

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.015

doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-57-62

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЛОКОМОТИВА ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

Николай Александрович Лукашов^{1✉}, Виталий Сергеевич Суслов², Артём Михайлович Масонов³, Олег Сергеевич Маганков⁴, Сергей Сергеевич Сергеев⁵

^{1,2,3,4} ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», Брянск, Россия

¹ Lukashov32@gmail.com

² v.suslov99@mail.ru

³ artemmasonov@mail.ru

⁴ o.magankov@yandex.ru

⁵ hosber@mail.ru

Аннотация

Тяговые асинхронные электродвигатели (ТАД) занимают ключевое место в электроприводе локомотивов, обеспечивая надежность и эффективность работы железнодорожного транспорта. В процессе эксплуатации ТАД их изоляционные материалы могут подвергаться различным воздействиям, что приводит к старению, деградации и, в конечном итоге, к возможным аварийным ситуациям. В связи с чем оценка состояния изоляции стержней тягового асинхронного электродвигателя локомотива с различными сечениями обмоток ротора является актуальной задачей. Проведено ис-

следование состояния изоляционных покрытий ТАД и определение их срока службы в зависимости от различных форм сечений обмоток ротора на основе метода распределения температур в обмотках. Установлено, что наименьшие температуры нагрева обмоток ротора фиксируются при трапециевидном сечении обмоток статора, в следствие чего изоляционные покрытия ТАД подвергаются меньшему износу при эксплуатации.

Ключевые слова: двигатель, изоляция, обмотка, ротор, стержень, теплоотдача.

Ссылка для цитирования:

Лукашов Н.А. Повышение надежности изоляции тягового асинхронного двигателя локомотива путем оптимизации параметров его конструкции / Н.А. Лукашов, В.С. Суслов, А.М. Масонов, О.С. Маганков, С.С. Сергеев // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 5. – С.57-62. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-57-62.

Original article

Open Access Article

IMPROVING THE INSULATION RELIABILITY OF THE TRACTION ASYNCHRONOUS MOTOR OF A LOCOMOTIVE BY OPTIMIZING ITS DESIGN PARAMETERS

Nikolay Aleksandrovich Lukashov^{1✉}, Vitaly Sergeevich Suslov², Artem Mikhailovich Masonov³, Oleg Sergeevich Magankov⁴, Sergey Sergeevich Sergeev⁵

^{1,2,3,4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ Lukashov32@gmail.com

² v.suslov99@mail.ru

³ artemmasonov@mail.ru

⁴ o.magankov@yandex.ru

⁵ hosber@mail.ru

Abstract

Traction asynchronous electric motors (TAEM) have a key place among locomotive electric drives,

ensuring the reliability and efficiency of railway transportation. During TAEM operation, their insulation

materials can be exposed to various influences, which lead to aging, degradation and, eventually, to possible emergency situations. In this regard, the assessment of the insulation condition of the rods of the traction asynchronous electric motor of a locomotive with different sections of the rotor windings is an urgent task. A study of the condition of TAEM insulating coatings and the determination of their service life depending on various shapes of the rotor windings based on the

method of temperature distribution in the windings is carried out. It is found out that the lowest heating temperatures of the rotor windings are fixed with a trapezoidal section of the stator windings, which results in less wear of TAEM insulating coatings during operation.

Keywords: motor, insulation, winding, rotor, rod, heat transfer.

Reference for citing:

Lukashov NA, Suslov VS, Masonov AM, Magankov OS, Sergeev SS. Improving the insulation reliability of the traction asynchronous motor of a locomotive by optimizing its design parameters. Transport Engineering. 2025;5:57-62. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-57-62.

Введение

Тяговые асинхронные двигатели (ТАД) широко используются в промышленности и бытовом секторе благодаря своей надежности и эффективности. Они занимают ключевое место в электроприводе локомотивов, обеспечивая надежность и эффективность работы железнодорожного транспорта.

Асинхронные электродвигатели работают на основе принципа электромагнитной индукции, создавая вращающееся магнитное поле, которое индицирует ток в роторе. Ротор может быть выполнен в виде короткозамкнутой конструкции, где стержни объединены с помощью кольцевых перемычек. Изоляционные покрытия стержней играют решающую роль в предотвращении короткого замыкания и обеспечении эффективного функционирования двигателя. ТАД подвержены различным воздействиям, которые могут негативно сказаться на состоянии изоляции, что, в свою очередь, приводит к снижению надежности и эффективности работы.

Износ изоляции может происходить по множеству причин:

– температурные колебания: повышенные температуры могут привести к старению изоляционных материалов;

– влажность: высокая влажность и конденсация влаги могут снизить диэлектрические свойства изоляции;

– механические воздействия: вибрации и удары могут повредить изоляционные слои.

Эти факторы могут приводить к коротким замыканиям, что в свою очередь вызывает остановки ТАД, приводящие к ремонтным работам, которые несут экономические потери.

В связи с вышеизложенным, оценка состояния изоляции стержней тягового асинхронного электродвигателя локомотива с различными сечениями обмоток ротора является актуальной задачей, имеющей важное значение для поддержания надежной работы электродвигателей и предотвращения возможных аварийных ситуаций.

Изоляционные дефекты могут возникать по ряду причин, включая тепловые и усталостные факторы. Тепловые изменения, такие как спекание, обугливание и тепловое старение изоляции, могут серьезно ухудшить ее характеристики. Важно отметить, что во время ремонта электродвигателей иногда сложно выявить скрытые дефекты, такие как повреждения стержней короткозамкнутого роторного устройства или нарушение изоляции на стадии разборки.

Обоснование оптимальной конструкции сечения обмоток ротора тягового асинхронного электродвигателя.

Выбор оптимальных конструкций сечений обмоток ротора ТАД позволяет улучшить его эффективность работы и

уменьшить температуру в обмотках при эксплуатации. Изменение геометрии обмотки может существенно повлиять на

распределение напряжений и, соответственно, на состояние изоляции. Основные направления изменения конструкции включают:

- увеличение зазора между обмоткой и корпусом двигателя для уменьшения плотности электрического поля;

- оптимизация формы обмоток для улучшения охлаждения и снижения механических нагрузок. [1–3].

Существуют различные методы оценки состояния изоляционных покрытий. Одним из наиболее эффективных является измерение сопротивления изоляции обмотки. Данный метод помогает определить, существует ли вероятность возникновения коротких замыканий и других неисправностей, которые могут привести к полной остановке работы ТАД.

Также к распространённым методам относится вибродиагностика. Она основывается на анализе вибрационных характеристик двигателя. Отклонения от нормы в вибрационных параметрах могут указывать на проблемы с изоляционными покрытиями. Применение таких методов позволяет не только диагностировать состояние изоляции, но и оценивать общее техническое состояние ТАД.

Применяемые методы акустической эмиссии, которые заключаются в регистрации звуковых сигналов, возникающих в процессе материализма. С помощью данного метода можно обнаружить микротрещины и другие дефекты в изоляции. Необходимо установить датчики на корпус двигателя для постоянного мониторинга состояния изоляционных покрытий.

Оценка состояния изоляционных покрытий с помощью оптических методов

диагностики позволяет на ранних этапах выявить изменения в структуре изоляции и оценить степень деградации материала. К ним относятся: флуоресцентная микроскопия, помогают в визуализации состояния изоляционного материала.

Также в качестве метода можно использовать способ исследования распределения температур в обмотках, при работе ТАД в цепи электропривода локомотива. На его основе производится расчет относительных износов изоляции в течение времени при определенных режимах работы ТАД. Данный метод эффективен для прогнозирования сроков безотказной работы электродвигателя и наряду с остальными является самым малозатратным.

В связи с чем исследования состояния изоляционных покрытий ТАД и определения их срока службы в зависимости различных форм сечений обмоток ротора был принят метод распределения температур в обмотках [4–6].

В качестве объекта исследования принят тяговый асинхронный электродвигатель ДТА-350Т, который применяется на тепловозах ТЭМ21 и 2ТЭ25А. Он предназначен для использования на колёсных парах локомотива. Характеристики рассматриваемого асинхронного двигателя представлены в таблице.

С помощью программного комплекса, реализующего метод конечных элементов, выполнено тепловое моделирование износов изоляции обмотки статора при различных вариантах сечений стержней ротора на разных скоростях движения локомотива с учетом его веса.

Таблица

Характеристики асинхронного тягового двигателя ДТА-350Т

Table

Characteristics of the DTA-350T asynchronous traction motor

Мощность на валу, кВт	Максимальное линейное напряжение, В	Частота тока статора, Гц	Фазный ток, А	Вращающий момент, Н·м.
350	1410	125	470	10500

В качестве разновидностей сечений обмотки статора были рассмотрены следующие варианты: прямоугольные; трапе-

циевидные; лопаточные; грушевидные; колбообразные.

Результаты

В ходе расчета были получены значения средних распределенных температур T в обмотках статора для каждого сечения обмоток ротора, на основе которых был рассчитан такой показатель, как относительный износ изоляционного покрытия ротора I [7–10].

На рис. 1 представлены графики зависимости температуры в обмотках ротора с различными сечениями обмоток статора от скорости движения локомотива.

В результате анализа, было установлено, что наибольшие температуры на обмотках ротора наблюдаются при прямо-

угольном варианте сечении обмотки статора. Пиковое значение достигает порядка 120 °С при скорости движения локомотива около 55 км/ч.

Сечения таких форм, как лопаточные, грушевидные, колбообразные, имеют приблизительно одинаковые температуры нагрева, максимальное значение которых достигает около 116...118 °С.

Наименьшие температуры нагрева обмоток ротора фиксируются при трапециевидном сечении обмоток статора. Максимальное значение температуры достигает 114 °С.

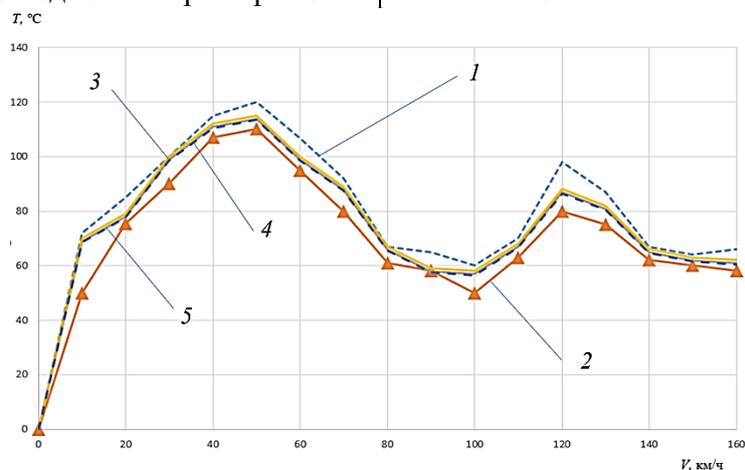


Рис. 1. График зависимости температуры в обмотках ротора с различными сечениями обмоток статора от скорости движения локомотива: 1 – прямоугольное; 2 – трапециевидное; 3 – лопаточное; 4 – грушевидное; 5 – колбообразное

Fig. 1. Graph of the dependence of the temperature in the rotor windings with different sections of the stator windings on the speed of the locomotive: 1 – rectangular; 2 – trapezoidal; 3 – bladed; 4 – pear-shaped; 5 – flask-shaped

Следующим шагом было определить показатель износа, на основе полученных усредненных температур. На рис. 2 представлены графики зависимости износа

изоляции обмоток ротора с разными сечениями обмоток статора для различных скоростей движения локомотива.

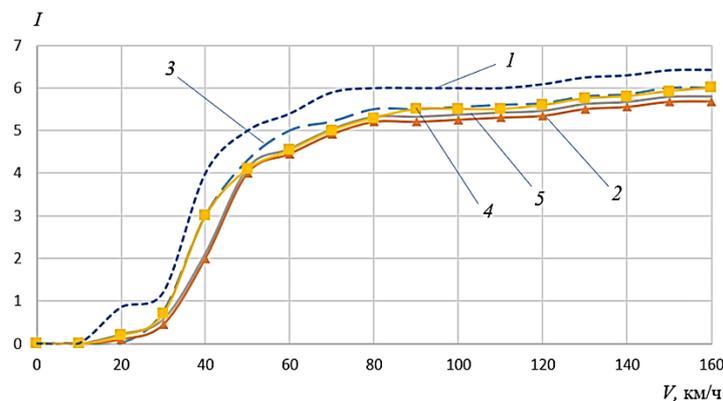


Рис. 2. Графики зависимости износа изоляции обмоток ротора с различными сечениями обмоток статора для различных скоростей движения локомотива: 1 – прямоугольное; 2 – трапециевидное; 3 – лопаточное; 4 – грушевидное; 5 – колбообразное

Fig. 2. Graphs of the dependence of wear of the rotor winding insulation with different sections of the stator windings for different locomotive speeds: 1 – rectangular; 2 – trapezoidal; 3 – bladed; 4 – pear-shaped; 5 – flask-shaped

Выводы

Установлено, что большему износу будет подвержена изоляция при прямоугольном сечении стержней ротора, так как она имеет самые высокие температуры нагрева по сравнению с остальными сечениями. Обмотки в виде лопаточных, грушевидных и колбообразных сечений имеют приблизительно одинаковые значения износа изоляционного покрытия, что очевидно, т. к. у них приблизительно одинаковые температуры нагрева. В меньшей степени износу подвергается изоляция для обмоток трапецевидных сечений.

Проведенное исследование и практический опыт показывают, что применение трапецевидных сечений обмоток статора обладает значительными преимуществами по сравнению с другими видами сечения-

ми. Трапецевидные сечения обеспечивают более равномерное распределение тока по проводнику, что способствует снижению тепловых потерь, а также улучшает тепловые характеристики двигателя.

Кроме того, такая форма сечения позволяет более эффективно использовать интегральные размеры обмотки, повышая запас мощности и улучшая механическую прочность конструкции. Все эти факторы в свою очередь позитивно влияют на общий КПД электродвигателя и увеличивают его срок службы.

Таким образом, целесообразность использования трапецевидных сечений обмоток статора в тяговых асинхронных двигателях локомотива.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями/Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.
2. Алиев, И.И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. – М.: ИП РадиоСофт, 2004. – 128 с.
3. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И. П. Копылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2025. – 828 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-11700-4. – Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/566208> (дата обращения: 14.02.2025).
4. Проектирование электрических машин. Изд. 3-е, переработанное и доп. М.: Энергия, 1970. – 632 с.
5. Разработка методов выбора параметров асинхронного тягового двигателя с учетом теплового состояния обмоток: дис. кан. техн. наук: 05.14.01/ Тихонов Филип Владимирович. – М., 2008. – 136 с.

6. Электрические машины. Асинхронные машины: учебное пособие для вузов / Е. И. Забудский. М.: ООО «Мегаполис», 2017. – Ч. 2. 304с.
7. Зюзев, А. М., Метельков, В. П. Оценка нагрева обмотки статора асинхронного двигателя в электроприводе с периодическим характером нагружения // ЭС и К. 2010. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nagreva-obmotki-statora-asinhronnogo-dvigatelya-v-elektroprivode-s-periodicheskim-harakterom-nagruzheniya> (дата обращения: 12.02.2025).
8. Федорова, К.Г. Обзор существующих тепловых моделей для частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя. Главный энергетик. 2018;7.
9. Расчет асинхронных двигателей: Пособие для выполнения курсовой работы / В. Н. Галушко, И. С. Евдасев, В. А. Пацкевич, А. В. Драбов ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2016. – 158 с. ISBN 978-985-554-487-7 (ч. II)
10. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1980.

REFERENCES

1. Usoltsev AA. Frequency control of asynchronous motors: textbook. St. Petersburg: St. Petersburg State University of ITMO; 2006.
2. Aliev II. Asynchronous motors in three-phase and single-phase modes. Moscow: IP RadioSoft; 2004.
3. Kopylov IP. Design of electric machines: textbook for universities [Internet]. 4th ed. Moscow: Yurait Publishing House; 2025 [cited 2025 Febr 02]. Available from: <https://urait.ru/bcode/566208>

4. Design of electric machines. 3rd ed. Moscow: Energy; 1970.
5. Tikhonov PhV. Development of methods to select the parameters of an asynchronous traction motor, taking into account the thermal state of the windings [dissertation]. [Moscow (RF)]; 2008.
6. Zabudsky EI. Electric machines. Asynchronous machines: textbook for universities. Moscow: Megapolis; 2017.

7. Zyuzev AM, Metelkov VP. Evaluation of the heating of the asynchronous motor stator winding in an electric drive with periodic loading. ES and K [Internet]. 2010[cited 2025 Febr 12];1. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nagreva-obmotki-statora-asinhronnogo-dvigatelya-v-elektroprivode-s-periodicheskim-harakterom-nagruzheniya>

8. Fedorova KG. Overview of existing thermal models for a frequency-controlled asynchronous electric motor. *Glavny Energetik*. 2018;7.
9. Galushko VN, Evdasev IS, Patskevich VA, Drabov AV. Calculation of asynchronous motors: textbook for coursework. Gomel: BelGUT; 2016.
10. Kopylov IP. Design of electric machines. Moscow: Energiya; 1980.

Информация об авторах:

Лукашов Николай Александрович – аспирант кафедры «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. +8-999-705-98-05.

Суслов Виталий Сергеевич – аспирант кафедры «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. + 8 999 620 69 69.

Масонов Артём Михайлович – аспирант кафедры «Высокотехнологичное транспортное машиностро-

ение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. + 8 990 620 69 63.

Маганков Олег Сергеевич – аспирант кафедры «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. + 8 990 620 69 63.

Сергеев Сергей Сергеевич – аспирант кафедры «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. + 8 991 097 97 20.

Lukashov Nikolay Aleksandrovich – Postgraduate Student of the Department of High-Tech Transport Engineering at Bryan State Technical University, phone: +8-999-705-98-05.

Suslov Vitaly Sergeevich – Postgraduate Student of the Department of High-Tech Transport Engineering at Bryan State Technical University, phone: + 8 999 620 69 69.

Masonov Artem Mikhailovich – Candidate of the Department of High-Tech Transport Engineering at

Bryansk State Technical University, phone: + 8 990 620 69 63.

Magankov Oleg Sergeevich – Postgraduate Student of the Department of High-Tech Transport Engineering at Bryan State Technical University, phone: + 8 990 620 69 63.

Sergeev Sergey Sergeevich – Postgraduate Student of the Department of High-Tech Transport Engineering at Bryan State Technical University, phone: + 8 991 097 97 20.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 29.04.2025; принята к публикации 30.04.2025. Рецензент – Волохов Г.М., доктор технических наук, главный научный эксперт динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры Акционерного общества «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 28.04.2025; approved after review on 29.04.2025; accepted for publication on 30.04.2025. The reviewer is Volokhov G.M., Doctor of Technical Sciences, Chief scientific expert of Rolling Stock and Infrastructure Dynamics and Strength of "Research and Development and Technological Institute of Rolling Stock", member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.