

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по науке и инновациям

ФГБОУ ВО «Национальный

исследовательский университет

«МЭИ»

Комаров И.И.

« 10 » сентября 2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации- Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на диссертацию Холодилова Сергея Сергеевича на тему «Диагностика электромагнитной системы синхронных двигателей с постоянными магнитами», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. -Электротехнические комплексы и системы

1. Актуальность диссертационной работы

Разработка современных методов диагностики электротехнического оборудования способствует повышению надёжности и безопасности критически важных систем, а также переходу к предиктивному обслуживанию, минимизирующему простои и эксплуатационные расходы. В связи с этим тема диссертационной работы Холодилова Сергея Сергеевича посвящена исследованию и совершенствованию методов токовой диагностики синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) для раннего выявления структурных изменений электромагнитной системы СДПМ.

Актуальность рассматриваемой темы обусловлена повсеместным внедрением высокоэффективных СДПМ в ответственные отрасли, такие как робототехника, автомобилестроение, авиация и автоматизированные промышленные комплексы, а также растущими требованиями к их отказоустойчивости, ресурсу и минимизации

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА
ФГБОУ ВО «ИГТУ им. Г.И. Носова»
за № _____
Дата регистрации 11.09.25
Фамилия регистратора _____

затрат на обслуживание. Широкое применение СДПМ, в конструкции которых используются высококоэрцитивные магниты, обусловило выделение специфического класса неисправностей, не характерных для других типов приводов: разрушение магнитов (сколы, крошение), их смещение с посадочных мест под действием значительных магнитных сил, что может привести к неисправностям вплоть до заклинивания механизма. Ввиду вышесказанного, прямая трансляция традиционных методов токовой диагностики, разработанных для асинхронных двигателей или двигателей постоянного тока, на СДПМ является неэффективной. Существенными отличиями, требующими отдельного глубокого исследования, являются наличие постоянного магнитного поля, вносящего дополнительные гармоники в спектр тока, особенности конструкции магнитов, а также принципиальные различия в системах управления. Это создаёт потребность в разработке специализированных алгоритмов анализа токовых сигналов, направленных на выявление уникальных сигнатур, характерных для дефектов СДПМ.

В связи с вышесказанным сделан вывод об актуальности диссертационной работы.

2. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность научных результатов определяется обоснованностью принятых допущений при разработке математического описания и достаточной сходимостью результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований. Основные научные выводы и положения подтверждаются теоретическим анализом, результатами моделирования и экспериментальных исследований. Все выносимые на защиту научные положения являются обоснованными и не противоречат известным научным положениям.

3. Основные результаты диссертационной работы

Первым значимым результатом является разработанный на основе комплексного анализа теоретико-методологический фундамент для диагностики синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), включающий:

- систематизацию и классификацию характерных неисправностей СДПМ (механических, электрических и магнитных) с оценкой их влияния на параметры привода и потребляемый ток;
- критический сравнительный анализ современных методов диагностики (метод конечных элементов, метод эквивалентной магнитной цепи, спектральный анализ токов, метод частичных разрядов), доказавший неэффективность преобразований Фурье из-за эффектов растекания спектра и Гиббса, маскирующих гармонические проявления дефектов;
- научное обоснование и подтверждение на практическом примере диагностики межвитковых замыканий преимуществ вейвлет-анализа как наиболее перспективного метода для выявления спектральных сигнатур неисправностей в токе статора СДПМ.

Данный результат позволяет целенаправленно выбирать и разрабатывать высокоэффективные алгоритмы для систем диагностики СДПМ, исключая заведомо неработоспособные методы.

Вторым значимым результатом является разработанный способ диагностики, использующей генераторный режим работы СДПМ для получения не зашумлённого диагностического сигнала. Способ включает:

- теоретическое обоснование и математическое моделирование влияния неисправностей на ЭДС в генераторном режиме;
- алгоритм автоматической детекции генераторного режима на основе частотной декомпозиции сигнала тока;
- практическое решение для диагностики во время штатных переходов двигателя в генераторный режим.

Данный подход позволяет устранить фундаментальную проблему токовой диагностики - помехи от преобразователя частоты и обеспечивает получение чистого сигнала для точного выявления дефектов методами вейвлет-анализа.

Третьим значимым результатом является разработка комплексного метода диагностики СДПМ, основанного на анализе сигналов в генераторном режиме и их обработке с помощью вейвлет-преобразования.

Метод включает:

- синхронизацию и идентификацию сигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования, позволяющую выделить уникальные сигнатуры отдельных магнитов ротора и обеспечить их точное попарное сравнение;
- процедуру предобработки сигналов, включающую интерполяцию для приведения к единому количеству отсчетов, нормализацию амплитуд и коррекцию фазового сдвига;
- многоуровневый анализ диагностического сигнала с использованием вейвлет-анализа, спектрального анализа Фурье и статистических методов для выявления дефектов;
- алгоритм принятия решения на основе метрического анализа и сравнения с базой эталонных состояний, позволяющий идентифицировать тип неисправности;

Метод обеспечивает высокую точность диагностики электромагнитной системы СДПМ. Его эффективность подтверждена моделированием и натурными испытаниями.

Четвертым значимым результатом является экспериментальное подтверждение эффективности разработанного метода диагностики СДПМ, полученное в ходе комплексных исследований на различных уровнях. Результаты математического анализа, компьютерного моделирования и стендовых испытаний на базе синхронного двигателя с искусственно внесенными неисправностями продемонстрировали высокую точность и надежность метода.

На основании проведенных исследований сформирована библиотека диагностических признаков для основных типов неисправностей, включая статический эксцентриситет ротора, межвитковые замыкания обмотки статора и повреждения магнитной системы. Для каждой неисправности установлены

характерные особенности диагностического сигнала, проявляющиеся как в его спектральном составе, так и в динамике изменения амплитуды.

Практическая значимость результатов подтверждена успешным применением метода для диагностики реального электропривода без необходимости конструктивных изменений двигателя. Разработанный подход обеспечивает надежную идентификацию дефектов с учетом производственных допусков и индивидуальных особенностей конкретного СДПМ, что открывает возможности для его внедрения в системы мониторинга промышленного оборудования.

4. Новизна научных положений и значение выводов и рекомендаций для науки и практики

1. Разработан способ выявления генераторного режима работы СДПМ, отличающийся от известных тем, что позволяет автоматически детектировать переход двигателя в генераторный режим на основе частотной декомпозиции сигнала тока с использованием вейвлет-преобразования, что обеспечивает получение не зашумлённого диагностического сигнала.

2. Предложен метод диагностики СДПМ в генераторном режиме, отличающийся от существующих подходов применением сигнатурного анализа и способа минимизации влияния основной гармоники на результаты диагностики, что повышает точность выявления дефектов.

3. Разработан способ синхронизации диагностируемого сигнала с эталонным, отличающийся использованием интерполяционных преобразований, что позволяет выделить значимую для диагностики составляющую и снизить погрешности анализа.

4. Выявлены диагностические признаки, позволяющие идентифицировать такие неисправности электромагнитной системы СДПМ, как короткое замыкание обмоток статора, статический эксцентриситет ротора, повреждение магнитов и снижение коэрцитивной силы магнитной системы.

С практической точки зрения, предложенные решения позволяют:

Проводить диагностику в режиме реального времени без остановки технологического процесса. Выявлять структурные изменения в магнитной,

геометрической и электрической частях двигателя, включая критические дефекты. Снизить аварийность приводов на основе СДПМ за счет непрерывного мониторинга и своевременного оповещения пользователя.

Разработанный программно-аппаратный комплекс диагностирования может быть использован в различных отраслях промышленности, включая транспорт, энергетику, автоматизированные производственные системы, авиацию, для повышения надежности и эффективности эксплуатации синхронных двигателей с постоянными магнитами.

5. Заключение о соответствии диссертации установленным критериям

Диссертационная работа имеет внутреннее структурное единство, содержит новые научные результаты и положения. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 217 наименований и изложена на 223 страницах машинописного текста, включая 1 таблицу и 100 рисунков. Текст диссертации и автореферата изложен логично и понятно, в научном стиле. Структура и логика представления не вызывают вопросов.

6. Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Автореферат диссертации соответствует диссертационной работе по цели, предмету, идее и задачам исследования, основным научным положениям, новизне и практической ценности.

7. Соответствие содержания диссертации содержанию опубликованных работ

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли достаточную апробацию на научно-технических конференциях и опубликованы в научных трудах соискателя. По теме диссертации имеется 10 публикаций, в том числе 2 статьи в ведущих рецензируемых журналах рекомендованных ВАК и 3 статьи в изданиях, индексируемых в международной системе цитирования Scopus.

8. Замечания и дискуссионные положения

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.

Отмеченные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы.

9. Заключение

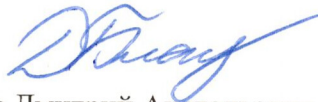
1. Полученные Холодиловым Сергеем Сергеевичем в ходе выполнения исследований и изложенные в диссертационной работе научно-практические результаты вносят заметный вклад в развитие методов и средств диагностики электромагнитной системы синхронных двигателей с постоянными магнитами. Разработанный метод позволяет повысить надежность и эффективность эксплуатации электроприводов за счет своевременного выявления дефектов.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.2. - Электротехнические комплексы и системы.

2. Диссертационная работа Холодилова Сергея Сергеевича «Диагностика электромагнитной системы синхронных двигателей с постоянными магнитами» по объему исследований, их глубине, научной и практической значимости удовлетворяет требованиям, установленным пунктами 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями), а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. - Электротехнические комплексы и системы.

Диссертационная работа, автореферат и отзыв обсуждены и одобрены на заседании кафедры автоматизированного электропривода ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» «28» августа 2025 г., протокол № 1.

Доцент кафедры автоматизированного электропривода
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
кандидат технических наук по специальности 2.4.2.


Благодаров Дмитрий Анатольевич

Доцент кафедры автоматизированного электропривода
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
кандидат технических наук по специальности 2.4.2.


Федорова Ксения Георгиевна

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Адрес: 111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

Тел. +7 495 362-75-60; факс +7 495 362-89-38

Электронная почта: universe@mpei.ac.ru. Сайт: <https://mpei.ru>





ПОДПИСИ
ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ
Н.И. ПОЛЕВАЯ