

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.05,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»,
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26.09.2025 № 10

О присуждении Холодилову Сергею Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Диагностика электромагнитной системы синхронных двигателей с постоянными магнитами» по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы принята к защите 1 июля 2025 г. (протокол № 9) диссертационным советом 24.2.324.05, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 508/нк от 24.03.2023 г.

Соискатель Холодилов Сергей Сергеевич, 26.01.1987 года рождения. В 2023 году соискатель окончил аспирантуру в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по направлению 13.06.01 Электро- и теплотехника.

Работает в должности инженера-электроника в Обществе с ограниченной ответственностью «ВЕЛПРОК», по совместительству работает в должности доцента кафедры «Электроники и микроэлектроники» ФГБОУ ВО «Магнитогор-

ский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования РФ.

Диссертация «Диагностика электромагнитной системы синхронных двигателей с постоянными магнитами» выполнена на кафедре электроники и микроэлектроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования РФ.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Петушков Михаил Юрьевич, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра электроники и микроэлектроники, профессор.

Официальные оппоненты:

1. Горожанкин Алексей Николаевич, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск), кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», заведующий;

2. Серебряков Артем Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», (г. Нижний Новгород), кафедра «Электрооборудование, электропривод и автоматика», доцент;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», (г. Москва), в своем положительном отзыве, подписанным Благодаровым Дмитрием Анатольевичем, кандидатом технических наук, доцентом кафедры автоматизированного электропривода и Федоровой Ксенией Георгиевной, кандидатом технических наук, доцентом кафедры автоматизированного электропривода, указала, что диссертация Холодилова Сергея Сергеевича «Диагностика электромагнитной системы синхронных двигателей с постоянными магнитами» соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842, а её автор, Холодилов Сергей Сергеевич, за-

служивает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 2 в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованного ВАК, 3 публикации, входящих в систему цитирования Scopus. Сведения об опубликованных работах достоверны.

Авторский вклад соискателя заключается в следующем: проанализированы типичные неисправности синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), которые возникают при работе двигателей такого типа; проведен анализ существующих методов диагностики СДПМ, показано, что для диагностики СДПМ можно применить генераторный режим, как метод минимизации гармонических составляющих в сигнале тока питающей линии; доказано что получение диагностический сигнала в генераторном режиме осуществляется при штатной работе СДПМ, без внесения изменений в конструкцию двигателя. На основе возможности интерполяции и математического сведения сигналов, разработан метод токовой диагностики СДПМ, с применением способа синхронизации исследуемых сигналов и их сравнительного анализа, с получением диагностического – результирующего сигнала.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Петушков, М.Ю. Применение вейвлет-анализа для синхронизации сигнала тока при диагностике синхронных двигателей с постоянными магнитами [Текст] / М.Ю. Петушков, С.С. Холодилов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2024. №3(20). – С. 17-27.

2. Петушков, М.Ю. Определение диагностического сигнала для мониторинга синхронных двигателей с постоянными магнитами [Текст] / М.Ю. Петушков, С.С. Холодилов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. №4(19). – С. 95-107.

3. Petushkov, M.Yu. Application of the Generator Mode to Obtain a Diagnostic Signal in the Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motors [Text] / M.Yu. Petushkov, S.S. Kholodilov // Conference Proceedings: Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). – 2023. – Pp. 59-64.

4. Петушков, М.Ю. Нахождение неисправностей синхронных двигателей с постоянными магнитами по линейному току [Текст] / М.Ю. Петушков, С.С. Холодилов // Интеллектуальная электротехника. – 2020. – № 4(12). – С. 52-60.

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов, все положительные:

1. Отзыв ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (КФУ), г. Казань (д-р техн. наук, доц. С.Г. Мосин): 1) Научная новизна отражает скорее полученные результаты без указания отличительных признаков и достигаемого эффекта, который можно оценить количественно и/или качественно, в сравнении с известными методами диагностики СДПМ. 2) Не представлены четкие математические критерии выбора типа материнского вейвлета и частоты дискретизации анализируемого сигнала. 3) Как обеспечен учет допусков при анализе их влияния на характеристики «исправного» СДПМ? 4) Не проведено сравнение предложенных методов с решениями для технической диагностики на основе активно развивающихся методов машинного обучения в целом и глубокого машинного обучения в частности. 5) По тексту автореферата встречаются опечатки и неточности. Не указан личный вклад соискателя в каждой из публикаций по теме диссертационной работы.

2. Отзыв ООО «ЭТК», г.Уфа (д-р техн. наук, доц. В.Е. Вавилов) 1) Почему именно для задач синхронизации сигналов и выделения диагностических сигнатур был выбран именно метод вейвлет-преобразования, а не другие, более современные методы цифровой обработки сигналов (например, преобразование Гильберта-Хуанга (ННТ) или глубокое обучение)? В чем заключаются ключевые и решающие преимущества вейвлет-анализа для данной конкретной задачи, и проводилось ли сравнительное исследование эффективности разных методов? 2) В автореферате наглядно представлены результаты для дефектов, вносимых по отдельности. Как предложенный метод реагирует на сложную ситуацию – комбинацию нескольких одновременно присутствующих дефектов (например, эксцентриситет ротора и частичное разрушение одного из магнитов)? Не приводит ли такая комбинация к интерференции или маскировке одного дефекта другим, и если да, то каким образом метод позволяет разрешать такие неоднозначности?

3. Отзыв ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк (д-р техн. наук, проф. В.Н. Мещеряков): 1) В работе предложен оригинальный способ автоматической регистрации генераторного режима по частотной декомпозиции сигнала. Насколько устойчив и надежен данный алгоритм к ложным срабатываниям в различных переходных и аварийных режимах работы электропривода (например, при глубоких провалах напряжения, резких скачках нагрузки, внешних КЗ), когда форма токового сигнала может существенно искажаться? 2) Внедрение результатов проведено на насосах системы водоснабжения аэропорта. Планируется ли или уже ведется работа по адаптации и валидации данного метода для диагностики СДПМ, работающих в более требовательных условиях, таких как электрический транспорт (электробусы, поезда) или авиация, где требования к надежности, точности и быстродействию диагностики на порядок выше, а последствия отказов критичны?

4. Отзыв ФГАО ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» г.Екатеринбург (д-р техн. наук, доц. Метельков В.П.) 1) В тексте автореферата упоминается о принципиальной возможности применения методов машинного обучения для более точной классификации неисправностей на заключительном этапе. Является ли это текущим, уже реализованным результатом работы (например, разработана и обучена нейросетевая модель), или же это интересная и многообещающая перспектива для дальнейших исследований? Если модель разработана, то каковы были результаты ее тестирования по сравнению с предложенным метрическим анализом? 2) Для неисправности «межвитковое замыкание» диагностическим признаком указано увеличение амплитуды диагностического сигнала от измерения к измерению. Возможно ли на основе предложенного метода не только детектировать факт наличия дефекта, но и количественно оценить степень его развития (например, оценить количество замкнувшихся витков или скорость прогрессирования повреждения) по величине или динамике этого увеличения? Такая возможность представляется крайне ценной для прогнозирования остаточного ресурса.

5. Отзыв ФГАОУ ВО «НИТУ МИСиС», г. Москва (д-р техн. наук, доц. Ю.В. Шевырев): 1) В автореферате фигурирует критерий достаточности количества реализаций ($N=21$) для проведения достоверной диагностики. Целесообразно привести более развернутое пояснение методологического характера: каким именно образом был получен, математически обоснован и верифицирован на практике этот конкретный критерий? Существует ли зависимость этого числа от мощности, частоты вращения или конструктивных особенностей диагностируемого двигателя, или же оно является универсальной константой предложенного метода? 2) В качестве одного из диагностических признаков для статического эксцентриситета указано «отсутствие увеличения амплитуды гармоники от измерения к измерению». Является ли этот фактор достаточным и однозначным диагностическим признаком, учитывая, что стабильность амплитуды может быть связана не только с отсутствием развития дефекта, но и со стабильностью самого режима работы привода (постоянство нагрузки, скорости)? Предусмотрены ли в методе процедуры для исключения влияния колебаний режимных параметров на результат диагностики?

6. Отзыв ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург (канд. техн. наук, доц. Э.Л. Греков): 1) Так как в большинстве случаев СДПМ питаются от управляемых инверторов, не проще ли диагностировать режим перехода в генераторный режим по смене направления электрической мощности в звене постоянного напряжения? 2) В автореферате автором не приведено обоснование достаточного количества сохраненных генераторных режимов, равное 21. От чего зависит это число, и для всех ли двигателей и типов механизмов это число будет одинаковым. 3) Проведено ли исследование влияния на точность диагностики зашумленности исходных сигналов (от датчиков тока), и разрядности АЦП. По осциллограммам диагностический сигнал по амплитуде составляет около 0,2% от исходного графика тока. 4) Из текста автореферата не совсем ясно, является ли разработанный программно-

аппаратный комплекс, который упоминается в положениях, выносимых на защиту, предметом интеллектуальной собственности?

7. **Отзыв ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара** (д-р техн. наук, доц. Ю.В. Зубков): 1) стр.8 В генераторном режиме обмотки СДПМ будут наводить ЭДС индукции...». Не ясно, что автор имеет ввиду? ЭДС индуктируется в обмотках, а не иначе. 2) На рис.5. приведен алгоритм диагностики СДПМ. Судя по содержанию блоков это диагностика СГПМ. 3) В четвертой главе сравниваются спектры диагностического сигнала, полученного аналитически, компьютерным моделированием и при испытаниях, но в автореферате отсутствует информация о компьютерной модели. 4) В пункте 2 научной новизны декларируется, что разработан метод диагностики СДПМ в генераторном режиме. Далее в разделе теоретической и практической значимости работы указано, что данный метод позволяет в режиме непрерывного мониторинга диагностировать неисправности СДПМ. Не ясно, каким образом можно обеспечить непрерывность функционирования привода с переводом электрической машины в генераторный режим?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью их научных достижений в области систем управления и диагностики электроприводов. Доктор техн. наук, доцент Горожанкин А.Н. является признанным специалистом в области систем диагностики и автоматического управления электроприводами. Кандидат техн. наук, доцент Серебряков А.В. – специалист в области автоматизированного привода электромеханических систем и диагностики электротехнических систем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны новый метод диагностики СДПМ в генераторном режиме, с применением сигнатурного анализа и способа минимизации влияния основной гармоника на результаты диагностики;

предложена новая научная идея, получения диагностической информации на основе токовой диагностики, с применением данных анализа существующих систем управления СДПМ;

доказано влияние магнитных характеристик отдельных магнитов ротора на токовые сигналы статорных обмоток, проявляющееся в формировании детерминированных токовых сигнатур в соответствующих группах обмоток;

введены новые диагностические признаки, позволяющие определить такие неисправности электромагнитной системы СДПМ, как короткое замыкание обмоток статора, статический эксцентриситет ротора, крошение высококоэрцитивного магнита, снижение коэрцитивной силы одного магнита и магнитной системы в целом.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Установлено и исследовано влияние уникальных магнитных характеристик постоянных магнитов ротора на ток статора, проявляющееся в формировании стабильных детерминированных токовых сигнатур, что является развитием теории и методов диагностики синхронных двигателей с постоянными магнитами и вносит вклад в расширение представлений о способах и методах выявления структурных изменений в электрической и магнитной частях двигателя;

применительно к проблематике диссертации эффективно использованы методы математического моделирования в программном пакете MatLab для проведения вейвлет анализа и анализа Фурье; в программном пакете Elcut для разработки компьютерной модели и проведения имитационного моделирования и экспериментальных исследований, выполненных на погружных скважных насосах и циркуляционных насосах с СДПМ;

изложена идея получения диагностической информации на интервалах генераторного режима работы СДПМ;

определен способ синхронизации диагностируемого сигнала с эталонным, позволяющий выделить значимую для диагностики составляющую;

изучены способы и методы обработки сигнала тока с использованием интерполяционных преобразований и вейвлет анализа;

проведена модернизация существующего метода токовой диагностики двигателей для СДПМ с применением сигнатурного анализа и способа минимизации влияния основной гармоники на результаты диагностики.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в промышленную эксплуатацию система про-активной диагностики электроприводов системы водоснабжения АО «Международный Аэропорт Магнитогорск» на погружных скважинных насосах типа ЭЦП 8-25-180 мощностью 18,5 кВт и двигателях циркуляционных насосов главного контура секции теплоснабжения 1FU8113-2TA2 мощностью 14 кВт, проводимых в рамках модернизации. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет 1,5 млн. руб./год;

определены области применения результатов исследования при проектировании и эксплуатации СДПМ, работающих в различных отраслях промышленности. Разработанный метод в составе комплексной системы диагностики позволяет в режиме непрерывного мониторинга идентифицировать неисправности в СДПМ и оповещать пользователя, что позволит снизить аварийность приводов на основе СДПМ;

создана система получения диагностического сигнала в генераторном режиме при штатной работе СДПМ, без внесения изменений в конструкцию двигателя. Определены способы регистрации генераторного режима, рассчитан критерий достаточности для диагностики в данном режиме;

представлены рекомендации по расширенному внедрению выполненных разработок для СДПМ; предложения по дальнейшему совершенствованию разработанных методов повышения ресурса оборудования и способов управления, направленных на снижение аварийности электромеханических систем.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

сходимость в пределах инженерной точности теоретических и экспериментальных результатов, полученных на СДПМ; адекватность результатов математического моделирования экспериментальным данным, полученным с использованием сертифицированного оборудования; воспроизводимость результатов исследований различных типов СДПМ;

теория построена на известных положениях автоматизированного электропривода и автоматического управления, теории надежности технических систем. Теоретические исследования проводились с помощью модели, разрабо-

танной в программных пакетах Excel и MathCad для выполнения расчётов и проверки теоретических положений; программном пакете MatLab для проведения вейвлет анализа и анализа Фурье; программном пакете Elcut для разработки компьютерной модели и проведения имитационного моделирования; основы теории вейвлетов;

идея базируется на анализе современных подходов и существующих решений по диагностике электромеханических систем, результатах экспериментов и опыта эксплуатации электроприводов погружных скважинных и циркуляционных насосов;

использовано сравнение данных, полученных автором, и полученных в ходе предыдущих исследований, результаты согласуются с опубликованными данными, представленными в работах российских и зарубежных ученых;

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике; доказано соответствие результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных, получена положительная оценка итогов эксплуатации внедренных методов;

использованы современные методы имитационного моделирования с применением математического пакета Matlab/Simulink и Elcut, методы прямого осциллографирования, цифровой обработки экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии на всех этапах разработок и исследований; в получении исходных данных и проведении научных экспериментов; обосновании новых научных положений; разработке способа управления электроприводом с предварительным разгоном и регулируемым темпом торможения после захвата раската валками; теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении снижения амплитуды упругого момента на шпинделе; разработке системы вычисления ресурса и наблюдателя упругого момента, обеспечивающего его восстановление путем дифференцирования сигнала скорости электропривода; обосновании и разработке методики расчета износа шпинделей электроприводов, обусловленного ударными нагрузками. Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

В отзыве ведущей организации:

1. В работе следовало бы дать более развернутое обоснование выбора материнского вейвлета для проведения анализа. Какими критериями руководствовался автор при его выборе и почему именно этот вейвлет наиболее эффективен для выделения сигнатур указанных дефектов?

2. В работе автором предложен комплексный метод диагностики, включающий интерполяцию, вейвлет-синхронизацию и сравнение сигналов, однако не приведена оценка вычислительной сложности алгоритма и требований к аппаратному обеспечению для его реализации в системах онлайн-мониторинга.

3. Какова потенциальная помехоустойчивость предложенного метода к изменению температуры двигателя, уровня нагрузки и других эксплуатационных факторов, которые также могут вносить изменения в токовый сигнал, маскируясь под диагностические признаки неисправностей?

4. В тексте работы указано, что для более точной классификации неисправностей «можно применить методы машинного обучения». Необходимо конкретизировать, были ли такие методы применены в рамках проведенного исследования или это остается предметом дальнейших разработок.

5. В работе представлены результаты моделирования и экспериментов для отдельных дефектов. Не показано, как метод ведет себя при наличии нескольких одновременных неисправностей (например, эксцентриситет и подмагничивание) и не происходит ли маскировка одного дефекта другим.

В отзыве официального оппонента Горожанкина А.Н.:

1. В работе обоснован выбор вейвлет-анализа перед анализом Фурье, однако не приведено детальное обоснование выбора конкретного материнского вейвлета. Какими критериями (например, симметрия, наличие моментов, время-частотная локализация) руководствовался автор при его выборе для данной конкретной задачи?

2. Для интерполяции сигналов выбран многочлен Лагранжа. Проводилось ли сравнение его эффективности с другими методами интерполяции (сплайны, sinc-интерполяция), традиционно применяемыми в ЦОС?

3. Учитывает ли метод поправки на температуру двигателя в процессе диагностики, которая может существенно влиять на магнитные свойства и формируемый сигнал?

4. Разработанный метод позиционируется как не требующий привязки к типу СДПМ. Проводились ли исследования на двигателях существенно различающейся мощности и с различным конструктивным исполнением магнитов?

5. Для неисправности «межвитковое замыкание» ключевым признаком является рост амплитуды диагностического сигнала. Позволяет ли метод количественно оценить тяжесть дефекта по скорости или величине этого роста?

В отзыве официального оппонента Серебрякова А.В.:

1. В разделе, посвященном интерполяции сигналов, для устранения расхождения по количеству отсчетов предлагается использовать интерполяционный многочлен Лагранжа. Однако, для задач цифровой обработки сигналов более типичным и эффективным является использование sinc интерполяции или полиномиальных сплайнов. Следовало бы дать сравнительное обоснование выбора именно многочлена Лагранжа для поставленной задачи.

2. В качестве критерия достаточности количества реализаций ($N=21$) для проведения диагностики приведено лишь конечное значение. Не раскрыт методический подход к расчету и верификации данного критерия, его зависимость от мощности и типа СДПМ.

3. В работе показана высокая эффективность метода для диагностики одиночных дефектов. Было бы полезно исследовать его помехоустойчивость к изменению параметров внешней среды, таких как температура и нагрузка на валу двигателя, которые также могут влиять на токовый сигнал.

4. В качестве диагностического признака неисправности «короткозамкнутый виток» указано «увеличение амплитуды диагностического сигнала». В работе не раскрыто, каким образом предложенный метод отделяет данный признак от возможной флуктуации коэрцитивной силы магнитов, не связанной с дефектом?

5. В выводах по главам и в заключении количественные оценки эффективности метода (например, точность обнаружения, вероятность ложного срабатывания) приведены в качественной форме. Желательно было бы представить их и в количественном виде.

В ходе заседания диссертационного совета:

1. Вы предлагаете для диагностики двигатель переводить в генераторный режим. Есть ли необходимость снимать его с агрегата и устанавливать на стенд?

2. При выбеге двигателя частота вращения и амплитуда будет меняться. Как их сопоставить с эталонными записями?

3. В докладе отдельно выделяются математические и компьютерные модели, в чем разница между ними?

4. На слайде 15 представлены спектры математического и компьютерного моделирования неисправности, спектры отличаются, в чем заключаются диагностические признаки, если спектры имеют существенные отличия?

5. Выдвинута гипотеза, что рассматриваемые неисправности привели к выведенным диагностическим признакам. Вы эти признаки получили эмпирически, или это было доказано теоретически?

6. Существуют ли другие неисправности, приводящие к таким же диагностическим признакам?

7. Разработанный метод применим для одного типа двигателя или для других типов будут аналогичные картины? Если двигатели одной и той же серии, но разной мощности, будут ли наблюдаться принципиальные отличия по картинам признаков.

8. Диагностические признаки на слайде 22, полученные при математическом моделировании и при стендовых испытаниях имеют отличия в части перехода через ноль. Как эти отличия объясняются с точки зрения сделанных выводов?

9. Занимался ли кто-либо данной тематикой до данного диссертационного исследования? Какие были результаты? Является ли использование генераторного режима в диагностике уникальным подходом?

10. Экономическая составляющая указана в акте внедрения как ожидаемый экономический эффект. Каким образом был получен данный эффект?

11. В генераторном режиме СДПМ как будет замыкаться ток? Каким образом будут получены диагностические сигналы и что будет приводить двигатель в движение?

12. Можно ли разработанный метод диагностики использовать для синхронных машин с электромагнитным возбуждением?

13. В чем была сложность выявить генераторный режим в работающем двигателе? Почему это выделено в отдельное положение?

14. На 11м слайде приведен пункт способа «сравнение матриц коэффициентов». Что это за матрицы, какая у них размерность, в чем суть необходимости их сравнения? Также приведён пункт «использование периодов выделенной матрицы как синхросигнала». Как матрицу – набор коэффициентов можно использовать как синхросигнал?

15. Учитывается ли изменение характеристик высококоэрцитивных магнитов в двигателе, происходящее в результате естественного размагничивания, флуктуации магнитного поля и других причин?

16. Если исследовать СДПМ уже бывший в работе, как получить эталонную последовательность для выполнения диагностики?

Соискатель Холодилов С.С. ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Не обязательно снимать двигатель с агрегата, достаточно отслеживать наличие свободного выбега двигателя. Применительно к электротранспорту генераторный режим является одним из основных режимах, применяемых при рекуперации и торможении. Достаточно подключиться к линии, записывать сигнал тока и при помощи разработанного метода регистрации генераторного режима, выделять участки сигнала тока в генераторном режиме и использовать их для проведения диагностики.

2. Да, частота и амплитуда будут изменяться, для сведения сигналов предлагается использовать методы интерполяции и корректировки амплитуды и фазы, в определённых допустимых пределах, чтобы данные методы не оказали влияния на диагностическую картину.

3. Акцент на математической модели сделан в аспекте применения аналитических расчётов, а под компьютерной моделью подразумевается применение прикладного пакета Elcut, в котором разработаны модели СДПМ и выполнен анализ методом конечных элементов. Разделение не с точки зрения подходов, а с точки зрения реализации самих вычислительных процессов.

4. Да, спектры отличаются, главным является наличие сигнала высокой амплитуды на частоте 300 Гц, 1800 Гц и 2400 Гц, которые являются расчётными характерными частотами для данного типа двигателя при данной неисправности. Также графики математического, компьютерного и стендового моделирования нельзя сравнивать напрямую, т.к. исходные условия отличаются. Главным является не близость амплитуд, а само наличие гармоник на данных частотах.

5. Это было доказано теоретически, далее подтверждено на математической модели и согласуется с результатами стендовых испытаний.

6. Да, такие неисправности могут существовать, но существуют вполне конкретные признаки рассматриваемых неисправностей, отличающиеся от подобных неисправностей. Например, признаки эксцентриситета ротора по подшипникам, похожи на признаки эксцентриситета ротора ввиду деформации обращённого ротора, но при этом признаки не повторяют друг друга, а имеют скорее общие тенденции. Также похожие признаки, позволяют отделить неисправности, например эксцентриситета ротора, от другого класса неисправностей, например связанных с короткозамкнутыми витками.

7. Разработанный метод исследован на 4х типах СДПМ, спектральные разложения отличаются в зависимости от типа СДПМ, но полностью согласуются с расчётными значениями. Диагностические признаки от двух одинаковых по конструкции СДПМ разной мощности не будут иметь существенных отличий.

8. Различия в математической модели и стендовой модели заключаются в не идеальности реального двигателя, флуктуациями характеристик электромагнитной системы. Главным фактором является наличие характерных для данного типа неисправности всплесков.

9. Да, согласно анализу литературы в 2016 году опубликована статья Голландского университета, где предложен схожий по предпосылкам подход к диагностике, однако в том исследовании была рассмотрена одна неисправность и

диагностика выполнена с применением векторов Паркера, без применения генераторного режима и вейвлет анализа. Сам по себе генераторный режим для диагностики не является новшеством, но его применение вместе со способом синхронизации исследуемых сигналов и сигнатурного анализа показано впервые.

10. Экономический эффект получен оценочным путём для данного производства и представляет собой затраты на замену скважинного насоса в случае незапланированной его замены в результате выхода из строя и связанного с этим простоя.

11. В режиме свободного выбега ток не возникает, но для диагностики можно использовать ЭДС. В режиме торможения на тормозные резисторы или при частичном к.з. возникающий ток в линии используется для диагностики. Изменение режима работы не требует дополнительных источников крутящего момента для вращения ротора, в режиме торможения источником крутящего момента служит момент инерции ротора и всего механизма.

12. Частично да, разработанный метод может быть использован для диагностики эксцентриситета ротора синхронных машин с электромагнитным возбуждением.

13. Если отсутствуют сигналы от контроллера, специально выводимые для регистрации генераторного режима, то для выявления переходов СДПМ из двигательного в генераторный режим необходимо применять методы анализа тока в линии, что и обосновано в работе.

14. Матрицы коэффициентов получаются путём разделения сигнала тока на полупериоды, выполнение вейвлет-преобразования данных полупериодов, выделение матриц аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов, взаимное их сравнение, выделение наиболее отличающихся матриц и использование полупериода соответствующего данной характерной матрице как сигнала синхронизации.

15. Да, изменения магнитных характеристик постоянных магнитов учитывается в разработанном методе как дополнительные исходные данные при диагностике.

16. В случае подхода к диагностике в СДПМ не имеющего эталонных сигналов тока необходимо отталкиваться от аналогичных электродвигателей, плюс задаться параметрами, которые можно получить в результате внешнего осмотра и дополнительных измерений, как исходными параметрами. При его дальнейшей эксплуатации если будут дополнительные изменения в структуре, то они также могут быть выявлены разработанным методом.

Диссертационный совет установил, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, полностью соответствующую критериям «Положения о присуждении ученых степеней» №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук.

На заседании 26 сентября 2025 года диссертационный совет принял решение за разработку научно-обоснованных технических решений, позволяющих выявлять неисправности СДПМ на ранних стадиях их развития, присудить Холодильову Сергею Сергеевичу учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования совет в количестве 11 человек, из них 10 – докторов наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 11, против присуждения ученой степени – нет, не проголосовали – нет.

Председатель
диссертационного совета

Корнилов Геннадий Петрович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Одинцов Константин Эдуардович

26 сентября 2025 г.