

На правах рукописи



ХОЛОДИЛОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск - 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

- Научный руководитель: **Петушков Михаил Юрьевич**, доктор технических наук, доцент;
- Официальные оппоненты: **Горожанкин Алексей Николаевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск;
- Серебряков Артем Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва.

Защита диссертации состоится «26» сентября 2025 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.324.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на официальном сайте <http://magtu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.324.05
канд. техн. наук, доцент



Одинцов Константин
Эдуардович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из наиболее перспективных направлений развития современного электропривода является применение синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Современное производство охватывает диапазон мощностей от ватт или милливатт до десятков мегаватт. К преимуществам данных приводов относятся: высокая удельная мощность более 4 кВт/кг, стабильная работа на угловых скоростях более 15 тыс. рад/с, высокий крутящий момент на старте (с применением датчиков координат). Вышеперечисленные преимущества обуславливают широкое применение СДПМ в промышленности, робототехнике, автомобилестроении и авиации.

В конструкции СДПМ неотъемлемой частью являются высококоэрцитивные магниты, расположенные в роторе и закреплённые, как правило, при помощи специальных клеящих составов, армируются при помощи стеклопластика или углеволокна, вставляются в специальные пазы. Такие способы крепления разработаны с целью надёжной фиксации магнитов в определённом положении. Ввиду высокой коэрцитивной силы, даже в состоянии покоя магниты, взаимодействуя между собой, через магнитное поле подвергаются воздействию (взаимного) магнитного момента, стремясь сместиться с посадочных мест.

Другим аспектом применения высококоэрцитивных магнитов (как правило неодимовых) является их хрупкость и, как следствие, склонность к скалыванию и крошению. При сколах и крошении частицы магнита меняют свое пространственное положение, примагничиваются к ферромагнитным материалам внутри машины, что может привести к нарастанию вибраций, ударных нагрузок на элементы привода и заклиниванию механизма. Также, СДПМ присущи стандартные неисправности электрических машин, связанные с эксцентриситетом оси ротора, вибрациями, износом подшипниковых узлов, короткозамкнутые витки обмоток статора и др.

Ввиду широкого применения СДПМ в различных отраслях техники, остро стоит вопрос разработки и внедрения систем функциональной диагностики. Одним из важных направлений функциональной диагностики является токовая диагностика, основанная на анализе тока в питающей линии для выявления отклонений и определении сигнатур, для проактивной диагностики неисправностей. Токовая диагностика электропривода как метод исторически развивалась для синхронных и асинхронных приводов, и двигателей постоянного тока (ДПТ). Однако прямая трансляция методов на СДПМ практически не осуществима. Существенным отличием СДПМ является наличие постоянных магнитов, которые могут привести к появлению неисправностей, не встречающихся в приводах без постоянных магнитов. Также следует отметить, что высококоэрцитивные магниты конструктивно имеют форму с прямыми углами, что вносит дополнительные гармоники в спектр тока. Существенным являются и различия в системах управления приводов с высококоэрцитивными магнитами и без них.

Вышеперечисленные аспекты дают основание для разработки систем токовой диагностики СДПМ как отдельного направления диагностики электротехнических комплексов. Также, отдельной проработки требуют вопросы, связанные с наличием в СДПМ высококоэрцитивных магнитов и присущих им неисправностей. До настоящего времени данные аспекты обсуждаются в большом числе публикаций, из чего следует актуальность данного направления.

Степень разработанности

Анализ имеющихся в свободном доступе работ показывает недостаточную проработку вопроса токовой диагностики синхронных электродвигателей с постоянными магнитами. Токовая диагностика электропривода как метод исторически развивалась для синхронных и асинхронных приводов, и двигателей постоянного тока (ДПТ). Существенный вклад в развитие токовой диагностики внесли российские и зарубежные учёные А.К. Аракелян, А. С. Анучин, В.Е. Вавилов, О.Г. Вегнер, И.А. Вевюрко, А.А. Глотов, М.А. Григорьев, А.А. Дубенский, Д.А. Завалишин, О.В. Крюков, Д. В. Корельский, И.Е. Овчинников, В.В. Панкратов, Г.Г.Соколовский, А.В. Серебряков, В.А. Флоренцев, Т.Д. Батзел, С. Боючикер, Г.А. Саролино, Н. Габраил, А. Глюмианю, Д. Греинер, Ф.Е. Хюссин, Е. Кадиаппан, Ж.Х. Кан, Д.Х. Ким, Р. Мохамед, Ю.А. Мохамед, Ж.С. Мореира, П. Пиллаю, М. Рахман, Д. Тодд, М.Н. Уддин, П. Вас, Л. Зонг, и многие другие.

Принципы токовой диагностики, применяемые для анализа тока синхронных и асинхронных машин и ДПП, транслируются на СДПМ такими учеными как: В.С. Петухов, М.Ю. Петушков, А.С. Сарваров, В.В. Купцов и др.

Несмотря на достаточно большое количество публикаций по диагностике СДПМ, особенно в зарубежных источниках, проработка подходов к диагностике зачастую сводится к поиску отдельных неисправностей на конкретных типах СДПМ. Причем для каждого типа необходимо разрабатывать сложные имитационные, компьютерные и математические модели. Такой подход вносит ограничения к применению токовой диагностики в СДПМ ввиду наличия большего разнообразия видов конструкций СДПМ, применения разных типов постоянных магнитов, различиями в системах управления и др. Данные аспекты определили дальнейшее направление поиска способов диагностики СДПМ, с целью раннего обнаружения неисправностей электромагнитной системы без привязки к конкретному типу конструкции и системе управления СДПМ.

Объект исследования – электромагнитная система синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Предмет исследования - неисправности электромагнитной системы, методы диагностики и диагностические признаки неисправностей СДПМ.

Цель диссертационной работы разработка метода диагностирования электромагнитной системы синхронных двигателей с постоянными магнитами.

Для достижения указанной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Выявить и проанализировать существующие неисправности СДПМ и степень их влияния на линейный ток, проанализировать существующие методы диагностики СДПМ;
2. Разработать способы получения диагностической информации на основе токовой диагностики, с применением данных анализа существующих систем управления СДПМ. Обосновать применение генераторного режима в токовой диагностике СДПМ;
3. Разработать метод токовой диагностики СДПМ, на основе идентификации элементов магнитной системы, с применением вейвлет-преобразования исследуемого сигнала;
4. Провести экспериментальные исследования для обоснования эффективности разработанного метода и критериев поиска неисправностей.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Установлено влияние уникальных магнитных характеристик отдельных магнитов ротора на токовые сигналы статорных обмоток, проявляющееся в формировании детерминированных токовых сигнатур в соответствующих группах обмоток.

2. Разработан метод диагностики СДПМ в генераторном режиме, с применением сигнатурного анализа и способа минимизации влияния основной гармоники на результаты диагностики.

3. Выявлены 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 и практическая значимость работы. Результаты диссертационной работы являются развитием теории и методов диагностики синхронных двигателей с постоянными магнитами, основанных на токовой диагностике. Дополняют существующие методики функциональной диагностики неисправностей синхронных двигателей с постоянными магнитами, с расширением возможностей по идентификации как отдельных типов неисправностей, так и в целом идентификации любых изменений в структуре двигателя.

Разработанный метод позволяет проводить диагностику в режиме реального времени, выявлять структурные изменения в магнитной и геометрической структуре двигателя, а также изменения в электрической части двигателя, в том числе и критические.

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 СДПМ.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались следующие методы: теория электромеханического преобразования энергии; теория электропривода; теория автоматического управления; численные и аналитические методы; программные пакеты Excel и MathCad для выполнения расчётов и проверки теоретических положений; программный пакет MatLab для проведения вейвлет анализа и анализа Фурье; программный пакет Elcut для разработки компьютерной модели и проведения имитационного моделирования; основы теории вейвлетов.

Внедрение результатов

Предложенный в диссертации метод диагностики СДПМ в генераторном режиме и способы обработки диагностической информации были апробированы на погружных скважных насосах и циркуляционных насосах с СДПМ применяемых в системе водоснабжения АО «Международный Аэропорт Магнитогорск», что подтверждено актом.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ выявления генераторного режима СДПМ для получения диагностической информации.

2. Способ синхронизации диагностируемого сигнала с эталонным, позволяющий выделить значимую для диагностики составляющую.

3. Способы обработки сигнала с использованием интерполяционных преобразований, для проведения синхронизации диагностического сигнала.

4. Метод токовой диагностики СДПМ с применением сигнатурного анализа и способа минимизации влияния основной гармоники на результаты диагностики.

5. Программно-аппаратный комплекс диагностирования СДПМ.

Степень достоверности результатов диссертационного исследования подтверждается совпадением результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными в ходе проведения серии экспериментов с использованием сертифицированного оборудования, соответствующих международным стандартам измерительной техники. Достоверность измерений обусловлена корректным использованием измерительного оборудования. Достоверность компьютерного моделирования обусловлена использованием сертифицированного программного обеспечения и использования общепринятых подходов к созданию компьютерной модели.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты диссертационного исследования соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы (п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; п.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.)

Апробация диссертационной работы. Положения диссертации, выносимые на защиту и научные результаты, были представлены на следующих научно-технических конференциях и публикациях: 2021, 2022, 2023 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice; 2023 Электротехнические и информационные комплексы и системы, № 3, 2024, № 4, 2023; 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года; 2022 Всероссийская конференция по Автоматизированному Электроприводу (АЭП 2022) (г.Тула, 28 09-1-1- 2022); Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 19–23 апреля 2021 года; _Публикация в журнале «Электротехнические комплексы и системы». – 26.11.2020; Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 20–24 апреля 2020 года; Публикация в журнале «Интеллектуальная электротехника». – 2020; Публикация в журнале «Наука и производство Урала». – 2011; Конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования». – 2010.

Публикации и личный вклад автора. Основное содержание диссертации отражено в 10 публикациях, в том числе 2 статьи в изданиях входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в изданиях индексируемых в SCOPUS, 5 публикаций в журналах перечня рецензируемых научных изданий.

Структура и содержание диссертации. Диссертационная работа содержит **223** страницы машинописного текста, который поясняется **100** рисунками и **1** таблицей. Работа состоит из введения, **4** глав, заключения, списка литературы из **217** наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, выявлена степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи, методы исследований, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту, приведены сведения о реализации и апробации результатов работы.

В первой главе рассматриваются неисправности характерные для синхронных двигателей с постоянными магнитами, а также современные методы диагностики данных неисправностей. Рассмотрены механические неисправности, такие как: дефекты подшипников, механическая разбалансировка и эксцентриситет ротора; Рассмотрены электрические неисправности, такие как короткозамкнутые витки обмотки статора в различных вариациях и случаях; Рассмотрены дефекты магнитной системы, такие как размагничивание отдельных магнитов, либо всей магнитной системы в целом. Показано влияние данных неисправностей на конструкцию привода, на потребляемый ток и оценена возможность дальнейшей эксплуатации привода. Проанализированы современные способы диагностики электроприводов, основанные на методах: метод конечных элементов, показаны практические результаты для поиска механических неисправностей, таких как эксцентриситет ротора и др.; метод эквивалентной магнитной цепи, может применяться при диагностике межвитковых замыканий, а также при повреждениях статора и ротора, при этом учитываются все существующие магнитные пути и не пренебрегают индуктивностью рассеяния; различные направления токовой диагностики электроприводов, такие методы анализа тока как, сигнатурный анализ, анализ Фурье, вейвлет анализ. Показаны преимущества и недостатки каждого математического метода применительно именно к диагностике СДПМ. Приведены результаты теоретических выкладок и практических исследований в области применения данных методов к конкретным сигналам, служащим источником диагностической информации. Показаны пределы использования быстрого преобразования Фурье, оконного преобразования Фурье. Отдельно рассмотрен эффект растекания спектра при выполнении преобразования Фурье. Показано, что применение оконного преобразования Фурье как метода борьбы с эффектом растекания спектра практически не применимо для токовой диагностики СПДМ, т.к. такой подход приводит к маскированию гармонических проявлений дефектов электромагнитной системы СДПМ. При анализе Фурье, как быстром, так и дискретном неизбежно сталкиваемся с эффектом Гиббса и связанными с этим ошибками преобразования. Сделан обобщающий вывод о неэффективности использования преобразования Фурье в качестве метода анализа линейного тока с целью поиска спектральных сигнатур, обусловленных появлением тех или иных дефектов электромагнитной системы двигателя.

Рассматривается метод вейвлет-анализа как более предпочтительный метод анализа исследуемого сигнала тока СДПМ. Показаны преимущества вейвлет-преобразования для анализа исходного сигнала, получения спектральной картины и поиска сигнатур, характерных для тех или иных неисправностей СДПМ. В главе на примере показана эффективность применения вейвлет-анализа при диагностике межвитковых замыканий статора. Отмечена недостаточность проработки вопроса поиска неисправностей характерных именно для СДПМ.

В второй главе рассматриваются вопросы использования генераторного режима СДПМ для проведения диагностики. Приведена математическая модель СДПМ с

некоторыми корректными допущениями, в разрезе использования данной модели для доказательства возможности применения генераторного режима в качестве режима – источника диагностической информации. На основании анализа систем управления (СУ) СДПМ, с учетом особенностей СУ для бесколлекторных двигателей постоянного тока показано, что прямое снятие сигнала тока с питающей линии и дальнейший его анализ для поиска сигнатур неисправностей приведёт к большому числу ложных результатов, как ложно положительных, так и ложно отрицательных. Для работы СДПМ необходим преобразователь с управляющими ключами и системой управления. В результате работы преобразователя, генерируется большое количество дополнительных гармонических составляющих в спектре потребляемого тока, что негативно сказывается на избирательности токовой диагностики при выполнении поиска спектральных сигнатур. При прямом снятии сигнала тока без фильтрации, вейвлет-анализ как более чувствительный метод по сравнению с анализом Фурье будет практически не применим ввиду сильной зашумленности диагностируемого сигнала, особенно при поиске сигнатур неисправностей, не вносящих значительный вклад в спектр сигнала. При векторном управлении СДПМ зачастую отсутствует какая-либо фильтрация гармоник. В случае диагностики бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ или BLDC) степень засорённости спектра еще выше.

Ввиду наличия в любом СДПМ постоянных магнитов в работе предложен способ получения диагностической информации в генераторном режиме. Индуцируемая ЭДС как под нагрузкой, так и без нее несет информацию о происходящих внутри СДПМ процессах, т.е. несет диагностическую информацию. В генераторном режиме обмотки СДПМ будут наводить ЭДС индукции, величина суммарной наводимой ЭДС на фазе А определяется из выражения:

$$e_A = 2 \sum_{i=0}^{w-1} B_m l v \cos\left(\vartheta + \frac{\pi}{6} - \frac{\Delta\alpha}{2} - i \cdot \Delta\alpha\right) = 2B_m l v \sum_{i=0}^{w-1} \cos\left(\vartheta + \frac{\pi}{6} - \frac{\Delta\alpha}{2} - i \cdot \Delta\alpha\right) \quad (1)$$

Согласно уравнению 1 величина ЭДС зависит от приложенной магнитной индукции, при этом форма наведённого сигнала будет зависеть от конструкции магнитной системы, плотности намагниченности каждого постоянного магнита, формы статора и ротора и прочих характеристик. Если учесть, что любые повреждения, даже незначительные, напрямую или опосредованно влияют на магнитное поле, магнитную проницаемость, магнитную индукцию и прочие параметры, то можно сделать вывод, что любая неисправность отражается на спектральных характеристиках генерируемой ЭДС. В работе приведён пример СДПМ с внесённой неисправностью «снижение коэрцитивной силы одного магнита». Уравнение 1 модифицировано с учётом данной неисправности:

$$e^A = (2B_m l v \sum_{i=0}^j \cos(\vartheta + \frac{\pi}{6} - \frac{\Delta\alpha}{2} - i \cdot \Delta\alpha)) + (2B_{m1} l v \sum_{i=j}^{j+n} \cos(\vartheta + \frac{\pi}{6} - \frac{\Delta\alpha}{2} - i \cdot \Delta\alpha)) + (2B_m l v \sum_{i=j+n+1}^{w-1} \cos(\vartheta + \frac{\pi}{6} - \frac{\Delta\alpha}{2} - i \cdot \Delta\alpha)) \quad (2)$$

Таким образом в сигнале тока в генераторном режиме появляется дополнительная амплитудная модуляция, которую можно обнаружить в сигнале методами математического анализа.

В работе приведены принципы восстановления рабочего режима СДПМ, после кратковременного перевода в генераторный режим. Показано, что любой СДПМ при работе так или иначе переходит в генераторный режим при торможении или выбеге. Сделан отдельный акцент на регистрации генераторного режима работы, для прове-

дения диагностики. Гармонический состав сигнала тока в питающей линии для двигательного режима определяется уравнением 3.

$$I(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (3)$$

где I_0 – постоянная составляющая тока, a_n и b_n - коэффициенты Фурье, ω - угловая частота основной гармоники, n - номер гармоники.

При переходе в генераторный режим спектр тока изменяется: высшие гармоники уменьшаются на несколько порядков, что связано с изменением характера работы инвертора:

$$I_{gen}(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a'_n \cos(n\omega t) + b'_n \sin(n\omega t)) \quad (4)$$

где a'_n и b'_n - коэффициенты Фурье для генераторного режима, причем $a'_n \ll a_n$ и $b'_n \ll b_n$ для высших гармоник.

На рисунке 1(а, в) приведены спектры токов двигательного и генераторного режимов соответственно.

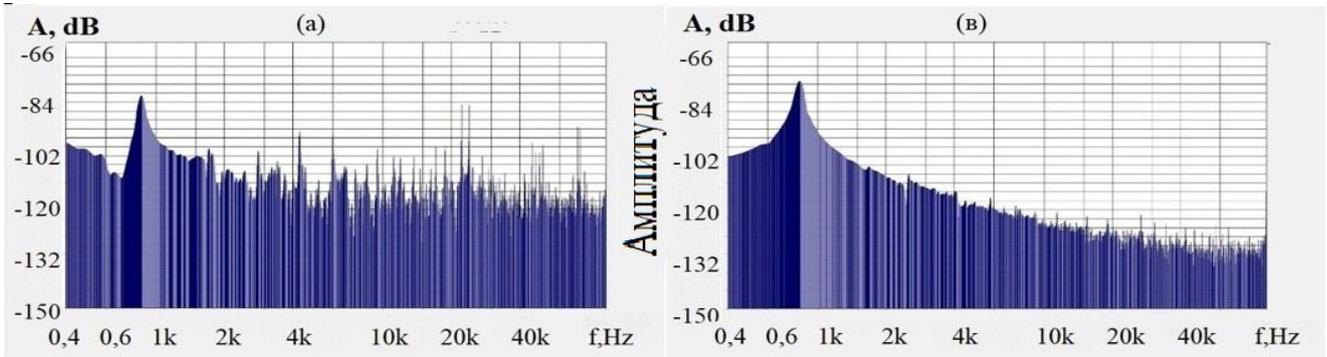


Рисунок 1 – Спектр сигнала тока двигательного (а) и генераторного (в) режимов

В главе приведены два способа регистрации генераторного режима основанные на частотной декомпозиции сигнала тока:

1. Способ основан на частотной декомпозиции посредством быстрого преобразования Фурье:

$$I(f) = \mathcal{F}\{I(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (5)$$

После получения спектра $I(f)$ сигнал разделяется на частотные полосы $f_1, f_2 \dots f_n$. Для каждой полосы рассчитывается коэффициент C_i , который отражает её вклад в общий спектр:

$$C_i = \frac{\int_{f_i}^{f_{i+1}} |I(f)|^2 df}{\int_0^{\infty} |I(f)|^2 df} \quad (6)$$

2. Способ основанный на частотной декомпозиции посредством вейвлет-анализа, непосредственно вейвлет-преобразование сигнала тока определяется как:

$$W_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} I(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (7)$$

где $\psi(t)$ – материнский вейвлет, a – масштабный коэффициент, b – параметр сдвига.

Далее энергия сигнала на каждом уровне декомпозиции рассчитывается как сумма квадратов коэффициентов детализации:

$$E_j = \sum_k |W_{j,k}|^2 \quad (8)$$

Метод частотной декомпозиции сигнала позволяет автоматически определять переход СДПМ в генераторный режим за счет анализа коэффициентов, присвоенных различным частотным полосам

Таким образом, генераторный режим является эффективным режимом для получения диагностического сигнала, позволяющий в полной мере реализовать методы математического анализа сигналов, без внесения погрешностей в виде спектральных составляющих, неизбежно возникающих при работе любого типа преобразователей.

В третьей главе рассматриваются вопрос разработки метода диагностики СДПМ. Состояние магнитной системы СДПМ отражается в потребляемом или вырабатываемом токе в зависимости от режима работы. Каждый магнит ротора влияет на спектральные и другие характеристики тока. При этом каждый магнит несет в себе определенные свойства, такие как распределение коэрцитивной силы по объему, а значит, и распределение магнитного потока, геометрические особенности, особенности крепления и другое. Даже малейшие отличия формы тока можно обнаружить и использовать в качестве своеобразного «отпечатка пальца» или сигнатуры. Выявление особенностей каждого магнита в отдельности позволит оперативно контролировать их состояние. Использование дискретного вейвлет-преобразования позволяет однозначно идентифицировать сигналы, полученные в результате взаимодействия постоянного магнита и катушек статора двигателя для каждого отдельного магнита.

В работе была выполнен математический анализ, серия моделирований в программном пакете Elcut на разработанной компьютерной модели СДПМ, а также на стендовых испытаниях. Показано, что при выполнении последовательности действий, приведённой на рисунке 2, с использованием вейвлет преобразования удаётся обнаружить уникальные черты в сигнале, характерные для каждого отдельного магнита. Данные характерные особенности в дальнейшем можно использовать для синхронизации сигналов, полученных через период времени, равный периоду между проведением диагностики, что позволяет проводить диагностику наиболее точно, сравнивая графики сигналов, полученных от одних и тех же магнитов.

Показана принципиальная возможность применения вейвлет преобразования для идентификации отдельных элементов магнитной системы СДПМ. Разработан способ синхронизации для получения данных с СДПМ, позволяющий выявить линейные токовые сигнатуры и однозначно идентифицировать периоды сигнала, отвечающие за определенную группу магнитов. Показано, что использование вейвлет-преобразования для синхронизации исследуемого сигнала существенно расширяет возможности сигнатурного анализа линейного тока. Поскольку для проведения диагностики необходимо определиться с количеством обрабатываемых данных, в работе определён критерий достаточности, определяющий достаточное количество регистраций генераторного режима для проведения диагностики $N = 21$. Проведено практическое исследование влияния интерполяции на методы сравнения сигналов. Метод сигнатурного анализа токового сигнала СДПМ подразумевает взаимное сравнение исходного сигнала от исправного двигателя, с сигналом от двигателя, находящегося в эксплуатации, с целью выполнения диагностики и идентификации наличия или отсутствия неисправностей. При этом, так как токовый сигнал снимается в разных режимах, при фиксированной частоте дискретизации на один и тот же полупериод сигнала будет приходиться различное число точек квантования и для каждой исследуемой гармоники частота дискретизации будет всё время разная.



Рисунок 2 - Способ синхронизации сигналов тока СДПМ

Для выполнения функциональной диагностики с применением таких математических методов как анализ Фурье, вейвлет анализ, методы прямого сравнения сигналов, и другие необходимо, чтобы сигналы соответствовали друг другу по параметрам средней амплитуды, частоты дискретизации, количеству точек квантования.

Для решения данной проблемы в работе предложено использовать интерполяцию сигнала на основе интерполяционного многочлена Лагранжа:

$$\psi(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k t^k \quad (9)$$

Это многочлен степени $N-1$, коэффициенты которого выбираются так, чтобы его график проходил через узлы интерполяции. При этом, интерполяция многочленом Лагранжа выдает приемлемые результаты при $N \leq 8$. Требуемая корректировка при помощи интерполяции для случая диагностики не превышает $n/2$ количества сэмплов, где n – количество сэмплов исходного сигнала. Это достигается тем, что сигналы снимаются при достаточно похожих условия и режимах работы, т.е. близких по частотам вращения и соответственно амплитудам и соотношению $f_{\text{диск}} / f_{\text{сигнала}}$.

Для подтверждения данного предложения в работе выполнены анализы формы и спектра сигнала до интерполяционного преобразования и после. Спектры приведены на рисунках 3 и 4. Показано, что наблюдается некоторое отфильтровывание спектров выше 10й гармоники сигнала при вейвлет анализе, тем не менее общая погрешность менее 5%, что говорит о допустимости применения данного метода.

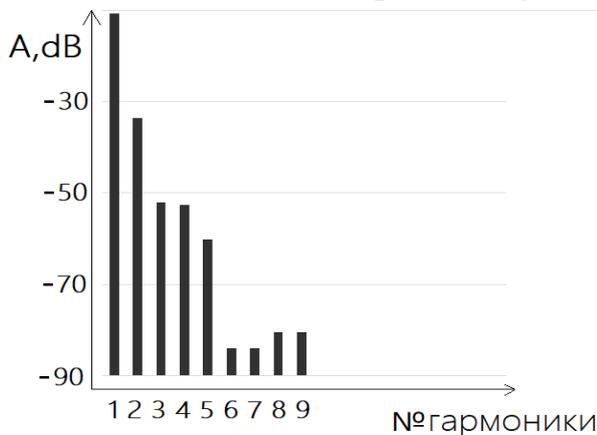


Рисунок 3 – Спектр сигнала до интерполяции

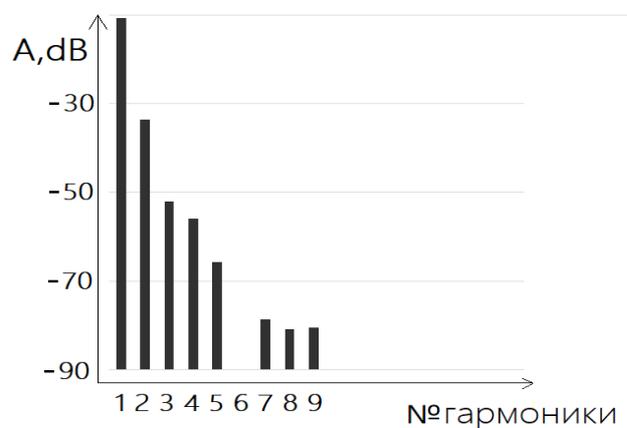


Рисунок 4 – Спектр сигнала после интерполяции

Главным критерием проверки метода является отсутствие появления дополнительных высших гармонических составляющих при операции интерполяции, а также

субгармоник, которые играют большую роль при анализе токовых сигналов. Интерполяция может выполняться как с целым коэффициентом интерполирования, так и с коэффициентом интерполирования L не являющимся целым числом. Тогда идеальная интерполяция сигнала $x[n]$ с нецелым коэффициентом L может быть выражена через свертку с sinc-функцией:

$$y[m] = n = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot \text{sinc}\left(\frac{m-nL}{L}\right) \quad (10)$$

$$\text{где } \text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$

Таким образом применение интерполяции допустимо при исследовании токовых сигналов СДПМ, а также о допустимости применения сведения двух сигналов по амплитуде, фазе и количеству точек квантования.

На основании вышеизложенных выводов разработан метод диагностики СДПМ, представленный на рисунке 5, с применением сигнатурного анализа, способа минимизации влияния основной гармоники на результаты диагностики и применении генераторного режима как режима- источника диагностируемого сигнала. Проведённые исследования показывают, что применение отдельных методов диагностики, таких математического анализа, преобразования Фурье, вейвлет преобразования, непосредственного сравнения форм сигналов не позволяет провести комплексную функциональную диагностику, т.к., по сути, каждый из методов направлен на поиск отдельных неисправностей. При этом, следует отметить, что на начальном этапе диагностики, информация о потенциальных неисправностях может отсутствовать, следовательно, диагностика должна проводиться по всем пунктам, проходя последовательно каждый из них, для выявления тех или иных отклонений. Следует отметить, что некоторые математические операции требуют значительных вычислительных мощностей, что противоречит концепции диагностики в режиме реального времени, однако не мешает проводить диагностику постфактум, т.е. необходимо и достаточно снять сигнал, несущий диагностическую информацию, затем подвергнуть его исследованию и как только исследование завершится, в этот момент времени появится информация о наличии или отсутствии неисправностей. В связи с вышесказанным, в работе предложено объединить описанные способы съема диагностического сигнала тока с СДПМ, выполнить сопоставление эталонного сигнала и диагностического и применить известные математические методы обработки, для поиска информации о неисправностях, т.е. разработать единый метод диагностики СДПМ, позволяющий провести все процедуры исследования сигнала в нужной последовательности с учетом нюансов диагностики описанных в научной литературе. Разработанный метод диагностики приведён на рисунке 5.

В первом и втором пунктах сигнал тока снимается при работе СДПМ в режиме генерации при снижении частоты вращения или останове и сохраняется в виде пула информации:

$$I_1 = [I_1^{(1)}(t), I_1^{(2)}(t), \dots, I_1^{(M)}(t)] \quad (11)$$

где $M \geq 21$ – количество записанных генераторных режимов

Далее производится выделение двойного набора периодов (за два полных оборота) исходного сигнала и диагностируемого:

$$I_1^{(i)} = \sum_{m=1}^P I_{1,m}^{(i)}(t), \quad I_2^{(j)} = \sum_{m=1}^P I_{2,m}^{(j)}(t), \quad (12)$$

где P – количество полупериодов

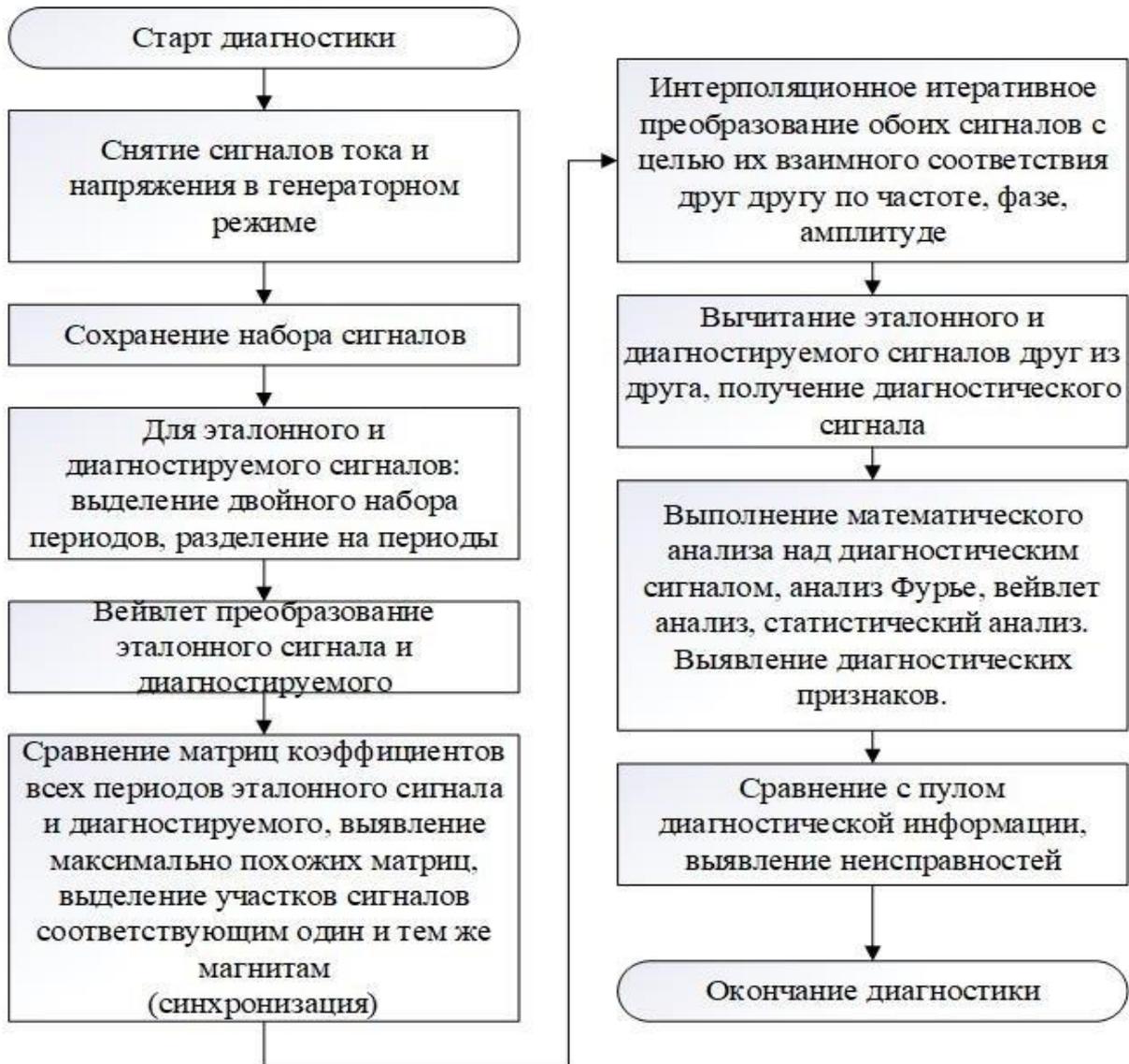


Рисунок 5 – Метод диагностики СДПМ

Следующим этапом производится вейвлет-преобразование каждого периода, исходного сигнала и диагностируемого:

$$W_{1,m}^{(i)}(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{1,m}^{(i)}(t)\psi_{a,b}(t)dt, \quad W_{2,m}^{(j)}(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{2,m}^{(j)}(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (13, 14)$$

где $W_{1,m}^{(i)}(a,b)$ и $W_{2,m}^{(j)}(a,b)$ - матрицы вейвлет коэффициентов для периода m , $\psi_{a,b}(t)$ – материнский вейвлет, a – масштаб, b – сдвиг.

Для полученного набора матриц аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов выполняется сравнение матриц коэффициентов всех периодов, исходного сигнала и диагностируемого. Нахождение максимально похожих матриц для синхронизации сигналов и выделения участков сигнала, соответствующих одним и тем же магнитам. Т.е. оба сигнала, исходный и диагностируемый будут сравниваться друг относительно друга при их полной синхронности. Для чего предварительно выполняется нормализация матриц, полученных в предыдущем пункте:

$$\tilde{W}_{1,m}^{(i)}(a,b) = \frac{W_{1,m}^{(i)}(a,b)}{\|W_{1,m}^{(i)}\|}, \quad \tilde{W}_{2,n}^{(j)}(a,b) = \frac{W_{2,n}^{(j)}(a,b)}{\|W_{2,n}^{(j)}\|} \quad (15,16)$$

где $\|W\|$ — норма матрицы (например, Фробениуса):

$$\|W\| = \sqrt{\sum_a \sum_b |W(a, b)|^2} \quad (17)$$

Для нахождения наиболее похожих полупериодов вычисляется мера близости между матрицами коэффициентов. Используем среднеквадратичную ошибку (MSE):

$$\epsilon_{m,n} = \frac{1}{A \cdot B} \sum_{a=1}^A \sum_{b=1}^B (\tilde{W}_{1,m}^{(i)}(a, b) - \tilde{W}_{2,n}^{(j)}(a, b))^2 \quad (18)$$

где $\epsilon_{m,n}$ – ошибка между периодом m сигнала $I_1^{(i)}(t)$ и периодом n сигнала $I_2^{(j)}(t)$,

А и В – количество масштабов и сдвигов в вейвлет- преобразовании.

Для каждого периода m сигнала $I_1^{(i)}(t)$ находим период n сигнала $I_2^{(j)}(t)$, который минимизирует ошибку $\epsilon_{m,n}$:

$$n_{best} = \arg \min_n \epsilon_{m,n} \quad (19)$$

Данный пункт позволяет выявить наиболее похожие матрицы, как при сравнении периодов одного сигнала (исходного и диагностируемого), так и при взаимном сравнении матриц разных сигналов между собой, для каждого периода m сигнала $I_1^{(i)}(t)$ находится наиболее близкий период n_{best} сигнала $I_2^{(j)}(t)$.

Для проверки синхронизации по магнитам необходимо, чтобы найденные периоды соответствуют одному и тому же магниту двигателя, для этого анализируются характерные всплески в матрицах коэффициентов. Всплески (локальные максимумы) в матрицах $\tilde{W}_{1,m}^{(i)}(a, b)$ и $\tilde{W}_{2,n}^{(j)}(a, b)$ должны совпадать по масштабу a (частоте) и сдвигу b (времени):

$$\arg \max_{a,b} \tilde{W}_{1,m}^{(i)}(a, b) = \arg \max_{a,b} \tilde{W}_{2,n_{best}}^{(j)}(a, b) \quad (20)$$

Следующим этапом выполняется интерполяционное итеративное преобразование обоих сигналов с целью приведения их к взаимному соответствию друг другу по частоте, фазе и амплитуде.

Если сигналы $I_1^{(i)}(t)$ и $I_2^{(j)}(t)$ имеют разное количество отсчетов, то необходимо их интерполировать до одинакового количества отсчетов N :

$$I_1^{(i)}(t_k) \rightarrow I_1^{(i)}(t_n), \quad I_2^{(j)}(t_k) \rightarrow I_2^{(j)}(t_n) \quad (21)$$

где $n = 1, 2, \dots, N$.

Амплитуды сигналов приводят к единой шкале:

$$I_1^{(i)}(t) \rightarrow \frac{I_1^{(i)}(t)}{\max(I_1^{(i)}(t))}, \quad I_2^{(j)}(t) \rightarrow \frac{I_2^{(j)}(t)}{\max(I_2^{(j)}(t))} \quad (22)$$

Если периоды синхронизированы по магнитам, приведены по амплитуды, частоте и количеству отсчетов, но имеют небольшой сдвиг по фазе, то выполняется корректировка. Для этого сигнал $I_2^{(j)}(t)$ сдвигается на величину Δt , чтобы минимизировать ошибку:

$$\Delta t = \arg \min_{\Delta t} \int_0^T (I_1^{(i)}(t) - I_2^{(j)}(t + \Delta t))^2 dt \quad (23)$$

Процесс является итеративным с поиском значений, при которых полупериоды отличаются на минимальные среднеквадратичные отклонения.

Далее производится вычитание исходного и диагностируемого сигналов друг из друга, для получения диагностического сигнала.

$$\Delta I(t) = I_1^{(i)}(t) - I_2^{(j)}(t) \quad (24)$$

Т.к. сигналы приведены друг ко другу, вычитание выполняется простым способом, побитно. Результат является «диагностическим сигналом», который в следую-

щем этапе необходимо подвергнуть математическому анализу при помощи следующих инструментов:

$$\text{Вейвлет- анализ: } W_{\Delta I}(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta I(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (25)$$

$$\text{Преобразование Фурье: } F_{\Delta I}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta I(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (26)$$

Также применяют различные методы анализа формы сигнала и статистического анализа, например вычисление дисперсии и корреляции.

Анализ диагностического сигнала выполняется для поиска сигнатур неисправностей подшипникового узла, статического и динамического эксцентриситета, коротко замкнутых витков и других типов неисправностей.

В последнем этапе диагностики выполняется сравнение полученных диагностических признаков с пулом накопленной информации и выявление неисправностей. Данный процесс включает следующие шаги:

Для формирования диагностических признаков из сигнатуры $\Delta I(t)$ и результатов её анализа (вейвлет-коэффициентов $W_{\Delta I}(a, b)$ и спектра $F_{\Delta I}(f)$) в зависимости от пула накопленной информации можно сформировать:

Вектор вейвлет-коэффициентов:

$$W_{\Delta I} = [W_{\Delta I}(a_1, b_1), W_{\Delta I}(a_2, b_2), \dots, W_{\Delta I}(a_k, b_k)] \quad (27)$$

Вектор спектральных компонент:

$$F_{\Delta I} = [F_{\Delta I}(f_1), F_{\Delta I}(f_2), \dots, F_{\Delta I}(f_L)] \quad (28)$$

Статистические характеристики (дисперсия, асимметрия, эксцесс):

$$S_{\Delta I} = [\text{Var}(\Delta I(t)), \text{Skew}(\Delta I(t)), \text{Kurt}(\Delta I(t))] \quad (29)$$

Все признаки можно объединить в один вектор:

$$D_{\Delta I} = [W_{\Delta I}, F_{\Delta I}, S_{\Delta I}] \quad (30)$$

Ранее накопленный пул информации представляет собой набор эталонных диагностических признаков состояния структуры двигателя, его можно обозначить как:

$$P = [D_1, D_2, \dots, D_R] \quad (31)$$

где D_R – диагностические признаки для R -го состояния двигателя,

R – количество состояний в пуле.

Для сравнения диагностических признаков $D_{\Delta I}$ с пулом P используется метрика близости, например евклидово расстояние:

$$d_r = \|D_{\Delta I} - D_R\| = \sqrt{\sum_{k=1}^K (D_{\Delta I,k} - D_{R,k})^2} \quad (32)$$

где d_r – расстояние между $D_{\Delta I}$ и D_R ,

$D_{\Delta I,k}$ и $D_{R,k}$ – k -е компоненты векторов $D_{\Delta I}$ и D_R .

Для выявления неисправностей задаются минимальным расстоянием d_r :

$$r_{best} = \arg \min_r d_r \quad (33)$$

Если d_r превышает заданный порог, то диагностируется неисправность, соответствующая состоянию r_{best} . В противном случае двигатель считается исправным.

Для более точной классификации неисправностей можно применить методы машинного обучения.

Валидность метода подтверждена практическими исследованиями на компьютерных моделях СДПМ, а также на практических исследованиях с применением реального СДПМ, с векторной системой управления.

В четвёртой главе приведены результаты, полученные при математическом анализе, компьютерном моделировании и стендовых испытаниях, на базе синхронно-

го двигателя с постоянными магнитами, в который были внесены неисправности. Получены аналитические уравнения диагностического сигнала, результаты компьютерного моделирования и стендовых испытаний. На основании полученных результатов сформулированы диагностические признаки.

Для неисправности **статический эксцентриситет ротора** приведены на рисунке 6 приведен спектр сигнала тока, полученного аналитически, на рисунке 7 спектр сигнала тока, полученного при компьютерном моделировании, на рисунке 8 спектр сигнала тока, полученного при стендовых испытаниях.

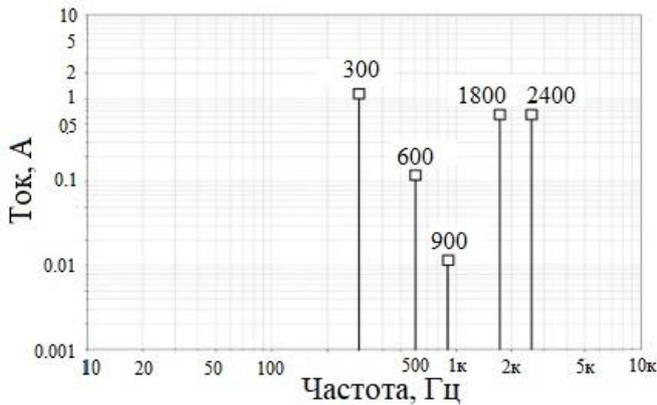


Рисунок 6 – Спектр диагностического сигнала, эксцентриситет ротора (расчёт)

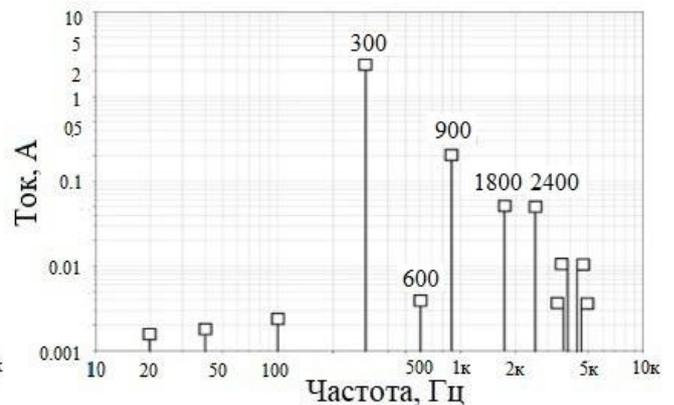


Рисунок 7 – Спектр диагностического сигнала, эксцентриситет ротора, компьютерная модель

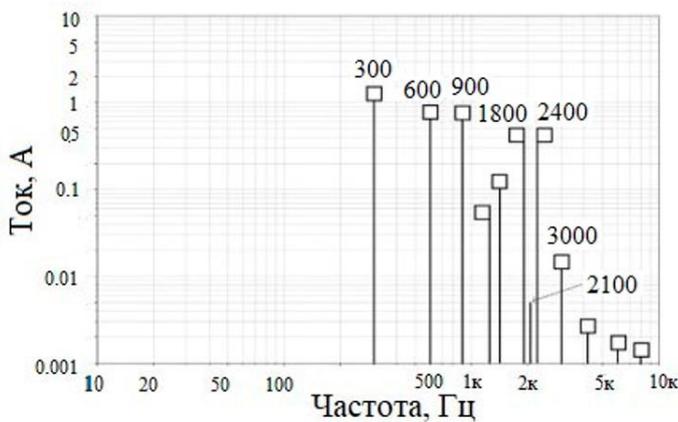


Рисунок 8 – Спектр диагностического сигнала, эксцентриситет ротора, стендовые испытания

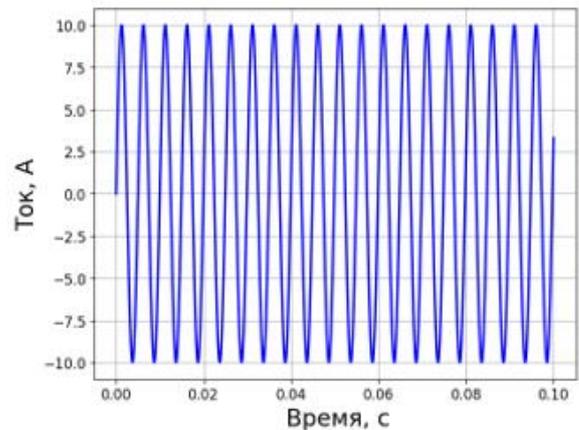


Рисунок 9 – График тока исправного СДПМ

Приведённые графики спектров подтверждают, что для неисправности **статический эксцентриситет ротора** диагностическими признаками неисправности являются:

1. Наличие в диагностическом сигнале набора гармонических составляющих, определяемых на ожидаемых частотах, а также гармоник на частотах кратных частоте вращения ротора.

2. Отсутствие увеличения амплитуды гармоники диагностического сигнала от измерения к измерению.

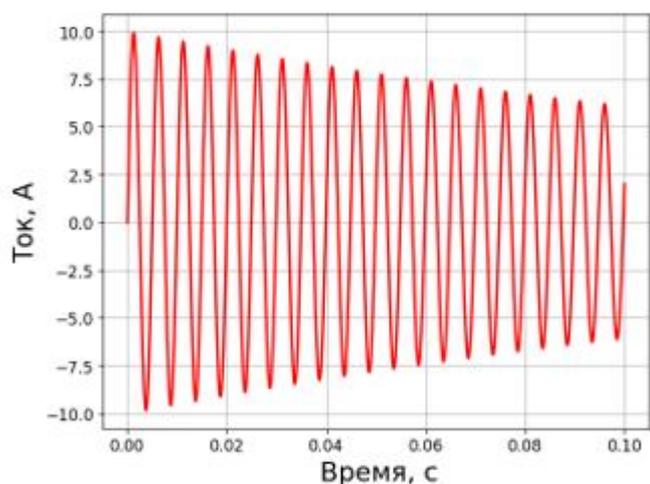


Рисунок 10 – Графики тока СДПМ с 10% короткозамкнутых витков

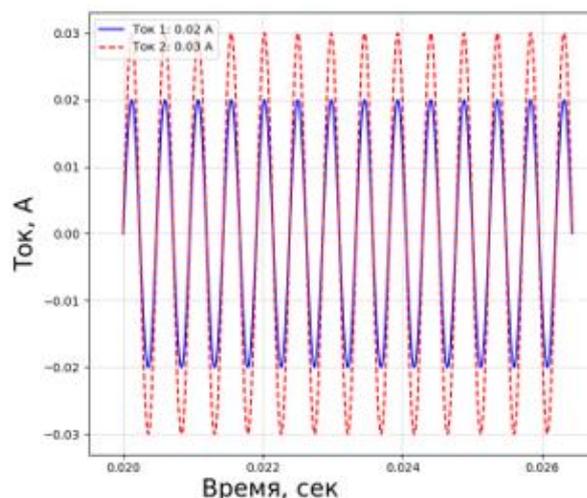


Рисунок 11 - Диагностические сигналы тока с 10% замкнутых витков в одной фазе, через 24 часа (синий), через 48 часов работы (красный)

Для неисправности **межвитковые замыкания обмотки статора** диагностическим признакам неисправности являются: увеличении амплитуды диагностического сигнала от измерения к измерению. В подтверждение данных выводов на рисунках 9 и 10 приведены расчетные графики токов без короткозамкнутого витка и короткозамкнутыми витками соответственно.

На рисунке 11 представлены результаты компьютерного моделирования неисправности – короткозамкнутые витки одной фазы, согласно разработанному методу диагностики. На рисунках 12 и 13 приведены графики диагностических сигналов снятых с СДПМ Turnigy SK3530-1100 через 24 часа работы после замыкания одного витка обмотки статора (10% витков) рисунок 12 и через 48 часов работы рисунок 13.

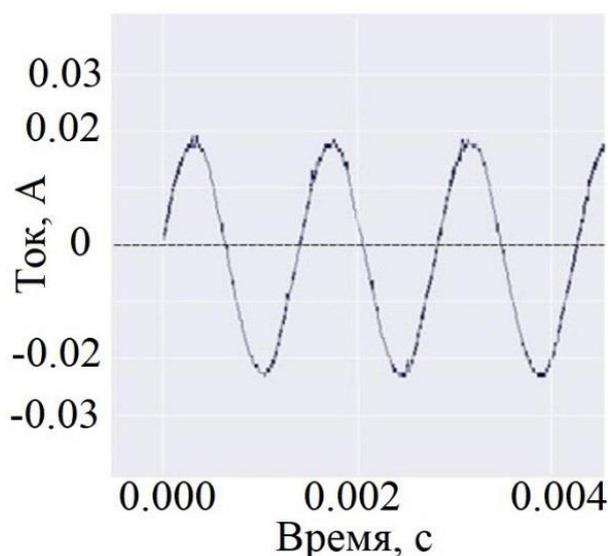


Рисунок 12 – Диагностический сигнал тока СДПМ с 10% замкнутых витков в одной фазе, через 24 часа работы

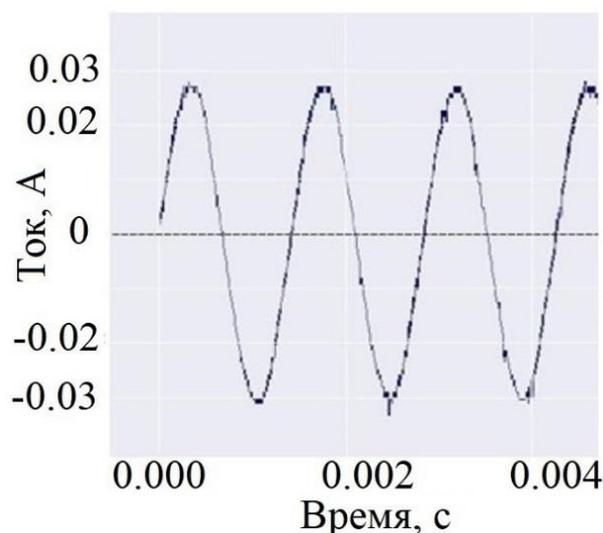


Рисунок 13 – Диагностический сигнал тока СДПМ с 10% замкнутых витков в одной фазе, через 48 часов работы

Диагностическими признаками неисправностей - **крошение одного магнита и/или снижение коэрцитивной силы** одного магнита являются:

$$I(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 0.833 \\ 0.01 \sin^2 \left(\frac{\pi(t-0.833)}{0.833} \right), & 0.833 \leq t < 1.666 \\ -0.002 \sin^2 \left(\frac{\pi(t-1.666)}{0.833} \right), & 1.666 \leq t < 2.5 \\ 0.01 \sin^2 \left(\frac{\pi(t-2.5)}{0.833} \right), & 2.5 \leq t < 3.333 \\ 0, & 3.333 \leq t < 6.666 \\ -0.01 \sin^2 \left(\frac{\pi(t-6.666)}{0.833} \right), & 6.666 \leq t < 7.5 \\ 0.002 \sin^2 \left(\frac{\pi(t-7.5)}{0.833} \right), & 7.5 \leq t < 8.333 \\ -0.01 \sin^2 \left(\frac{\pi(t-8.333)}{0.833} \right), & 8.333 \leq t < 9.166 \\ 0, & 9.166 \leq t < 10 \end{cases} \quad (34)$$

На рисунке 15 представлен график сигнала тока, полученный в ходе компьютерного моделирования. На рисунке 16 представлен график сигнала тока, полученный в ходе стендовых испытаний.

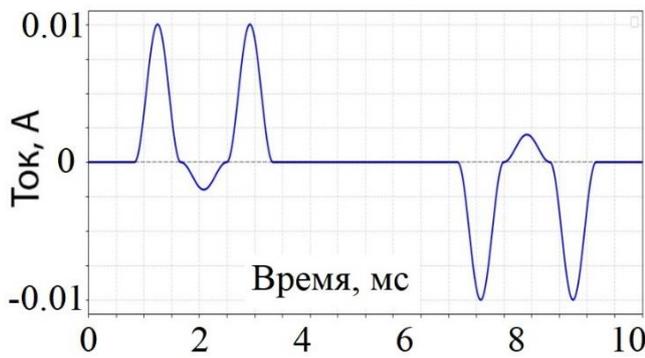


Рисунок 14 – Диагностический сигнал тока для неисправности «крошение магнита», математическая модель

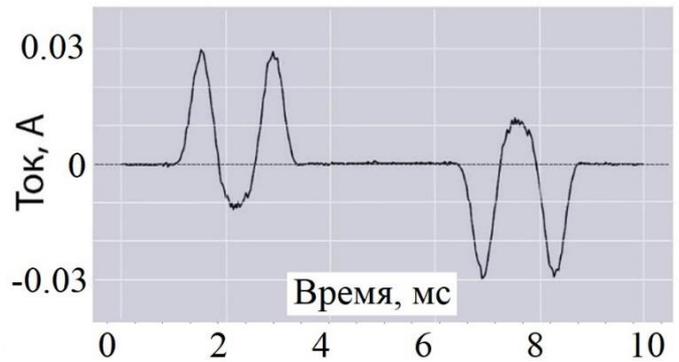


Рисунок 15 – Диагностический сигнал, при моделировании неисправности – крошение магнита, компьютерное моделирование

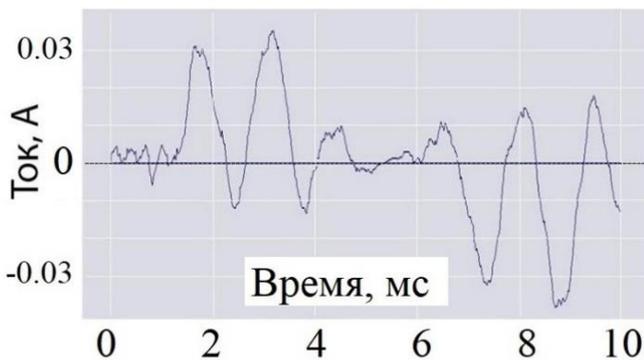


Рисунок 16 – Диагностический сигнал, при моделировании неисправности – крошение магнита, стендовые испытания

Разработанный метод диагностики позволяет однозначно идентифицировать неисправности СДПМ при выполнении функциональной диагностики. Также, разработанный метод работает в режиме накопления информации о конкретном СДПМ, с учетом всех его особенностей и дефектов, что позволяет применить разработанный метод диагностики без привязки к конструкции СДПМ, с учетом уже существующих неточностей в конструкции, ввиду погрешностей изготовления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведено исследование возможности токовой диагностики синхронных двигателей с постоянными магнитами. Проведённый анализ литературы, а также выполненные исследования показывают практическую возможность проведения диагностики синхронных двигателей с постоянными магнитами на основе анализа линейного тока. В работе показаны следующие результаты:

1. Проанализированы типичные неисправности СДПМ, которые возникают при работе данного типа двигателя в различных отраслях техники в особенности это касается современного транспорта. К типичным неисправностям относят эксцентриситет ротора, неисправности подшипников, различные виды неисправностей магнитной системы с постоянными магнитами. Показано, что любое изменение конфигурации электромагнитной системы влияет на линейный ток статора.

2. Проанализированы существующие методы диагностики СДПМ, показано, что ввиду наличия высококоэрцитивных постоянных магнитов, при диагностике СДПМ можно применить генераторный режим, как метод минимизации гармонических составляющих в сигнале тока питающей линии. Проанализированы способы управления СДПМ, показана возможность использования генераторного режима, для получения диагностического сигнала. Также, получение диагностический сигнала в генераторном режиме осуществляется при штатной работе СДПМ, без внесения изменений в конструкцию двигателя. Определены способы регистрации генераторного режима, рассчитан критерий достаточности для диагностики в данном режиме.

3. Доказано, что применение интерполяции не оказывает существенного влияния на спектр результирующего сигнала. 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.

4. Проведено практическое исследование разработанного метода диагностики на реальном электроприводе. Показано, что неисправности в электромагнитной системе СДПМ, однозначно идентифицируется при применении разработанного метода диагностики. Приведены результаты диагностики и диагностические признаки, полученные путем применения разработанного метода диагностики, для неисправностей:

а) Статический эксцентриситет ротора, диагностические признаки:

- наличие в диагностическом сигнале гармонической составляющей на частоте вращения ротора, амплитуда которой пропорциональна степени эксцентриситета;
- отсутствие увеличения амплитуды гармоники диагностического сигнала на частоте вращения ротора от измерения к измерению.

б) Межвитковые замыкания, диагностические признаки:

- увеличении амплитуды диагностического сигнала от измерения к измерению.

в) Крошение магнита или снижение его коэрцитивной силы, диагностические признаки:

- характерная форма графика диагностического сигнала;
- наличие гармонических составляющих на ожидаемых частотах

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

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. Холодильов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. №4(19). – С. 95-107.

Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus

3. Petushkov M. Yu. Application of wavelet analysis for synchronization of current signals in the diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motors [Text] / M. Yu. Petushkov, S. S. Kholodilov // Conference Proceedings: 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2022.

4. Petushkov, M. Yu. Signature Analysis of the Line Current of Permanent Magnet Synchronous Motor [Text] / M. Yu. Petushkov, S. S. Kholodilov, A. V. Valyaev // International conference on industrial engineering, applications and manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, Russia: Institute of Electrical and Electronics Engineers. - 2021. – Pp. 283-287.

5. 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.

Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования РИНЦ

6. Петушков, М. Ю. Исследование неисправностей синхронных двигателей [Текст] / М. Ю. Петушков, С. С. Холодильов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции. – 2021. – С. 258.

7. Петушков, М. Ю. Разработка системы диагностирования синхронных двигателей [Текст] / М. Ю. Петушков, С. С. Холодильов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. - 2020. – С. 317.

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

9. Холодильов, С. С. Особенности применения микропроцессорных средств для диагностики мехатронных систем / С. С. Холодильов, Л. С. Данилов, Д. Ю. Усатый // Наука и производство Урала. – 2011. – № 7. – С. 63-68.

10. Холодильов, С. С. Разработка и создание электронного регистратора с гальванической изоляцией для обнаружения неисправностей сложных мехатронных систем / С. С. Холодильов, Л. С. Данилов, Д. Ю. Усатый // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2010. – Т. 2, № 68. – С. 169-171.