

УДК 621.3.045.56

Павел Викторович Яковлев

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и теплоэнергетики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: yakovlev_pv@pers.spmi.ru

Илья Николаевич Сулыненков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе, Россия, Иваново, e-mail: sulynenkov.in@ispu.ru

Обоснование возможности диагностики межвиткового короткого замыкания обмотки асинхронного электродвигателя применением тепловизионной съемки

Авторское резюме

Состояние вопроса. Анализ дефектов асинхронных электродвигателей показывает, что одной из основных причин выхода их из строя являются межвитковые короткие замыкания обмоток статоров. Существующие системы диагностики для выявления этого дефекта преимущественно требуют остановки оборудования или разборки электродвигателя для непосредственной дефектовки обмоток. Среди методов оперативного контроля в настоящее время используется метод тепловизионной съемки, но отсутствует методика выявления межвиткового короткого замыкания на начальном его этапе, когда локальные тепловыделения относительно невелики. В связи с этим исследования поверхностных локальных аномалий температуры, возникающих на начальном этапе появления межвитковых коротких замыканий в обмотке статора, обоснование возможности их надежного выявления с помощью тепловизионной съемки, определение требуемой чувствительности тепловизора и разработка рекомендаций по проведению обследования являются актуальными.

Материалы и методы. Для определения механизма и закономерностей формирования температурного поля на поверхности асинхронного электродвигателя и выявления межвитковых коротких замыканий применением тепловизионного контроля использован метод численного моделирования теплообмена с верификацией результатов по существующим термограммам.

Результаты. Выявлены закономерности формирования температурных полей и аномалии температур на поверхности корпуса асинхронного электродвигателя при межвитковом коротком замыкании обмотки статора. Предложен метод достоверного определения и локализации межвиткового короткого замыкания обмотки статора по анализу температурного поля термограммы с оценкой величины тепловыделения в обмотке, позволяющий выявить дефект на ранних стадиях.

Выводы. Предложенная методика проведения тепловизионной съемки асинхронного электродвигателя и анализа полученной термограммы может быть использована для раннего обнаружения межвитковых замыканий в статоре двигателя, позволяет существенно сократить трудозатраты на поиск неисправностей электродвигателей и в сочетании с другими существующими методами диагностирования эффективно и своевременно планировать ремонты энергетического оборудования и повышать его энергоэффективность.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, межвитковое короткое замыкание, тепловизионная съемка, численное моделирование, температурное поле

Pavel Viktorovich Yakovlev

Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Heat Engineering and Thermal Power Engineering Department, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: yakovlev_pv@pers.spmi.ru

Ilya Nikolaevich Sulynenkov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Vice-Rector for Research, Russia, Ivanovo, e-mail: sulynenkov.in@ispu.ru

Justification of the possibility to diagnose an inter-turn short circuit in the winding of an asynchronous electric motor using thermal imaging

Abstract

Background. An analysis of asynchronous electric motor defects shows that interturn short circuits in the stator windings are one of the main causes of their failure. Existing diagnostic systems to detect this defect primarily require shutting down the equipment or disassembling the electric motor for detection of defects of the windings. Thermal imaging is currently used as

an operational monitoring method, but there is no method to detect interturn short circuits at their initial stage, when localized heat generation is relatively low. Therefore, it is relevant to study localized surface temperature anomalies that occur at the initial stage of interturn short circuits in the stator winding, to justify their reliable detection using thermal imaging, to determine the required thermal imager sensitivity, and to develop recommendations on inspection.

Materials and methods. The authors have used a method of numerical modeling of heat exchange with verification of the results using existing thermograms to determine the mechanism and patterns of formation of the temperature field on the surface of an asynchronous electric motor and to identify interturn short circuits using thermal imaging control.

Results. Patterns of the formation of temperature fields and temperature anomalies on the surface of an asynchronous electric motor housing during interturn short circuits in the stator winding have been identified. The authors have proposed a method to detect and localize interturn short circuits in the stator winding by analyzing the temperature field of a thermogram and assessing the amount of heat generated in the winding, enabling early detection of the defect.

Conclusions. The proposed method to conduct thermal imaging of an asynchronous electric motor and analyze the resulting thermogram can be used for early detection of interturn short circuits in the motor stator. It allows us significantly reduce labor costs for troubleshooting electric motors and, in combination with other existing diagnostic methods, effectively and timely plan maintenance of power equipment and increase its energy efficiency.

Key words: asynchronous electric motor, interturn short circuit, thermal imaging, numerical modeling, temperature field

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.043-050

Введение. Своевременное выявление межвиткового короткого замыкания обмоток электродвигателя позволяет снизить ущерб от аварийного отключения оборудования и выполнить своевременный ремонт [1–3]. Для диагностики короткого замыкания применяются различные методы [4–6], но для большинства из них требуется остановка оборудования или разборка электродвигателя. Большинство работ в области диагностики состояния обмоток посвящено методам контроля электромагнитного поля [7–9], параметров сети [10–12] или комбинированных методов [13–15], в том числе с использованием интеллектуальных нейросетей [16–18] и основанных на создании цифровых двойников электродвигателей или трансформаторов [19–21]. Анализ работ [22–24] показал, что теоретическому обоснованию тепловизионного контроля уделяется, на наш взгляд, недостаточное внимание, в то время как его активно используют в практике диагностики оборудования [25]. Широкое распространение тепловизоров и снижение их стоимости позволяют организовать на большинстве объектов тепловизионное обследование работающего оборудования. В настоящее время тепловизионное обследование преимущественно выполняется для выявления неисправностей подшипникового узла, перегрева контактных участков и перегрузки оборудования (рис. 1).

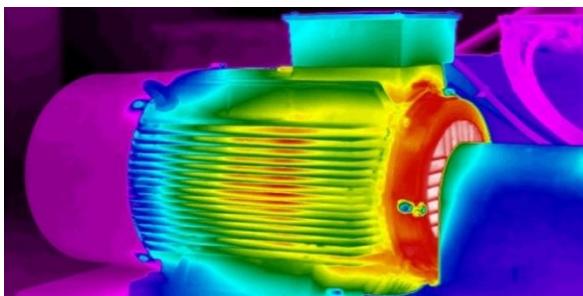


Рис. 1. Термограмма электродвигателя [25]

При возникновении межвиткового короткого замыкания, когда тепловыделение достаточно мало, его выявление и локализация могут

маскироваться неравномерностью температурного поля электродвигателя. Оценка возможности выявления подобных неисправностей в пределах границ чувствительности тепловизионной картинки является предметом исследования.

Метод исследования. В основу исследования положен метод численного моделирования с верификацией результатов по существующим данным тепловизионного обследования и зонам вероятного возникновения межвиткового замыкания. Для этого разработана 3d-модель асинхронного электродвигателя мощностью 3 кВт, включающая оребренный корпус, статор с контрольной обмоткой, переднюю и заднюю крышки электродвигателя с подшипниками, вращающийся ротор, крыльчатку системы охлаждения. При создании модели сделаны некоторые геометрические допущения, незначительно влияющие на температурное поле на поверхности корпуса электродвигателя. Из допущений, требующих проверки в дальнейших исследованиях, следует отметить допущение о равномерности тепловыделения по длине обмотки. Также при создании модели учтен лучистый теплообмен – принята степень черноты 0,95, характерная для окрашенных и загрязненных поверхностей. Расчеты выполнены для температуры окружающей среды 20 °C. Общий вид модели представлен на рис. 2.

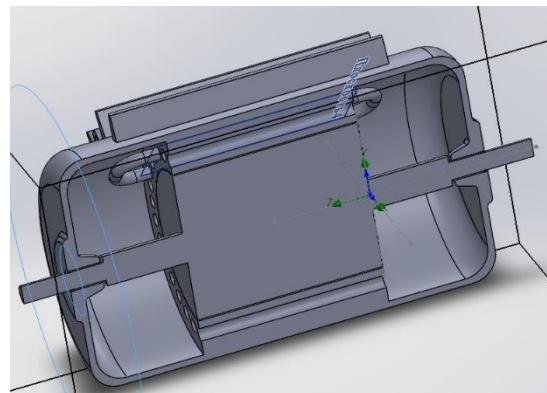


Рис. 2. 3d-модель асинхронного электродвигателя

Результаты исследования. Основной целью исследования являлось определение отклонения температурного поля поверхности корпуса электродвигателя при локальном перегреве, вызванном коротким замыканием в тестовой обмотке. Факторами, влияющими на температурное поле, являются: рассеивание теплового потока в статоре, корпусе, включая его оребренную часть; вынужденная конвекция внутри электродвигателя, вызванная вращением ротора; неравномерность распределения коэффициента теплоотдачи при внешнем обдуве электродвигателя.

На рис. 3 представлено распределение коэффициента теплоотдачи по поверхности электродвигателя. Анализируя полученные результаты, можно отметить их сходимость с результатом тепловизионного обследования (рис. 1). Наиболее холодной частью является зона вблизи кожуха крыльчатки, а наиболее горячей – зона с минимальным коэффициентом теплоотдачи вблизи вала. Поверхность корпуса между ребрами имеет наименьший коэффициент теплоот-

дачи (рис. 3), на основании чего эта зона представляется наиболее перспективной для выявления маломощных источников теплоты, таких как межвитковые замыкания на начальном этапе их развития.

Воздух внутри электродвигателя обдувает ротор (рис. 4), но анализ его движения показывает относительно малые скорости движения вблизи выхода обмотки из статора, что подтверждается перегревом обмотки в этих зонах (рис. 5, а).

Результаты расчета показали значительную неравномерность температуры обмотки. Для обмотки характерны участки с интенсивным отводом теплоты внутри статора и лобовые части, обдуваемые потоком воздуха, возникающим при вращении ротора. Перегрев обмотки наблюдается в зонах ее выхода из статора, но с еще недостаточной интенсивностью движения воздуха. Для этой зоны характерны межвитковые замыкания (рис. 5, б). Вторым фактором, который не исследовался, является возможная вибрация провода как вторичный фактор, способствующий межвитковым замыканиям.

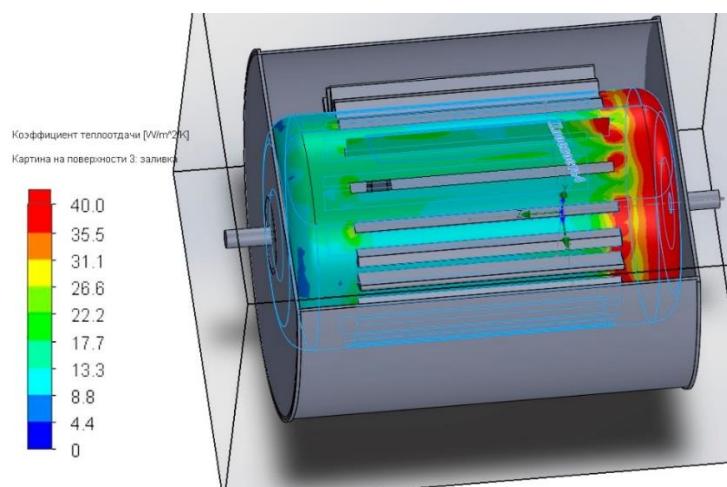


Рис. 3. Распределение коэффициента теплоотдачи по поверхности электродвигателя

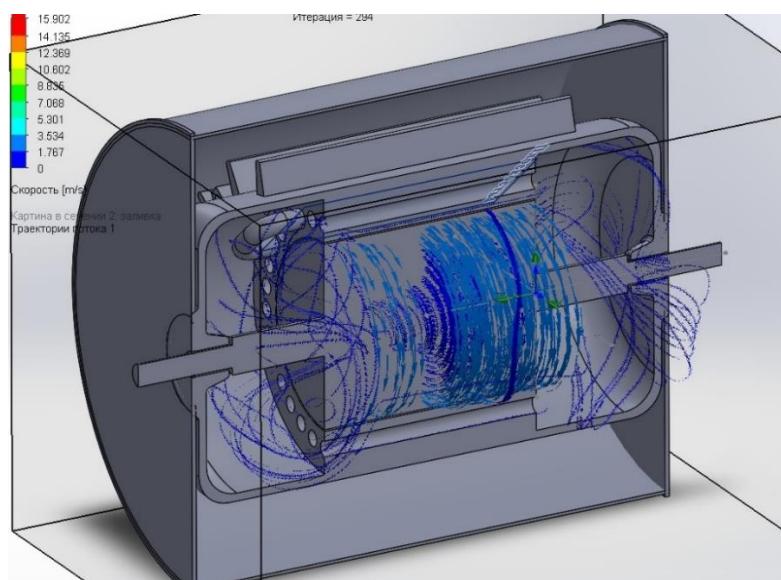
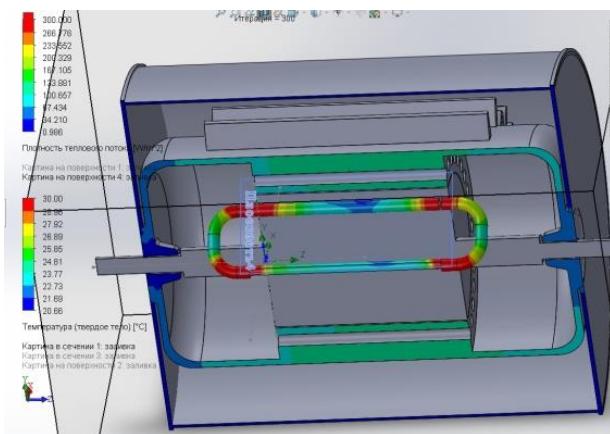
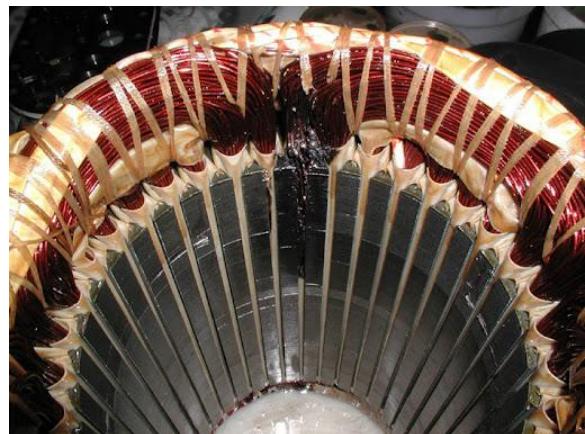


Рис. 4. Поле скоростей движения воздуха внутри корпуса электродвигателя



а)



б)

Рис. 5. Локальный перегрев обмотки в районе торца ротора: а – температурное поле; б – зона характерного повреждения обмотки

Определение точного значения количества теплоты, выделяющегося при замыкании пары витков, представляет собой сложную задачу, требующую отдельных исследований, но в качестве ориентировочной выделяемой мощности

на основе анализа пусковых токов для электродвигателя 3 кВт принята мощность 25 Вт. Результат одного из вариантов расчета температурного поля приведен на рис. 6.

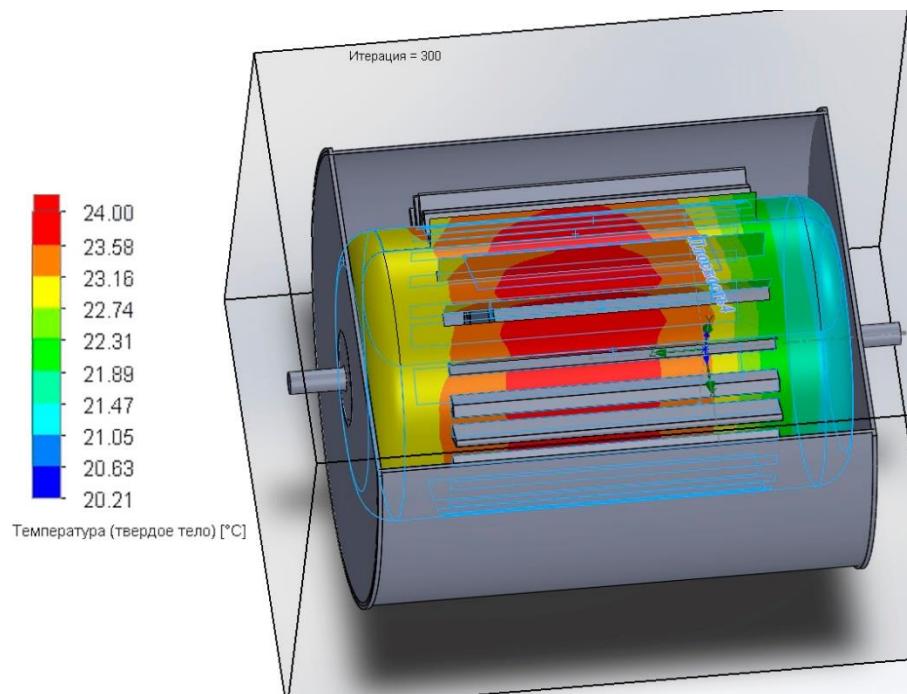


Рис. 6. Поле температур на поверхности корпуса при локальном тепловыделении обмотки 25 Вт и скорости обдува 2 м/с

Анализ полученных значений температур показывает, что повышение температуры относительно фонаового ее значения составляет 4 °C, что находится в пределах чувствительности большинства тепловизионных систем и позволяет диагностировать межвитковое замыкание на его начальном этапе развития.

Зависимость отклонения температуры от температуры исправного электродвигателя (принята температура 20 °C) при различных значениях мощности тепловыделения и скорости

охлаждающего воздуха 5 м/с представлена на рис. 7,а. Зависимость имеет вид, близкий к линейной. При незначительном тепловыделении, характерном для начального этапа развития дефекта, отклонение температуры составляет около 2 °C, что недостаточно для надежного его выявления.

Блокировка вентиляционной решетки повышает отклонение температуры (рис. 7,б) при тепловой мощности 25 Вт до 5 °C, что позволяет рекомендовать этот метод для визуализации дефекта. Влияние скорости обдува на температуру

поверхности корпуса между ребрами представлено на рис. 7, в.

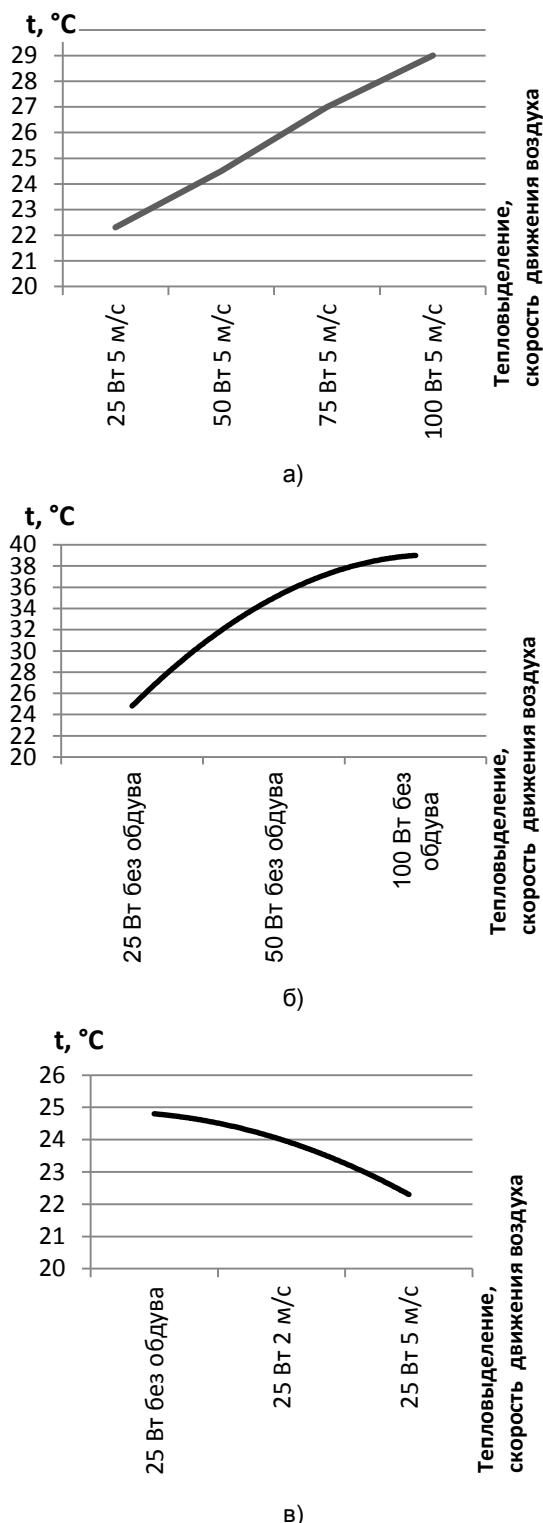


Рис. 7. Зависимости температуры корпуса электродвигателя между ребрами системы охлаждения: а – от мощности тепловыделения при скорости движения воздуха 5 м/с; б – то же без обдува (вентиляционные каналы закрыты); в – от скорости движения воздуха при тепловыделении 25 Вт

Полученные температурные поля позволили выполнить дополнительные исследования

температурных напряжений в статоре электродвигателя при его локальном перегреве, сопровождающем межвитковое короткое замыкание. На рис. 8 представлен результат расчета термического напряжения, который показывает, что возникающие напряжения по величине сопоставимы с пределом текучести металла, а с учетом слоистой структуры статора можно сделать вывод о вероятном расслоении сердечника статора в результате такого воздействия.

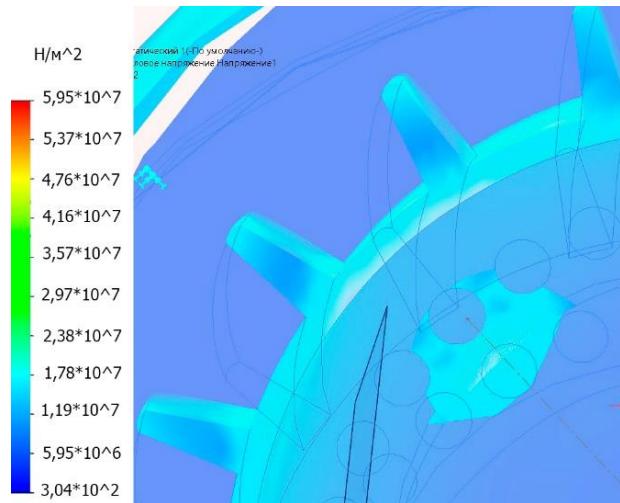


Рис. 8. Статическое напряжение в корпусе статора в результате его локального перегрева

Выводы. Численное моделирование межвиткового короткого замыкания в статоре асинхронного электродвигателя позволяет рекомендовать тепловизионный контроль для выявления подобных дефектов, в том числе на ранних стадиях развития короткого замыкания при относительно небольших тепловыделениях. Для выявления дефекта необходима тепловизионная съемка всей поверхности электродвигателя с выявлением аномальных локальных перегревов, выявляемых по температуре поверхности корпуса между ребрами системы охлаждения. Для локализации дефекта и уточнения результатов обследования может быть рекомендовано кратковременное перекрытие вентиляционных отверстий, в результате которого происходит незначительное повышение температуры электродвигателя, но при этом заметное повышение температур поверхности в зоне дефекта.

Список литературы

- Никиян Н.Г., Митрофанов С.В., Омон А.Б.** Электромагнитные процессы и токи трехфазного асинхронного двигателя при межвитковых коротких замыканиях // Электричество. – 2010. – № 5. – С. 53–56. – EDN LJWDTP.
- Шестаков И.В.** Совершенствование технологии диагностирования изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. – Омск, 2017. – 141 с.

3. **Диб Мухаммад.** Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе анализа тока статора: дис. ... канд. техн. наук: 2.4.2. – М., 2023. – 140 с.
4. **Сафин Н.Р.** Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Екатеринбург, 2017. – 152 с.
5. **Супуева А.С.** Снижение дефектности межвитковой изоляции обмоток низковольтных асинхронных электродвигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02. – Томск, 2016. – 121 с.
6. **Гоголев Г.А.** Методики и средства диагностики и контроля отдельных показателей качества тяговых трансформаторов и электрических машин подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – СПб., 2000. – 112 с.
7. **Мустафаев Р.И., Ахмедов Д.А., Ахмедов А.Д.** Диагностирование асинхронного двигателя при межвитковом замыкании в обмотке статора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 48–53. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-48-53. – EDN AVMAGZ.
8. **Сурков Д.В., Фильченко Е.А., Назаренко Д.А.** Способы определения межвитковых замыканий в обмотках электрических машин // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Труды X Всерос. науч.-техн. конф., Оренбург, 01 января – 31 января 2019 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет». – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. – С. 304–305. – EDN YWRRGE.
9. **Пехота А.Н., Галушко В.Н., Громыко И.Л.** Диагностирование межвитковых коротких замыканий трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета // Энергоэффективность. – 2021. – № 2. – С. 24–28. – EDN QKETOO.
10. **Лавренов Е.О.** Методы и устройство обеспечения непрерывности производственного цикла при появлении электрической несимметрии в цепях крупных асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Новосибирск, 2021. – 126 с.
11. **Еремеева В.А.** Алгоритмы обработки информации для оценки технического состояния асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ ТП: дис. ... канд. техн. наук: 2.3.1. – Челябинск, 2025. – 105 с.
12. **Королев Н.А.** Оценка технического состояния электротехнических комплексов с асинхронным электроприводом по частотным составляющим спектра тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – СПб., 2021. – 169 с.
13. **Гулов Д.Ю.** Разработка электротехнического комплекса диагностики аварийных режимов короткого замыкания генераторов гидроэлектростанций малой и средней мощности: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Челябинск, 2021. – 148 с.
14. **Куприянов И.С., Лукьянин А.В.** Математическое моделирование механических колебаний асинхронного двигателя при межвитковом замыкании обмотки статора // System Analysis and Mathematical Modeling. – 2024. – Т. 6, № 3. – С. 339–356. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(3).339-356. – EDN ISFBZ.
15. **Солодкий Е.М., Сальников С.В., Даденков Д.А.** Диагностика межвиткового замыкания обмотки статора асинхронного двигателя на основе анализа траектории вращения вектора тока статора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 114–127. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.07. – EDN MVRTUB.
16. **Галушко В.Н., Пехота А.Н., Громыко И.Л.** Применение интеллектуальных нейросетей для диагностики межвитковых замыканий трансформаторов // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 26–27 ноября 2020 года / Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусская железная дорога, Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта». Ч. 4. – Гомель: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2020. – С. 88–89. – EDN SDDHTN.
17. **Галушко В.Н., Ермоленко Д.В.** Моделирование электромагнитных процессов при возникновении межвитковых замыканий в трехфазном асинхронном двигателе // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2024. – № 1(48). – С. 7–10. – EDN YDWUDF.
18. **Громыко И.Л., Пацкевич В.А.** Моделирование электромагнитных процессов в однофазном трансформаторе при межвитковых замыканиях на основе т-образной схемы замещения // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2024. – № 1(48). – С. 11–16. – EDN DJOEGS.
19. **Громыко И.Л., Галушко В.Н.** Диагностирование межвитковых замыканий в трансформаторе и обучение сверточных нейронных сетей // Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 апреля 2021 года. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021. – С. 158–163. – EDN EEEVVL.
20. **Жежеленко И.В., Кривоносов В.Е., Василенко С.В.** Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64, № 3. – С. 202–218. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218. – EDN QRTGOL.
21. **Еремеева В.А.** Диагностика межвитковых замыканий в статоре асинхронного двигателя методом матричных пучков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2025. – № 5. – С. 1–10. DOI: 10.25791/pribor.5.2025.1579. – EDN VIAEGK.
22. **Пустовой Д.О., Петушкин М.Ю.** Диагностика межвитковых замыканий асинхронного двигателя // Фундаментальные основы, теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: материалы XIX Междунар. молодеж. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 27–28 февраля 2018 года. – Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. – С. 43–50. – EDN YWPWNB.
23. **Овсяник Е.А., Хлопова А.В.** Сравнительный анализ методов выявления межвитковых замыканий силовых трансформаторов 10/0,4 кВ // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп., ученых. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 43–45. – EDN QWWDP.

24. Мирош Д.В. Контроль межвитковых замыканий в обмотке асинхронного электродвигателя // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апреля 2024 года. – Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2024. – С. 337–338. – EDN LFGADM.

25. Электротехническая лаборатория «Протон». – URL: <https://elab72.ru/electrozmereniya/11-teplovizionnyy-kontrol.html> (дата обращения: 11.09.2025).

References

1. Nikiyan, N.G., Mitrofanov, S.V., Omon, A.B. Elektromagnitnye protsessy i toki trekhfaznogo asinkhronnogo dvigateley pri mezhvitkovykh korotkikh zamykaniyakh [Electromagnetic processes and currents of a three-phase asynchronous motor during interturn short circuits]. *Elektrichestvo*, 2010, no. 5, pp. 53–56. EDN LJWDTP.
2. Shestakov, I.V. Sovershenstvovanie tekhnologii diagnostirovaniya izolyatsii tyagovykh elektrodvigateley podvizhnogo sostava. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the technology of diagnosing the insulation of traction electric motors of rolling stock. Cand. tech. sci. diss.]. Omsk, 2017. 141 p.
3. Dib, Muhammad. *Diagnostika neispravnostey asinkhronnykh dvigateley na osnove analiza toka statora*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Diagnostics of faults of asynchronous motors based on the analysis of the stator current. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2023. 140 p.
4. Safin, N.R. Sovershenstvovanie metodiki tokovoy diagnostiki asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the methodology of current diagnostics of asynchronous motors with a squirrel-cage rotor. Cand. tech. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2017. 152 p.
5. Supueva, A.S. *Snizhenie defektnosti mezhvitkovoy izolyatsii obmotok nizkovoltnykh asinkhronnykh elektrodvigateley*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Reducing the Defectiveness of Interturn Insulation of Windings of Low-Voltage Asynchronous Electric Motors. Cand. tech. sci. diss.]. Tomsk, 2016. 121 p.
6. Gogolev, G.A. *Metodiki i sredstva diagnostiki i kontrolya otdel'nykh pokazateley kachestva tyagovykh transformatorov i elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Methods and means of diagnostics and control of individual quality indicators of traction transformers and electric machines of rolling stock. Cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2000. 112 p.
7. Mustafaev, R.I., Akhmedov, D.A., Akhmedov, A.D. Diagnostirovanie asinkhronnogo dvigateley pri mezhvitkovom zamykanii v obmotke statora [Diagnostics of an asynchronous motor with an interturn short circuit in the stator winding]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 48–53. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-48-53. EDN AVMAGZ.
8. Surkov, D.V., Fil'chenko, E.A., Nazarenko, D.A. Sposoby opredeleniya mezhvitkovykh zamykaniy v obmotkakh elektricheskikh mashin [Methods for determining interturn short circuits in the windings of electric machines]. *Trudy X Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy», Orenburg, 01 yanvarya – 31 yanvarya 2019 goda* [Proceedings of X all Russian scientific and technical conference “Power engineering: state, problems, prospects”, Orenburg, January 1 – January 31, 2019]. Orenburg: Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet, 2019, pp. 304–305. EDN YWRRGE.
9. Pekhota, A.N., Galushko, V.N., Gromyko, I.L. Diagnostirovanie mezhvitkovykh korotkikh zamykaniy transformatorov s pomoshch'yu kompleksnogo analiza dannykh pribornogo ucheta [Diagnosing interturn short circuits of transformers using a comprehensive analysis of instrument metering data]. *Energoeffektivnost'*, 2021, no. 2, pp. 24–28. EDN QKETOO.
10. Lavrenov, E.O. *Metody i ustroystvo obespecheniya nepreryvnosti proizvodstvennogo tsikla pri poyavlenii elektricheskoy nesimmetrii v tsepyakh krupnykh asinkhronnykh dvigateley*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Methods and device for ensuring continuity of the production cycle when electrical asymmetry appears in the circuits of large asynchronous motors. Cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2021. 126 p.
11. Eremeeva, V.A. *Algoritmy obrabotki informatsii dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnogo elektrodvigateley ispolnitel'nykh mehanizmov ASU TP*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Information processing algorithms for assessing the technical condition of an asynchronous electric motor of actuators of an automated process control system. Cand. tech. sci. diss.]. Chelyabinsk, 2025. 105 p.
12. Korolev, N.A. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya elektrotekhnicheskikh kompleksov s asinkhronnym elektroprivodom po chastotnym sostavlyayushchim spektra toka*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Assessment of the technical condition of electrical complexes with an asynchronous electric drive based on the frequency components of the current spectrum. Cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2021. 169 p.
13. Gulov, D.Yu. *Razrabotka elektrotekhnicheskogo kompleksa diagnostiki avariynykh rezhimov korotkogo zamykaniya generatorov gidroelektrostantsiy maloy i sredney moshchnosti*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of an electrical engineering complex for diagnosing emergency short-circuit conditions in generators of low- and medium-power hydroelectric power plants. Cand. tech. sci. diss.]. Chelyabinsk, 2021. 148 p.
14. Kupriyanov, I.S., Luk'yanov, A.V. Matematicheskoe modelirovaniye mekhanicheskikh kolebanii asinkhronnogo dvigateley pri mezhvitkovom zamykanii obmotki statora [Mathematical modeling of mechanical vibrations of an asynchronous motor with interturn short circuit of the stator winding]. *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2024, vol. 6, no. 3, pp. 339–356. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(3).339–356. EDN ISFBBZ.
15. Solodkiy, E.M., Sal'nikov, S.V., Dadenkov, D.A. Diagnostika mezhvitkovogo zamykaniya obmotki statora asinkhronnogo dvigateley na osnove analiza traektorii vrashcheniya vektora toka statora [Diagnostics of interturn short circuit of the stator winding of an asynchronous motor based on the analysis of the trajectory of rotation of the stator current vector]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, 2020, no. 34, pp. 114–127. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.07. EDN MVRTUB.
16. Galushko, V.N., Pekhota, A.N., Gromyko, I.L. Primenenie intellektual'nykh neyrosetey dlya diagnostiki mezhvitkovykh zamykaniy transformatorov [Application of intelligent neural networks for diagnostics of interturn short circuits of transformers]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy bezopasnosti na transporte», Gomel'*, 26–27 noyabrya 2020 goda [Proceedings of the X International Scientific and Practical

Conference “Transport Safety Issues”, Gomel, November 26–27, 2020]. Gomel: Belarusian State University of Transport, 2020, pp. 88–89. EDN SDDHTN.

17. Galushko, V.N., Ermolenko, D.V. Modelirovaniye elektromagnitnykh protsessov pri vozniknovenii mezhvitkovykh zamykaniy v trekhfaznom asinkhronnom dvigatele [Modeling of electromagnetic processes during the occurrence of interturn short circuits in a three-phase asynchronous motor]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport*, 2024, no. 1(48), pp. 7–10. EDN YDWUDF.

18. Gromyko, I.L., Patskevich, V.A. Modelirovaniye elektromagnitnykh protsessov v odnofaznom transformatore pri mezhvitkovykh zamykaniyakh na osnove t-obraznoy skhemy zameshcheniya [Modeling of electromagnetic processes in a single-phase transformer with interturn short circuits based on a T-shaped equivalent circuit]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport*, 2024, no. 1(48), pp. 11–16. EDN DJOEGS.

19. Gromyko, I.L., Galushko, V.N. Diagnostirovaniye mezhvitkovykh zamykaniy v transformatore i obuchenie svertochnykh nevronnykh setey [Diagnosing interturn short circuits in a transformer and training convolutional neural networks]. *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami AES i TES»*, Minsk, 27–28 aprelya 2021 goda [Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference “Automated process control systems for NPPs and TPPs”, Minsk, April 27–28, 2021]. Minsk: Belorusskiy gosudarstvennyy universitet informatiki i radioelektroniki, 2021, pp. 158–163. EDN EEEVVL.

20. Zhezhenko, I.V., Krivonosov, V.E., Vasilenko, S.V. Kriterii vyyavleniya mezhvitkovykh zamykaniy v statornykh obmotkakh s ispol'zovaniem vektornogo analiza faznykh tokov elektrodvigatelya [Criteria for detecting interturn short circuits in stator windings using vector analysis of phase currents of an electric motor]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG*, 2021, vol. 64, no. 3, pp. 202–218. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218. EDN QRTGOL.

21. Eremeeva, V.A. Diagnostika mezhvitkovykh zamykaniy v statore asinkhronnogo dvigatelya metodom

matrichnykh puchkov [Diagnostics of interturn short circuits in the stator of an asynchronous motor using the matrix beam method]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2025, no. 5, pp. 1–10. DOI: 10.25791/pribor.5.2025.1579. EDN VIAEGK.

22. Pustovoy, D.O., Petushkov, M.Yu. Diagnostika mezhvitkovykh zamykaniy asinkhronnogo dvigatelya [Diagnosis of interturn short circuits of an asynchronous motor]. *Materialy XIX Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Fundamental'nye osnovy, teoriya, metody i sredstva izmereniy, kontrolya i diagnostiki»*, Novocherkassk, 27–28 fevralya 2018 goda [Proceedings of the 19th International Youth Scientific and Practical Conference “Fundamental principles, theory, methods and means of measurements, control and diagnostics”, Novocherkassk, February 27–28, 2018]. Novocherkassk: OOO Lik, 2018, pp. 43–50. EDN YWPWHB.

23. Ovsyanik, E.A., Khlopova, A.V. Sravnitel'nyy analiz metodov vyyavleniya mezhvitkovykh zamykaniy silovykh transformatorov 10/0,4 kV [Comparative analysis of methods for detecting interturn short circuits of 10/0,4 kV power transformers]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov, uchenykh «Energo- i resursosberezenie v teploenergetike i sotsial'noy sfere»* [Proceedings of the International scientific and technical conference of students, graduate students, and scientists “Energy and resource conservation in heat and power engineering and the social sphere”], 2023, vol. 11, no. 1, pp. 43–45. EDN QWWDP.

24. Mirosh, D.V. Kontrol' mezhvitkovykh zamykaniy v obmotke asinkhronnogo elektrodvigatelya [Monitoring of interturn short circuits in the winding of an asynchronous electric motor]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «MATERIALY, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii»*, Mogilev, 25–26 aprelya 2024 goda [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Materials, equipment and resource-saving technologies”, Mogilev, April 25–26, 2024]. Mogilev, 2024, pp. 337–338. EDN LFGADM.

25. *Elektrotehnicheskaya laboratoriya «Proton»* [Electrical engineering laboratory “Proton”]. Available at: <https://elab72.ru/electroizmereniya/11-teplovizionnyy-kontrol.html> (date of access: 11.09.2025).