация

**Цель:** Выполнить анализ процессов усталостного старения изоляции тяговых электрических машин локомотивов при действии циклических нагрузок в эксплуатации. **Методы:** При решении типовых задач усталостной прочности изоляционных материалов электрических машин локомотивов в исследовании используются периодические циклы нагружения. **Результаты:** Анализ процессов усталостного старения материалов изоляции электрических машин показывает, что основными параметрами, увеличивающими интенсивность старения, являются частота и амплитуда цикла нагревания, а термомеханические напряжения возрастают при увеличении скорости нагрева и амплитуды температуры. **Практическая значимость:** Определение усталостных характеристик материала изоляции имеет очень важное значение при моделировании его повреждений, что позволит повышать надежность электрических машин современных локомотивов на стадиях проектирования, изготовления, модернизации и эксплуатации.

**Ключевые слова:** Тяговый электродвигатель тепловоза, изоляция электрических машин локомотивов.

### Введение

Решение проблемы повышения надежности электрических машин и электрооборудования является одним из приоритетных направлений исследований специалистов и исследователей в XXI веке [1–4]. Известно, что усталостные процессы — это основная причина разрушения конструкций, в том числе электрических машин, при циклическом нагружении. Большое количество работ было посвящено повышению надежности монолитных материалов (металлы и их сплавы). В итоге развился значительный прогресс в создании материалов, способных сопротивляться усталостным процессам, а также появились современные методы прогнозирования срока службы подобных материалов.

Известно, что усталость материала является результатом циклической пластической деформации. Незначительная пластическая деформация материала, возникшая всего один раз, не вызовет каких-либо существенных изменений в структуре изоляционного материала электрической машины, но многократное повторение подобных малых пластических деформаций приведет в итоге к

кумулятивному повреждению и как результат к усталостным разрушениям материала изоляции.

Анализ усталости композитных материалов и последующее прогнозирование срока их службы являются достаточно трудными задачами, так как свойства материалов, составляющих композит, могут быть совершенно различными. На усталостное поведение одного компонента может существенно влиять наличие других компонентов и межфазных областей между волокнами и пропиточным составом. На данный момент поведение компонентов композита при усталостной нагрузке еще далеко не полностью изучено.

Предполагается, что материал изоляции — это стеклоткань, пропитанная специальным лаком или компаундом. Связь между этими двумя компонентами обычно слабая, но можно полагаться на их взаимодействие, так как они остаются в фрикционном контакте и после расслоения. Часто этот фактор не учитывается при выборе компонентов. Однако несоответствие теплового расширения на границе раздела двух различных по структуре материалов (между волокном и пропиточным составом, пропиточным составом и медью проводника либо пропиточным составом и сталью сердечника) создает сжимающее нормальное напряжение. Также наличие фрикционного скольжения на границе раздела материалов формирует основной необратимый механизм, вызывающий их усталостное разрушение [5].

## Виды циклического нагружения

Известны три характерных цикла напряжений, согласно которым к изучаемому компоненту могут быть приложены нагрузки. Классифицируют следующие циклы испытаний: циклические испытания на сжатие-сжатие, циклические испытания на растяжение-сжатие и циклические испытания на растяжение-растяжение (рис. 1).

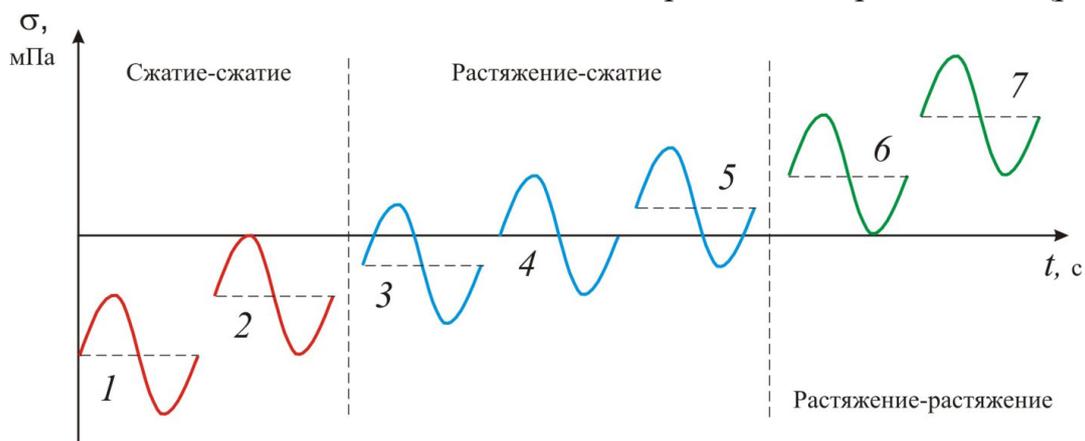


Рис. 1. Классификация циклических нагружений:  
 1, 2 — повторяющийся цикл сжатие-сжатие; 3, 5 — ассиметричный цикл растяжение-сжатие; 4 — реверсивный цикл растяжение-сжатие;  
 6, 7 — повторяющийся цикл растяжение-растяжение

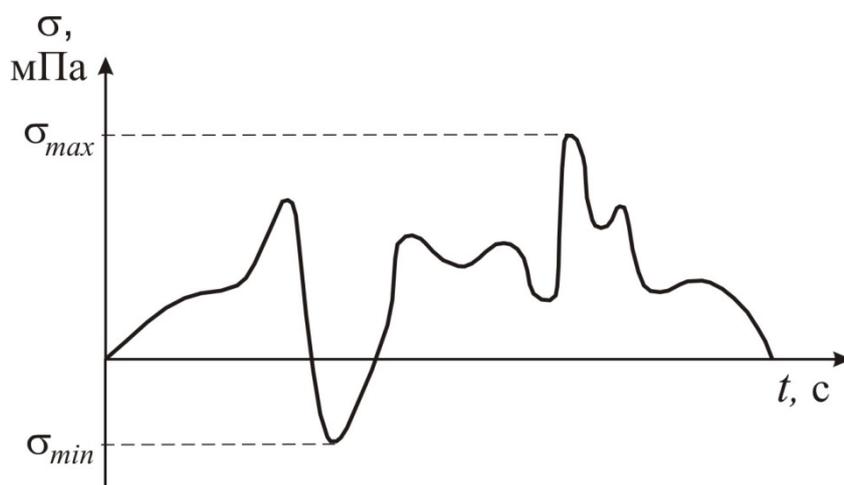


Рис. 2. Случайный цикл нагружения

Наиболее простым является реверсивный цикл напряжения, а именно растяжение-сжатие (зависимость 4). Это синусоида, где максимальное и минимальное напряжения равны между собой, но отличаются знаком. Пример подобного типа цикла напряжения: любая ось, в которой каждые пол-оборота или полпериода напряжение изменяется на противоположное.

Более распространен вид цикла, когда максимальное и минимальное напряжения цикла асимметричны. При этом максимальное напряжение и минимальное напряжение не равны и не противоположны друг другу. Этот тип нагружения называется повторяющимся циклом (зависимости 1, 2, 6, 7).

Описанные выше два типа циклического нагружения представляют собой идеализацию переменных нагрузок, действующих на изучаемые конструкции.

Наиболее приближенным к эксплуатационным условиям является случайный цикл нагружения. В этом случае напряжение, частота и длительность его изменяются случайным образом (рис. 2). Но такое протекание процесса вызывает существенные трудности при математическом описании напряженно-деформированного состояния и моделировании усталостных повреждений.

При решении типовых задач усталостной прочности металлов или их сплавов обычно применяются периодические циклы нагружения, при этом исследователи оперируют с миллионами циклов. Для изучения температурного усталостного разрушения материала изоляции тягового электродвигателя используют режимы со сравнительно небольшим числом циклов нагружения и при сравнительно небольших напряжениях. В этом случае приходится иметь дело с десятками, сотнями, самое большее — с тысячами циклов. Однако для оценки работоспособности материала изоляции при циклическом нагружении к настоящему времени не имеется достаточного количества объективных данных.

Несмотря на то, что усталостное разрушение материала изоляции электрических машин подвижного состава трудно предсказать точно, методика

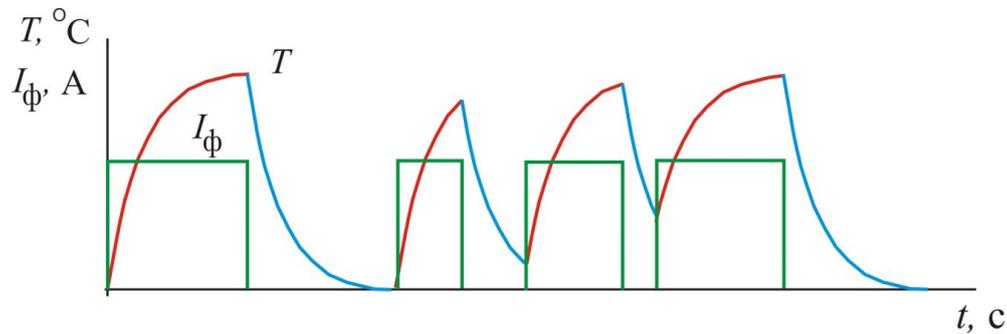


Рис. 3. Изменение температуры обмотки  $T$  при изменении фазного тока  $I_{\phi}$  тягового электродвигателя тепловоза

прогнозирования и предотвращения усталостного разрушения необходима при проектировании современных и перспективных тяговых электрических машин.

С целью прогнозирования срока службы изоляции тягового электродвигателя необходимо учитывать циклические параметры изменения температуры. Например, при движении локомотива с составом тепловой цикл создается каждый раз, когда происходит включение или отключение напряжения питания тяговых электродвигателей [6]. С учетом зависимостей нагревания-охлаждения тяговых электрических машин этот процесс будет выглядеть таким, как показано на рис. 3.

При включении и отключении электрической нагрузки последняя оказывает термомеханическое воздействие на все элементы конструкции электрической машины. В результате возникает повышение температуры меди обмотки, что заставляет ее расширяться преимущественно в осевом направлении. Считается, что один цикл соответствует одному процессу нагрева, за которым следует один процесс охлаждения.

Из-за разницы коэффициентов теплового расширения меди и материала изоляции один или оба компонента также испытывают дополнительные нагрузки, и изоляция подвергается большему воздействию, чем все остальные элементы. Такие периоды переменных напряжений повторяются до того момента, пока один из компонентов изоляции не выйдет из строя. В результате электрические свойства изоляции становятся достаточно слабыми, что препятствует выполнению ее функций. Потому изоляция паза должна иметь необходимую прочность на сжатие и сдвиг, чтобы предотвратить ее повреждение.

Подобные процессы особенно заметны в условиях Крайнего Севера и Сибири, когда температура окружающей среды может опускаться ниже минус  $45^{\circ}\text{C}$  зимой и достигать  $35^{\circ}\text{C}$  летом. При длительном движении локомотива на холостом ходу температура обмоток часто приближается к температуре окружающей среды, в то время как рабочая температура обмоток тяговых электродвигателей под нагрузкой может составлять  $130\text{--}150^{\circ}\text{C}$  и выше. Вот поэтому следует для прогнозирования срока службы материала изоляции электрических машин локомотивов учитывать циклические диапазоны изменения температур.

## Усталостные изменения в структуре материала изоляции

Результаты исследований [7–9] показывают, что изменения жесткости слоистого материала влияют на усталостную долговечность и могут использоваться в качестве индикатора старения изоляции тяговых электрических машин. Слоистые материалы претерпевают явные изменения жесткости  $K$ , разделенные на три стадии, как показано на рис. 4.

На первом этапе (зона I) происходит быстрое снижение нормированной жесткости (2–5 %), вызванное первичными трещинами, и некоторое ограниченное разрушение волокна соответствует его 10–15 % срока службы. По мере продолжения циклического нагружения первичные и вторичные трещины приводят к непрерывному, медленному и линейному снижению нормализованной жесткости на 1–8 % (зона II), в течение которой достигается 85–95 % усталостной долговечности. Наконец, в конце срока службы наблюдается резкое снижение нормированной жесткости, характеризующееся расслоением и окончательным разрушением материала изоляции (зона III).

При исследовании систем изоляции специалисты пытаются ускорить процесс старения, чтобы иметь возможность оценить материалы и методы испытаний в течение приемлемо короткого времени. Таким образом, ускоренные испытания являются наиболее подходящим средством исследовать характеристики старения, при которых применяемые ограничения окружающей среды или электрические нагрузки сильнее, чем в номинальных условиях эксплуатации. Следовательно, для заданного уровня надежности продолжительность испытаний при ускоренных методах исследования значительно сокращается. Испытания на старение не могут проводиться систематически на реальном оборудовании по очевидным причинам продолжительности и стоимости. Вместо этого должны использоваться опытные образцы, представляющие системы изоляции электрической машины.

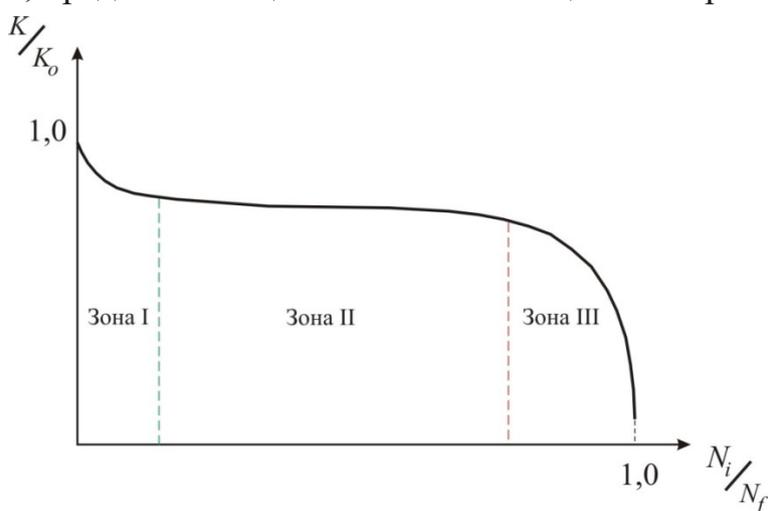


Рис. 4. Стадии усталостного изменения жесткости слоистого материала

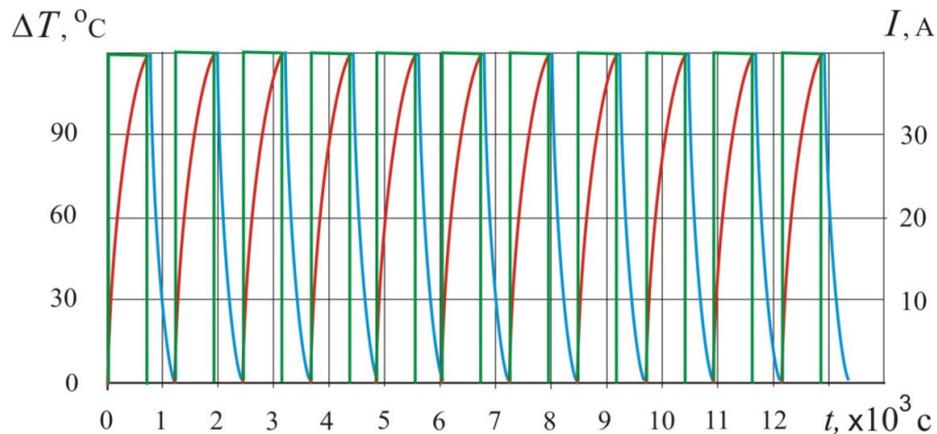


Рис. 5. Основные параметры нагрева обмотки при исследовании старения изоляции

Оценка способности изоляционной системы сопротивляться разрушению под действием электрического напряжения регулируется стандартами, установленными Международной электротехнической комиссией (МЭК). Хотя отдельные параметры, такие как испытательное напряжение и частота или тип образца, могут различаться в зависимости от применения, но при проведении испытаний на ускоренное старение необходимо соблюдать некоторые общие правила.

Ускоренное старение может быть реализовано за счет увеличения электрических нагрузок (уровень напряжения, частота, величина, рабочий цикл, скорость нарастания и т. д.), воздействий окружающей среды (влажность, давление, температура, механическое напряжение) или любого другого уровня ограничений. Коэффициент ускорения не должен быть слишком высоким, чтобы обеспечить единый механизм старения и не создавать дополнительных явлений, которых не было бы при номинальной работе. Чем выше ускорение и уровни напряжения, тем больше неопределенность модели срока службы. С другой стороны, выбор уровней нагрузки, слишком низких или слишком близких к условиям эксплуатации, может привести к неоправданно длительным испытаниям с очень низким числом отказов. Таким образом, подход заключается в поиске компромисса между продолжительностью испытаний и точностью модели для точной оценки срока службы изоляционных систем в реальных условиях.

В данном исследовании используется повторение процессов нагрева-охлаждения до получения конечного результата (рис. 5).

С одной стороны, такой цикл нагрузки в определенной степени отображает процессы работы материала изоляции, а с другой — такой интенсивности процесса нагружения нет в условиях реальной эксплуатации ТЭД. Старение, выполненное при таком напряжении, не может быть непосредственно экстраполировано на реальную среду, но гарантирует, что срок службы реальной системы существенно превосходит срок службы, полученный при ускоренном старении, поскольку он представляет собой наихудший возможный случай.

Упрощенное описание ускоренного старения заключается в том, что эффект, похожий на естественное старение, возникает за более короткое время. Реализм ускорения зависит, по крайней мере, от того, чтобы фактор ускорения не был настолько высоким, чтобы модифицировать доминирующий механизм старения; например, это может произойти, если ускоренное напряжение приведет к аномально высокой температуре или нагрузкам, которых никогда не было бы при нормальной работе.

Стандарты избегают заявлений о прямом сходстве с эффектами эксплуатации, излагая только метод, с помощью которого можно сравнивать различные группы объектов испытаний, таких как установленная и экспериментальная система изоляции. Подразумевается, что ускоренные методы испытаний дадут результаты, коррелирующие с теми, которые можно было бы увидеть в реальной эксплуатации

## Выводы

Необратимые изменения, которые постепенно происходят в изоляционной системе из-за рабочих нагрузок и воздействия окружающей среды, могут продолжаться многие годы. Механизмы старения изменяют характеристики компонентов материала изоляции и снижают их электроизоляционные свойства. Исследованиями было показано, что вредные факторы могут действовать на материал изоляции по отдельности, но в большинстве случаев в различном их сочетании.

Основными параметрами термоциклирования, которые ускоряют старение системы электрической изоляции тяговых электрических машин тепловоза, являются частота и амплитуда цикла нагревания. При этом термомеханические напряжения будут больше при увеличении скорости нагрева и амплитуды температуры.

Использование методов ускоренного старения также может быть полезно для оценки новых методов диагностики и установления критериев интерпретации результатов. В этих ситуациях использование реальных систем изоляции в естественных условиях эксплуатации имеет несколько проблем. Одним из них является замедление изменений из-за старения, хотя это не так критично, поскольку измерения можно производить на широком диапазоне возрастов существующих электрических машин.

## Библиографический список

1. Pedersen K. B. Dynamic modeling method of electro-thermo-mechanical degradation in IGBT modules / K. B. Pedersen, K. Pedersen // IEEE Trans. Power Electron. — 2016. — Iss. 31. — Pp. 975–986.
2. Chen W. Thermal stress in bonded joints / W. Chen, C. Nelson // IBM Journal of Research and Development. — 1979. — Vol. 23. — Iss. 2. — Pp. 179–188.

3. Kokko Voitto I. J. Ageing Due to Thermal Cycling by Start and Stop Cycles in Lifetime Estimation of Hydroelectric Generator Stator Windings / Voitto I. J. Kokko // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). — 2011.
4. Dakin T. W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon / T. W. Dakin // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. — 1998. — Vol. 67. — Iss. 1. — Pp. 113–122.
5. Grachev V. V. Thermomechanical voltages in the insulation of traction electric machines of locomotive / V. V. Grachev, M. A. Shrajber // Journal of Physics: Conference Series. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ИТММ 2021 — Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres” 2021. — P. 042087.
6. Grishchenko A. V. Experimental studies of the thermal state of the TED collector / A. V. Grishchenko, V. V. Grachev, F. Yu. Bazilevsky et al. // In the collection: Locomotives. Electric transport. XXI Century.
7. Grishchenko A. V. Simulation of thermal processes in asynchronous traction electric motor of a locomotive / A. V. Grishchenko, M. A. Shrajber // Journal of Physics: Conference Series. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ИТММ 2021 — Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres” 2021. — P. 042088.
8. Grachev V. V. A model of stator-winding heat flow for an induction traction electric motor / V. V. Grachev, A. V. Grishchenko, I. G. Kiselev et al. // Russian Electrical Engineering. — 2022. — Vol. 93. — Iss. 2. — Pp. 95–97.
9. Grishchenko A. V. Thermomechanical stresses in the insulation of traction electric machines of diesel locomotives / A. V. Grishchenko, M. A. Shrajber // In the collection: III Betancourt International Engineering Forum. Collection of works in two volumes. — St. Petersburg, 2021. — Pp. 107–109.

Дата поступления: 18.09.2023

Решение о публикации: 10.11.2023

#### Контактная информация:

ШРАЙБЕР Марина Александровна — канд. техн. наук, доц.; goshapti4ka@yandex.ru

## Investigation of Fatigue Aging of Insulation of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives Under Cyclic Load

**M. A. Shrajber**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Shrajber M. A. Investigation of Fatigue Aging of Insulation of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives Under Cyclic Load. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 27-35. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-27-35

### Summary

**Purpose:** To analyze the processes of fatigue aging of the insulation of traction electric machines of locomotives under cyclic loads in operation. **Methods:** When solving typical problems of fatigue strength of insulating

materials of electric locomotives, periodic loading cycles are used in the study. **Results:** The analysis of the processes of fatigue aging of insulation materials of electrical machines shows that the main parameters that increase the intensity of aging are the frequency and amplitude of the heating cycle. Thermomechanical stresses increase with rise of heating speed and temperature amplitude. **Practical significance:** Determination of the fatigue characteristics of the insulation material is very important when modeling its damage, which will increase the reliability of electric machines of modern locomotives at the stages of design, manufacture, modernization and operation.

**Keywords:** Traction electric motor of a diesel locomotive, insulation of electric machines of locomotives.

## References

1. Pedersen K. B., Pedersen K. Dynamic modeling method of electro-thermo-mechanical degradation in IGBT modules. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, Iss. 31, pp. 975–986.
2. Chen W., Nelson C. Thermal stress in bonded joints. *IBM Journal of Research and Development*, 1979, vol. 23, Iss. 2, pp. 179–188.
3. Kokko Voitto I. J. Ageing Due to Thermal Cycling by Start and Stop Cycles in Lifetime Estimation of Hydroelectric Generator Stator Windings. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011.
4. Dakin T. W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1998, vol. 67, Iss. 1, pp. 113–122.
5. Grachev V. V., Shrajber M. A. Thermomechanical voltages in the insulation of traction electric machines of locomotive. *Journal of Physics: Conference Series*. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, IITMM 2021 — Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres” 2021, p. 042087.
6. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Bazilevsky F. Yu. et al. Experimental studies of the thermal state of the TED collector. In the collection: *Locomotives. Electric transport. XXI Century*.
7. Grishchenko A. V., Shrajber M. A. Simulation of thermal processes in asynchronous traction electric motor of a locomotive. *Journal of Physics: Conference Series*. Ser. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, IITMM 2021 — Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres” 2021, p. 042088.
8. Grachev V. V., Grishchenko A. V., Kiselev I. G. et al. A model of stator-winding heat flow for an induction traction electric motor. *Russian Electrical Engineering*, 2022, vol. 93, Iss. 2, pp. 95–97.
9. Grishchenko A. V., Shraiber M. A. Thermomechanical stresses in the insulation of traction electric machines of diesel locomotives. In the collection: *III Betancourt International Engineering Forum. Collection of works in two volumes*. St. Petersburg, 2021, pp. 107–109.

Received: September 18, 2023

Accepted: November 10, 2023

### Author's information:

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