

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева-КАИ»

На правах рукописи

Морозов Арсений Леонидович

МЕТОД МОМЕНТОВ ДРОБНОГО ПОРЯДКА И ПРИБОР НА ЕГО ОСНОВЕ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики
материалов и изделий, веществ и природной среды

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук, профессор
Нигматуллин Равиль Рашидович

Казань – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. Аналитический обзор методов контроля и диагностики электродвигателей.....	17
1.1 Типовые неисправности асинхронных двигателей	18
1.1.1 Классификация неисправностей.....	18
1.1.2 Эксцентриситет ротора.....	20
1.1.3 Неисправности ротора	21
1.2 Методы контроля и диагностики асинхронных двигателей.....	22
1.3 Методы токовой диагностики асинхронных двигателей.....	25
1.3.1 Общие сведения о методах токовой диагностики	25
1.3.2 Метод анализа токовых сигнатур мотора.....	26
1.3.3 Метод отслеживания порядковых гармоник.....	28
1.3.4 Методы анализа огибающей токовых сигналов	29
1.3.5 Параметрические методы	30
1.3.6 Методы высокого разрешения	30
1.3.7 Методы на основе векторов Парка.....	31
1.3.8 Метод Прони.....	32
1.3.9 Методы искусственного интеллекта	34
1.3.10 Статистика дробных моментов.....	37
1.3.11 Сравнение методов токовой диагностики	39
1.4 Методы вибродиагностики асинхронных двигателей	42
1.4.1 Общие сведения о методах вибродиагностики.....	42
1.4.2 Методы контроля общего уровня вибраций и пик-фактора.....	42
1.4.3 Анализ Фурье-спектра вибросигналов	43
1.4.4 Метод анализа огибающей.....	44

1.4.5	Методы эмпирического разложения	45
1.4.6	Методы на основе вейвлет преобразования	45
1.4.7	Методы искусственного интеллекта	46
1.4.8	Сравнение методов вибродиагностики асинхронных двигателей	47
1.5	Выводы. Постановка цели и задач исследования	50
ГЛАВА 2. Развитие метода моментов дробного порядка и разработка алгоритмов на его основе для решения задач контроля и диагностики электродвигателей.....		
2.1	Развитие и разработка метода моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики электродвигателей	53
2.1.1	Современные методы цифровой обработки сигналов	53
2.1.2	Функция обобщенного среднего	56
2.1.3	Выбор и обоснование метода предобработки сигналов	57
2.1.4	Метод моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики электродвигателей	61
2.2	Разработка алгоритмов обработки токовых и вибрационных сигналов для решения задач для контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей	62
2.3	Моделирование асинхронных двигателей.....	69
2.3.1	Методы моделирования асинхронных двигателей.....	69
2.3.2	Модель исправного асинхронного двигателя	70
2.3.3	Модель асинхронного двигателя с дефектами в стержне ротора	70
2.3.4	Модель асинхронного двигателя с эксцентриситетом.....	72
2.4	Моделирование разработанных алгоритмов для решения задач контроля и диагностики асинхронных двигателей	74
2.4.1	Параметры моделей	74

2.4.2	Моделирование диагностики дефекта в стержне ротора.....	78
2.4.3	Моделирование диагностики эксцентриситета	85
2.5	Оценка характеристик и параметров разработанных алгоритмов контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей.....	89
2.5.1	Исследование влияния шумов на результаты диагностики	89
2.5.2	Оптимизация параметров разработанных алгоритмов	92
2.6	Выводы	96
ГЛАВА 3. Экспериментальное исследование алгоритмов контроля и диагностики неисправностей асинхронных двигателей		
3.1	Описание экспериментальной установки и методики измерений.....	101
3.2	Особенности обработки данных	105
3.3	Результаты экспериментального исследования диагностики эксцентриситета и дефекта в стержне ротора с помощью предложенных алгоритмов	107
3.3.1	Результаты обработки токовых сигналов.....	107
3.3.2	Результаты обработки радиальных вертикальных вибросигналов..	114
3.3.3	Результаты обработки осевых вибросигналов	118
3.4	Выводы	123
ГЛАВА 4. Разработка типовой системы непрерывного контроля и диагностики состояния электродвигателей и её экспериментальное исследование		
4.1	Введение.....	125
4.2	Разработка стенда для проведения удаленных измерений и применения приборов контроля и диагностики в непрерывном режиме	126
4.3	Разработка прототипа прибора контроля и диагностики асинхронных двигателей в непрерывном режиме	133
4.3.1	Описание аппаратной платформы прототипа прибора.....	134

4.3.2	Описание программного обеспечения прототипа прибора	137
4.4	Результаты экспериментального исследования прототипа прибора для диагностики и контроля асинхронных двигателей в непрерывном режиме ..	141
4.4.1	Параметры разработанных алгоритмов во время проведения экспериментального исследования прототипа прибора	141
4.4.2	Результаты обработки токового сигнала	144
4.4.3	Результаты обработки радиальных вибросигналов.....	147
4.5	Выводы	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Электродвигатели являются одними из самых распространенных преобразователей энергии. Среди них асинхронные двигатели (АД) де факто считаются стандартом в промышленности благодаря эффективности и надежности [1]. Они получили широкое применение во многих отраслях, включая промышленную, жилищную, транспортную, коммерческую и другие [2]. Несмотря на надежность асинхронных машин, они подвержены неисправностям. Работа в неисправном состоянии порождает рост дефекта. Это приводит к удорожанию ремонта, остановке производства и увеличению риска аварии. Во многих применениях узлы с АД являются ключевыми, на которых завязано выполнение основных функций, в том числе функций, связанных с безопасностью. Поэтому задача обеспечения своевременного контроля и диагностики технического состояния АД является одной из наиболее важных.

Для решения этой задачи применяют различные виды технического обслуживания (ТО): корректирующее (внеплановое) ТО и профилактическое ТО [3, 4]. Профилактическое ТО разделяют на плановое ТО и ТО по состоянию. Стратегия ТО по состоянию, как правило, представляет из себя непрерывный мониторинг технического состояния в непрерывном режиме. Данный подход является одним из наиболее экономически выгодных и эффективных по следующим причинам [5]:

1. Дефекты и неисправности обнаруживаются на ранних стадиях, что дает такие преимущества как:

- снижение стоимости ремонта;
- снижение риска отказов АД и аварий;
- поддержание высокой эффективности машин на всем сроке службы. У АД, работающих с неисправностями, снижается производительность

[6], а в следствии раннего обнаружения дефектов и неисправностей, время, когда машина работает в неисправном состоянии, сокращается.

2. Не требуется останавливать процессы, в которых задействованы АД, для демонтажа с целью контроля технического состояния. За счет этого нивелируются затраты из-за простоя и затраты на демонтаж оборудования;

3. Увеличивается срок использования элементов подверженных усталостному износу. Согласно плановому и корректирующему ТО, такие элементы необходимо заменять с некоторой периодичностью, даже когда они ещё могут продолжать работу. Согласно ТО по состоянию, элементы необходимо заменять, когда у них обнаруживается неисправность либо приближается прогнозируемый срок появления неисправности [5].

Отметим, что согласно статистическим исследованиям [7] на долю АД приходится более 40% от общемирового энергопотребления, поэтому вопрос поддержания их эффективного использования является важным как с экономической точки зрения, так и с экологической.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость разработки приборов и методов мониторинга технического состояния АД. Данные приборы должны обеспечивать контроль и диагностику состояния АД, находящегося в рабочем состоянии, в автоматическом режиме непрерывно. Одной из наиболее сложных задач, при разработке таких приборов, является выбор методики цифровой обработки сигналов для извлечения диагностической информации из измерений и принятия решения о техническом состоянии АД.

Степень разработанности. По данной тематике существуют международные стандарты группы [8, 9]. В этих стандартах представлены рекомендации в отношении методов обработки сигналов для систем мониторинга. Эти подходы позволяют диагностировать неисправности, имеющие явные признаки, такие как повышенная температура, повышенные уровни акустического

шума и вибраций. Указанные подходы основаны на контроле за превышением амплитуд измеряемых величин некоторых пороговых значений. Такие методы подходят для диагностирования ярко выраженных и достаточно развитых неисправностей как, например сильный износ подшипников. Но эти методы не подходят для обнаружения менее выраженных и скрытых неисправностей и зарождающихся дефектов, таких как дефект(ы) в стержне(ях) ротора, эксцентриситет, межвитковые замыкания обмотки и другие.

На данный момент учеными активно ведутся разработки и исследования методов диагностирования слабовыраженных и неявных неисправностей АД, что подтверждается ежегодно растущим количеством публикаций на эту тематику в научных журналах, как отечественных, так и зарубежных, а также большое количество научно-практических конференций, проводимых на эту тему. Это говорит об открытости и актуальности данного вопроса. Также в последнее время разрабатываются международные стандарты, например стандарт [10], в которых рекомендуются более комплексные и сложные методы диагностики АД. Данные методы предназначены в большей степени для постобработки измерений, снятых с АД, в том числе с участием человека для анализа диагностической информации. Эти методы не подходят для систем непрерывного мониторинга, так как требуют автоматизации и оптимизации требований к вычислительным ресурсам и ресурсам памяти.

С развитием полупроводниковых технологий, методов диагностики, а также современных эффективных методов обработки сигналов, разработка методов диагностирования слабовыраженных неисправностей, оптимизированных для приборов мониторинга технического состояния АД является важной задачей. Контроль технического состояния основных узлов АД способствует к повышению надежности оборудования, бесперебойной работе технологического процесса без

снижения эффективности, уменьшению расходов на ремонт и продлению срока службы машины.

Общий вклад в разработку методов, приборов и систем мониторинга технического состояния асинхронных электрических машин внесли многие ученые, в том числе: A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, G. Capolino, H. Henaou, E. H. El Bouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid, S. Kia, H. Henaou, Z. Kanovic, D. Matic, Z. Jelcic, R. Romero-Troncoso, P. A. Delgado-Arredondo, D. Morinigo-Sotelo, R. A. Osornio-Rios, Кан Ш., Микулович А. В., Микулович В. И., Сарапулов Ю. В., Сидоров В. А., Сушко А. Е., Баркова Н.А., Дорошев Ю.С., Сидельников Л.Г., Барков А. В.

Область исследования – разработка и реализация программно-технического обеспечения для приборов мониторинга, контроля и диагностирования технического состояния асинхронных двигателей. Область исследования соответствует требованиям паспорта специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов и изделий, веществ и природной среды: п.6 Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля.

Объект исследования – электропривод с прибором контроля и диагностики технического состояния.

Предмет исследования – методы и приборы для решения задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей.

Цель исследования – развитие и разработка метода моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей.

Решаемые задачи. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Аналитический обзор текущего состояния вопроса контроля и диагностики электродвигателей, выявление недостатков существующих методов и путей их преодоления.

2. Развитие и разработка метода моментов дробного порядка для применения в задачах контроля и диагностики технического состояния электродвигателей.

3. Разработка алгоритмов непрерывного контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей на основе вибрационных и токовых сигналов.

4. Верификация разработанных алгоритмов на модельных и экспериментальных данных.

5. Разработка типовой структурной схемы, алгоритмического и программного обеспечения для системы непрерывного контроля и диагностики технического состояния электродвигателей, включающей прибор, в котором реализуется разработанный метод.

6. Создание экспериментального стенда для проведения удаленных измерений и применения приборов непрерывного контроля и диагностики технического состояния электродвигателей, а также проведение экспериментальных исследований разработанного метода на созданном стенде.

Научная новизна

1. Предложен и научно обоснован метод моментов дробного порядка и его применение в задачах контроля и диагностики технического состояния электродвигателей.

2. На основе метода предложены и разработаны алгоритмы непрерывного контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей на основе вибрационных и электрических токовых сигналов.

3. Разработаны и апробированы рекомендации по построению систем непрерывного контроля и диагностики технического состояния электродвигателей.

Практическая значимость работы:

1. Создан экспериментальный стенд для проведения удаленных измерений и применения приборов непрерывного контроля и диагностики технического состояния электродвигателей.

2. Разработан прототип прибора непрерывного контроля и диагностики технического состояния электродвигателей.

3. Получен большой объем экспериментальных данных по токовым и вибрационным сигналам асинхронных двигателей в разных технических состояниях при разных нагрузках.

4. Предложены и разработаны типовая структурная схема, алгоритмическое и программное обеспечение для систем контроля и диагностики технического состояния электродвигателей.

Результаты полученные в рамках работ по выполнению КНИТУ-КАИ госзадания (программа «Фократ», соглашение № 075-03-2020-051, fzsU-2020-0020), программы «Приоритет-2030» и совместного с Политехническим университетом города Бари (Италия) гранта Erasmus.

Методология и методы исследования. Диссертационная работа выполнялась с использованием методов математической физики, методов математической статистики, математических методов моделирования сигналов асинхронных двигателей, методов спектрального анализа сигналов. Достоверность и обоснованность результатов опираются на использовании известных положений фундаментальных наук; корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам; совпадением теоретических результатов с экспериментальными данными и результатами исследований других

авторов. При решении задач диссертационной работы использовались современные программные средства, в том числе лицензионные пакеты прикладных программ PTC Mathcad, National Instruments LabView, MathWorks MATLAB, SEGGER Embedded Studio, SEGGER J-Link.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод моментов дробного порядка применительно к решению задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей;
2. Алгоритм обработки сигналов для решения задач контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей;
3. Результаты экспериментального исследования алгоритма обработки сигналов для контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей;
4. Типовая структурная схема, алгоритмическое и программное обеспечение систем контроля и диагностики технического состояния, реализующих предложенный метод.

Степень достоверности. Достоверность научных положений и предложенных выводов в работе, а также результатов исследований обеспечивается согласованием результатов, полученных во время практических испытаний с модельными расчетами.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

1. Морозов А. Л., Определение углов ориентации объекта в пространстве и измерение механического воздействия с помощью MEMS акселерометра применительно в дефектоскопах нефтяных скважин, SMIT 2018, стр. 27, апрель 2018.
2. Морозов А. Л., Нигматуллин Р. Р., Тарасов М. Л., Вдовин А. Ю., Одиванов В. Л., Шакирова Ф. Р., Хайруллин М. И., Определение углов ориентации

объекта в пространстве и измерение механического воздействия с помощью МЭМС акселерометров и гироскопов применительно в дефектоскопах нефтяных скважин, Offshore Marinetec 2018, стр. 87-89, октябрь, 2018.

3. Морозов А. Л., Компрессор информации для систем передачи данных в реальном времени на основе промежуточной модели, SMIT 2019, стр. 47, апрель 2019.

4. Морозов А. Л., Оптимизация НАЧАСС Преобразования Для Спектрального Анализа Сигналов «XXIV Туполевские Чтения (школа молодых ученых)»: Международная молодежная научная конференция, 7-8 ноября 2019: материалы конференции, т.5, г. Казань: Изд-во Казань гос. тех. ун-та, 2019, стр. 235-237, ISBN 978-5-6043565-6-2 (т.5)

5. Морозов А. Л., Комбинированный метод обработки сигналов тока статора для диагностики и контроля асинхронных двигателей оптимизированный для встраиваемых систем, «Машиностроение и техносфера XXI века»: Международная молодежная научная конференция, 13-19 сентября 2021 г. Крым.: сборник трудов: Изд-во ДонНТУ, 2021. - С. 345-353 ISSN 2079-2670

6. Морозов А. Л., Разработка прибора для непрерывного мониторинга технического состояния асинхронных двигателей применительно к нефтегазовой промышленности, 15-я Международная выставка и конференция по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ “RAO CIS Offshore 2021”, 21-24 сентября 2021, Санкт-Петербург.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 2 статьи, которые цитируются в базе Scopus и 2 статьи в журналах и научных изданиях определенных ВАК:

1. A. L. Morozov et al., "Microcontroller Realization of an Induction Motors Fault Detection Method based on FFT and Statistics of Fractional Moments," 2021 29th

Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2021, pp. 65-70, doi: 10.1109/MED51440.2021.9480322.

2. A. L. Morozov, R. R. Nigmatullin, P. Lino, G. Maione and S. Stasi, "An Improved Nonparametric Method for Fault Detection of Induction Motors Based on the Statistics of the Fractional Moments," 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2018, pp. 386-391, doi: 10.1109/CCTA.2018.8511461.

3. Raoul R. Nigmatullin, Arsenii L. Morozov, Jan Awrejcewicz Michal Ludwicki. Original Research Article, Modeling and experimental validation of walking processes. *Biocybernetics and Biomedical Engineering* 40 (2020) pp. 200 – 210, doi: 10.1016/j.bbe.2019.03.005.

4. Морозов А. Л Комбинированный метод обработки вибросигналов для диагностики и контроля асинхронных двигателей оптимизированный для встраиваемых систем *Контроль. Диагностика.* Том 24, № 10, 2021, С. 18-27. ISSN: 0201-7032.

5. Морозов А. Л., Статистическая методика и алгоритм диагностики асинхронных двигателей на основе вибросигналов, *Вестник Казанского Государственного Технического Университета имени А. Н. Туполева*, 2021, №2, с. 62-67, изд. Казанского государственного технического университета (КНИТУ-КАИ) ISBN 2078-6255.

Личный вклад автора заключается в проведении анализа существующих методов обнаружения и диагностики технического состояния электродвигателей; развитии и разработке метода моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей; разработке алгоритма обработки сигналов асинхронных двигателей для решения задач контроля и диагностики в непрерывном режиме; разработке типовой структурной схемы, алгоритмического и программного обеспечения для систем, реализующих предложенный метод; разработка приборка контроля и диагностики технического

состояния асинхронных двигателей в непрерывном режиме; проведение экспериментальных исследований предложенного метода.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Она изложена на 180 страницах и содержит 53 рисунка и 26 таблиц. Список литературы включает 171 наименование.

В первой главе проведен статистический и теоретический анализ распределения неисправностей электродвигателей. Проведен аналитический обзор методов обнаружения и диагностики неисправностей, выделены их основные особенности. Сформулированы и поставлены задачи исследования.

Во второй главе представлена разработка и научно-техническое обоснование метода моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей, также приведена разработка алгоритмов обработки токовых и вибрационных сигналов АД, на основе разработанного метода, для решения задач контроля и диагностики в непрерывном режиме, представлены математические модели токовых сигналов в различных технических состояниях АД, представлено экспериментальное исследование разработанных алгоритмов на симулированных данных, полученных с помощью указанных математических моделей.

В третьей главе представлено экспериментальное исследование разработанных алгоритмов на записанных токовых и вибрационных сигналах АД в различных технических состояниях при разных уровнях нагрузки машины.

В четвертой главе представлена разработка типовой структурной схемы, алгоритмического и программного обеспечения систем непрерывного контроля и диагностики технического состояния электродвигателей, создание на их основе экспериментального стенда, разработка прототипа прибора непрерывного

контроля и диагностики технического состояния электродвигателей, а также экспериментальное исследование прототипа прибора на разработанном стенде.

В заключении приведены основные выводы, обобщены результаты, полученные в ходе выполнения работы, а также предложены направления для дальнейших исследований по этой актуальной теме.

ГЛАВА 1. Аналитический обзор методов контроля и диагностики электродвигателей

Электродвигатели являются одними из самых распространенных преобразователей энергии. На их долю приходится около 50% от общемирового энергопотребления [11]. Данные машины, в работе [12], классифицируются по выходной мощности: малые двигатели с выходной мощностью до 0,75 кВт, двигатели среднего размера с выходной мощностью от 0,75 кВт до 375 кВт и крупные электродвигатели с выходной мощностью 375 кВт и более. Наибольшую долю в общемировом энергопотреблении занимают двигатели среднего размера с выходной мощностью от 0,75 кВт до 375 кВт и крупные электродвигатели с выходной мощностью 375 кВт и выше [12]. Данные машины как правило применяются в промышленности, коммерческой сфере, инфраструктурных системах и жилом секторе. В данных применениях особенно важна безопасность и надежность. Среди данных машин наиболее распространены двигатели асинхронного типа. В связи с этим вопрос обеспечения надежности и максимальной эффективности приводов данного типа приобретает большую актуальность. Этому свидетельствует и большее количество научных публикаций, посвященных обнаружению неисправностей именно асинхронных двигателей, нежели синхронных и двигателей постоянного тока. Так, на момент подготовки данного материала – май 2022 – в цифровой библиотеке IEEE Xplore по запросу «induction motor fault detection» (с англ. обнаружение неисправностей асинхронных двигателей) найдено 2514 работ, а по запросам «synchronous motors fault detection» (с англ. обнаружение неисправностей синхронных двигателей) и «dc motor fault detection» (с англ. обнаружение неисправностей двигателей постоянного тока) – 655 и 536 работ соответственно.

В связи с вышенаписанным в данной работе рассматриваются задачи контроля и диагностики именно асинхронных электродвигателей.

1.1 Типовые неисправности асинхронных двигателей

1.1.1 Классификация неисправностей

Асинхронные двигатели (АД) подвержены различным неисправностям. Классификация типовых неисправностей представлена на рисунке 1.1:

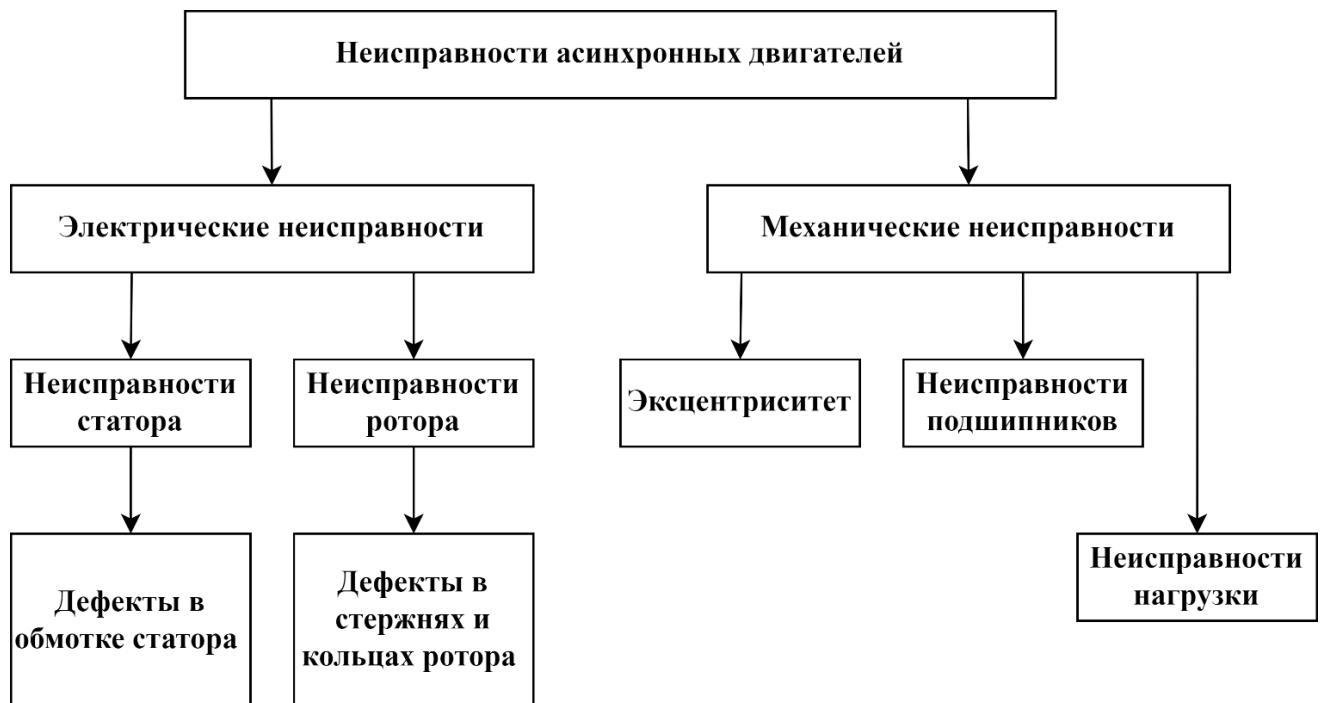


Рисунок 1.1 – Классификация типовых неисправностей асинхронных двигателей

Неисправности АД делятся на механические и электрические [13]. Наиболее частыми механическими неисправностями, согласно литературе [6], являются эксцентриситет воздушного зазора и неисправности подшипников.

Электрические неисправности делятся на неисправности статора и неисправности ротора. Основные неисправности статора – разрыв и короткое замыкание обмотки статора, а основные неисправности ротора – дефекты в стержнях и кольцах ротора.

Распределения причин отказов АД, согласно статистическим исследованиям Института Инженеров Электротехники и Электроники (англ. Institution of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)) [14] и Исследовательского Института Электроэнергетики (англ. Electric Power Research Institute (EPRI)) [15], представлены на рисунке 1.2:

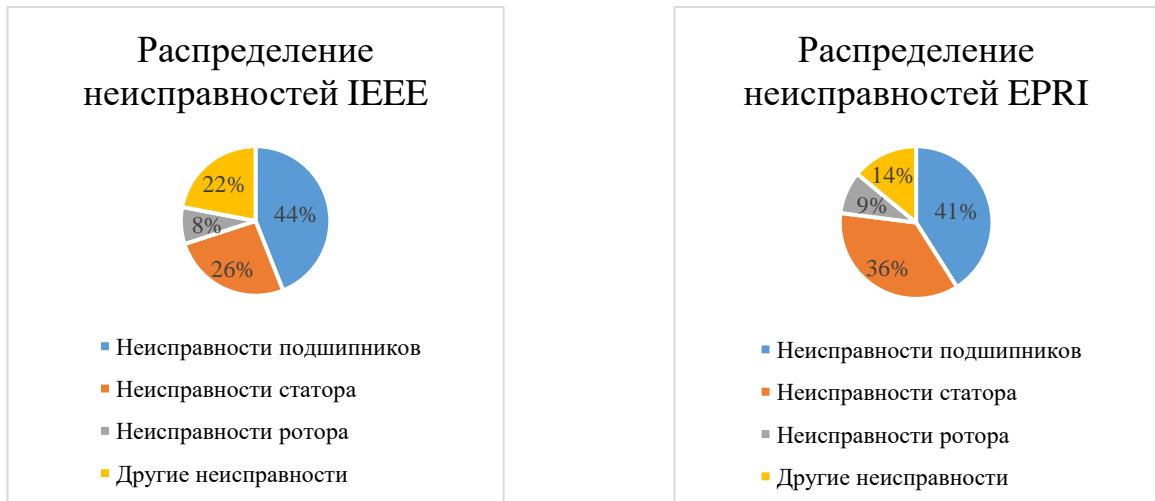


Рисунок 1.2 – Распределение неисправностей согласно (а) – IEEE и (б) – EPRI

Неисправность подшипников является причиной отказа АД в более 40% случаев от общего числа отказов АД. Данная неисправность одна наиболее частых и приводит к повышению вибраций и уровню шума АД [16]. Причинами зарождения дефектов в подшипниках являются: (а) усталостный износ материала, (б) повышенный эксцентриситет воздушного зазора, (в) дисбаланс нагрузки АД,

(г) несоосность вала, (д) повышенные вибрации рядом стоящего оборудования и (е) колебания крутящего момента.

К основным неисправностям статора относят разрыв и короткое замыкание обмотки статора [17]. Разрыв обмотки статора, вызывает рост амплитуды обратной последовательности тока статора до значений прямой последовательности [6]. Данная неисправность детектируется путем сравнения значений амплитуд прямой и обратной последовательностей тока статора, и при приближении этих значений срабатывает система защиты. Короткое замыкание обмоток статора – одна из наиболее сложных в обнаружении неисправностей. Названный дефект в основном возникает по следующим причинам [18]: (а) повышенная температура сердечника; (б) загрязнение маслом, влагой, пылью; (в) электрические разряды; (г) течь в системах охлаждения.

1.1.2 Эксцентриситет ротора

В технической литературе выделяют явление, при котором воздушный зазор между ротором и статором становится неравномерным. Данное явление называют эксцентриситетом [6]. Когда АД работает с эксцентриситетом, увеличивается износ подшипников и других элементов, что может привести к неисправностям. В источниках [19–21] отмечается, что эксцентриситет является первопричиной более 80% отказов АД, поэтому эксцентриситет допустимо отнести к одному из самых критически важных для обнаружения дефектов. Различают три основных типа эксцентриситета: статистический, динамический и смешанный.

Эксцентриситет возникает по следующим причинам: (а) некачественная сборка мотора с несбалансированным или нецентрированным ротором, (б) смещение вала, (в) износ или поломка подшипников, (г) несбалансированная нагрузка и (д) неисправности коробки передач [22].

Эксцентриситет создает неравномерную нагрузку на подшипники, что в конечном итоге, приводит к их существенному износу. Более того, радиальная магнитная сила, возникающая при эксцентриситете, действует на сердечник статора и подвергает обмотки статора ненужным и потенциально вредным вибрациям.

1.1.3 Неисправности ротора

Поломка и трещины в стержнях и кольцах ротора являются причиной отказа в 5-10% от всех отказов АД [14, 15]. Основными причинами данных неисправностей являются: (а) тепловые напряжения, возникающие в стержнях ротора; (б) магнитные напряжения, возникающие в результате несимметричности магнитных сил, электромагнитного шума, и вибраций; (в) загрязнение и коррозия ротора химическими материалами и влажностью; (г) усталостный износ материалов, создающий неравномерные механические нагрузки.

Значительное количество научных публикаций посвящено обнаружению неисправностей именно в стержнях ротора. Это говорит об открытости и значимости вопроса обнаружения данного дефекта.

В работе [23] отмечаются последствия, возникающие в случаях, если данная неисправность не была вовремя обнаружена и своевременно устранена:

- сломанные стержни могут вызвать искрение, что является серьезной проблемой во взрывоопасных зонах;
- если один или несколько стержней ротора сломаны, через исправные стержни проходит повышенный ток, что приводит к повреждению сердечника ротора из-за повышенных температур вблизи сломанных стержней и тока, проходящего через сердечник между сломанными стержнями и исправными;

- сломанные стержни вызывают колебания крутящего момента и частоты вращения ротора, вызывая преждевременный износ подшипников и других компонентов;
- большие воздушные карманы в обмотках ротора из литого под давлением алюминиевого сплава могут вызывать неравномерное расширение стержня, приводящее к изгибу и дисбалансу ротора, что вызывает высокие уровни вибрации из-за преждевременного износа подшипников;
- если ротор вращается с высокой радиальной скоростью, обломки стержней ротора могут выскочить из паза под действием центробежной силы и удариться об обмотку статора, что приведет к полному отказу АД;
- повышенный эксцентриситет (к которому приводит асимметричность электромагнитных полей, вызванная повреждениями электрических частей ротора), как статический, так и динамический, может привести к трению ротора об обмотку статора, что приведет к повреждению сердечника ротора и даже к аварийному отказу.

1.2 Методы контроля и диагностики асинхронных двигателей

Методы контроля и диагностирования технического состояния АД классифицируются по измеряемым параметрам:

- электрический ток статора;
- вибрации на невращающихся частях;
- акустические колебания и акустическая эмиссия;
- крутящий момент;
- электрический и магнитный потоки;
- температура.

Методы токовой диагностики и вибродиагностики получили наибольшее распространение из-за удобства и простоты измерения. Данные подходы позволяют обнаружить основные неисправности АД на этапе зарождения, что делает их привлекательными для систем мониторинга технического состояния АД. Данные подходы, а также применяемые методы обработки сигналов тока и вибраций рассмотрены в параграфах 1.3 и 1.4.

Методы, основанные на измерении акустических колебаний схожи с методами на основе измерений вибраций, поскольку акустические колебания генерируются механическими частями машины [24]. Однако для некоторых применений, акустические методы являются более предпочтительными, поскольку они не требуют прямого контакта с АД. Анализ акустических сигналов используется преимущественно для обнаружения механических неисправностей [13, 25]. Недостатком данных методов является высокая зашумленность сигналов из-за влияния рядом стоящего оборудования.

Методы на основе измерения крутящего момента применяются для обнаружения неисправностей, которые вызываются колебаниями крутящего момента [13]. Крутящий момент в воздушном зазоре представляет собой совокупное воздействие всех связей потоков и токов как в статоре, так и в роторе [26], поэтому большинство возможных неисправностей АД оказывают влияние на крутящий момент. Основным недостатком данных методов является высокая стоимость датчиков для измерения крутящего момента [27]. В работе [28] отмечается, что ещё одним недостатком таких методов является снижение точности измерения в динамических режимах работы АД.

Методы электромагнитной диагностики основаны на измерении электрического и магнитного потоков внутри или вблизи АД [6, 13, 25]. Эти методы применяются в большей степени для диагностики эксцентриситета за счет обнаружения неоднородностей электромагнитных полей. Отмечается, что данные

методы имеют высокую точность определения асимметрии и как следствие диагностирования [29–31]. Такие подходы широко распространены для диагностики высоковольтных машин. К недостаткам данных подходов относят сложность установки датчиков, которая требует демонтажа и разбора АД, либо осуществления монтажа датчиков на этапе производства [25, 32]. Кроме того, вышеупомянутые методы являются инвазивными, поэтому требуют прямого доступа к объекту диагностирования, что также является затруднительным в некоторых применениях.

Методы тепловой диагностики основаны на измерениях температуры одного или нескольких узлов АД. Для измерения температурных характеристик двигателя используют контактные и бесконтактные датчики температуры, а также тепловизоры [13, 25]. Преимуществами контактных датчиков температуры, таких как термисторы и термопары, является низкая стоимость и высокая точность измерений, однако они требуют прямого доступа к машине. Бесконтактные датчики температуры являются более дорогими, также они подвержены влиянию окружающей среды: (влажности, пыли, температуры окружающего воздуха). Тепловизоры позволяют оценивать температурное состояние АД более полно. Тепловизоры, как правило используются для периодического обследования АД, нежели для мониторинга. К недостаткам тепловизионного оборудования относят значительную стоимость и ограничение по нижнему пределу температуры [33].

Методы теплового мониторинга позволяют обнаружить неисправности подшипников, а также локализовать обнаруженные неисправности. Недостатками методов тепловой диагностики является то, что неисправности обнаруживаются, когда она уже существенно развита, а также большая зависимость от окружающей среды. В частности, применение этих методов осложнено в условиях высокой температуры окружающей среды.

1.3 Методы токовой диагностики асинхронных двигателей

1.3.1 Общие сведения о методах токовой диагностики

Методы диагностики АД на основе анализа тока фаз статора являются перспективными и получают все большее распространение [5, 25]. Наиболее распространенные неисправности АД, такие как дефекты подшипников, неисправности ротора, статора и эксцентриситет, оказывают влияние на токи фаз, создавая дополнительные частотные компоненты в спектре [5, 25]. Следовательно, эти неисправности могут быть обнаружены с помощью токовой диагностики при применении соответствующего метода обработки токовых сигналов.

Методы анализа тока основаны на том, что ток, протекающий в обмотке статора, зависит не только от подаваемой мощности и электрического импеданса обмотки, но также включает в себя дополнительную составляющую, наведенную магнитным полем от вращающегося ротора [10]. Таким образом, обмотка статора выступает как элемент, чувствительный к дефектам ротора, и задача состоит в том, чтобы отделить ток статора, необходимый для вращения ротора, от дополнительного тока, наводимого самим ротором, в случае его неисправности.

Одним из преимуществ токовых методов диагностики является возможность измерения тока удаленно от АД, так как в некоторых случаях прямой доступ к машине затруднителен. Также во многих системах, электрические токи и напряжения измеряются в системах защиты, что позволяет снизить затраты на внедрение методов токовой диагностики в существующие установки.

Существуют международные стандарты, которые также приняты в Российской Федерации [10, 34], рекомендующие методы обработки токовых сигналов для извлечения диагностической информации о состоянии АД.

Основным недостатком токовой диагностики является сложность существующих методов обработки сигналов. Эта сложность вызвана наличием

доминирующей составляющей гармоник связанной с частотой сети питания, которая на несколько порядков превышает гармоники, вызванные неисправностями.

1.3.2 Метод анализа токовых сигнатур мотора

Одной из наиболее распространенных техник обработки токовых сигналов является сигнатурный анализ токовых сигналов моторов [10, 25, 35]. В англоязычной литературе данный метод называется Motor Current Signature Analysis (MCSA) [36]. Данный метод основан на анализе спектра токов фаз статора, а именно проверяются амплитуды гармоник связанных с неисправностями (сигнатуры неисправностей) на превышение заданных значений. Преобразование в частотную область осуществляется с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). БПФ имеет достаточно низкую вычислительную сложность - $O(n \log n)$ [37], что делает его пригодным для реализации в приборах контроля и диагностики на основе микроконтроллеров. Более того, БПФ входит в стандартную библиотеку CMSIS-DSP [38], что упрощает его внедрение в микроконтроллерах промышленного применения на базе распространённой архитектуры ядер ARM Cortex-M.

Недостатки MCSA связаны с требованием длительной выборки измерения и зависимостью от параметра скольжения двигателя.

Требование длительной выборки вытекает из свойства БПФ: частотное разрешение прямо пропорционально длине выборки. Требуемое частотное разрешение зависит от скольжения АД, которое может меняться в зависимости от мощности АД и нагрузки. В работе [39] отмечается, что требуемое частотное разрешение, для распознавания сигнатур дефектов в стержнях ротора составляет величину 0.01 Гц. Это соответствует выборке длиной 100 с. Использование

выборки такой длительности вызывает следующие сложности, при реализации таких алгоритмов в приборах непрерывного мониторинга:

- требуется большой расход памяти, которая сильно ограничена в микроконтроллерах. При частоте дискретизации 10 кГц 24-битного аналого-цифрового преобразователя, выборка длиной 100 секунд будет занимать примерно 9 мегабайт, тогда как объем оперативной памяти микроконтроллеров редко превышает нескольких сотен килобайт;
- требуется, чтобы в течении измерений АД находился в стационарном режиме работы. На практике двигатели часто переходят между различными стационарными режимами. Попадание такого перехода на выборку для анализа, сказывается достоверности результатов анализа MCSA;

Для корректной работы MCSA также необходима информация о скольжении двигателя, для того чтобы вычислять частоты сигнатур неисправностей. Эта информация вводится в систему либо вручную оператором, либо для этого ставят дополнительный датчик скорости вращения АД [40], на основе показаний которого вычисляется скольжение, либо для этого используются специальные алгоритмы вычисления скорости АД [36]. Любой из этих вариантов повышает сложность системы.

Другим недостатком MCSA является эффект спектральной утечки, связанный с тем, что при выполнении БПФ, полученные частоты могут не совпадать с частотами неисправностей, в этом случае амплитуды неисправностей уменьшаются и становятся трудноотличимыми.

В работе [41] предложена мультичастотная техника обработки сигналов для улучшения свойств БПФ. В англоязычном источнике техника называется Multirate Signal Processing (MSP). Эта техника основана на использовании децимации и интерполяции и позволяет избавиться от эффекта спектральной утечки, который

присутствует в MCSA. Вычислительная сложность данной техники выше, чем у БПФ, однако она остается приемлемой для реализации на микроконтроллерах – $O((n \log n)F_c)$. При применении этой техники необходимо выполнять БПФ столько раз, сколько сигнатур неисправностей, нужно исследовать. Недостатки данной техники, за исключением отсутствия спектральной утечки, совпадают с недостатками MCSA, так как в обоих подходах используется БПФ.

1.3.3 Метод отслеживания порядковых гармоник

Существует семейство методов [40, 42–45] основанных на отслеживании порядковых гармоник. В англоязычной литературе данный вид анализа называется Harmonic Order Tracking Analysis (НОТА). Данные методы позволяют сократить необходимое для анализа количество гармоник, за счет того, что спектр строится не от частоты сигнала, а от порядкового номера сигнатур неисправностей. Для вычисления спектра используется БПФ. В различных модификациях НОТА используются разные алгоритмы, для преобразования тока фаз статора в систему координат ротора. В работе [40] для этого используется датчик угла поворота для измерения угловой скорости, который синхронизирован с измерениями тока. Также датчик угла поворота используется для вычисления скольжения, что снимает необходимость задавать его вручную.

Недостатками НОТА являются: (а) необходимость дополнительного датчика углового положения; (б) при низком скольжении нужна длинная выборка, т.к. используется БПФ; (в) метод может дать неверные результаты, в случае наличия осцилляций нагрузки.

1.3.4 Методы анализа огибающей токовых сигналов

Существует группа методов, основанных на анализе огибающей тока. В работах [46–53] отмечается, что огибающая тока содержит такие же сигнатуры неисправностей, что и обычный токовый сигнал АД, только смещенные в частотной области на частоту питания АД. За счет этого смещения решается проблема «слияния» частоты питания с сигнатурами неисправностей. Для этого используют различные способы демодуляции, такие как: (а) эмпирическое разложение мод – Empirical Mode Decomposition (EMD), (б) дискретное вейвлет преобразование – Discrete Wavelet Transform (DWT), (в) дискретное преобразование Гильберта – Discrete Hilbert Transform (DHT), а также (г) преобразование Фурье. Основным преимуществом данных методов является отсутствие доминирующей частоты питания и отсутствие эффекта спектральной утечки. Также отметим, относительно низкую вычислительную сложность, которая зависит от реализации: EMD – $O(n \log n)$ [54], DWT – $O(n)$ [55], DHT – $O(n \log n)$ [56]. Недостатки данных методов, следующие: (а) требование высокой частоты дискретизации сигналов, а также (б) требования длительной выборки измерений.

В работе [39] предложен метод, лишенный указанных недостатков, основанный на анализе уменьшенной огибающей. Данный метод заключается в «отборе» измерений, в моменты, когда ротор проходит через один и тот же угол, что позволяет сократить анализируемую выборку, сохранив разрешение по частоте. Для преобразования в частотную область используется БПФ. Недостатком данного подхода является сложность определения критерия прохождения статора через определенный угол, так как этот критерий ложно срабатывает при высокой зашумленности токового сигнала. Стоит также отметить, что для сохранения разрешения по частоте, требуется длительная выборка сигнала, во время которой

АД работает с неисправностью. Отметим, что в упомянутой работе рассмотрена только возможность диагностирования только дефектов в стержне ротора и не рассмотрена диагностика других дефектов.

1.3.5 Параметрические методы

В работах [49, 57–60] методы MUSIC (Multiple Signal Classification) и ESPRIT (Estimation of the Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) адаптированы для решения задач диагностики и обнаружения неисправностей электрических машин. Данные методы позволяют обнаружить неисправности статора, дефекты в стержнях и кольцах ротора, эксцентриситет, дефекты подшипников и другие. Методы MUSIC и ESPRIT основаны на разделении измеренных сигналов на подпространство модельной составляющей и подпространство шума [61]. Данные методы позволяют осуществить преобразование временного сигнала в частотную область и при низком соотношении сигнал/шум обнаружить частотные компоненты, связанные с неисправностями. Преимуществом данных методов является то, что необходимо меньшее число отсчетов, чтобы обеспечить высокое частотное разрешение спектра, например в работе [62] рапортуется что для обнаружения дефектов в стержне ротора достаточно 256 отсчетов. Недостатком данных методов является высокая вычислительная сложность – $O(n^3)$ [59].

1.3.6 Методы высокого разрешения

Для решения проблемы высокой вычислительной сложности методов MUSIC и ESPRIT, предложены так называемые методы высокого разрешения [59, 63–66], являющиеся модификациями MUSIC и ESPRIT, которые получили названия ZMUSIC, и ZESPRIT, соответственно. Приставка «Z» - сокращение от слова zoom

(на англ. zoom – увеличение). Данные методы основаны на применении дециматора, для сокращения количества требуемых вычислений, при этом сохраняется разрешение по частоте и короткая длина выборки, а именно, в работе [59] – 3 секунды. Не смотря на эти преимущества, вычислительная сложность модифицированных методов по-прежнему велика для реализации в приборах мониторинга, где обработка данных выполняется непрерывно. Вычислительная сложность ZMUSIC и ZESPRIT – $O\left(\left(\frac{n}{A}\right)^3\right)$ и $O\left(\left(\frac{n}{A} - P_s + 1\right)^3\right)$, соответственно, где A – коэффициент децимации, P_s – параметр автокорреляционной матрицы [59].

1.3.7 Методы на основе векторов Парка

Метод на основе векторов Парка, в англоязычной литературе – Park Vector Approach (PVA), является одним из наиболее эффективных и наименее вычислительно затратных алгоритмов обнаружения неисправностей АД. Данный метод является одним из методов диагностики, в котором анализируются сигналы во временной области, а не в спектральной. Этот подход используют в промышленности для выявления таких неисправностей трехфазных АД, как: (а) асимметрия напряжения питания, (б) эксцентриситет воздушного зазора, (в) межвитковые дефекты в обмотке статора, (г) несоосность механических соединений, (д) обрыв в обмотке фазного ротора и (е) дефекты стержней и колец короткозамкнутого ротора [67–70]. Данный метод используют для двигателей с питанием непосредственно от сети или через инвертор для обнаружения как одиночных неисправностей, так и их сочетаний. В работе [71] отмечается, что PVA позволяет обнаружить наличие неисправности, но при этом не позволяет идентифицировать тип(ы) неисправности(ей). Для решения этой проблемы разработаны модификации PVA:

- расширенный подход на основе векторов Парка, в англоязычной литературе – Extended Park Vector Approach (EPVA) [67, 68];
- подход на основе множества векторов Парка, в англоязычной литературе - Multiple Park Vector Approach (MPVA) [71].

Данные подходы являются комбинациями PVA и БПФ. EPVA заключается в том, что для составляющих вектора Парка вычисляются спектры, с помощью БПФ, в которых далее анализируются сигнатуры неисправностей. Данный подход похож на MCSA, однако отличается тем, что компоненты вектора Парка вычисляются на основе всех компонент ток фаз статора, что делает EPVA более полным, чем MCSA. Кроме того, в MCSA часто бывает сложно удалить из сигнала тока составляющую основной частоты питания, не исказив при этом сигнатуры неисправностей. В EPVA такая проблема отсутствует, поскольку составляющая основной частоты питания автоматически устраняется при преобразовании Парка. MPVA заключается в том, что сначала вычисляются спектры БПФ токов фаз статора АД, затем на основе амплитуд сигнатур неисправностей генерируются сигналы, которые отдельно анализируются с помощью классического PVA. Такой подход позволяет отдельно анализировать наличие тех или иных неисправностей, присутствующих в некой случайно комбинации, и степень развития дефектов. EPVA и MPVA включают в себя БПФ, поэтому они наследуют все основные преимущества и недостатки БПФ.

1.3.8 Метод Прони

В работах [72–80] предложены методы диагностики неисправностей АД на основе модифицированного метода Прони. Данные подходы основаны на модели Прони, фитинг которой позволяет оценить амплитуды характеристических частот, связанных с сигнатурами неисправностей. Этот подход позволяет использовать короткие выборки сигналов с низкой частотой дискретизации, так как длина

выборки определяется порядком модели, а частота дискретизации – максимальной частотой анализируемого сигнала. Например, в работе [72] порядок модели был выбран равным 7, соответствующая длина выборки – 3 миллисекунды. Привлекательными особенностями данного метода является отсутствие спектральной утечки, а также возможность отслеживания изменений амплитуд сигнатур неисправностей, что позволяет использовать данные метод как при устоявшихся режимах работы АД, так и во время переходных процессов. Для использования этого метода необходимо решить задачу оптимального фитинга, которая усложняется наличием шумов и другими случайными составляющими, присутствующими в исходном измеренном сигнале. Данные проблемы являются основными, которые не позволяют использовать данный подход в надежных системах мониторинга технического состояния АД. В работах [72–74] предложены частные решения этих проблем, в которых применяется сложная предобработка исходных сигналов с использованием полосовых фильтров высоких порядков для практически полного удаления всех составляющих сигнала, кроме тех, которые сохраняются для исследования. В этих работах задача оптимизации решается с помощью метода наименьших квадратов, который имеет высокую вычислительную сложность – $O(n^3)$, но за счёт малого количества отсчетов, данная проблема нивелируется. Данная группа методов является новой и перспективной, однако проблемы выбора и обоснования критериев оптимального фитинга и выбора порядка модели являются открытыми и нерешенными. В работах [81–84] найден физический смысл метода Прони и показано, что он может быть применен к сильно-коррелированным или к так называемым почти-периодическим данным. Именно так они определены в работах [81–84]. Если влияние неконтролируемых параметров становится существенным, то данные искажаются, память между последовательными измерениями ослабевает, и они становятся почти-воспроизводимыми. В этом случае подгоночная функция меняется и необходимо

использовать уже другую функцию, полученную в работе [83]. Однако данные подходы ранее не были достаточно исследованы в задачах контроля и диагностики технического состояния двигателей.

1.3.9 Методы искусственного интеллекта

В последнее время широкое распространение получают методы на основе искусственного интеллекта (ИИ). В работе [6] выделяются следующие основные подходы ИИ, применяемые для диагностики и обнаружения неисправностей АД: (а) нейронные сети, (б) нечеткая логика, (в) экспертные системы и (г) машинное обучение. Данные подходы не зависят от модели системы и обладают большой степенью обобщения. Благодаря независимости эти методы могут использоваться внутри других и/или использовать несколько методов, объединенных между собой в комбинацию. Методы на основе ИИ требуют обязательный предварительный этап – обучение. Для обучения необходимо иметь большой объем данных, для каждого состояния, которое необходимо обнаруживать и/или оценивать. Методы ИИ используются в процессе принятия решений и кластерного анализа, при этом диагностические признаки задаются предварительно. Для задания диагностических признаков используются, как правило, классические методы, основанные на апробированных моделях.

1.3.9.1 Нейронные сети

Нейронные сети (НС), являются одним из подходов ИИ. НС представляют собой структуру из нейронов, каждый из которых выполняет простые арифметические операции. НС имитируют поведение человеческого мозга. В работе [85] предложен метод мониторинга технического состояния подшипников качения асинхронного тягового электродвигателя локомотивов, где задача

классификации решалась с помощью искусственных НС. В работе [86] предложен метод обнаружения дефектов в стержнях ротора, в котором используется кратномасштабный анализ для построения базисных вейвлетов и быстрое вейвлет преобразование для получения диагностических признаков, а для принятия решения используется НС, обученная методом обратного распространения ошибки.

1.3.9.2 Нечеткая логика

Нечеткая логика (НЛ) так же, как и НС является одним из подходов, входящих в арсенал методов ИИ. НЛ является более мощной вариацией традиционной логики, в которой применяются не только бинарные значения, такие как истина и ложь, а гораздо большее число возможных значений. Благодаря этому представление информации становится более приближенной к мышлению человека. Системы НЛ способны обрабатывать нечеткие входные параметры с помощью нечетких правил «если-то», на основе априорных знаний. В работе [87] НЛ используется для обнаружения дефектов в роторе, с помощью подачи на вход НЛ остаточного тока статора. В работе [88] исследуется диагностика поломки стержней ротора в ветряной турбине на базе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором с использованием системы нечеткой логики для анализа спектра мощности токов статора.

1.3.9.3 Экспертные системы

Экспертные системы (ЭС) представляют собой системы, способные заменить полностью или частично специалиста-эксперта. ЭС состоят из базы знаний, механизмов логических выводов и подсистемы объяснений [89]. Базы знаний, применяемые для решения задач контроля и диагностики АД, включают в себя: (а) информацию об узлах, (б) датчиках, (в) программном обеспечении,

(г) аппаратных ресурсах, включая среду сбора данных и (д) диагностические алгоритмы. Разработка и обучение ЭС является сложным, долгим и дорогостоящим процессом [6]. В работе [90] разработана база знаний для ЭС, предназначенная для диагностики ротора АД в непрерывном режиме на основе мгновенных значений тока статора. Предложенная база знаний организована как двухуровневая система. Первый уровень предназначен для первичной диагностики с помощью MCSA, он является более простым и требует всего несколько параметров тестируемой машины. Второй уровень активируется при обнаружении дефекта в роторе на первом уровне. Второй уровень позволяет более точно локализовать дефект и оценить количество поврежденных стержней ротора. Для второго уровня требуется подробная спецификация тестируемой машины. В работе [91] экспертные системы применяются для диагностики локомотивного асинхронного электродвигателя.

1.3.9.4 Машинное обучение

Машинное обучение (МО) является одним из подходов ИИ, в котором решение задачи достигается не прямым решением, а обучением за счет применения решений множества сходных задач. МО образовалось в результате разделения науки о нейросетях на методы обучения сетей и виды топологий их архитектуры. Метод опорных векторов, в англоязычной литературе Support-Vector Machine (SVM), является одним из самых широко применяемых подходов МО для задач контроля и диагностики АД. В работе [92] предложен метод обнаружения поломки стержней ротора с помощью комбинации SVM и MCSA. В работе [93] построена предиктивная модель для прогнозирования технического состояния подшипников АД на основе вейвлет разложения тока статора, полученная с помощью обучения методом SVM.

1.3.9.5 Заключение по методам искусственного интеллекта

Методы на основе ИИ позволяют решить задачу по принятию решения. Данные подходы за счет своей универсальности и обособленности применяются не только одиночно, но и в комбинациях для повышения эффективности и точности. При этом предобработка сигнала и расчет критериев происходит вне методов ИИ, а предварительно. Для подобной предварительной обработки как правило применяются классические методы контроля и диагностики технического состояния АД. Таким образом обобщенно оценить параметры методов диагностики на основе ИИ, такие как требуемая длительность выборки данных и вычислительная сложность – невозможно, поскольку каждая реализация имеет свою специфическую предобработку с помощью классических методов и свои методы ИИ. Однако, очевидно, что требуемая длительность выборки данных и вычислительная сложность будут не меньше, чем у классических методов, так как в данных подходах применяются классические методы совместно с методами ИИ. Другой важной особенностью методов ИИ является необходимость предварительных обучающих мероприятий, которые являются долгими и дорогостоящими [6]. Для обучения требуются большие массивы данных двигателей в различных состояниях и условиях, которые необходимо обнаруживать и диагностировать.

1.3.10 Статистика дробных моментов

Недавно был разработан новый статистический подход, названный Статистикой Дробных Моментов (СДМ), для различения сигналов с низким отношением сигнал/шум [94, 95]. Сигналы преобразуются в пространстве дробных моментов, где их можно различать и группировать по степени их коррелированности к друг другу. СДМ чрезвычайно чувствительна к очень

небольшим различиям между исследуемыми сигналами. Это позволяет представить и описать любую случайную последовательность данных в пространстве дробных моментов [94, 96, 97]. Функция обобщенного среднего (ФОС) аппроксимируется линейной комбинацией экспоненциальных функций, благодаря чему случайные последовательности представляются в виде небольшого числа параметров (намного меньшего, чем количество данных). Это представление удобно для сравнения различных последовательностей, имеющих разное число точек в исследуемых выборках. Заметим, что сравнение выборок между собой, имеющих различное число точек в обычной статистике не представляется возможным.

ФОС и другие функции, полученные в рамках СДМ, широко используются для решения задач классификации. В работе [97, 98] данный подход применяется для автоматической классификации видеопотоков. В работе [99] с помощью ФОС были получены калибровочные кривые для двухфазных электрических смесей.

СДМ разработал и представил профессор Нигматуллин Равиль Рашидович. Также вклад в развитие и применение СДМ внесли Г. Смит [100], Г. Майоне, Д. Стриколи [97], С. Осокин, Р. Шами [99], Н. Перминов, М. Смирнов [101].

Данный подход имеет большой потенциал применения в диагностике АД, поскольку задачи классификации в диагностике являются одними из основных. Вычислительная сложность ФОС - $O(n^2)$, что является достаточно большим значением, однако в данном случае n это количество рассматриваемых моментов. В цитируемых работах выше подобрано оптимальное количество рассматриваемых моментов $n = 75$. Таким образом за счет малого количества требуемых итераций, ФОС является инструментом, подходящим для реализации в системах работающих в непрерывном режиме на базе микроконтроллеров.

Подходы СДМ ранее не применялись в диагностике АД, однако они обладают большим потенциалом, так как могут быть внедрены в системы мониторинга технического состояния АД в непрерывном режиме, за счет своей

эффективности и высокой чувствительности, которая уже была апробирована в других задачах [97, 101, 102].

1.3.11 Сравнение методов токовой диагностики

Сравнение рассмотренных методов токовой диагностики с точки зрения преимуществ и недостатков реализации в приборах мониторинга технического состояния АД представлено в таблице 1.1:

Таблица 1.1 – Сравнение методов токовой диагностики

Название метода	Преимущества	Недостатки	Вычислительная сложность	Требуемая длина выборки, с	Обнаруживаемые неисправности
Метод анализа токовых сигнатур мотора (MCSA)	Низкая вычислительная сложность	Длинная выборка измерений; зависимость от скольжения АД; спектральная утечка; доминирующая гармоника с частотой питания	$O(n \log n)$	100	Неисправности подшипников, неисправности ротора, эксцентриситет
Методы отслеживания порядковых гармоник (НОТА)	Низкая вычислительная сложность; скольжение вычисляется автоматически; для анализа неисправностей используется сокращенный спектр	Длинная выборка измерений; спектральная утечка; подверженность шумам, при осцилляциях нагрузки; требуется дополнительный датчик скорости вращения ротора; доминирующая частота питания	$O(n \log n)$	100	Неисправности подшипников, неисправности ротора, эксцентриситет
Анализ огибающей	Низкая вычислительная сложность; отсутствие эффекта спектральной утечки, отсутствие доминирующей частоты питания; для анализа используется сокращенная выборка	Длительная выборка сигнала; высокая частота дискретизации; не рассмотрен вопрос обнаружения других дефектов	EMD – $O(n \log n)$ DWT – $O(n)$ DHT – $O(n \log n)$ FFT – $O(n \log n)$	100	Неисправности ротора
Параметрические методы (MUSIC, ESPRIT)	Короткая выборка сигнала; отсутствие эффекта спектральной утечки	Высокая вычислительная сложность	$O(n^3)$	< 1	Неисправности подшипников, неисправности

					ротора и статора, эксцентриситет
Методы высокого разрешения	Высокое разрешение по частоте; короткая выборка сигнала	Высокая вычислительная сложность	ZFFT - $O\left(\frac{n}{A} \log \frac{n}{A}\right)$ ZMUSIC - $O\left(\left(\frac{n}{A}\right)^3\right)$ ZESPRIT - $O\left(\left(\frac{n}{A} - P_s + 1\right)^3\right)$	3	Неисправности ротора
Методы основе векторов Парка	Высокая чувствительность; низкая вычислительная сложность; отсутствие доминирующей частоты питания	Длинная выборка измерений; зависимость от скольжения АД; спектральная утечка	$O(n \log n)$	100	Неисправности подшипников, неисправности ротора и статора, эксцентриситет
Метод Прони	Короткая выборка сигнала; отсутствие эффекта спектральной утечки; низкая частота дискретизации	Требуется сложная предобработка сигнала; отсутствуют критерии выбора порядка модели и метода фитинга	$O(n^3)$	< 1	Неисправности ротора и статора
Методы ИИ	Высокая чувствительность; высокая степень автоматизации всей системы	Трудность обучения; трудность выбора диагностических признаков	Зависит от выбранных диагностических признаков	-	Неисправности, на которых осуществлялось обучение

1.4 Методы вибродиагностики асинхронных двигателей

1.4.1 Общие сведения о методах вибродиагностики

Вибродиагностика получила широкое распространение в области контроля и диагностики технического состояния АД, в том числе и среди коммерческих решений.

Широко известны компании, предоставляющие решения в области вибродиагностики Bruel&Kjaer (Дания), Metravib Instruments (Франция), PCB Piezotronics (США), АВВ (Швеция, Швейцария), ООО «ВАСТ» (Россия), ООО «ИНКОТЕС» (Россия), ООО «Вибро-Центр» (Россия), ООО «Димрус» (Россия).

Преимуществами вибродиагностики являются высокая точность диагностики, а также возможность локализации дефектов. К недостаткам вибродиагностики относят необходимость прямого доступа к АД, а также высокую чувствительность вибросигналов к помехам от рядом стоящего оборудования.

С помощью анализа вибраций АД обнаруживаются и диагностируются такие неисправности как: (а) дефекты подшипников, (б) ослабление крепления опор, (в) дефекты электромагнитной системы (обрыв стержней ротора), (г) эксцентриситет воздушного зазора и другие [25].

1.4.2 Методы контроля общего уровня вибраций и пик-фактора

Существуют различные методы вибродиагностики. Простейшими являются методы на основе контроля общего уровня вибраций и пик-фактора. Метод контроля общего уровня вибраций заключается в измерении среднеквадратичного отклонения виброускорений и виброскоростей и отслеживании тренда их изменения во времени [103]. Метод пик-фактора заключается в контроле значения пик-фактора. Пик-фактором является отношение максимальной амплитуды, в исследуемом временном окне, к среднеквадратичному отклонению сигнала.

Превышение пик-фактора некоторого заранее заданного значения свидетельствует о появлении ударных импульсов. Большое количество ударных импульсов говорит о возможной проблеме в подшипниках и дальнейшая эксплуатация машины опасна. Данные подходы позволяют лишь грубо оценить состояние. Зарождающиеся дефекты не могут быть обнаружены с помощью этих методов, поскольку они оказывают слабое влияние на диагностические признаки [103], поэтому неисправности могут быть обнаружены только когда они уже достаточно сильно развиты.

1.4.3 Анализ Фурье-спектра вибросигналов

Наиболее чувствительными являются методы спектральной диагностики, однако они и более сложны в реализации. Данные методы являются более перспективными и с учетом тенденции развития производительности микроконтроллерных систем могут быть реализованы в приборах мониторинга. Далее рассмотрены преимущества и недостатки этих методов, с точки зрения реализации в приборах контроля и диагностики, известных спектральных методов вибродиагностики.

БПФ является одним из самых распространенных способов преобразования сигналов в частотную область [104–107]. Преимуществом БПФ является низкая вычислительная сложность $O(n \log n)$. Однако БПФ обладает следующими недостатками:

- требование длительной выборки сигнала для обеспечения высокого разрешения по частоте, а именно 100 с для обеспечения разрешения 0,01 Гц;
- наличие двух доминирующих гармоник, соответствующих частоте питания АД и частоте вращения ротора, амплитуды которых в 5–10 раз превышают сигнатуры неисправностей;

- положение сигнатур неисправностей зависит от скольжения АД.

1.4.4 Метод анализа огибающей

В вибродиагностике широко применяется метод анализа огибающей временного сигнала [108]. Данный метод заключается в анализе низкочастотных колебаний мощности временного сигнала, которая представляет из себя модуляцию высокочастотных составляющих. Наличие ярко выраженных гармоник в спектре огибающей говорит о наличии дефектов, а их амплитуда – о степени развития дефектов. Выделение огибающей осуществляется либо с помощью амплитудных/фазовых детекторов [103] либо с помощью преобразования Гильберта [109, 110]. Для получения спектра огибающей используется, как правило БПФ, поэтому данные методы наследуют преимущества и недостатки БПФ [110, 111]. Однако некоторые исследователи отходят от БПФ и анализируют спектр огибающей с помощью дискретного вейвлет преобразования – Discrete Wavelet Transform (DWT) [112]. DWT обладает меньшей вычислительной сложностью и высокой степенью точности оценки сигнатур неисправностей. Анализ огибающей вибросигналов применяется для диагностирования дефектов подшипников и ротора [110–113].

Преимуществами метода анализа огибающей вибросигнала является: (а) высокая чувствительность, (б) способность обнаружить дефект на ранних стадиях, (в) способность локализации дефекта, а также (г) отсутствие доминирующей составляющих гармоник, связанных с частотами питания и вращения ротора. К недостаткам относят требования длительной выборки сигнала, зависимость от скольжения АД и спектральную утечку.

1.4.5 Методы эмпирического разложения

Метод эмпирического разложения широко применяется для вибродиагностики АД. В англоязычной литературе – Empirical Mode Decomposition (EMD) [114–116]. Также применяются его модификации – Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) [117] и Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition (CEEMD). Данный подход основан на преобразовании Гильберта-Хуанга, в англоязычной литературе – Hilbert-Huang Transform (ННТ). Метод заключается в разложении сигнала на составляющие, так называемые, существенные модальные функции, в англоязычной литературе – Intrinsic Mode Functions (IMF), что позволяет разделить интересующие гармоники, связанные с неисправностями. ННТ представляет собой частотно-временной анализ данных и не требует априорного функционального базиса. Функции базиса получаются адаптивно непосредственно из данных процедурами отсеивания EMD. Данный подход позволяет обнаруживать эксцентриситет, дефекты в стержнях ротора, дефекты в подшипниках [118]. Длина анализируемой выборки сигнала, согласно данным, приведенным в работе [119] – 10 секунд. Преимуществом EMD является высокая устойчивость к шумам, отсутствие необходимости подбирать базисные функции, низкая вычислительная сложность [119] – $O(n \log n)$. К недостаткам относят отсутствие критерия определения общего количества IMF, причем локализация дефекта возможна только при известных величинах скорости или скольжения АД.

1.4.6 Методы на основе вейвлет преобразования

Вейвлет преобразование широко применяется для вибродиагностики [103]. Одной из особенностей вейвлет преобразования является то, что разрешение по частоте не зависит от длины анализируемой выборки, поэтому вейвлет анализ подходит для реализации во встраиваемых системах. Суть метода заключается в

разложении сигнала в многообразных вейвлет базисах. Реконструкция сигнала, лишаясь нежелательных шумов и используется для анализа интересных частотных областей, в которых находятся сигнатуры неисправностей. Вейвлет анализ позволяют диагностировать основные неисправности АД. В работе [120] показана эффективность обнаружения дефектов в подшипниках с помощью обработки вибросигналов вейвлет преобразованием. В работе [121] продемонстрирована эффективность вейвлет анализа для диагностики подшипников качения газотурбинного двигателя. В работе [103] разработана методика контроля критических режимов работы высокоэнергетических установок на основе вейвлет анализа вибрационных сигналов.

Преимуществами вейвлет анализа является низкая вычислительная сложность – $O(n)$, меньшая требуемая длина выборки, по сравнению с БПФ, например в работе используется выборка длиной 1 секунда. Основными недостатками вейвлет анализа является: (а) отсутствие общепринятого критерия выбора базисного вейвлета, (б) трудности оценки вычислительной ошибки, которая накладывается на другие случайные факторы при обработке данных с помощью вейвлет преобразований, а также (в) сложность интерпретации результатов.

1.4.7 Методы искусственного интеллекта

Методы искусственного интеллекта (ИИ) применяются в вибродиагностике АД. Данные подходы для обработки вибросигналов аналогичны методам ИИ, применяем для токовой диагностики, которые рассмотрены в 1.3.9. В работе [122] предложена техника глубокого обучения нейронных сетей для обработки Фурье спектра вибрационных сигналов для диагностики АД на производстве. В работе [123] предложен метод диагностики таких неисправностей как дефекты в

подшипниках, неисправности статора и дисбаланс ротора, с помощью обработки вибрационных сигналов АД во временной области и анализом результатов с помощью экспертной системы. В работе [124] предложено сравнение методов извлечения диагностических признаков из вибрационного сигнала АД при диагностировании неисправности ротора: БПФ, полиспектра, кепстра и авторегрессионного анализа. Сравнение проводилось с помощью подхода машинного обучения – метода опорных векторов, в англоязычной литературе Support Vector Machine – и, как показывает результат, авторегрессионный анализ является наиболее эффективным.

1.4.8 Сравнение методов вибродиагностики асинхронных двигателей

Сравнение рассмотренных методов вибродиагностики с точки зрения преимуществ и недостатков реализации в приборах мониторинга технического состояния АД представлено в таблице 1.2:

Таблица 1.2 – Сравнение методов вибродиагностики

Название метода	Преимущества	Недостатки	Вычислительная сложность	Требуемая длина выборки, с	Обнаруживаемые неисправности
Методы контроля общего уровня и пик-фактора	Низкая вычислительная сложность	Невозможность локализации дефектов; невозможность обнаружения зарождающихся дефектов	$O(n)$	-	Неисправности подшипников
Анализ Фурье спектра	Низкая вычислительная сложность	Длинная выборка измерений; зависимость от скольжения АД; спектральная утечка; доминирующая гармоника с частотой питания; доминирующая гармоника с частотой вращения ротора	$O(n \log n)$	100	Неисправности подшипников, неисправности ротора, эксцентриситет
Анализ огибающей	Отсутствие доминирующих гармоник с частотами питания и вращения ротора; чувствительность, возможность локализации дефекта; низкая вычислительная сложность	Длинная выборка измерений; зависимость от скольжения; эффект спектральной утечки	$O(n \log n)$	100	Неисправности подшипников, неисправности ротора
Эмпирическое разложение (EMD)	Низкая вычислительная сложность; высокая устойчивость к шумам; отсутствие необходимости подбора базисных функций	Не определен критерий подбора количества мод; зависимость от скольжения АД	$O(n \log n)$	10	Неисправности подшипников, неисправности ротора

Вейвлет преобразование	Низкая вычислительная сложность	Сложность подбора базисных вейвлетов; сложность интерпретации результатов	$O(n)$	1	Неисправности ротора, статора и подшипников
Методы ИИ	Высокая чувствительность; высокая степень автоматизации всей системы	Трудность обучения; трудность выбора диагностических признаков	Зависит от выбранных диагностических признаков	-	Неисправности, на которых осуществлялось обучение

1.5 Выводы. Постановка цели и задач исследования

Обзор литературных источников показывает, что контроль и своевременное проведение диагностических проверок являются критически важным мероприятием в эксплуатации электродвигателей. Анализ различных стратегий технического обслуживания, показывает, что оптимальным с экономической и энергетической точек зрения является непрерывный мониторинг технического состояния. Данный подход требует разработки соответствующего метода, который реализуется в виде алгоритма обработки сигналов двигателя, обладающего вычислительной сложностью приемлемой для реализации данного алгоритма на микроконтроллерах с ограниченными ресурсами памяти и производительности.

Среди электродвигателей, в сегментах среднечастотных и высокоомощных двигателей наибольшее распространение получили асинхронные двигатели. Вклад асинхронных машин в общемировое энергопотребление составляет более 40%, что указывает на важность эффективного и безопасного использования данных двигателей. Кроме того, в самих сферах применения данного вида электродвигателей предъявляются повышенные требования к безопасности и надежности, к которым относятся: промышленность, инфраструктурные системы, жилой сектор. В связи с вышеуказанным наибольшую актуальность приобретают задачи контроля и диагностики двигателей асинхронного типа, поэтому в данной работе рассматриваются именно эти машины.

Рассмотрение статистических распределений типовых неисправностей АД, показывает, что наиболее сложными для обнаружения и при этом критически важными для раннего распознавания на этапе зарождения являются следующие дефекты: эксцентриситет воздушного зазора и дефекты ротора.

На основании подробного анализа, приведенного выше, рассмотрены и классифицированы методы диагностики АД. Подходы на основе измерения токов

и вибраций являются наиболее перспективными, так как основные виды неисправностей оказывают влияния на эти параметры. Также данные параметры являются удобными для измерения, в частности токовая диагностика может быть легко внедрена в существующие системы защиты АД, поскольку она уже включает в себя измерения тока фаз статора. Анализ литературы и приведенные выше таблицы 1.1 и 1.2 дают сравнительные характеристики методов токовой диагностики и вибродиагностики. Выделены основные преимущества и недостатки этих методов с точки зрения применения в системах мониторинга технического состояния в непрерывном режиме. Основными недостатками существующих методов являются:

- 1) требование длиной выборки сигнала;
- 2) высокая вычислительная сложность;
- 3) требование априорной информации о скольжении АД.

Метод моментов дробного порядка, основанный на применении статистики дробных моментов (СДМ) выделен как наиболее перспективный. Он позволяет добиться необходимых требований к длине выборки сигнала, приемлемую вычислительную сложность и работать без априорной информации о скольжении АД, при этом сохранив чувствительность к дефектам и возможность их идентификации. Для применения СДМ необходимо выбрать способ предобработки сигналов. Кроме этого, необходимо выполнить адаптацию выражений СДМ, для сопряжения с выбранным методом предобработки данных и снижения вычислительной сложности для реализации в системах контроля и диагностики технического состояния электродвигателей в непрерывном режиме.

На основе сделанных выводов сформулирована следующая **цель** исследования – развитие и разработка метода моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

7. Аналитический обзор текущего состояния вопроса контроля и диагностики электродвигателей, выявление недостатков существующих методов и путей их преодоления.

8. Развитие и разработка метода моментов дробного порядка для применения в задачах контроля и диагностики технического состояния электродвигателей.

9. Разработка алгоритмов непрерывного контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей на основе вибрационных и токовых сигналов.

10. Верификация разработанных алгоритмов на модельных и экспериментальных данных.

11. Разработка типовой структурной схемы, алгоритмического и программного обеспечения для системы непрерывного контроля и диагностики технического состояния электродвигателей, включающей прибор, в котором реализуется разработанный метод.

12. Создание экспериментального стенда для проведения удаленных измерений и применения приборов непрерывного контроля и диагностики технического состояния электродвигателей, а также проведение экспериментальных исследований разработанного метода на созданном стенде.

ГЛАВА 2. Развитие метода моментов дробного порядка и разработка алгоритмов на его основе для решения задач контроля и диагностики электродвигателей

2.1 Развитие и разработка метода моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики электродвигателей

2.1.1 Современные методы цифровой обработки сигналов

В главе 1 рассмотрены существующие методы обработки токовых и вибрационных сигналов АД, предназначенных для решения задач контроля и диагностики технического состояния. Существуют другие новейшие перспективные методы обработки сигналов, разработанные профессором Р. Р. Нигматуллиным и при его участии, которые ранее не применялись для данных задач, одними из них являются: статистика дробных моментов, сравнительный анализ положительных и отрицательных флуктуаций, неортогональный амплитудно-частотный анализ сглаженных сигналов, неортогональный комбинированный Фурье анализ сглаженных сигналов.

Неортогональный комбинированный Фурье анализ сглаженных сигналов (НОКФАСС) является ещё одним подходом неортогонального амплитудно-частотного анализа. В данном подходе частоты сигнала определяются с помощью преобразования Фурье, далее выбираются гармоники с наибольшими амплитудами, после чего амплитуды отобранных гармоник аппроксимируются методом наименьших квадратов [125–129]. Данный подход позволяет описать исследуемый сигнал небольшим количеством параметров, которое соответствует количеству отобранных гармоник в спектре Фурье. НОКФАСС может использоваться в задачах сжатия информации. Он обладает небольшой вычислительной сложностью – $O(n \log n)$, поэтому может быть реализован в

системах мониторинга технического состояния в непрерывном режиме на базе микроконтроллера. Однако НОКФАСС не подходит для решения задачи диагностики электродвигателей, поскольку частоты, которые «находит» НОКФАСС, определяются преобразованием Фурье, которое требует большой временной выборки, порядка 100 секунд [39]. Выборка длиной 100 секунд потребует нескольких мегабайт памяти, что является критически большим значением для маломощных систем на базе микроконтроллеров.

Неортогональный амплитудно-частотный анализ сглаженных сигналов (НАЧАСС) является новым подходом для представления сигналов с трендом, свободный от предположений о модели сигнала [130–132]. НАЧАСС является новой дискретной спектроскопией для анализа случайных сигналов и флуктуаций. Эта дискретная спектроскопия основана на успешном решении модифицированной задачи Прони для сильно коррелированных случайных последовательностей. В отличие от общей проблемы Прони, где предполагается, что набор частот неизвестен, в предложенном новом подходе распределение неизвестных частот может быть найдено для сильно коррелированных случайных последовательностей. Предварительная информация о распределении частот облегчает вычисления и придает дополнительную стабильность при наличии шума. Эта спектроскопия использует только информативно значимую полосу частот, которая помогает с высокой точностью подобрать заданный сигнал. Это означает, что любой случайный сигнал, измеренный во временной области, может быть «преобразован» в частотную область без модельных допущений, связанных с поведением этого сигнала в частотной области. Метод преодолевает существенные недостатки обычного метода Прони. К недостаткам НАЧАСС относится высокая вычислительная сложность – $O(n^4)$, поэтому данный метод не подходит для реализации в системах мониторинга технического состояния в непрерывном режиме на базе микроконтроллеров.

Сравнительный анализ положительных и отрицательных флуктуаций (САПОФ) позволяет выразить сигналы в виде десяти статистических параметров для сравнения и кластеризации случайных сигналов между собой [133–135]. В данном подходе отсутствуют ошибки обработки и допущения о модели данных. Из-за низкой вычислительной сложности метода его реализация целесообразна в системах обработки данных в непрерывном режиме на базе микроконтроллеров. Данный подход также рассматривался как потенциальный метод обработки данных для системы мониторинга технического состояния асинхронного двигателя в непрерывном режиме и был успешно апробирован для диагностики дефекта в стержне ротора и эксцентриситета [136]. Недостатком данного метода является необходимость проведения большой серии экспериментов для изучения зависимостей параметров САПОФ от различных параметров электродвигателей. Большое количество параметров САПОФ также усложняет систему принятия решений, поэтому данный подход больше подходит для систем на базе искусственного интеллекта, таких как экспертная система или нечеткая логика.

Статистика дробных моментов (СДМ) является подходом для: (а) описания, (б) изучения и сравнения сигналов не только в рамках классических статистических параметров, таких как среднее арифметическое, среднеквадратичное отклонение, дисперсия, т. е. значений моментов целочисленных порядков, но и моментов дробных порядков. В рамках СДМ разработаны расширенные уравнения для привычных статистических параметров: функция обобщенного среднего как аналог для среднего арифметического, обобщенный коэффициент корреляции Пирсона и т. д. Данные функции позволяют количественно описывать с помощью ограниченного числа параметров сигналы различной длины и сравнивать их между собой. В работах [94, 95, 97, 99, 100, 102] доказана эффективность СДМ в задачах сходных с задачами диагностики, а именно в задачах идентификации, распознавания, сравнения последовательностей с шумовыми сигналами и

последовательностей с зашумленными полезными сигналами, а также в задачах сжатия информации. На основании вышесказанного СДМ рассматривается автором диссертации, как наиболее перспективный подход для анализа сигналов электродвигателей с целью решения задач контроля и диагностики технического состояния.

2.1.2 Функция обобщенного среднего

В рамках статистики дробных моментов (СДМ) разработана функция обобщенного среднего (ФОС). ФОС для момента порядка p вычисляется согласно следующему выражению:

$$\Delta_{(mom_p)} = \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L y_i^{mom_p} \right)^{1/mom_p} \quad (1)$$

где y_i – входная последовательность, L – число точек; $p=1,2,\dots,P$ – целое положительное число; mom_p – момент порядка p . Момент порядка p вычисляется согласно выражению:

$$mom_p = \exp \left\{ \min + \frac{P}{P} (\max - \min) \right\} \quad (2)$$

\min , \max и P – параметры ФОС. Параметры \min и \max определяют диапазон моментов в логарифмической шкале; P – коэффициент, определяющий разрешение порядков момента.

В работах [94, 95, 97, 99–102] доказывается высокая чувствительность ФОС к малым статистическим различиям в сравниваемых сигналах.

2.1.3 Выбор и обоснование метода предобработки сигналов

Для вычисления параметров статистики дробных моментов (СДМ) данные необходимо предварительно обработать, чтобы выделить из исходных временных сигналов информативную для диагностики часть. При этом метод предобработки должен иметь приемлемую вычислительную сложность, чтобы этот метод был целесообразен для реализации в приборе мониторинга технического состояния электродвигателей в непрерывном режиме на базе микроконтроллера. В таблицах 1.1, 1.2 рассмотрены существующие методы обработки токовых и вибрационных сигналов электродвигателей, с точки зрения реализации в приборе мониторинга. Большая часть существующих методов основана на использовании быстрого преобразования Фурье (БПФ) в тех или иных комбинациях и модификациях. БПФ обладает невысокой вычислительной сложностью – $O(n \log n)$, что делает его удобным для реализации в системах на базе микроконтроллеров. Также большим преимуществом БПФ является его большая степень исследованности – в литературе присутствует большое количество публикаций, исследующих неисправности электродвигателей, на основе спектрального анализа с помощью БПФ.

Несмотря на эффективность и низкую вычислительную сложность БПФ также обладает следующими ограничениями:

- эффект спектральной утечки;
- разрешение по частоте обратно пропорционально длине выборки исследуемого сигнала.

Для нивелирования этих ограничений используют методы передискретизации [41], а также изменяют длину выборки исходного исследуемого

сигнала. Передискретизация является дорогостоящей операцией в части времени вычислений и ресурсов памяти, так как требуется несколько раз выполнить БПФ для получения амплитуд гармоник без эффекта спектральной утечки. Поэтому применение передискретизации не рассматривается.

Рассмотрим манипуляции с длиной выборки исследуемого сигнала. Изменение длины выборки исследуемого сигнала, также оказывает влияние на требуемый объем памяти и время вычислений. С одной стороны, длинная выборка временного сигнала позволяет получить спектр с высоким разрешением по частоте и, при этом требует: (а) большого объема памяти, (б) времени сбора данных и (в) увеличивает время вычислений; с другой стороны, короткая выборка требует меньшего вычислительного времени и памяти, но результирующий спектр имеет низкое частотное разрешение и интересующие гармоники могут стать неразличимыми. Исследуем следующий сигнал, состоящий из трех косинусоид:

$$i(t_i) = \cos(2\pi f_1 t_i) + 0.5 \cos(2\pi f_2 t_i) + 0.5 \cos(2\pi f_3 t_i) \quad (3)$$

где $f_1 = 50$ Герц, $f_2 = 49$ Герц, $f_3 = 51$ Герц. Временная переменная задается как $t_i = \frac{i}{f_s}$, где f_s – частота дискретизации, $i = 0, 1, \dots, N$, $N = f_s \cdot T$ – количество точек в зависимости от выбранного временного интервала сбора данных T . На рисунке 2.1 показан сигнал (3) при частоте дискретизации $f_s = 250$ Герц, голубая линия описывает оригинальный сигнал, красные маркеры указывают на отчеты с частотой f_s .

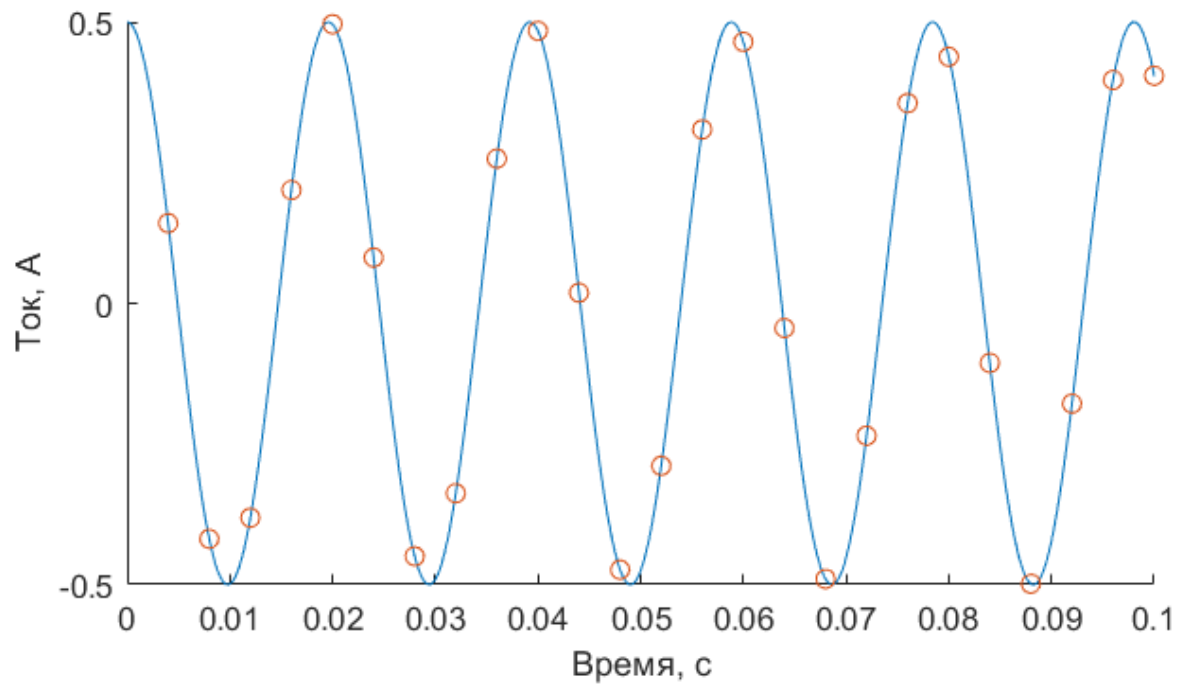
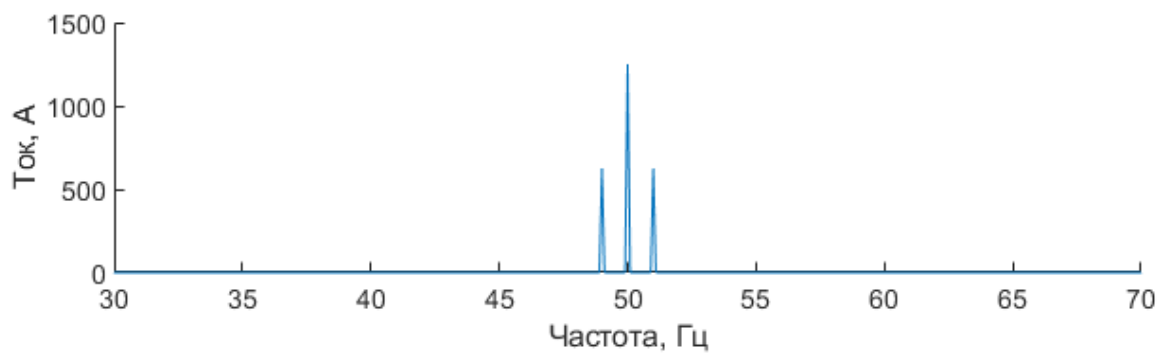
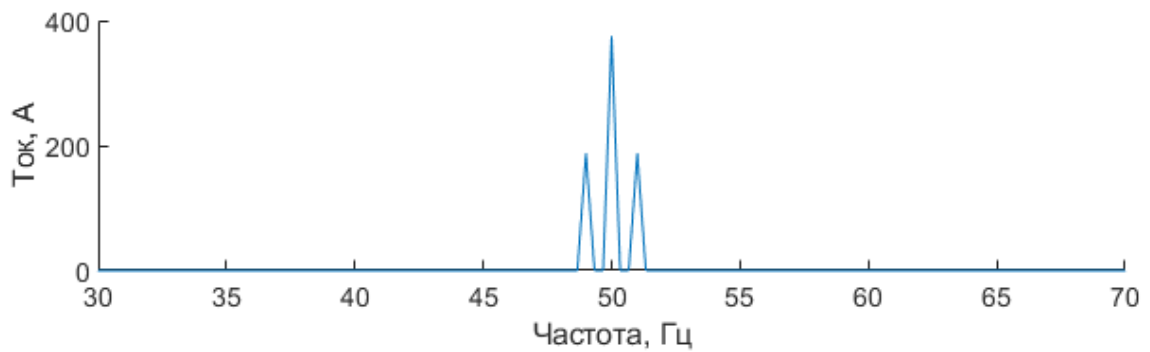


Рисунок 2.1 – Исследуемый тестовый сигнал во временной области

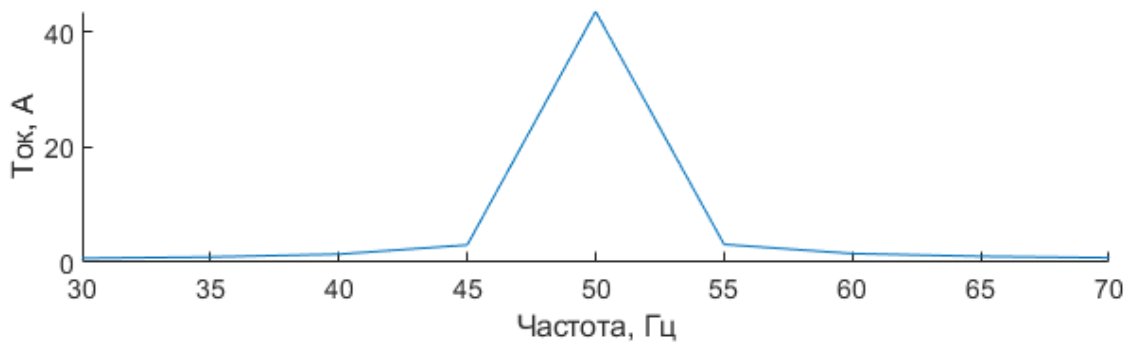
На рисунке 2.2 показаны амплитуды спектра, полученные с помощью БПФ для различных значений T : 0.2, 3 и 10 секунд.



(a)



(б)



(в)

Рисунок 2.2 – Фурье спектр сигнала (1) при разных значениях интервала сбора данных T : (а) 10 секунд, (б) 3 секунды, (в) 0.2 секунды

Когда $T=10$ секундам, спектр БПФ позволяет различать гармонические составляющие между собой. Однако при $T=3$ секунды и $T=0,2$ секунды гармоники становятся неразличимыми, хотя последний случай предпочтительнее, поскольку он требует меньше памяти и времени вычислений. Количество точек в спектре БПФ равно количеству точек N исследуемого сигнала во временной области. Следовательно, частотное разрешение равно:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{f_s}{f_s T} = \frac{1}{T} \quad (4)$$

По этой причине, для хорошего частотного разрешения спектра БПФ необходима большая временная выборка исследуемого сигнала. При плохом частотном разрешении спектр БПФ не позволяет различить близкие по частоте компоненты, в этом случае амплитуды реальных гармоник распределяются между соседними гармониками в спектре БПФ. Также, при плохом частотном разрешении возникает эффект спектральной утечки, поскольку частоты реальных гармоник не совпадают с частотами полученного спектра [48]. Сигнатуры неисправностей «сливаются» с ближайшими гармониками в спектре, и амплитуды сигнатур неисправностей распределяются вокруг их реального местоположения. В этом случае амплитуды сигнатур неисправностей не различимы. Поэтому требуется дополнительный метод обработки спектров с плохим частотным разрешением, позволяющий обнаруживать слабые изменения амплитуд гармоник, расположенных вблизи сигнатур неисправностей.

2.1.4 Метод моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики электродвигателей

Предложенный метод моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей состоит из следующих основных шагов:

1. Измерение одного или нескольких сигналов электродвигателя.
2. Применение преобразования Фурье к измеренному сигналу, для представления сигнала в частотной области.
3. Вычисление функции обобщенного среднего (ФОС) для полученного на предыдущем этапе спектра, согласно выражениям (1) и (2).

4. Сравнение полученной ФОС с ФОС, полученной для машин в различных технических состояниях. Если ФОС, полученная для двигателя в исправном состоянии «близка» с ФОС, полученной для тестируемого двигателя, то заключается что двигатель исправен. В противном случае заключается что имеют место быть аномалии и возможные неисправности. Способ сравнения ФОС и критерий «близости» определяется в конкретной реализации предложенного метода. Например, в работах [137, 140, 163] для сравнения ФОС вычисляются тангенс угла наклона между ФОС, полученной для тестируемого двигателя и ФОС, полученной для исправного двигателя. Для решения задач диагностики дефектов, необходимо получить ФОС двигателей с неисправностями и сравнивать ФОС тестируемого двигателя не только с ФОС исправного, но и с ФОС, полученными для двигателей с дефектами.

Предложенный метод не зависит от специфики измеряемого сигнала и свободен от модельных предположений о сигнале.

2.2 Разработка алгоритмов обработки токовых и вибрационных сигналов для решения задач для контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей

В данной секции представлены алгоритмы обработки сигналов АД, реализующие предложенный метод моментов дробного порядка. Алгоритм обработки сигналов состоит из этапов предварительной обработки сигналов, включающей: α - β преобразование, децимацию, БПФ и выделение информативных частотных диапазонов (ИЧД), а также этапов основной обработки, включающей: вычисление функции обобщенного среднего (ФОС) и вычисление наклона текущей ФОС относительно ФОС, полученной для исправного АД, сравнение наклонов с

табличными значениями и принятие решения о техническом состоянии АД. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 2.3:

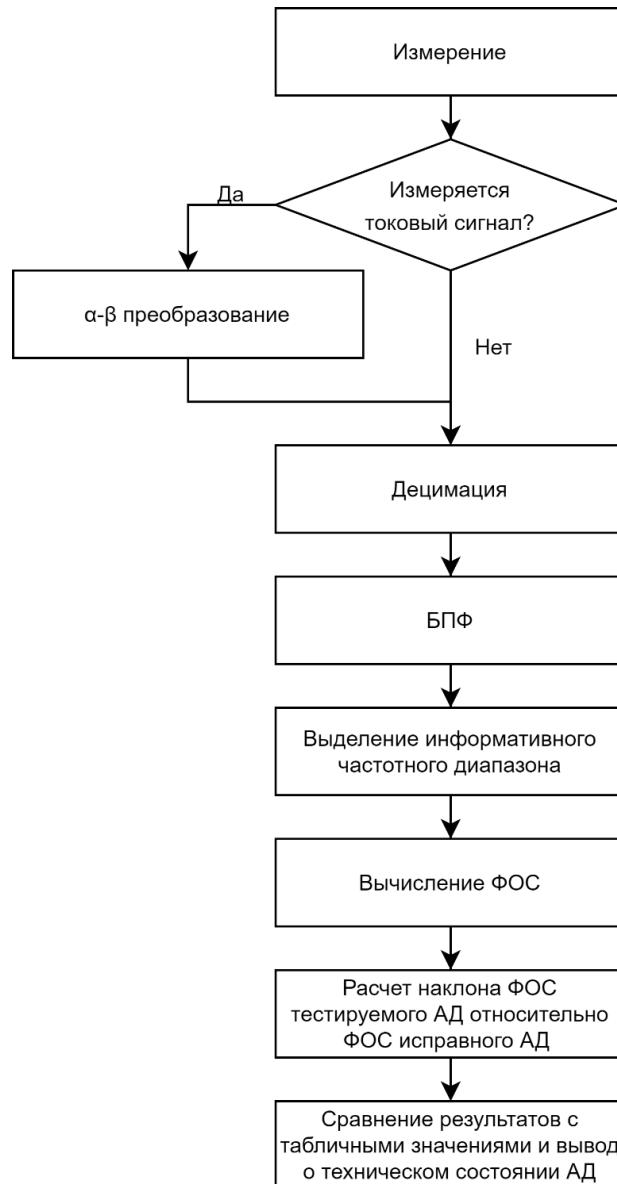


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритма обработки сигналов для решения задач контроля и диагностики технического состояния АД

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. α - β преобразование

Трехфазные токи статора АД представляются как вращающийся пространственный вектор в системе отсчета, прикрепленной к фазовой плоскости статора. Действительная ось α совмещена с осью одной из обмоток статора, а мнимая ось β сдвинута по фазе на 90 градусов. Преобразование координат от измеренных токов фаз i_u, i_v, i_w , к координатам i_α, i_β определяется матричной операцией:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (5)$$

Данный шаг применяется только при обработке токовых сигналов и не используется при обработке вибрационных сигналов.

2. Децимация

Современное измерительное оборудование позволяет существенно увеличить частоту дискретизации. Более того, современные сенсорные технологии позволяют измерять сигналы на высоких частотах, не увеличивая уровень шума. Высокочастотная информация также может содержать диагностическую информацию [138]. Однако высокая частота дискретизации увеличивает объем требуемой памяти. Поэтому в предложенном методе вводится процедура децимации за счет усреднения. Таким образом, для дальнейшего анализа используется только среднее значение нескольких измерений.

Представим входную выборку исходного сигнала x как вектор наблюдения \mathbf{x}^T :

$$\mathbf{x}^T = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_M] \quad (6)$$

$$M = T \cdot F_s \quad (7)$$

где M – общее количество измерений; T – временной интервал сбора данных; F_s – исходная частота дискретизации.

Децимация с помощью процесса усреднения дает сигнал y , который можно представить как вектор наблюдения \mathbf{y}^T :

$$\mathbf{y}^T = \left[\frac{1}{K_d} \sum_{j=1}^{K_d} x_j \quad \frac{1}{K_d} \sum_{j=K_d}^{2K_d} x_j \quad \dots \quad \frac{1}{K_d} \sum_{j=M-K_d}^M x_j \right] \quad (8)$$

$$K_d = \frac{F_s}{F_{dec}} \quad (9)$$

где K_d – коэффициент децимации; F_{dec} – частота, полученная после децимации.

Размер N вектора \mathbf{y}^T после децимации равен:

$$N = \frac{M}{K_d} \quad (10)$$

Для дальнейшей обработки достаточно хранить только сигнал y , представленный буфером данных размера N , который в K_d раз меньше исходного вектора \mathbf{x}^T .

3. Быстрое преобразование Фурье

Вычисление полного спектра сигнала выполняется с помощью БПФ, согласно выражению:

$$fftFull_k = \left| \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{j=1}^N y(j) e^{\frac{(-2\pi i)(j-1)(k-1)}{N}} \right| \quad (11)$$

$$fFull_k = k \frac{F_{dec}}{N} \quad (12)$$

где y – сигнал после децимации; N – количество точек после децимации; $fftFull(k)$ – модуль амплитуд полного спектра Фурье; $fFull(k)$ – частоты полного спектра Фурье, $k=1,2,\dots,N$. Для того чтобы не рассматривать реальную и мнимую части отдельно используется модуль.

4. Выделение информативного частотного диапазона

Информативный частотный диапазон (ИЧД) – это отрезок Фурье-спектра, ограниченный определенным частотным диапазоном. Сам частотный диапазон выбирается исходя из типа анализируемого дефекта. Это позволяет уменьшить требуемое количество вычислений, повысив чувствительность метода, так как в вычислениях ФОС будут отсутствовать неинформативные гармоники. Каждый дефект по-разному влияет на спектр сигналов АД. Для того чтобы анализировать только информативную часть спектра, введена процедура выделения ИЧД. ИЧД зависит от: (а) частоты питающего напряжения, (б) типа анализируемой неисправности, (в) результирующей частоты после децимации. Выделение ИЧД происходит согласно следующему выражению:

$$IFR_l = fftFull_p \quad (13)$$

$$l = 1, 2, \dots, p_{max} - p_{min} \quad (14)$$

$$p = p_{min}, \dots, p_{max}, p_{min} = \text{floor} \left(f_{min} \frac{N}{F_{dec}} \right), p_{max} = \text{floor} \left(f_{max} \frac{N}{F_{dec}} \right) \quad (15)$$

где IFR – отрезок спектра Фурье, входящий в ИЧД; f_{min} – нижняя граница ИЧД; f_{max} – верхняя граница ИЧД; $\text{floor}()$ – операция округления до целого.

5. Вычисление функции обобщенного среднего

ФОС вычисляется для отрезков спектра Фурье, которые входят в ИЧД, – IFR_{ecc} и IFR_{brb} . ФОС вычисляется согласно следующему выражению:

$$\Delta_{(mom_p)} = \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L IFR_i^{mom_p} \right)^{1/mom_p} \quad (16)$$

где L – число гармоник, входящих в отрезок спектра, в рассматриваемом ИЧД; mom_p – порядок момента, который может быть вычислен согласно

$$mom_p = \exp \left\{ \min + \frac{p}{P} (\max - \min) \right\} \quad (17)$$

\min , \max и P – параметры ФОС, а $p = 1, 2, \dots, P$. Значения \min и \max определяют диапазон рассматриваемых моментов; P – коэффициент, определяющий разрешение порядков момента.

6. Расчет тангенса угла наклона полученной ФОС относительно эталонной ФОС

ФОС, вычисленная на предыдущем шаге, сравнивается с эталонной ФОС. Для сравнения ФОС между собой вычисляется тангенс угла наклона ФОС,

полученной для тестируемого двигателя, относительно эталонной ФОС. В данной работе в качестве эталонной ФОС используется ФОС, полученная для исправного АД без нагрузки. Тангенс угла наклона рассчитывается с помощью хорошо известного линейного метода наименьших квадратов. В случае полного совпадения исследуемой ФОС и эталонной ФОС, тангенс угла наклона будет равен 1.

Для сокращения далее в работе вместо выражения «тангенс угла наклона» используется – наклон.

7. Сравнение наклонов и вывод о техническом состоянии

На этом этапе вычисленные наклоны сравниваются с заранее определенными значениями, полученными для АД в различных состояниях. Сначала полученные наклоны проверяются на предмет выхода некоторый доверительный интервал, который подбирается эмпирически. Если наклоны выходят за этот интервал, то делается вывод о том, что машина находится не в нормальном техническом состоянии. Таким образом реализуется контроль технического состояния АД. Далее, вышедшее за пределы доверительного интервала значение наклона сравнивается со значениями наклонов, заранее полученных для различных неисправностей. Если значение полученное значение наклона близко к значениям наклонов неисправностей, то значит соответствующая неисправность имеет место на тестируемом АД. Таким образом реализуется диагностика технического состояния. На основе этого сравнения делается вывод о техническом состоянии тестируемого двигателя.

2.3 Моделирование асинхронных двигателей

2.3.1 Методы моделирования асинхронных двигателей

Существует два подхода моделирования асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором и их сигналов: системное моделирование [139, 141–144] и моделирование сигналов [49, 145–148].

Системное моделирование является сложным и комплексным подходом, в рамках которого строится модель АД, учитывающая механические и электромагнитные параметры машины. Такие модели, как правило, строятся с помощью сетки, в каждом узле которой решается система уравнений, в которых вычисляются интересующие разработчиков параметры. Для решения таких моделей применяется метод конечных элементов. Построение указанных моделей является сложной научной задачей, которой посвящаются отдельные научные работы. Данные модели находят применение при разработке и проектировании самих АД и систем, включающих АД.

Моделирование сигналов является более простым подходом, который заключается в представлении исследуемых сигналов в виде комбинации нескольких гармоник [149]. Этот подход часто применяется для разработки, отладки и тестирования методов контроля и диагностики АД.

Токовые сигналы получают как с использованием системного моделирования, так и с помощью моделирования сигналов. В данной главе рассмотрены сигнальные модели токов: АД в исправном состоянии, АД с дефектом в стержнях ротора, АД с эксцентриситетом.

Модели вибрационных сигналов АД в исправном и неисправном состояниях строятся с помощью системного моделирования. Это связано с тем, что на вибрационный сигнал оказывает влияние множество факторов, начиная от конструкции и спецификации самого АД, заканчивая рядом стоящим

оборудованием, методами крепления АД и места и метода крепления датчика вибраций [150–152].

2.3.2 Модель исправного асинхронного двигателя

Математическая модель тока фазы статора исправного АД, представляет собой косинусоидальный сигнал, частота которого соответствует частоте питания. Гармонику, соответствующую частоте питания, в литературе [6, 25] также называют фундаментальной или доминирующей гармоникой. Модель исправного АД выглядит следующим образом [57, 72]:

$$I_h[k] = I_m \cos(2\pi f_s \Delta t k + \varphi_0) + \eta[k] \quad (18)$$

где $I_h[k]$ – значения тока фаз статора исправного АД, $k = 1, 2, \dots, N$ – порядковый номер отсчета, N – общее количество измерений, I_m – амплитуда тока, f_s – частота сети питания (в источниках [6] используется понятие фундаментальная частота), Δt – шаг дискретизации, φ_0 – начальная фаза, $\eta[k]$ – шум.

2.3.3 Модель асинхронного двигателя с дефектами в стержне ротора

Протекающий в обмотке статора ток, зависит не только от подаваемой мощности и электрического импеданса обмотки, но также включает в себя дополнительную составляющую, наведенную магнитным полем от вращающегося ротора. Таким образом, обмотка статора выступает как элемент, чувствительный к дефектам ротора. Токи в обмотке ротора создают трехфазное магнитное поле с тем же числом полюсов, что и у магнитного поля статора, вращающееся с частотой скольжения по отношению к вращающемуся ротору. При асимметрии токов ротора

возникает результирующее вращающееся поле, отстающее на частоту собственного вращения от частоты вращения ротора. Причиной такой асимметрии могут быть обрывы одного или нескольких стержней ротора или разрывы в короткозамкнутом кольце, препятствующие протеканию по нему тока. «Отстающее» магнитное поле вращается в том же направлении, что и ротор, с частотой, равной частоте тока питания обмоток статора, умноженной на коэффициент $(1-2s)$, где s – это скольжение АД. Это приводит к появлению в обмотке статора токовой составляющей с частотой $(1-2s)f_s$, которую называют нижней боковой частотой, вызванной обрывом стержня ротора. В свою очередь, данная составляющая вызывает модуляцию тока статора, что приводит к колебаниям вращающего момента ротора на удвоенной частоте скольжения $2f_s$, и соответствующим колебаниям скорости вращения ротора. Колебания скорости вращения ротора приводят к появлению составляющей на верхней боковой частоте $(1+2s)f_s$ в токе статора [10]. Таким образом, обрыв стержня ротора приводит к появлению боковых гармоник вокруг фундаментальной частоты в токе статора, определяемых формулой:

$$f_{sb} = (1 \pm 2s)f_s \quad (19)$$

Боковые гармоники отстоят от частоты питания на приблизительно от 0,1 до 3 Гц, а амплитуда этих составляющих, как правило, в 100 – 1000 раз меньше амплитуды фундаментальной гармоники [10].

Выражение для тока статора с дефектами в стержне ротора [149]:

$$I_{brb}[k] = I_m \cos(2\pi f_s \Delta t k + \beta \sin(2\pi f_c \Delta t k + \varphi_0)) + \eta[k] \quad (20)$$

где $I_{brb}[k]$ – значения тока фаз статора АД с дефектами клетки ротора, β – коэффициент модуляции, $f_c = 2sf_s$ – характеристическая частота дефектов в стержне ротора. Данные составляющие появляются также в вибрационном сигнале АД. Это вызвано осцилляциями крутящего момента, которые возникают из-за асимметрии магнитного поля [138, 153–155].

В работах [6, 48, 156, 157] приводится связь между коэффициентом модуляции β , количеством стержней ротора с дефектом n_B и общим количеством стержней ротора N_B . Она выражается в виде отношения:

$$\beta = \frac{n_B}{N_B} \quad (21)$$

2.3.4 Модель асинхронного двигателя с эксцентриситетом

Эксцентриситет характеризуется несколькими диагностическими признаками, проявляющимися в изменении амплитуд характеристических гармоник в магнитном потоке, токовых сигналах и вибрациях [31]. Эти характеристические гармоники таковы: (а) гармоники прохождения пазов ротора (в англоязычной литературе используется термин Rotor Slot Harmonic и сокращение RSH), (б) боковые гармоники ротора вокруг частоты питания, (в) удвоенная частота питания и боковые гармоники вокруг нее.

В токовом и вибрационном сигналах [10, 158, 159], при наличии повышенного эксцентриситета, изменяются амплитуды RSH гармоник, которые определяются следующим выражением [160]:

$$f_{RSH} = f_s \left((l \cdot N_B \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm \eta_{ws} \right) = f_s \left(l \cdot N_B \frac{(1-s)}{p} \pm \eta_{ws} \right) \pm f_s \cdot n_d \frac{(1-s)}{p} \quad (22)$$

где $l=1,2,3,\dots$ – любое положительное целое число [161], $n_d=0$ – при статическом эксцентриситете, $n_d=1,2,3,\dots$ – при динамическом эксцентриситете (n_d является порядком эксцентриситета [35]), p – число пар полюсов, η_{ws} – является порядком временных гармоник статора, которые присутствуют в источнике питания, приводящем в действие двигатель. η_{ws} принимает нечетные значения для токовых сигналов и осевого магнитного потока, четные для вибрационных сигналов [29, 31, 162]. Выражение (22) состоит из двух слагаемых. Левое слагаемое представляет из себя частоту прохождения пазов ротора f_{rs} , определяемую формулой:

$$f_{rs} = f_s \left(N_B \cdot l \frac{(1-s)}{p} \pm \eta_{ws} \right) \quad (23)$$

Правое слагаемое определяет частоты боковых гармоник f_r , вокруг частоты прохождения пазов ротора. В литературе эти гармоники называются субгармониками частоты вращения ротора [10]. Частоты этих гармоник определяются выражением [35]:

$$f_r = f_s \left(\frac{(1-s)}{p} \right) \quad (24)$$

Боковые гармоники ротора вокруг частоты питания являются признаком динамического эксцентриситета [35]. Данные гармоники присущи токовым сигналам и магнитному потоку. Частоты этих гармоник определяются согласно следующему выражению:

$$f_{sbr} = f_s \pm m \cdot f_r \quad (25)$$

где $k=1,2,3,\dots$ – любое положительное целое число.

Удвоенная частота питания $2f_s$ и боковые гармоники частоты ротора вокруг неё ($2f_s \pm f_r$) являются также признаком эксцентриситета, который присущ вибрационным сигналам.

В работах [145–147, 149] приводится аналитическое выражение для токового сигнала при эксцентриситете, в котором фигурируют боковые гармоники ротора вокруг фундаментальной гармоники:

$$I_{ecc}[k] = I_m (1 + \alpha \cos(2\pi f_r \Delta tk + \varphi_0)) \cos(2\pi f_s \Delta tk) + \eta[k] \quad (26)$$

где $I_{ecc}[k]$ – значения тока фаз статора АД с эксцентриситетом, α – коэффициент модуляции эксцентриситета, который прямо пропорционален степени эксцентриситета.

2.4 Моделирование разработанных алгоритмов для решения задач контроля и диагностики асинхронных двигателей

2.4.1 Параметры моделей

Валидация предложенного метода осуществлена на симулированных токовых сигналах АД в следующих состояниях: (а) в исправном состоянии, (б) с дефектом в стержне ротора, (в) с эксцентриситетом. Для данных симуляций использовались характеристики мотора, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры асинхронного двигателя для симуляции

Параметр	Значение
Номинальная мощность, P	3 кВт
Частота питания, f_s	50 Гц
Номинальное напряжение, U_n	380 В
Номинальный ток потребления, I_m	7 А
Скорость вращения, n_r	1410 об/мин
Общее количество стержней ротора, N_B	28
Количество пар полюсов, p	2
Начальная фаза сигнала φ_0	0

На основе указанных характеристик рассчитаны: (а) синхронная частота вращения, (б) скольжение АД, а также (в) частоты сигнатур неисправностей. Данные параметры представлены в таблице 2.2:

Таблица 2.2 – Параметры моделируемой системы

Параметр	Значение
Синхронная частота вращения АД	$n_s = \frac{f_s}{p} \cdot 60 = \frac{50}{2} \cdot 60 = 1500$ об/мин
Скольжение АД	$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0.06$
Нижняя боковая характеристическая частота дефекта стержня ротора, при $k = 1$	$f_{brb1} = f_s - 2ksf_s = 50 - 2 \cdot 1 \cdot 0.06 \cdot 50 = 44$ Гц

Верхняя боковая характеристическая частота дефекта стержня ротора, при $k = 1$	$f_{brb2} = f_s + 2ksf_s = 50 + 2 \cdot 1 \cdot 0.06 \cdot 50 = 56 \text{ Гц}$
Частота вращения ротора	$f_r = \frac{n_r}{60} = \frac{1410}{60} = 23.5 \text{ Гц}$
Частота левой боковой гармоники ротора от частоты питания, характеризующая наличие эксцентриситета, при $m = 1$	$f_{ecc1} = f_s - mf_r = 50 - 1 \cdot 23.5 = 26.5 \text{ Гц}$
Частота правой боковой гармоники ротора от частоты питания, характеризующая наличие эксцентриситета, при $m = 1$	$f_{ecc2} = f_s + mf_r = 50 + 1 \cdot 23.5 = 73.5 \text{ Гц}$

Для генерации модельных сигналов использовалось программное обеспечение от компании Mathworks – MATLAB R2022a. Токовые сигналы генерировались для каждой фазы. Сгенерированные сигналы имеют длину 100 секунд и частоту дискретизации 100 кГц. Каждый сгенерированный сигнал разбивался на временные окна и каждое временное окно независимо обрабатывалось с помощью разработанного алгоритма обработки токовых сигналов. Конфигурация параметров алгоритма, представлена в таблице 2.3:

Таблица 2.3 – Конфигурация параметров алгоритма используемая при моделировании

Параметр	Значение
Коэффициент децимации, K_d	100 (частота сигнала после децимации 1 кГц)
Длина временного окна, T	0.5 с

Информативный частотный диапазон	[0 Гц; 100 Гц]
Параметры ФОС	$P = 75$, диапазон порядка моментов [-15;15]

Соотношение сигнал/шум выбрано $SNR = 25$ дБ. SNR определяет максимальную амплитуду шума, согласно выражению:

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{I_m}{I_n} \right) \Rightarrow I_n = \frac{I_m}{\frac{SNR}{10^{20}}} = \frac{7}{\frac{25}{10^{20}}} = 0.39 \text{ мА} \quad (27)$$

Моделированный токовый сигнал одной из фаз исправного АД, описанный выражением (18), представлен на рисунке 2.4:

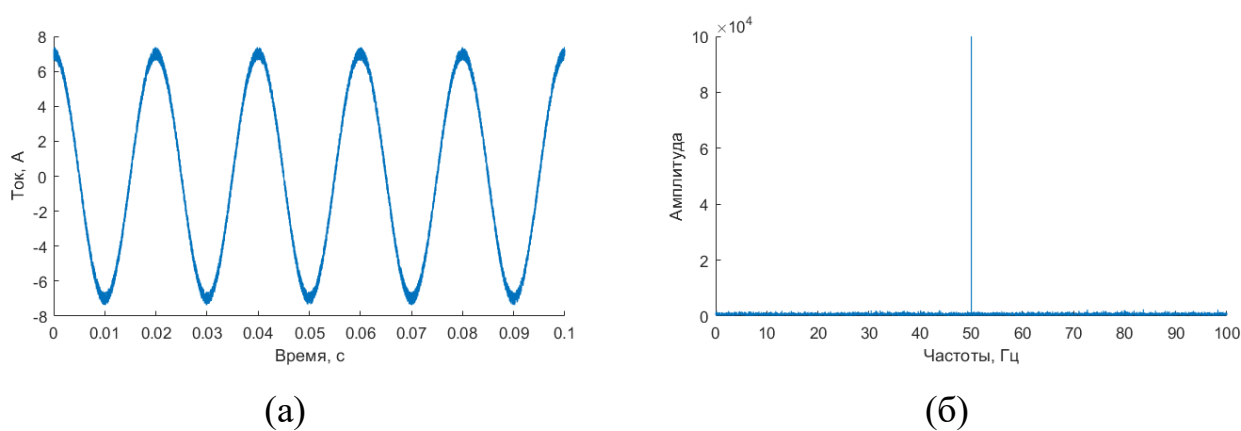


Рисунок 2.4 – Исходный симулированный сигнал исправного АД: (а) во временной области, (б) в частотной

2.4.2 Моделирование диагностики дефекта в стержне ротора

Сигнал с дефектом в стержне ротора смоделирован с помощью выражения (20). Количество неисправных стержней ротора задано равным единице $n_B = 1$. Уровень шумов установлен такой же, как у сигнала исправного АД $SNR = 25$ дБ. Полученный сигнал представлен на рисунке 2.5. Характеристические гармоники, отмеченные на рисунке 2.5 (б) расположены на частотах $f_{brb1} = 44.01$ Гц и $f_{brb2} = 56.01$ Гц, что подтверждается расчетными значениями в таблице 2.2.

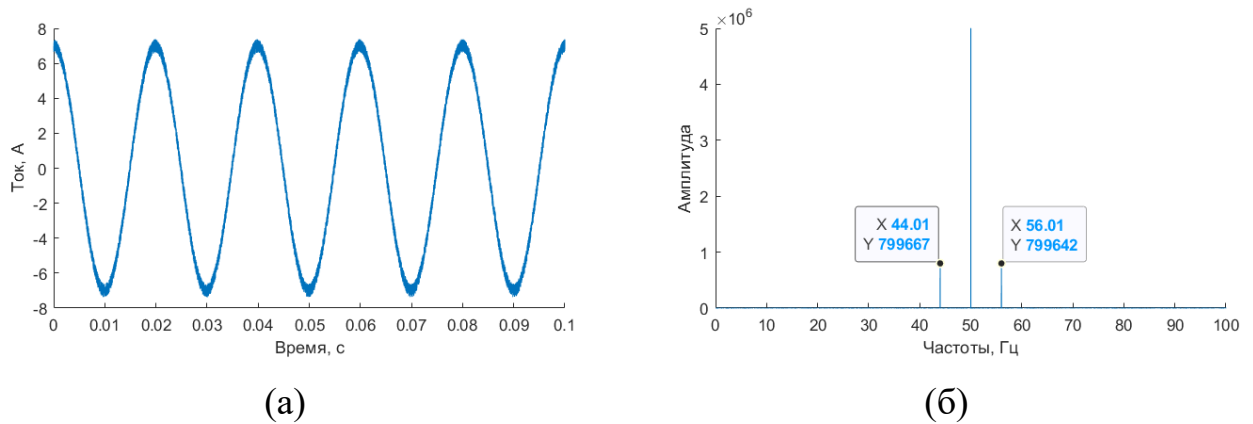


Рисунок 2.5 – Исходный симулированный сигнал АД с дефектом в одном стержне ротора: (а) во временной области, (б) в частотной

Данный сигнал и сигнал смоделированный для исправного АД были обработаны с помощью разработанного алгоритма. Каждый из сигналов при обработке разбивался на отрезки, равные размеру временного окна и каждое временное окно обрабатывалось отдельно и независимо. Далее представлены результаты, полученные на основных этапах предложенного алгоритма для первых временных окон в рассматриваемых сигналах.

Первым этапом является α - β преобразование. Отрезки длиной 0.1 с сигналов АД в исправном состоянии и АД с дефектом в стержне ротора до и после α - β преобразование представлены на рисунке 2.6.

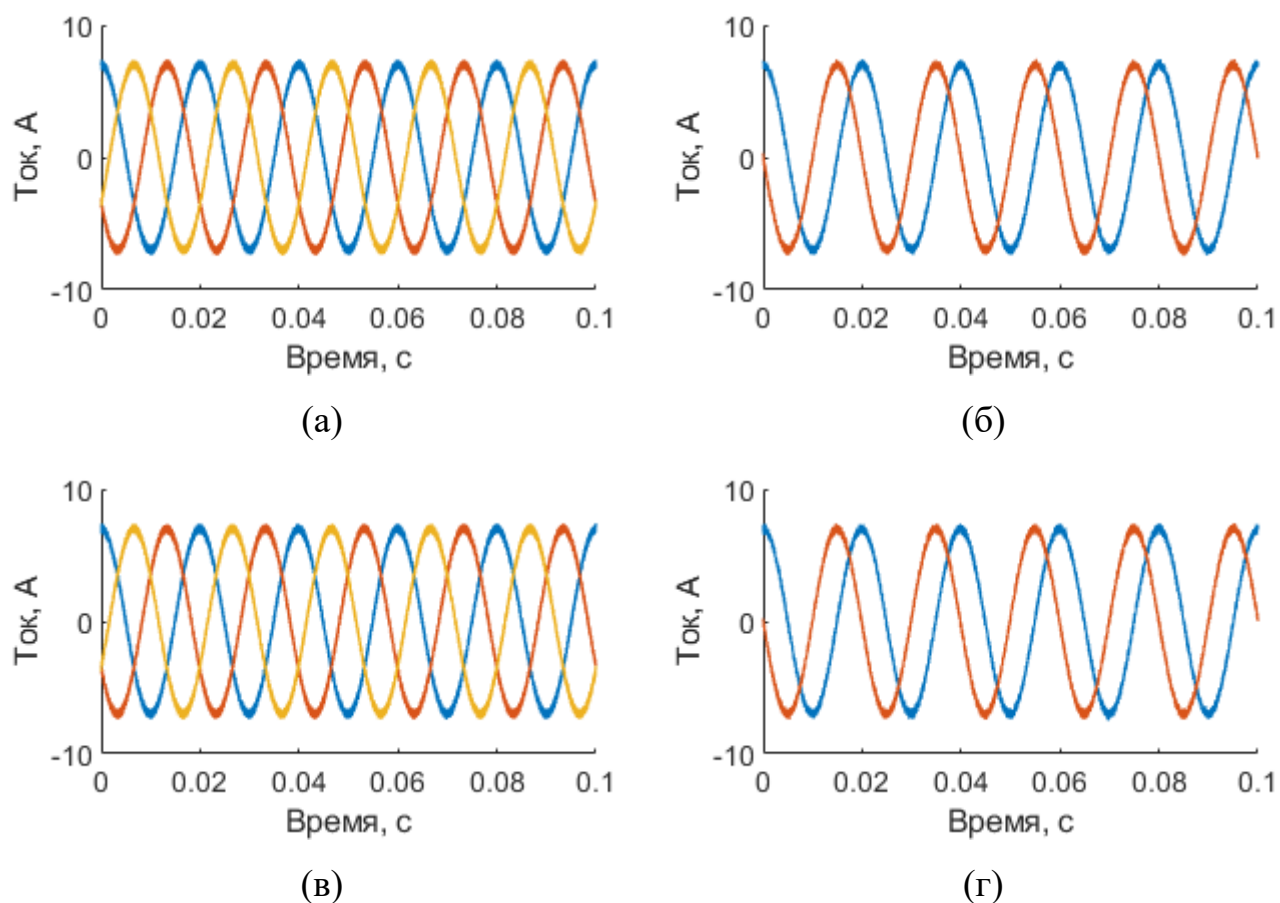


Рисунок 2.6 – Сигналы исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора до α - β преобразования (а), (в) соответственно и после преобразование – (б), (г). Цвета кривых (а), (в): голубая – 1-ая фаза, красная – 2-ая фаза, желтая – 3-ья фаза; (б), (г): голубая – α -компонент, красная – β -компонент

В данном представлении сигналы не различимы. Следующим этапом идут децимация, БПФ и выделение ИЧД. Полученные ИЧД для рассматриваемых сигналов представлены на рисунке 2.7:

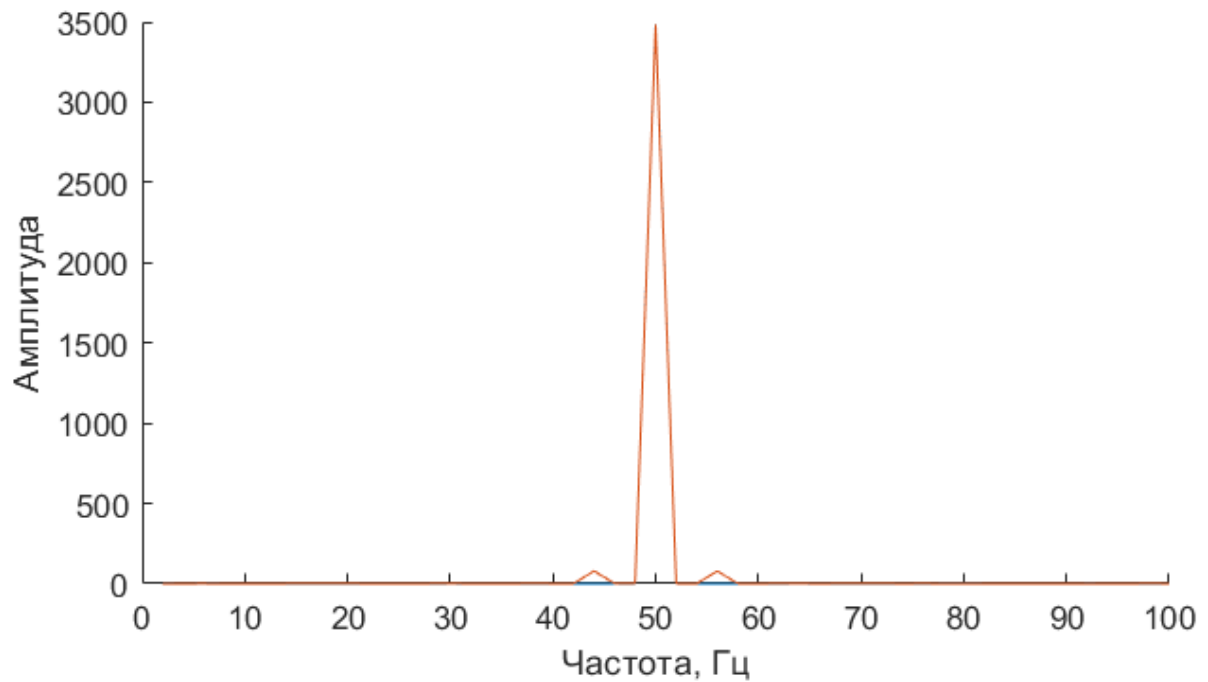


Рисунок 2.7 – Информативный частотный диапазон Фурье спектра. Голубая кривая – исправный АД, красная кривая – АД с дефектом в стержне ротора

Далее вычисляется ФОС для полученных ИЧД. ФОС для исследуемых временных окон представлены на рисунке 2.8.

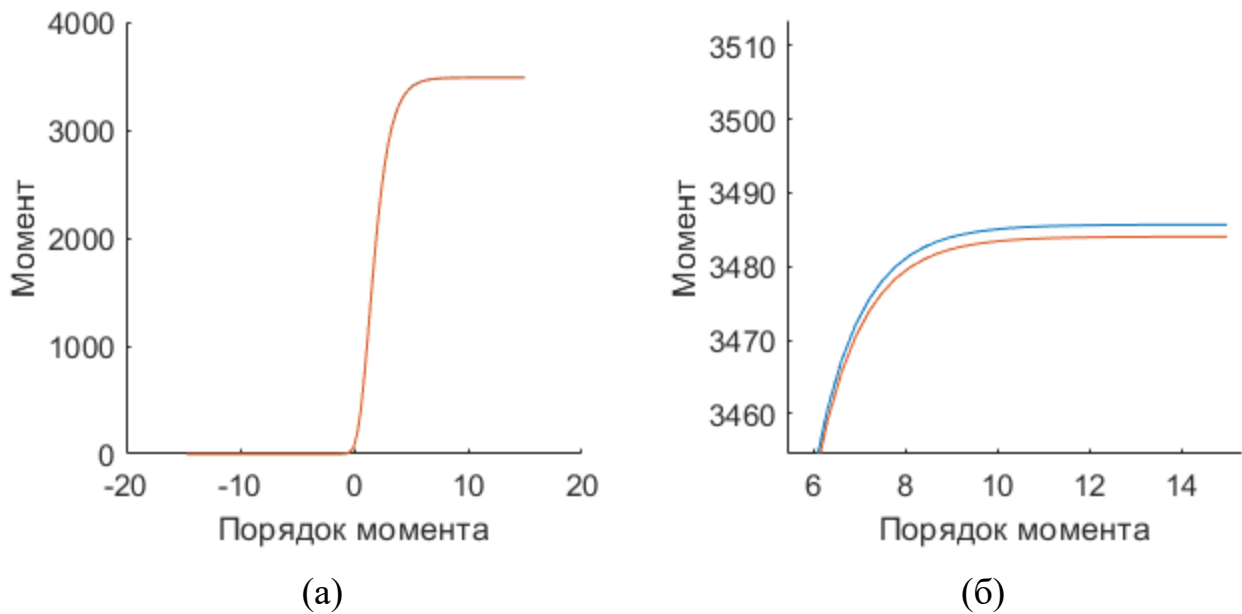


Рисунок 2.8 – ФОС для исправного АД (красная кривая) и АД с дефектом в стержне ротора (синяя кривая): (а) ФОС целиком, (б) увеличенная часть верхнего «плато»

После расчета ФОС, рассчитывается наклон между ФОС, тестируемого АД и эталонной ФОС. Эталонная ФОС была получена путем расчета ФОС для каждого временного окна сигнала исправного АД и затем усреднением значений для каждого порядка момента. Относительно наклонов полученной эталонной ФОС рассчитаны наклоны для полученных ФОС сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора. Полученные значения наклонов показаны на рисунке 2.9.

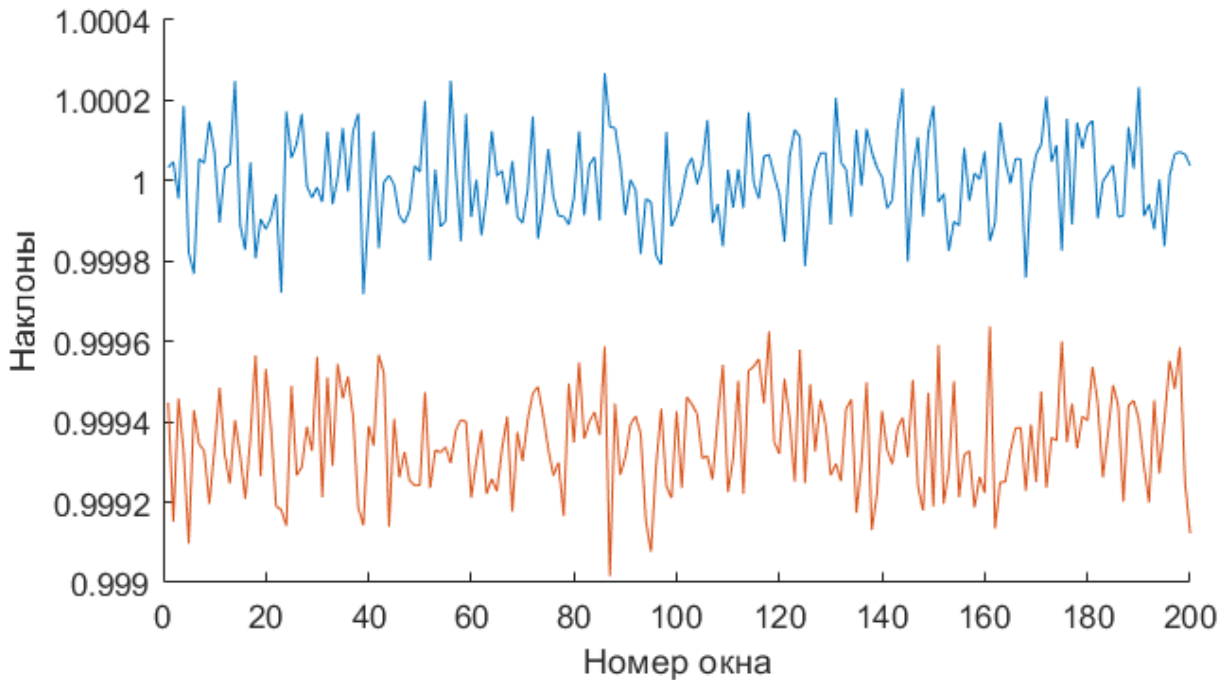


Рисунок 2.9 – Значения наклонов: голубая кривая – исправный АД, красная кривая – АД с дефектом в стержне ротора

Рисунок 2.9 показывает эффективность диагностики с помощью предложенного алгоритма. Кривые наклонов, полученные для исправного АД и АД с дефектом в одном стержне ротора – не пересекаются между собой, а значит дефект в стержнях ротора может быть обнаружен на ранних стадиях, когда только один стержень вышел из строя.

Далее была исследована зависимость результатов диагностирования дефектов в стержнях ротора от количества вышедших из строя стержней. Для этого были симулированы сигналы с дефектами в стержне ротора для значений $n_B = 2, 3, 4$. Указанные сигналы были обработаны аналогичным образом с помощью предложенного алгоритма. Полученные результаты совмещены с результатами для

токовых сигналов исправного АД и АД с дефектом в одном стержне ротора ($n_B = 1$) и представлены на рисунке 2.10.

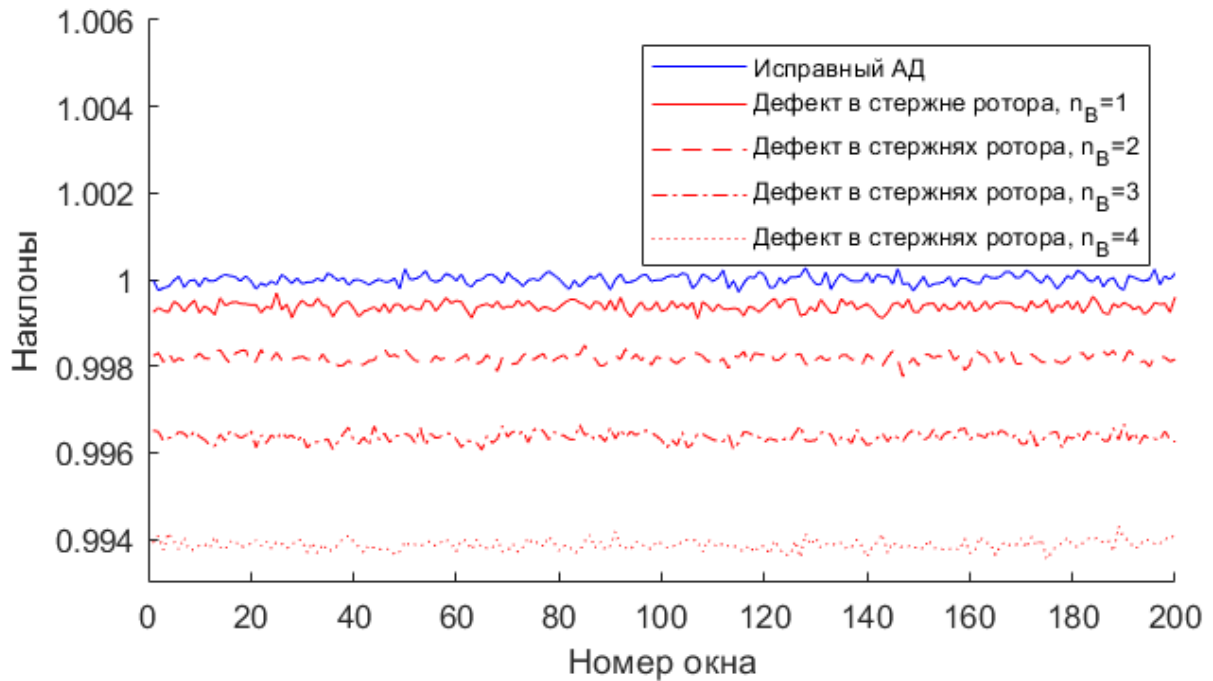


Рисунок 2.10 – Наклоны, полученные для токовых сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора, с разным количеством поврежденных стержней: $n_B = 1, 2, 3, 4$

В данной работе для анализа корреляций результатов диагностики, полученных для исправных АД и для АД с дефектами используется критерий оценки степени внешних корреляций случайных последовательностей между собой, предложенный профессором Нигматуллиным [136]. Данный критерий описывается следующей формулой:

$$C_{ex}(x, y) = \frac{Range(x) + Range(y)}{\max(x, y) - \min(x, y)} \quad (28)$$

где x, y – это случайные последовательности.

Значения C_{ex} интерпретируются следующим образом. Предположим, что последовательности идентичны $x = y$. Из формулы (28) следует, что $C_{ex}(x, y) = 2$. Если числитель в формуле (28) больше знаменателя, то диапазоны для каждой сравниваемой последовательности пересекаются друг с другом, а коэффициент C_{ex} находится в интервале $[1, 2]$. В этом случае существуют взаимные корреляции между сравниваемыми последовательностями. Если числитель в формуле (28) меньше знаменателя, то диапазоны сравниваемых векторов не пересекаются и коэффициент C_{ex} находится в интервале $(0, 1)$. В этом случае взаимные корреляции между двумя сравниваемыми векторами отсутствуют и сравниваемые вектора x и y можно дифференцировать.

Также статистические параметры кривых для наклонов, такие как среднее значение, максимальное отклонение, а также значения критерия C_{ex} представлены в таблице 2.4. В данной таблице средние значения и максимальные отклонения указаны в формате $mean \pm deviation$, где $mean$ – среднее значение, а $deviation$ – максимальное отклонение.

Таблица 2.4 – Статистические параметры наклонов токовых сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержнях ротора

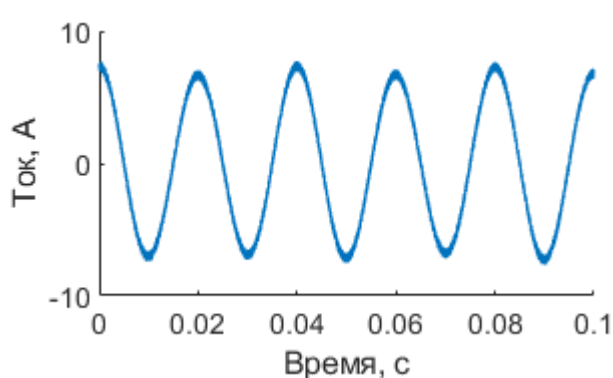
Параметр	Исправный АД	АД с дефектом в стержнях ротора			
		$n_B = 1$	$n_B = 2$	$n_B = 3$	$n_B = 4$
$mean \pm deviation$	1.000± 0.001	0.999± 0.001	0.998± 0.001	0.996± 0.001	0.994± 0.001

<i>C_{ex}</i>	2.000	0.868	0.555	0.352	0.239
-----------------------	-------	-------	-------	-------	-------

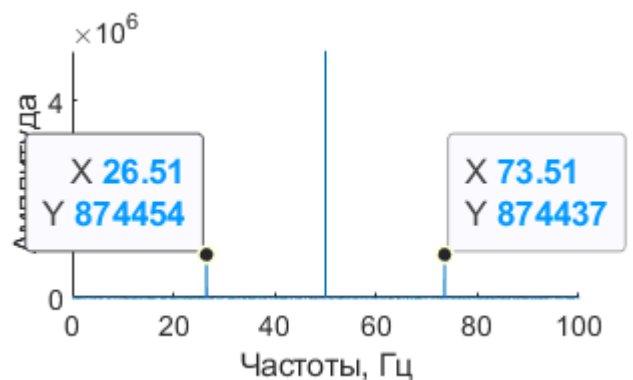
Результаты, представленные на рисунке 2.10 показывают, что наклоны, полученные для сигнала исправного АД и АД с дефектами в стержне ротора, не пересекаются между собой. Это подтверждается и численными данными, приведенными в таблице 2.4, а именно критерием *C_{ex}*, значения которого лежат в диапазоне (0;1), что говорит о том, что между наклонами полученными для исправного АД и наклона полученного для АД с дефектами в стержне ротора отсутствуют корреляции. Полученные результаты, позволяют обнаружить дефект в стержне ротора с помощью разработанного алгоритма.

2.4.3 Моделирование диагностики эксцентриситета

Сигнал с эксцентриситетом смоделирован с помощью выражения (26). Коэффициент, определяющий степень эксцентриситета выбран $\alpha = 0.05$. Уровень шумов установлен такой же, как у сигнала исправного АД $SNR = 25$ дБ. Полученный сигнал представлен на рисунке 2.11. Характеристические гармоники, отмеченные на рисунке 2.11 б расположены на частотах $f_{ecc1} = 26.51$ Гц и $f_{ecc2} = 73.51$ Гц, что подтверждается расчетными значениями в таблице 2.2.



(a)



(б)

Рисунок 2.11 – Исходный симулированный сигнал АД с эксцентриситетом: (а) во временной области, (б) в частотной

Смоделированный сигнал АД с эксцентриситетом обработан аналогичным образом каким ранее был обработан смоделированный сигнал АД с дефектом в стержне ротора. Полученные наклоны сигнала АД с эксцентриситетом, относительно наклонов полученных для исправного АД представлены на рисунке 2.12.

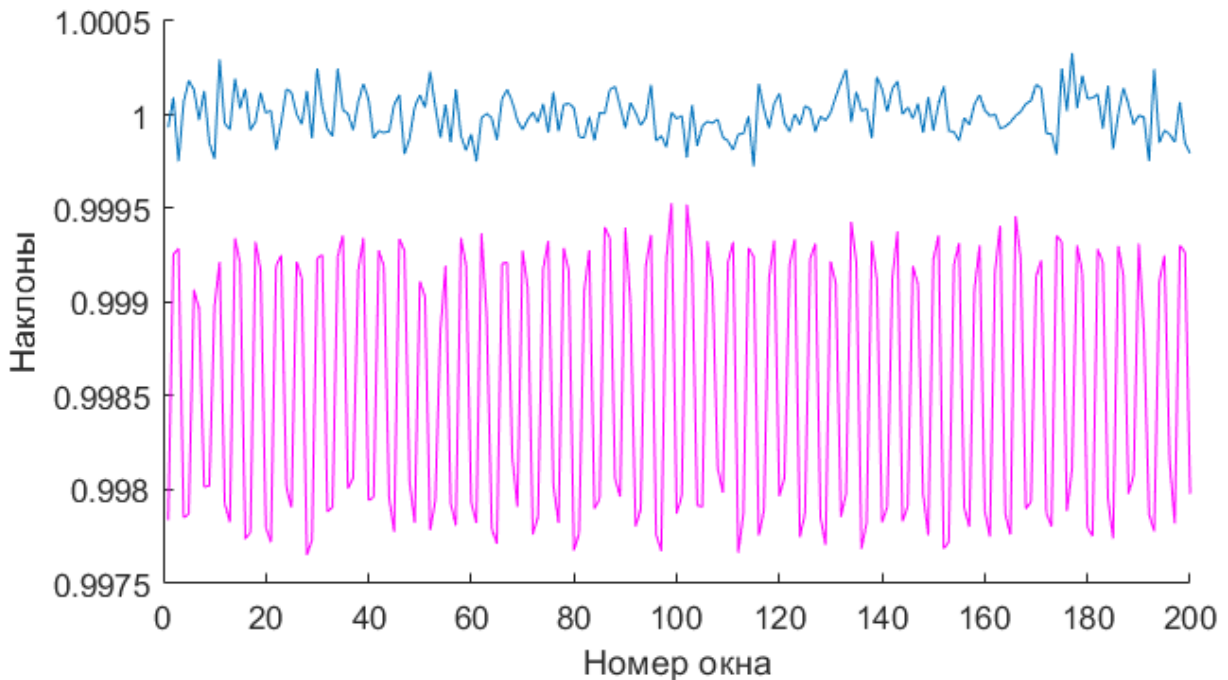


Рисунок 2.12 – Значения наклонов: голубая кривая – исправный АД, фиолетовая кривая – АД с эксцентриситетом

Рисунок 2.12 – показывает эффективность диагностики с помощью предложенного алгоритма. Кривые наклонов, полученные для исправного АД и АД

с эксцентриситетом – не пересекаются между собой, а значит эксцентриситет может быть обнаружен на ранних стадиях ($\alpha = 0.05$).

Исследована зависимость результатов диагностирования эксцентриситета с разными значениями коэффициента модуляции. Для этого были симулированы сигналы АД с эксцентриситетом для значений $\alpha = 0.1, 0.2, 0.4$. Указанные сигналы были обработаны аналогичным образом с помощью предложенного алгоритма. Полученные результаты совмещены с результатами, полученными для токовых сигналов исправного АД и АД с эксцентриситетом ($\alpha = 0.05$) и представлены на рисунке 2.13. Статистические параметры кривых для наклонов, такие как среднее значение, максимальное отклонение, а также значения критерия S_{ex} представлены в таблице 2.5. В данной таблице средние значения и максимальные отклонения указаны в формате $mean \pm deviation$, где $mean$ – среднее значение, а $deviation$ – максимальное отклонение.

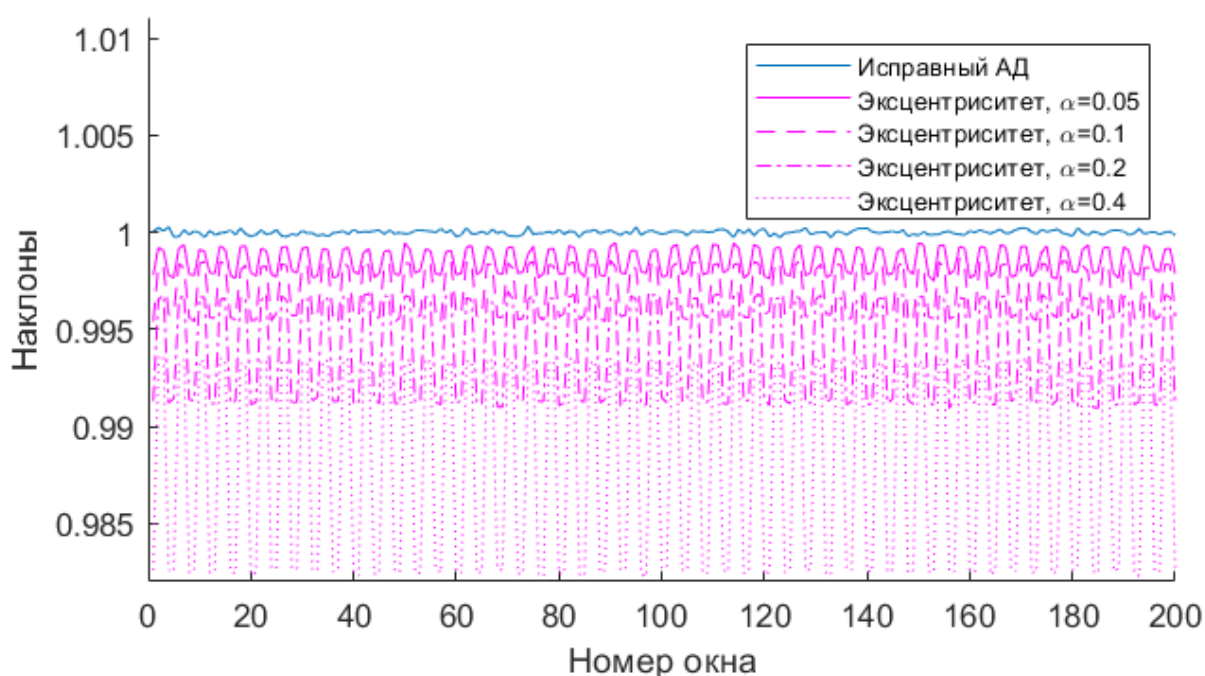


Рисунок 2.13 – Наклоны, полученные для токовых сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора, с разным количеством поврежденных стержней:
 $\alpha = 0.05, 0.1, 0.2, 0.4$

Таблица 2.5 – Статистические параметры наклонов токовых сигналов исправного АД и АД с эксцентриситетом

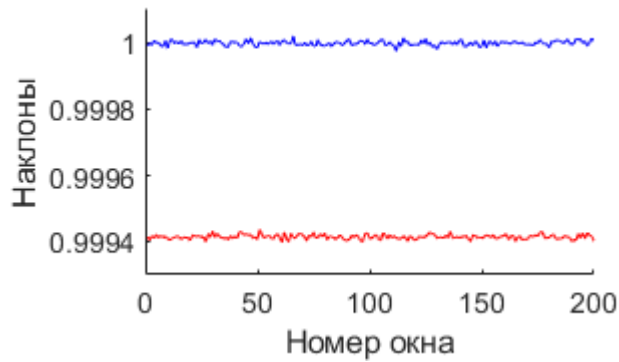
Параметр	Исправный АД	АД с эксцентриситетом			
		$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.4$
<i>mean</i> ± <i>deviation</i>	1.000± 0.001	0.999± 0.001	0.997± 0.002	0.994± 0.003	0.988± 0.006
<i>Cex</i>	2.000	0.918	0.736	0.699	0.659

Результаты, представленные на рисунке 2.13 показывают, что наклоны, полученные для сигнала исправного АД и АД с эксцентриситетом, не пересекаются между собой. Это подтверждается и численными данными, приведенными в таблице 2.5, а именно критерием *Cex*, значения которого лежат в диапазоне (0;1), что говорит о том, что между наклонами полученными для исправного АД и наклона полученного для АД с эксцентриситетом отсутствуют корреляции. Полученные результаты, позволяют обнаружить эксцентриситет с помощью разработанного алгоритма.

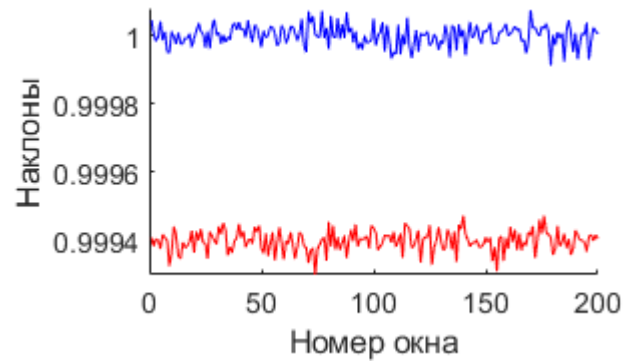
2.5 Оценка характеристик и параметров разработанных алгоритмов контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей

2.5.1 Исследование влияния шумов на результаты диагностики

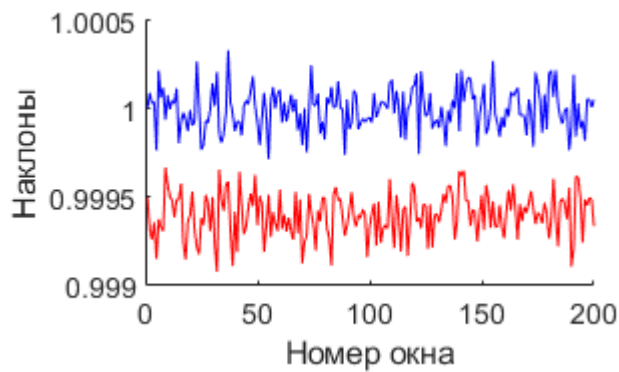
Уровень шумов может меняться в зависимости от различных факторов: (а) качество источника питания АД, (б) качество датчиков, (в) условия крепления АД и датчиков, (г) влияние помех рядом расположенного оборудования и т. д. В предыдущих исследованиях использовалось соотношение $SNR = 25$ дБ, что является достаточно низким значением, например в работах [145, 149] при моделировании использовалось соотношение $SNR = 50$ дБ, а в работе [147] - $SNR = 37$ дБ, то есть более низкий уровень шума по сравнению с настоящим исследованием. При исследовании влияния шумов на результаты диагностики технического состояния АД с помощью предложенного алгоритма для моделей были заданы следующие соотношения сигнал/шум $SNR = 50, 37, 25, 15$. При исследовании влияния шумов на результаты диагностики использовались модельный сигнал исправного АД (18), модельный сигнал АД с дефектом в стержне ротора (20) при $n_b = 1$ и модельный сигнал АД с эксцентриситетом при $\alpha = 0.05$ (26). Данные сигналы были обработаны с помощью предложенного алгоритма при разных соотношениях сигнал/шум. Наклоны, полученные для каждого соотношения сигнал/шум для сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора представлены на рисунке 2.14. Наклоны, полученные для каждого соотношения сигнал/шум для сигналов исправного АД и АД с эксцентриситетом представлены на рисунке 2.15.



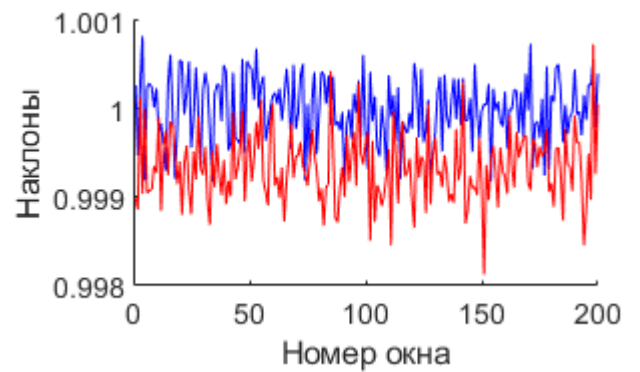
(a)



(б)

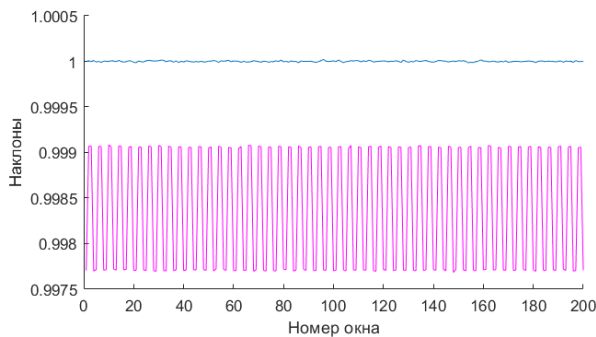


(в)

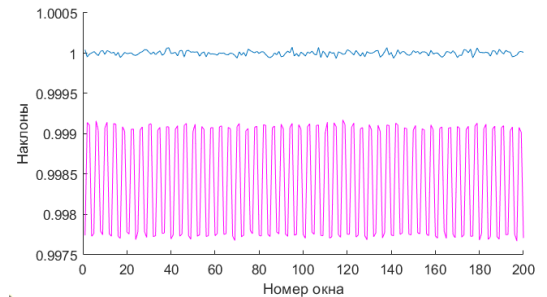


(г)

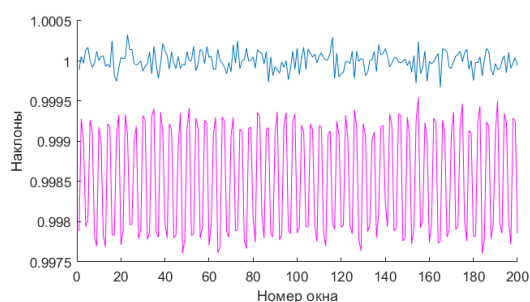
Рисунок 2.14 – Наклоны, полученные при обработке модельных сигналов для исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при $n_B = 1$: (а) $SNR = 50$ дБ, (б) $SNR = 37$ дБ, (в) $SNR = 25$ дБ, (г) $SNR = 15$ дБ. Голубая кривая соответствует исправному АД, красная – АД с дефектом в стержне ротора



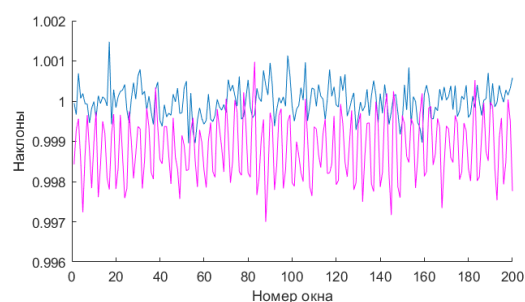
(a)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 2.15 – Наклоны, полученные при обработке модельных сигналов для исправного АД и АД с эксцентриситетом при $\alpha = 0.05$: (а) $SNR = 50$ дБ, (б) $SNR = 37$ дБ, (в) $SNR = 25$ дБ, (г) $SNR = 15$ дБ. Голубая кривая соответствует исправному АД, красная – АД с эксцентриситетом

В таблице 2.6 представлены средние значения, максимальные отклонения наклонов, полученных для сигналов исправного АД, АД с дефектом в стержне ротора и АД с эксцентриситетом, а также значения критерия C_{ex} . В данной таблице средние значения и максимальные отклонения указаны в формате $mean \pm deviation$, где $mean$ – среднее значение, а $deviation$ – максимальное отклонение.

Таблица 2.6 – Статистические параметры наклонов, полученных для модельных сигналов при разных соотношениях сигнал/шум

Сигнал/шум, дБ	Параметр	Исправный АД	АД с дефектом в стержне ротора, $n_B = 1$	АД с эксцентриситетом, $\alpha = 0.05$
50	$mean \pm deviation$	1.000±0.001	0.999±0.001	0.998±0.001
	C_{ex}	2.000	0.088	0.612

37	<i>mean ± deviation</i>	1.000±8.72	0.999±0.001	0.998±0.001
	<i>Cex</i>	2.000	0.334	0.684
25	<i>mean ± deviation</i>	1.000±3.33	0.999±0.001	0.999±0.001
	<i>Cex</i>	2.000	0.816	0.938
15	<i>mean ± deviation</i>	1.000±0.001	0.999±0.002	0.999±0.002
	<i>Cex</i>	2.000	1.419	1.416

Полученные результаты показывают, при увеличении уровня шума, увеличивается и размах флуктуаций получаемых наклонов, так при значениях соотношения сигнал/шум $SNR=15$ дБ обнаружение неисправностей на ранних стадиях становится затруднительным. Однако, стоит отметить, что предложенная техника показывает стабильный результат и для достаточно низких соотношений сигнал/шум $SNR=25$ дБ. Для снижения соотношения сигнал шум в выбранном ИЧД могут применяться фильтры.

2.5.2 Оптимизация параметров разработанных алгоритмов

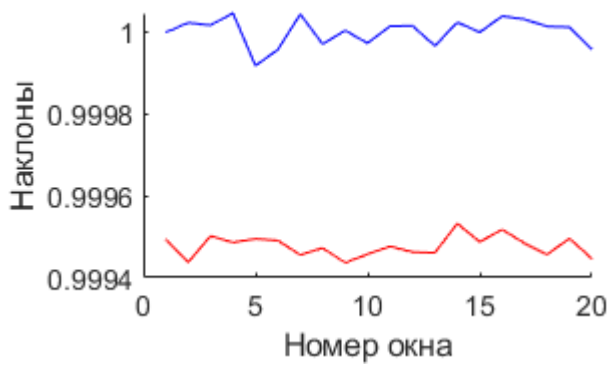
Предложенные алгоритмы имеют следующие параметры:

- длина временного окна T ;
- коэффициент децимации K_d ;
- информативный частотный диапазон (ИЧД);
- параметры функции обобщенного среднего (ФОС).

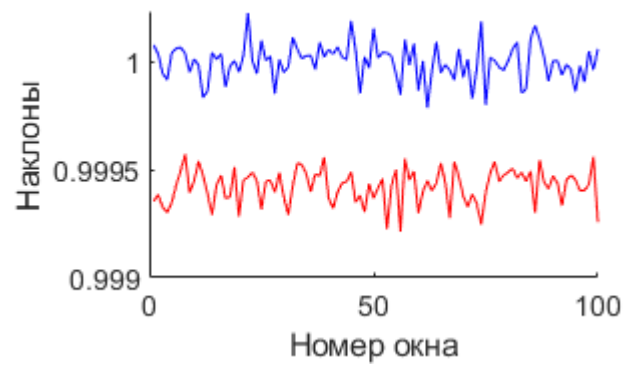
Длина временного окна

Длина временного окна определяет частотное разрешение БПФ и количество отсчетов, которые необходимо хранить в оперативной памяти для обработки. Чем

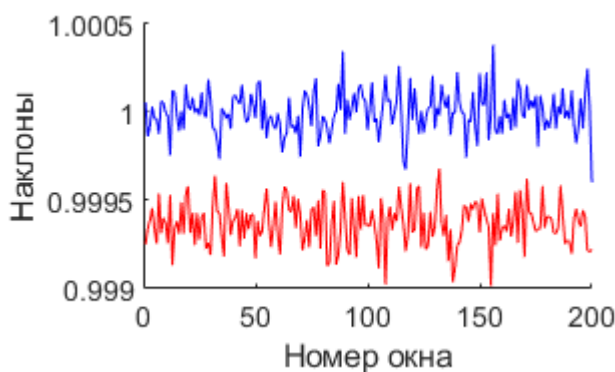
меньше длина временного окна, тем: (а) более маломощный и экономически выгодный микроконтроллер подойдет для реализации этого алгоритма; (б) и тем быстрее время реакции при обнаружении дефекта. Для подбора оптимальной длины временного окна использовались следующие значения данного параметра при диагностике дефекта в стержне ротора: $T = 5, 1, 0.5, 0.2$ с. Диагностика осуществлялась с помощью обработки модельных сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора. Параметры сигналов аналогичны используемым в главах 2.4.2, 2.4.3 и приведены в таблице 2.2. Результирующие наклоны, полученные для различных значений показаны на рисунке 2.16.



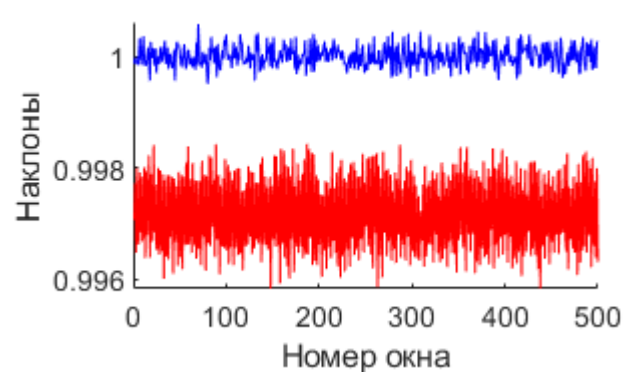
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 2.16 – Наклоны полученные для разных значений временного окна: (а) $T = 5$, (б) $T = 1$, (в) $T = 0.5$, (г) $T = 0.2$

В таблице 2.7 представлены средние значения и максимальные отклонения наклонов, полученных для сигналов исправного АД, АД с дефектом в стержне ротора. В данной таблице средние значения и максимальные отклонения указаны в формате $mean \pm deviation$, где $mean$ – среднее значение, а $deviation$ – максимальное отклонение.

Таблица 2.7 – Статистические параметры наклонов, полученных для модельных сигналов при разных значениях временного окна

Временное окно, с	Параметр	Исправный АД	АД с дефектом в стержне ротора, $n_B = 1$
5	$mean \pm deviation$	1.000±0.001	0.999±0.001
	C_{ex}	2.000	0.024
1	$mean \pm deviation$	1.000±0.001	0.999±0.001
	C_{ex}	2.000	0.064
0.5	$mean \pm deviation$	1.000±0.001	0.999±0.001
	C_{ex}	2.000	0.088
0.2	$mean \pm deviation$	1.000±0.001	0.994±0.002
	C_{ex}	2.000	0.499

Полученные результаты показывают, что с уменьшением длины временного окна T увеличивается зашумленность результирующих наклонов. При этом даже для относительно коротких временных окон $T = 0.5$ с предложенный алгоритм позволяет обнаружить дефекты в стержне ротора при $n_B = 1$ и величины эксцентриситета $\alpha = 0.05$. Параметр T также влияет на количество отсчетов которое

необходимо хранить в оперативной памяти для определения технического состояния АД в непрерывном режиме, поэтому снижение T позволит уменьшить размер требуемой памяти и, как следствие, оптимизировать стоимость всей системы мониторинга.

Коэффициент децимации

Коэффициент децимации K_d является параметром, определяющим частоту сигнала, который попадет на вход БПФ. Спектр БПФ в 2 раза ограничивается частотой поданного на вход сигнала, поэтому для исследования высокочастотных гармоник, коэффициент децимации необходимо уменьшать. Например, при исследовании RSH гармоник, для диагностики статического эксцентриситета, необходимо предварительно рассчитать диапазон RSH гармоник, с помощью выражения (26) и подобрать коэффициент децимации таким образом, чтобы частота сигнала после децимации была как минимум в 2 раза больше максимальной частоты RSH гармоники. Для обнаружения частот f_{sb} , f_{sbr} , которые зависят от частоты питания АД и лежат в области низких частот, коэффициент децимации можно увеличить. Увеличение коэффициента децимации позволяет сократить количество точек в сигнале, который необходимо хранить в памяти и соответственно сократить время обработки сигнала, ускорить реакцию при обнаружении неисправности и, в итоге, сократить стоимость системы.

Таким образом, при выборе коэффициента децимации необходимо подобрать наибольшее число таким образом, чтобы при таком коэффициенте результирующая частота после децимации была как минимум в 2 раза больше частоты гармоники, за которой необходимо следить в спектре сигнала АД.

Информативный частотный диапазон

Информативный частотный диапазон (ИЧД) определяется исходя из выбранных диагностических признаков исследуемых дефектов. Диагностические признаки – это характеристические гармоники, рост которых говорит о росте

дефекта. Для того чтобы предложенный алгоритм обнаруживал рост данных гармоник, частоты указанных гармоник должны выходить в ИЧД. Для разных дефектов используется свой ИЧД. Для одновременной диагностики нескольких дефектов может потребоваться несколько ИЧД, такой подход апробирован в работе [163]. ИЧД также влияет на время вычислений: чем уже ИЧД, тем меньший объем вычислений необходимо сделать, что приводит к ускорению обработки данных. Поэтому если точно известны частоты гармоник неисправностей, то ИЧД нужно сузить, если частоты гармоник неисправностей неизвестны, например из-за того, что неизвестна скорость вращения ротора, то ИЧД нужно расширить.

Параметры ФОС

Функция обобщенного среднего (ФОС) имеет следующие параметры: *min* – минимальное значение порядка момента, *max* – максимальное значение порядка момента и *P* – коэффициент определяющие разрешение порядка момента. Оптимальные значения этих параметров, подобраны в работах [94, 97, 100], имеют следующие величины: $P = 75$, диапазон порядка моментов $[-15;15]$.

2.6 Выводы

Развит метод моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики электрических двигателей. Данный подход дополнен этапом предварительной обработки измеренных сигналов с помощью метода Фурье.

Приведены и проанализированы модели токовых сигналов АД. Токовые и вибрационные сигналы АД представляют из себя набор гармоник, по амплитудам и частотам которых судят о техническом состоянии тех или иных узлов машины.

Разработаны алгоритмы обработки токовых и вибрационных сигналов АД на основе метода моментов дробного порядка, которые позволяет различать сигналы с малыми различиями между гармоническими составляющими по амплитуде и

частоте. Указанные алгоритмы состоит из этапа предварительной обработки, включающего: α - β преобразование, децимацию, быстрое преобразование Фурье (БПФ), выделение информативного частотного диапазона (ИЧД), и этапа основной обработки, включающего в себя вычисление функции обобщенного среднего (ФОС), вычисления наклона ФОС тестируемого АД относительно ФОС эталонного АД, сравнение наклона с табличным значением и вывод о техническом состоянии. Благодаря использованию БПФ и ФОС, алгоритм имеет низкую вычислительную сложность, а именно $O(N \log N)$ – предварительный этап обработки, где $N = T \cdot \frac{F_s}{K_d}$ – количество отсчетов в исследуемом временном окне T и $O(P^2)$ – основной этап обработки, где $P = 75$ – коэффициент определяющий разрешение порядка момента.

Разработанный алгоритм обработки токовых сигналов верифицирован на модельных токовых сигналах АД в различных технических состояниях: исправный АД, АД с дефектом в стержнях ротора, АД с эксцентриситетом. Предложенный алгоритм показала эффективность диагностики дефектов на ранних этапах их развития, когда соответствующие этим дефектам гармоники ещё малы, а именно количество поврежденных стержней ротора минимально $n_B = 1$ и индекс модуляции $\alpha = 0.05$ также минимален при диагностике эксцентриситета.

Предложенный алгоритм исследован на зависимость от соотношения сигнал/шум. С уменьшением данного соотношения увеличивается зашумленность выходных параметров предложенного алгоритма – наклонов. Однако даже при достаточно низком соотношении сигнал/шум $SNR = 25$ дБ предложенный алгоритм дает стабильный результат, позволяющий обнаруживать дефекты в стержнях ротора и эксцентриситет. Указанное значение сигнал/шум является минимальным для предложенного алгоритма. Отметим, что полученное значение достаточно мало, по сравнению со значениями, используемыми в работе [147] – $SNR = 37$ и в

работах [145, 149] – $SNR = 50$. Результаты позволяют сделать вывод о том, что разработанный алгоритм достаточно устойчив к зашумлённым измеренным сигналам.

Предложенные алгоритмы имеют следующие параметры:

- длина временного окна;
- коэффициент децимации;
- информативный частотный диапазон (ИЧД);
- параметры функции обобщенного среднего (ФОС).

Длина временного окна определяет размер памяти, требуемой для корректной работы предложенного алгоритма. Показано, что при чрезмерном уменьшении длины временного окна возрастает зашумленность выходных параметров. Оптимальное значения для данного параметра найдено экспериментально $T = 0,5$ с. Данное значение в несколько раз ниже временного окна существующих методов таких как MSCA – 100 с [39]. Коэффициент децимации определяет частоту сигнала, который будет подвергаться основной обработке, поэтому он также влияет на требуемый размер памяти. Значение коэффициента децимации должно быть как минимум в 2 раза больше частоты гармоники, за которой необходимо следить в спектре сигнала АД. ИЧД определяет диапазон, в котором будет происходить анализ. ИЧД определяется типом неисправности и параметрами АД.

Предложенный метод не зависит от измеряемого сигнала двигателя, что делает её универсальным, так как он может применяться к тому сигналу, который доступен. В данной работе на основе предложенного метода разработаны алгоритмы обработки токовых и вибрационных сигналов.

Предложенный метод позволяет реализовывать как простой контроль технического состояния, для обнаружения неисправностей без их локализации, так

и диагностику для определения типа дефекта. Для того, чтобы выполнялась диагностика, необходимо предварительно получить наклоны ФОС относительно эталонной ФОС для тех видов неисправностей, диагностику которых система должна обеспечивать.

Предложенные алгоритмы решают поставленные перед ними задачи, а именно: позволяет обнаружить неисправности ротора и эксцентриситет; требует малую длину выборки ($T=0,5$ с); имеет низкую вычислительную сложность, а именно $O(N \log N)$ – предварительный этап обработки, где $N = T \cdot \frac{F_s}{K_d}$ – количество отсчетов в исследуемом временно окне T , $O(P^2)$ – основной этап обработки, где $P=75$ – коэффициент определяющий разрешение порядка момента; не зависит от скольжения АД, т.е. может применяться если неизвестна скорость вращения АД.

Предложенный метод был апробирован в статьях:

– A. L. Morozov et al., "Microcontroller Realization of an Induction Motors Fault Detection Method based on FFT and Statistics of Fractional Moments," 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2021, pp. 65-70.

– A. L. Morozov, R. R. Nigmatullin, P. Lino, G. Maione and S. Stasi, "An Improved Nonparametric Method for Fault Detection of Induction Motors Based on the Statistics of the Fractional Moments," 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2018, pp. 386-391.

– Морозов А. Л. Комбинированный метод обработки вибросигналов для диагностики и контроля асинхронных двигателей оптимизированный для встраиваемых систем Контроль. Диагностика. Том 24, № 10, 2021 - С. 18-27.

Также метод был представлен конференциях и опубликована в следующих тезисах:

– Морозов А. Л. Комбинированный метод обработки сигналов тока статора для диагностики и контроля асинхронных двигателей оптимизированный

для встраиваемых систем, «Машиностроение и техносфера XXI века»: Международная молодежная научная конференция, 13–19 сентября 2021 г. Крым.: сборник трудов: Изд-во ДонНТУ, 2021. - С. 345–353.

– Морозов А. Л. Разработка прибора для непрерывного мониторинга технического состояния асинхронных двигателей применительно к нефтегазовой промышленности, 15-я Международная выставка и конференция по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ «RAO CIS Offshore 2021», 21–24 сентября 2021, Санкт-Петербург,

ГЛАВА 3. Экспериментальное исследование алгоритмов контроля и диагностики неисправностей асинхронных двигателей

Экспериментальное исследование проводилось в рамках гранта Erasmus. Эксперимент проводился в Политехническом университете гор. Валенсии (Испания) совместно с исследователями Р. Р. Нигматуллин, Х. Роман-Мартинез, З. Канович, Г. Майоне, П. Лино. Данная работа проведена для апробации и экспериментального исследования разработанного метода и реализующих его алгоритмов для решения задач контроля и диагностики асинхронных двигателей (АД) на записанных сигналах токов фаз статора и вибраций идентичных АД во время их работы, находящихся в различных технических состояниях.

3.1 Описание экспериментальной установки и методики измерений

Эксперименты проводились на трех идентичных трехфазных асинхронных двигателях (АД) с короткозамкнутым ротором. Модель АД – Siemens UD 1010/71980410-10. Номинальные параметры АД приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Номинальные параметры используемых АД для экспериментов

Параметр	Значение
Модель	Siemens UD 1010/71980410-10
Номинальная мощность	1.5 кВт
Частота питания	50 Гц
Номинальное напряжение питания	400 В

Номинальный ток	3.25 А
Коэффициент мощности	$\cos \varphi = 0.85$
Номинальная скорость вращения	2860 об/мин
Количество пар полюсов, p	2
Общее количество стержней в роторе, N_B	28

Механическую нагрузку создавали с помощью синхронной машины с постоянными магнитами. Управляющий синхронный двигатель с постоянными магнитами – АВВ MS4839N4008E43C10. Характеристики модели асинхронного двигателя и управляющего синхронного двигателя приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Номинальные параметры используемой синхронной машины с постоянными магнитами для создания нагрузки АД

Параметр	Значение
Модель	АВВ MS4839N4008E43C10
Номинальная мощность	4.9 кВт
Номинальная частота	200 Гц
Номинальный ток	14.4 А
Удерживающий момент	15.5 Н·м
Номинальная скорость	3000 об/мин

Первый АД был исправен. У второго АД был дефект в стержне ротора, вызванный сверлением одного стержня ротора в концевом кольце, что

показано на рисунке 3.1 (а). У третьего АД был искусственно создан статический эксцентриситет. Он был спровоцирован заменой оригинального подшипника на другой, наружный диаметр которого меньше, а внутренний больше по сравнению с размерами оригинального подшипника, что показано на рисунке 3.1 (б). Этот новый подшипник был установлен с помощью эксцентриковой втулки, установленной точно между подшипником и корпусом подшипника, а также одной втулки между валом ротора и подшипником. Общий эксцентриситет вала двигателя, полученный таким образом, составил 0.09 мм, что составляет в общей сложности 30% для обоих подшипников.

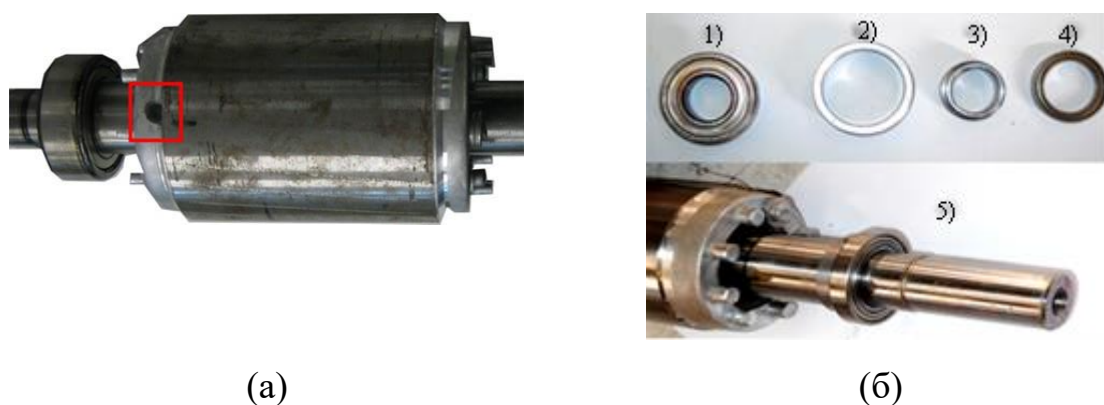


Рисунок 3.1 – Экспериментальные АД: а) – ротор с дефектом в одном стержне; б) – ротор с эксцентриситетом: 1) – оригинальный подшипник; 2) – наружная эксцентриковая втулка; 3) – внутренняя эксцентриковая втулка; 4) – новый подшипник; 5) – втулки и подшипник, установленные на валу

Ток измерялся на всех трех фазах АД с помощью токоизмерительных клещей. Вибрационный сигнал регистрировался с помощью двух акселерометров РСВ 352С33 от РСВ PIEZOTRONICS (США) с чувствительностью 100 мВ/г. Акселерометры крепились к двигателям с

помощью магнитного основания, как показано на рисунке 3.2. Датчики размещены согласно рекомендациям ГОСТ ИСО 10816-1-97. Датчики соединялись с цифровым осциллографом и компьютером, в котором записывались сигналы. Сигналы записывались с частотой 100 кГц длительностью 100 секунд.

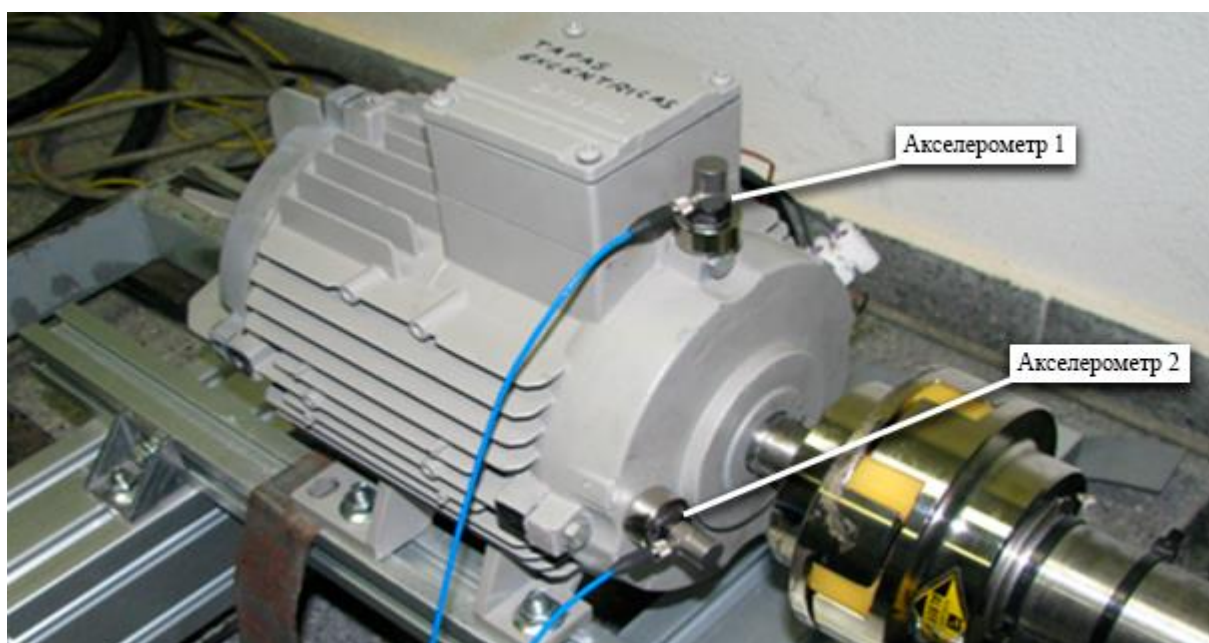


Рисунок 3.2 – Размещение датчиков вибраций (акселерометров) на АД. Акселерометр 1 – измеряет вертикальные радиальные вибрации, акселерометр 2 – измеряет осевые вибрации

Измерения проводили при следующих уровнях нагрузки АД: без нагрузки (0 %), половина номинальной нагрузки (50 %) и полной номинальной нагрузке (100 %) для каждого АД.

На рисунке 3.3 показаны схема и внешний вид лабораторного испытательного стенда для получения экспериментальных данных.

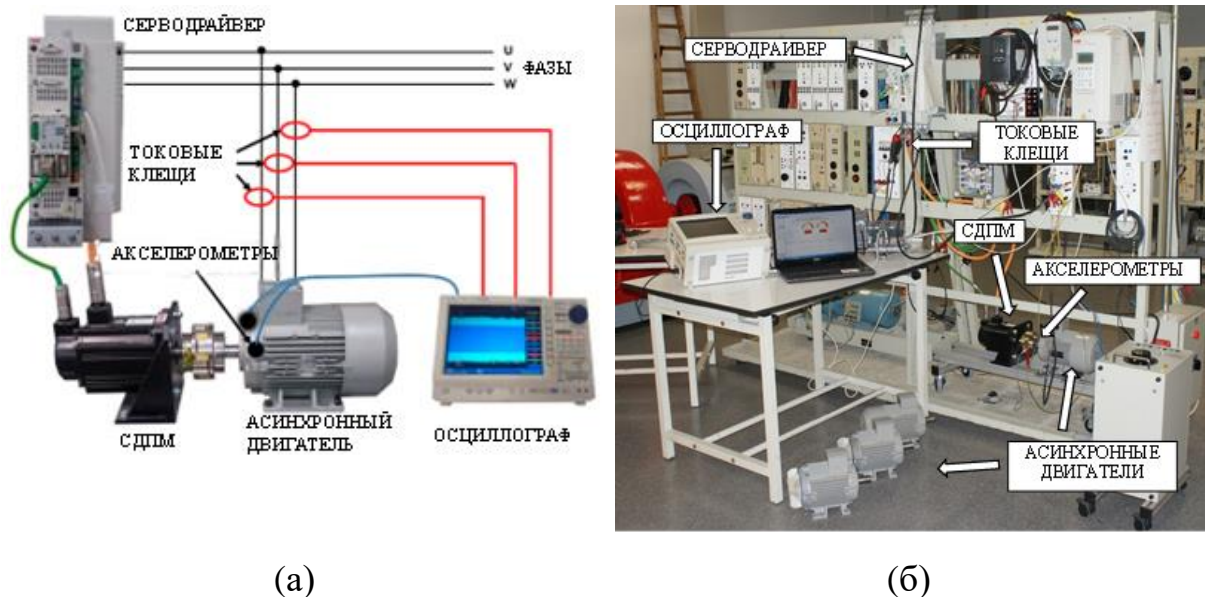


Рисунок 3.3 – Лабораторный испытательный стенд: а) – принципиальная схема; б) – внешний вид. Сокращение СДПМ – синхронный двигатель с постоянными магнитами

3.2 Особенности обработки данных

Разработанные алгоритмы реализованы в виде алгоритма в программном обеспечении MATLAB автором диссертации. Записанные сигналы обрабатывались в указанном программном обеспечении. Были записаны следующие сигналы: токовые сигналы, радиальные вертикальные вибросигналы, полученные с первого акселерометра и осевые вибросигналы, полученные со второго акселерометра. Данные сигналы обрабатывались с помощью разработанных алгоритмов отдельно и независимо.

Оптимальное значение длины временного окна было найдено во второй главе, в экспериментальном исследовании использовалось аналогичное значение, а именно $T=0.5$. Значения параметров функции обобщенного среднего (ФОС) были подобраны в работах [94, 97, 100]. В этом

экспериментальном исследовании взяты эти же значения, а именно: $min_mom = -15$, $max_mom = 15$, $P = 75$. Коэффициент децимации был подобран таким образом, чтобы частота сигнала после децимации была 1 кГц, т.е. при частоте исходного сигнала 100 кГц, использовался коэффициент децимации $K_d = 100$. Выбор частоты после децимации 1 кГц обусловлен тем, что основные гармоники неисправностей находятся вокруг частоты питания, в районе 50 Гц, т. е. ниже 1 кГц. Информативный частотный диапазон (ИЧД) для токового сигнала выбран [0 Гц; 100 Гц]. Для вибрационных сигналов данный параметр подбирался эмпирически, поскольку вибрационные сигналы имеют большую зашумленность, а гармоники неисправностей возрастают не только вокруг частоты питания, но и вокруг модулированных составляющих гармоник вращения ротора.

Параметры алгоритма, использованные для обработки записанных сигналов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения параметров алгоритма, используемые в экспериментальном исследовании

Параметр	Значение
Коэффициент децимации, K_d	100 (частота сигнала после децимации 1 кГц)
Длина временного окна, T	0.5 с
Параметры ФОС	$P = 75$, диапазон порядка моментов [-15;15]

Записанные сигналы, имеющие длину 100 секунд, были разбиты на 200 отрезков, длина которых соответствует длине временного окна – 0.5 секунд.

Каждый отрезок был независимо обработан. В качестве эталонной функции обобщенного среднего (ФОС) использовалась ФОС, рассчитанная для исправного АД.

3.3 Результаты экспериментального исследования диагностики эксцентриситета и дефекта в стержне ротора с помощью предложенных алгоритмов

3.3.1 Результаты обработки токовых сигналов

На рисунке 3.4 представлен записанный токовый сигнал на одной из фаз исправного АД при 100% номинальной нагрузке во временной и частотной области.

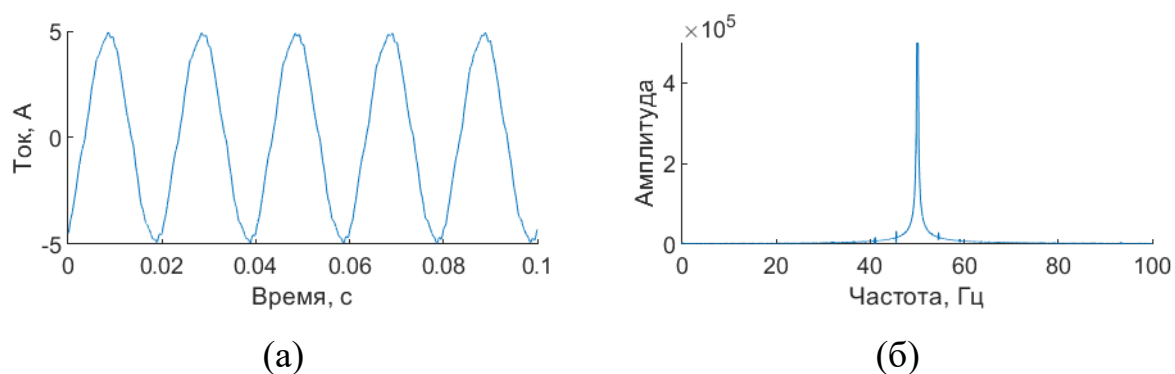


Рисунок 3.4 – Записанный токовый сигнал АД: (а) во временной области, (б) в частотной области

На рисунке 3.5 представлен записанный токовый сигнал на той же фазе АД с дефектом в стержне ротора при 100% номинальной нагрузке во временной и частотной области. Скорость вращения АД была 2892 об/мин, скольжение АД $s=0.036$. Согласно формуле (19) рассчитаны частоты боковых гармоник, характеризующих дефект в стержне ротора $f_{brb1} = 46.36$ Гц,

$f_{brb2} = 53.66$ Гц. Расчетные значения подтверждаются фактическими значениями частот этих гармоник, которые отмечены на рисунке 3.5 (б) и имеют значения $f_{brb1} = 46.39$ Гц, $f_{brb2} = 53.62$ Гц.

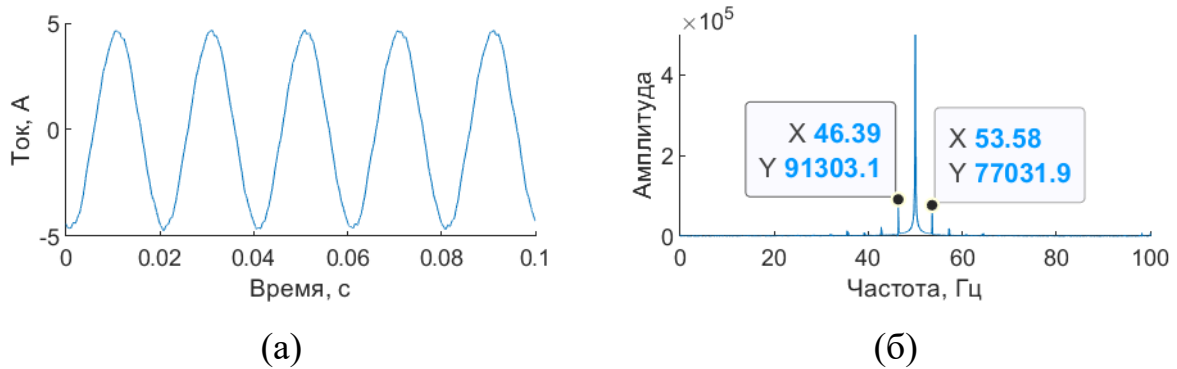


Рисунок 3.5 – Записанный токовый сигнал АД с дефектом в одном стержне ротора: (а) во временной области, (б) в частотной области

На рисунке 3.6 (а), (б) представлен записанный токовый сигнал на той же фазе АД с эксцентриситетом при 100% номинальной нагрузке во временной и частотной области. Скорость вращения АД была 2892 об/мин. При эксцентриситете возрастает несколько видов гармоник в токовом сигнале, указывающих на существующий эксцентриситет. Данные гармоники в литературе определяются как признаки эксцентриситета [31]. Они подробно рассмотрены в главе 2.3.4. Одним из таких признаков является возрастание гармоник прохождения частоты ротора вокруг частоты питания. Расчетные значения частот указанных гармоник имеют следующие значения, при $m=1$: $f_{ecc1,2} = f_s \pm m \cdot f_r = 50 \pm 48.2$, следовательно $f_{ecc1} = 1.8$ Гц, а $f_{ecc2} = 98.2$ Гц. На рисунке 3.6 (б) стрелкой отмечена область возрастания гармоник в районе 100 Гц, наибольшая гармоника в этом диапазоне имеет частоту $f_{ecc2} = 97.66$ Гц.

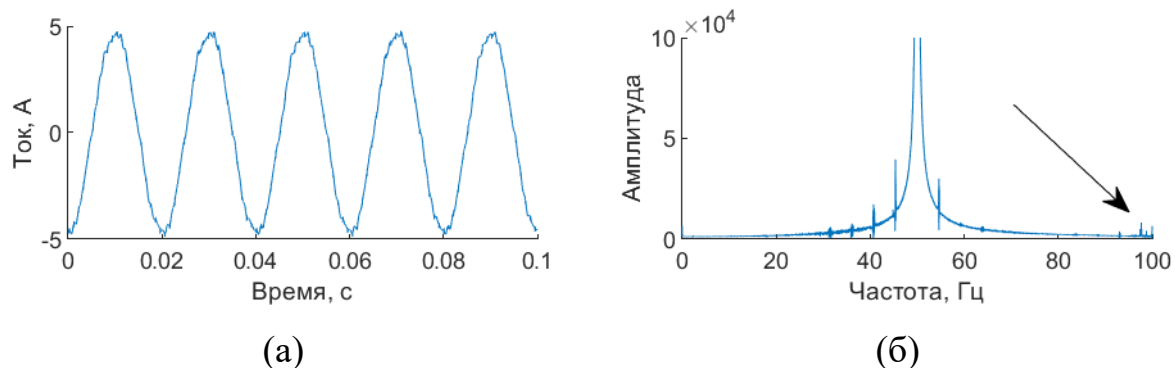


Рисунок 3.6 – Записанный токовый сигнал АД с эксцентриситетом: (а) во временной области, (б) в частотной

Для сравнения участка спектра с признаком эксцентриситета на рисунке 3.7 приведен отрезок спектра исправного АД и АД с эксцентриситетом с увеличенным масштабом в диапазоне [90 Гц; 110 Гц].

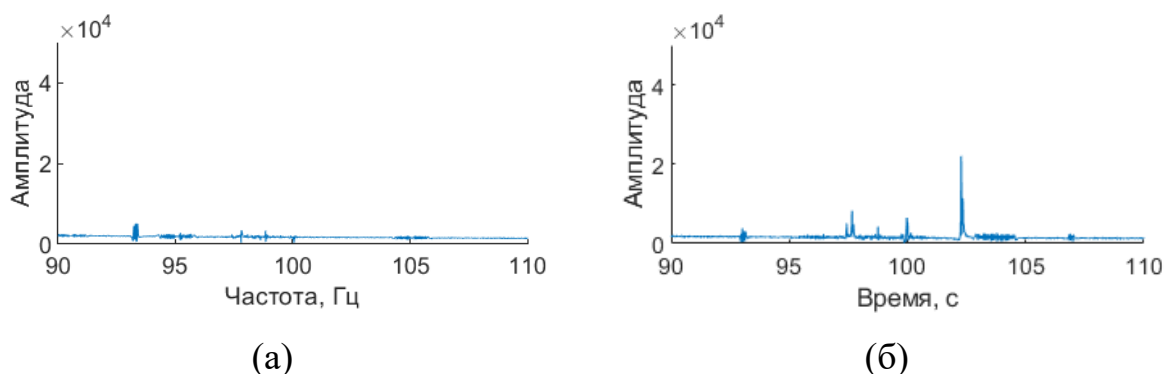
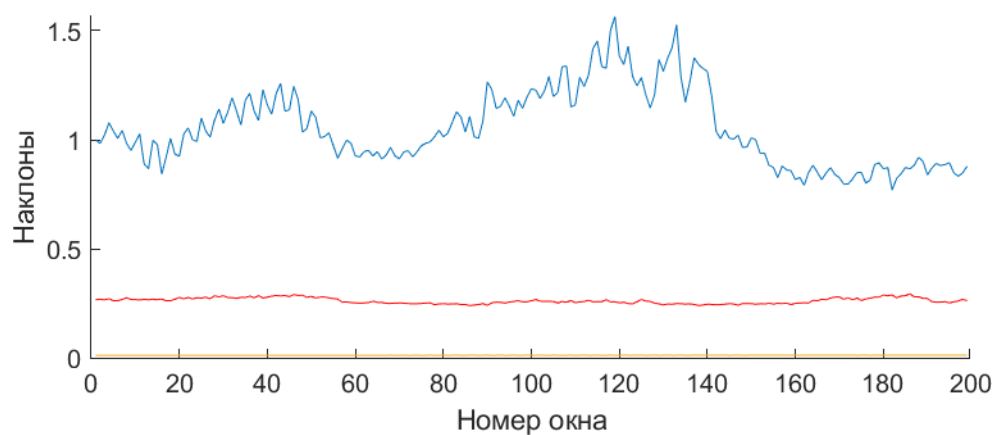
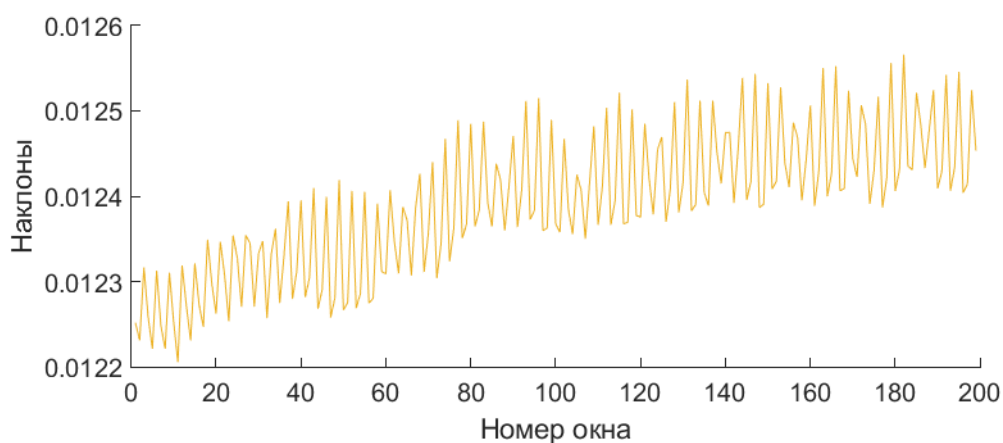


Рисунок 3.7 – Увеличенный масштаб спектров токовых сигналов в диапазоне [90 Гц; 100 Гц]: (а) исправного АД, (б) АД с эксцентриситетом

Указанные сигналы, а также сигналы, записанные при других значениях нагрузки (без нагрузки и 50% от номинальной нагрузки), были обработаны с помощью разработанного алгоритм. Полученные наклоны для моторов без нагрузки представлены на рисунке 3.8.



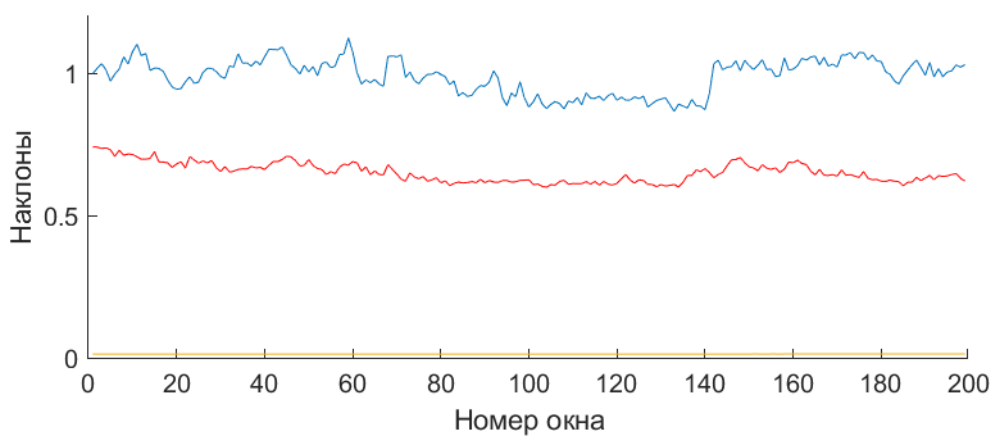
(а)



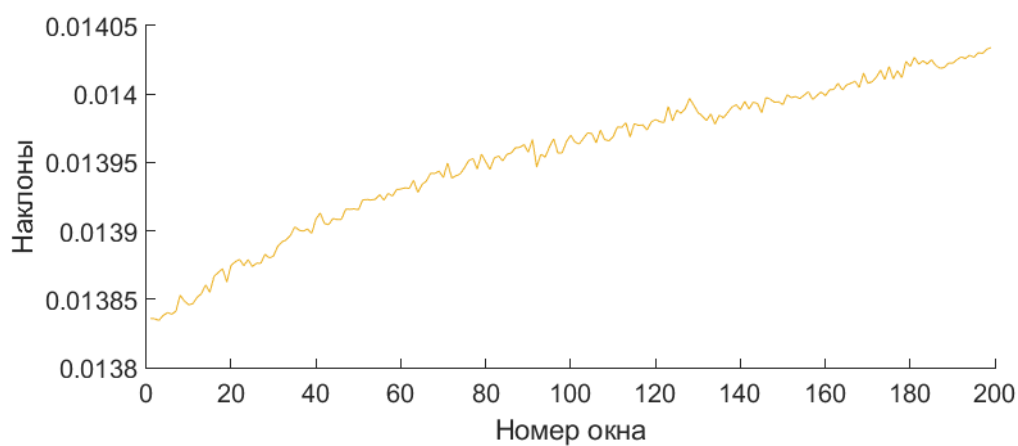
(б)

Рисунок 3.8 – Наклоны, полученные для рассматриваемых АД без нагрузки: синяя кривая соответствует исправному АД, красная - АД с дефектом в одном стержне ротора, желтая - АД с эксцентриситетом. (а) – наклоны от всех АД; (б) – увеличенный масштаб вокруг наклонов, полученных для АД с эксцентриситетом

Наклоны, полученные для моторов при половине от номинальной нагрузки, представлены на рисунке 3.9:



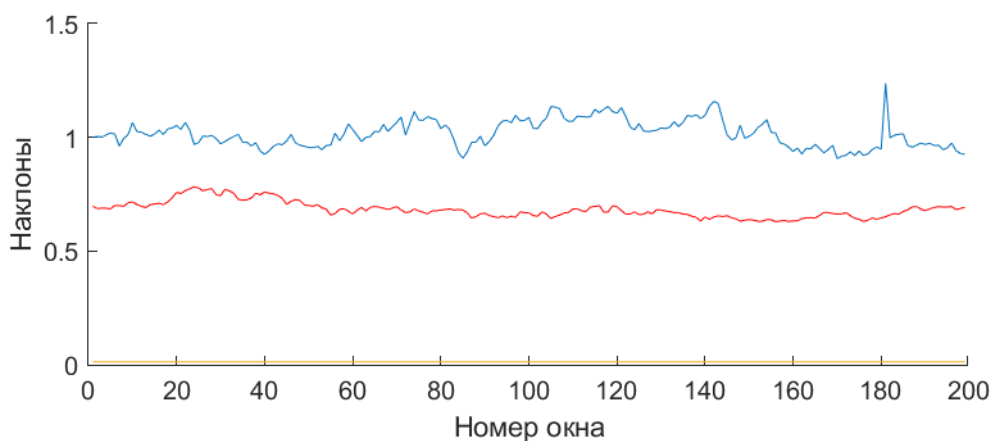
(a)



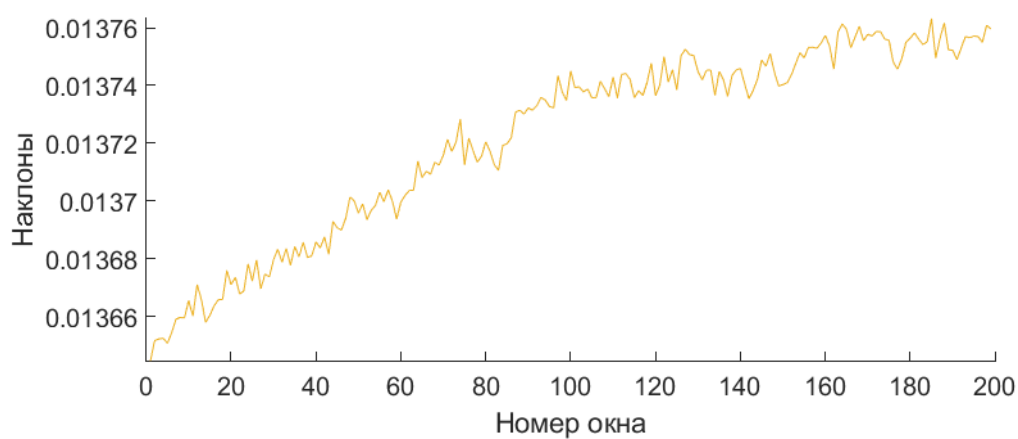
(б)

Рисунок 3.9 – Наклоны, полученные для рассматриваемых АД при половине от номинальной нагрузки: синяя кривая соответствует исправному АД, красная - АД с дефектом в одном стержне ротора, желтая - АД с эксцентриситетом. (а) – наклоны от всех АД; (б) – увеличенный масштаб вокург наклонов, полученных для АД с эксцентриситетом

Наклоны, полученные для моторов при полной номинальной нагрузке, представлены на рисунке 3.10:



(а)



(б)

Рисунок 3.10 – Наклоны, полученные для рассматриваемых АД при полной номинальной нагрузке: синяя кривая соответствует исправному АД, красная - АД с дефектом в одном стержне ротора, желтая - АД с эксцентриситетом. Голубые кривые соответствуют исправному АД, красные – АД с дефектом в стержне ротора, желтые – АД с эксцентриситетом. (а) – наклоны от всех АД; (б) – увеличенный масштаб воцург наклонов, полученных для АД с эксцентриситетом

Средние значения, максимальные отклонения наклонов, полученных для токовых сигналов исправного АД, АД с дефектом в стержне ротора и АД с эксцентриситетом, а также значения критерия S_{ex} представлены в таблице

3.4. В данной таблице средние значения и максимальные отклонения указаны в формате $mean \pm deviation$, где $mean$ – среднее значение, а $deviation$ – максимальное отклонение.

Таблица 3.4 – Статистические параметры наклонов полученных для токовых сигналов АД

Уровень нагрузки, %	Параметр	Исправный АД	АД с дефектом в одном стержне ротора	АД с эксцентриситетом
0	$mean \pm deviation$	1.052 ± 0.517	0.262 ± 0.031	0.012 ± 0.001
	Cex	2.000	0.641	0.512
50	$mean \pm deviation$	0.990 ± 0.135	0.650 ± 0.092	0.014 ± 0.001
	Cex	2.000	0.762	0.233
100	$mean \pm deviation$	1.016 ± 0.215	0.686 ± 0.102	0.014 ± 0.001
	Cex	2.000	0.797	0.270

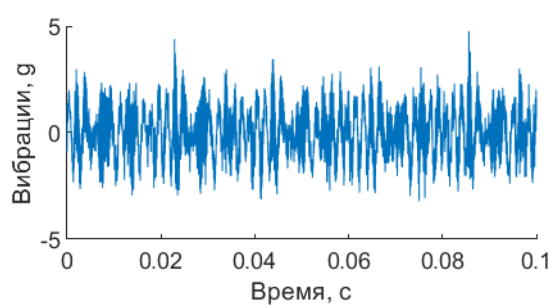
Полученные кривые на рисунках выше не пересекаются между собой, что подтверждается результатами, приведенными в таблице 3.4. Значения выходных параметров алгоритма – наклонов, позволяют отличить токовые сигналы рассматриваемых АД между собой. Это подтверждается и значениями критерия внешних корреляций, который лежит в диапазоне (0;1). Вышесказанное позволяет заключить, что с помощью алгоритма, обрабатывая токовые сигналы АД, можно обнаружить и идентифицировать дефекты в стержне ротора и эксцентриситет АД.

3.3.2 Результаты обработки радиальных вертикальных вибросигналов

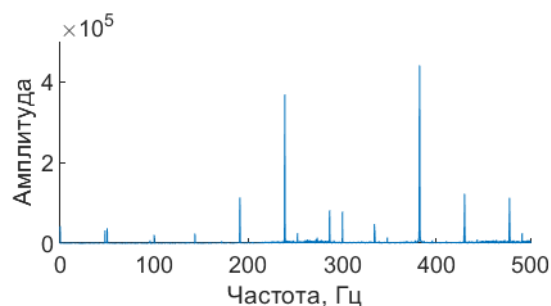
Записанные сигналы радиальных вертикальных вибраций исправного АД, АД с дефектом в стержне ротора и АД с эксцентриситетом, работающих при 100% номинальной нагрузке представлены на рисунке 3.11.

На спектральном представлении сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора, видно, что основные отличия в спектре наблюдаются на частотах около 200 Гц, 250 Гц, 300 Гц и 350 Гц. Данные гармоники отмечены на рисунке 3.11 (г) стрелками. Для диагностики дефекта в стержне ротора выбран информативный частотный диапазон (ИЧД) – $IFR_{vib1,brb} = [200 Гц; 275 Гц]$.

На спектральном представлении сигналов исправного АД и АД с эксцентриситетом, видно, что основные отличия в спектре наблюдаются на частотах около 150 Гц, 200 Гц и 300 Гц. Данные гармоники отмечены на рисунке 3.11 (е) стрелками. Для диагностики эксцентриситета выбран ИЧД – $IFR_{vib1,ecc} = [0 Гц; 200 Гц]$.



(a)



(б)

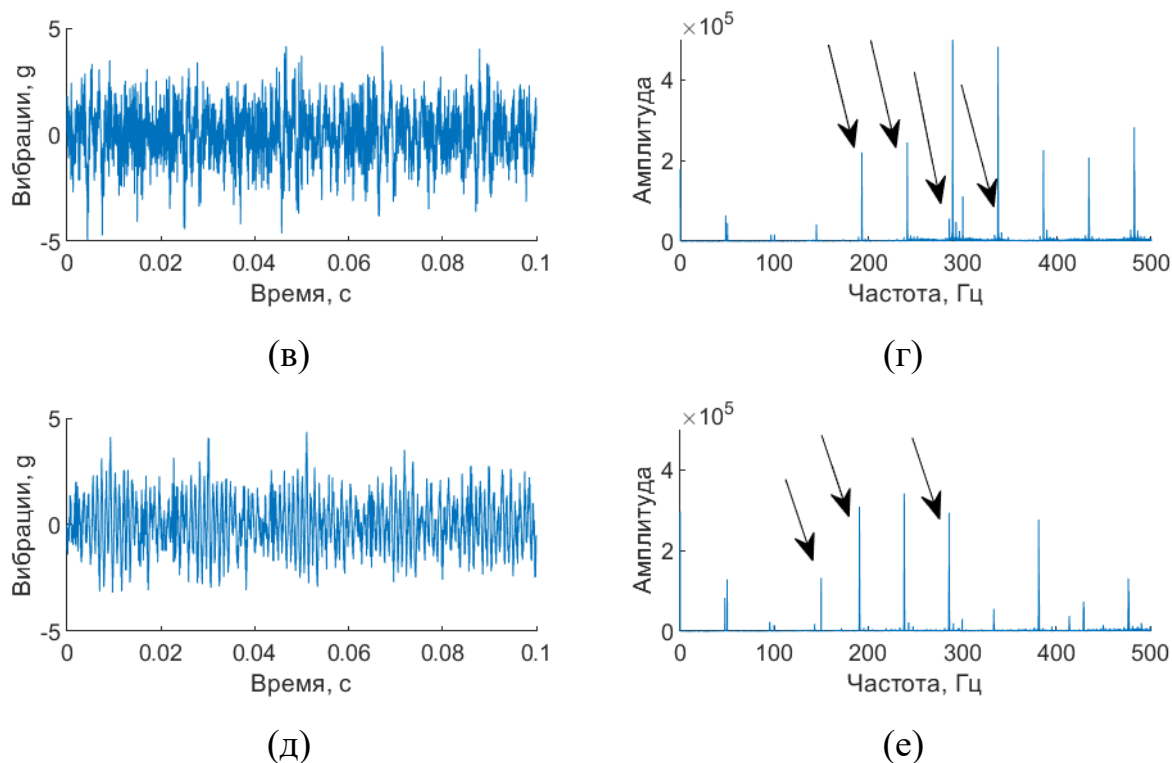
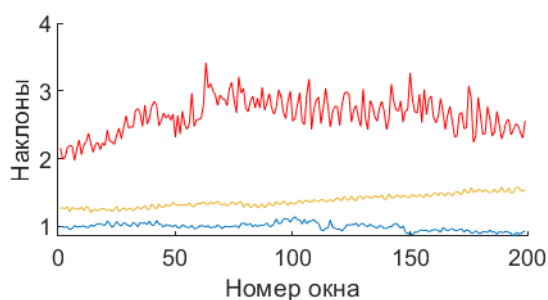
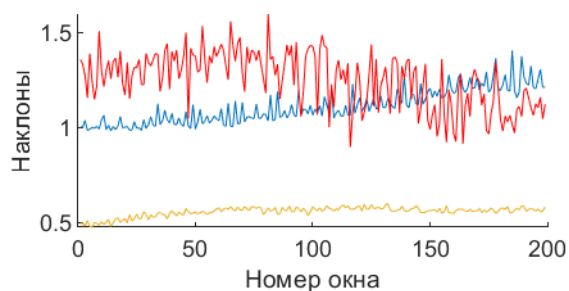


Рисунок 3.11 – Записанные сигналы радиальных вертикальных вибраций во временной и частотной областях соответственно: (а), (б) – АД в исправном состоянии; (в), (г) – АД с дефектом в стержне ротора, (д), (е) – АД с эксцентриситетом

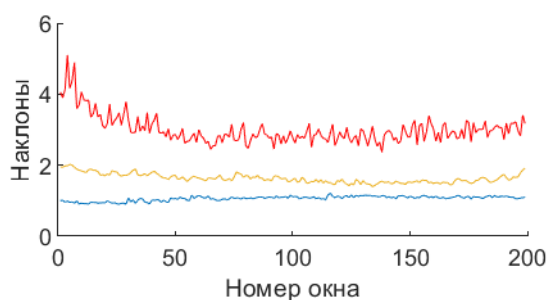
Указанные сигналы, а также сигналы, записанные при других значениях нагрузки (без нагрузки и половина от номинальной нагрузки), были обработаны с помощью разработанного алгоритма. Полученные наклоны для моторов при разной нагрузке для $IFR_{vib1,brb}$ и $IFR_{vib1,ecc}$ представлены на рисунке 3.12:



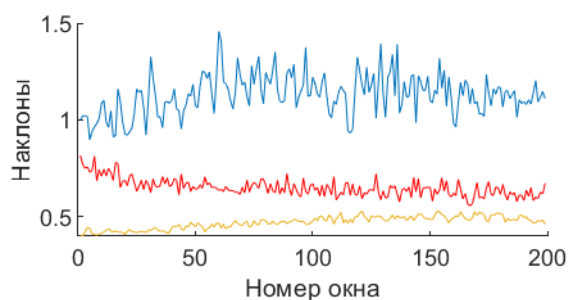
(а)



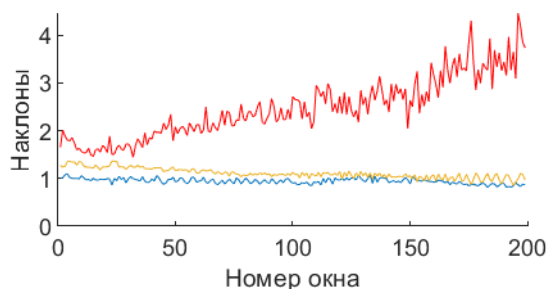
(б)



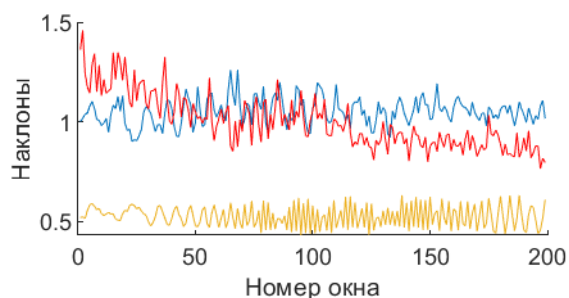
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 3.12 – Наклоны полученные для радиальных вертикальных вибрационных сигналов АД в разных условиях нагрузки: без нагрузки (а) – $IFR_{vib1,brb}$, (б) – $IFR_{vib1,ecc}$, половина номинальной нагрузки (в) – $IFR_{vib1,brb}$, (г) – $IFR_{vib1,ecc}$, полная номинальная нагрузка (д) – $IFR_{vib1,brb}$, (е) – $IFR_{vib1,ecc}$. Голубые кривые соответствуют исправному АД, красные – АД с дефектом в стержне ротора, желтые – АД с эксцентриситетом

Средние значения, максимальные отклонения наклонов, полученных для радиальных вертикальных вибрационных сигналов исправного АД, АД с дефектом в стержне ротора и АД с эксцентриситетом, а также значения критерия C_{ex} представлены в таблице 3.5. В данной таблице средние значения и максимальные отклонения указаны в формате $mean \pm deviation$, где $mean$ – среднее значение, а $deviation$ – максимальное отклонение.

Таблица 3.5 – Статистические параметры наклонов полученных наклонов, полученных для радиальных вертикальных вибраций АД

Уровень нагрузки, %	Параметр	$IFR_{vib1,brb}$			$IFR_{vib1,ecc}$		
		Исправный АД	АД с дефектом в одном стержне ротора	АД с эксцентриситетом	Исправный АД	АД с дефектом в одном стержне ротора	АД с эксцентриситетом
0	$mean \pm deviation$	0.993 ± 0.148	2.634 ± 0.782	1.376 ± 0.204	1.109 ± 0.296	1.250 ± 0.353	0.557 ± 0.081
		C_{ex}	2.000	0.675	0.919	2.000	1.605
	50	$mean \pm deviation$	1.064 ± 0.166	3.002 ± 2.098	1.633 ± 0.391	1.129 ± 0.329	0.650 ± 0.166
C_{ex}			2.000	0.725	0.836	2.000	0.912
100		$mean \pm deviation$	0.945 ± 0.152	2.469 ± 1.990	1.110 ± 0.255	1.050 ± 0.210	1.001 ± 0.458
	C_{ex}		2.000	0.904	1.433	2.000	1.518

Голубые кривые (исправный АД) и красные кривые (АД с дефектом в стержне ротора) на рисунках 3.12 (а), (в), (д), полученные кривые для

первого ИЧД – $IFR_{vib1,brb}$ – не пересекаются между собой, что позволяют обнаружить дефект в стержне ротора. Однако на рисунке 3.12 (д) видно, что желтая кривая (АД с эксцентриситетом) пересекается с голубой, делая затруднительной надежную диагностику эксцентриситета на полном диапазоне нагрузок АД, анализируя лишь данный ИЧД. Это подтверждается и численными данными в таблице 3.5, так значения критерия C_{ex} находятся в диапазоне (0;1), для ИЧД $IFR_{vib1,brb}$ кроме эксцентриситета при полной нагрузке АД. Для диагностики эксцентриситета предложен второй ИЧД – $IFR_{vib1,ecc}$. Голубые и желтые кривые на рисунке 3.12 (б), (г), (е), полученные для $IFR_{vib1,ecc}$ не пересекаются между собой. Это подтверждается и критерием C_{ex} который для ИЧД $IFR_{vib1,ecc}$ для эксцентриситета лежит в диапазоне (0;1), что позволяет обнаружить эксцентриситет, анализируя данный ИЧД.

Полученные результаты, показывают, что предложенный алгоритм при обработке радиальных вертикальных вибросигналов, позволяет обнаружить и диагностировать дефект в стержне ротора и эксцентриситет, при разных нагрузках АД. Особенностью радиальных вертикальных вибраций при применении алгоритма является то, что необходимо анализировать два ИЧД.

3.3.3 Результаты обработки осевых вибросигналов

Записанные сигналы осевых вибраций АД при полной номинальной нагрузке, в различных технических состояниях: исправен, дефект в стержне ротора и эксцентриситет, представлены во временной и частотной области на рисунке 3.13:

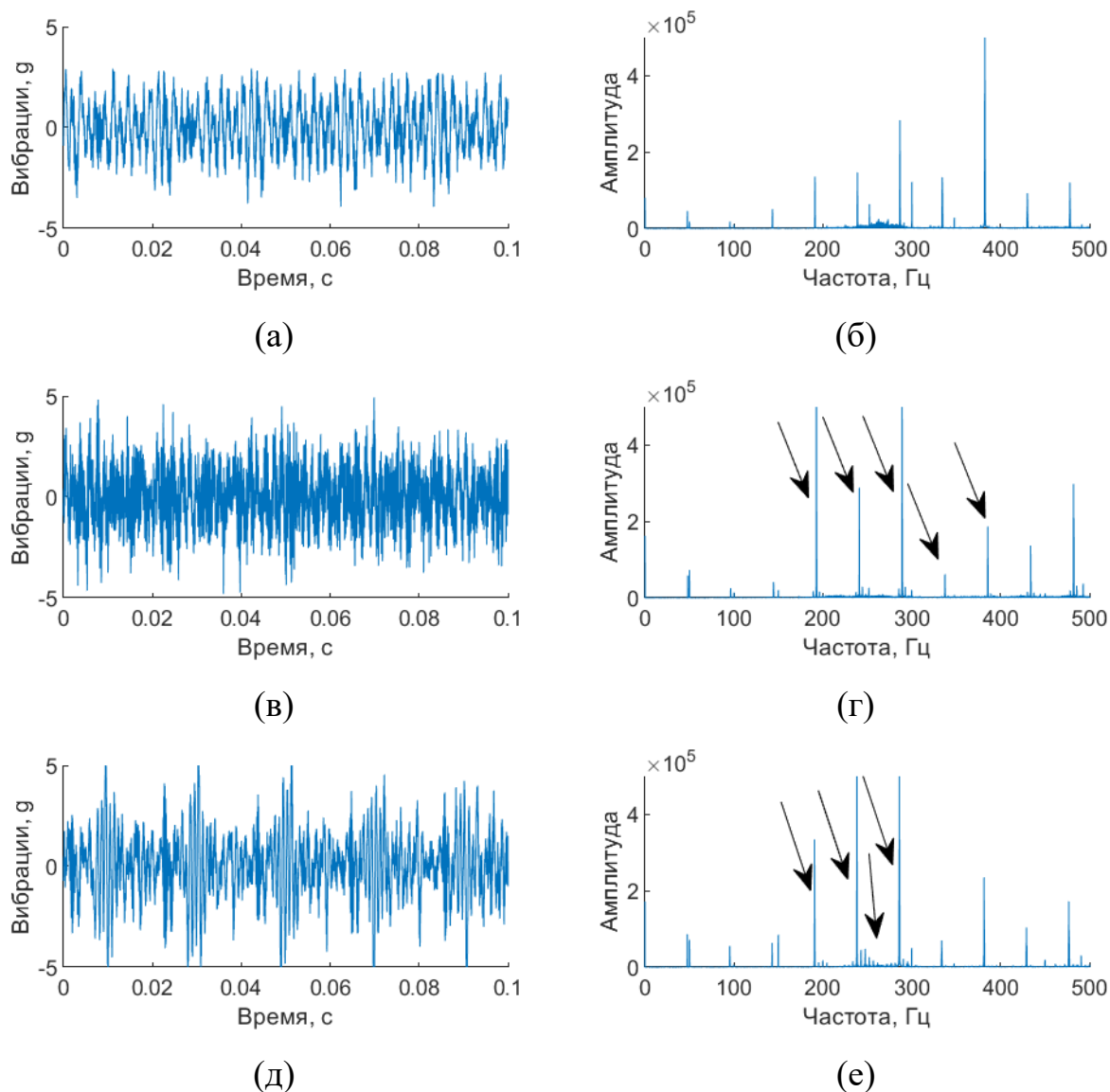


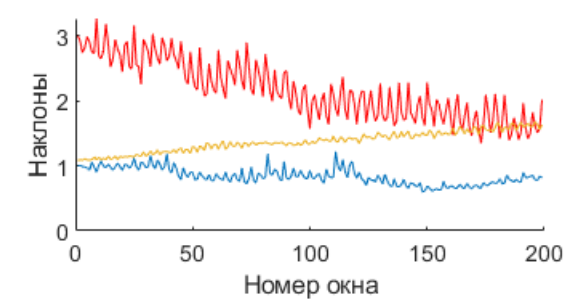
Рисунок 3.13 – Записанные сигналы осевых вибраций АД в различных технических состояниях при полной номинальной нагрузке во временной и частотной областях: (а), (б) – исправный АД, (в), (г) – АД с дефектом в стержне ротора, (д), (е) – АД с эксцентриситетом

На спектральном представлении сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора, видно, что основные отличия в спектре наблюдаются на частотах около 200 Гц, 250 Гц, 300 Гц, 350 Гц и 400 Гц.

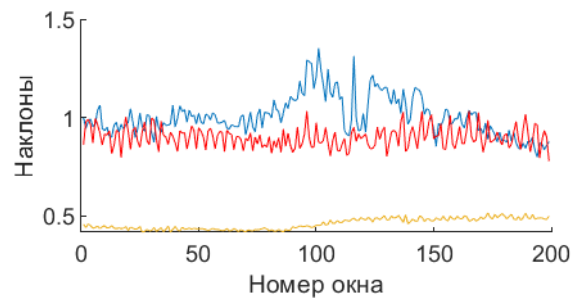
Данные гармоники отмечены на рисунке 3.13 (г) стрелками. Для диагностики дефекта в стержне ротора выбран информативный частотный диапазон (ИЧД) – $IFR_{vib2,brb} = [275 Гц; 410 Гц]$.

На спектральном представлении сигналов исправного АД и АД с эксцентриситетом, видно, что основные отличия в спектре наблюдаются на частотах около 200 Гц, 250 Гц, 300 Гц, а также отрезок спектра в диапазоне $[250 Гц; 300 Гц]$. Данные гармоники отмечены на рисунке 3.13 (е) стрелками. Для диагностики эксцентриситета выбран ИЧД – $IFR_{vib2,ecc} = [200 Гц; 275 Гц]$.

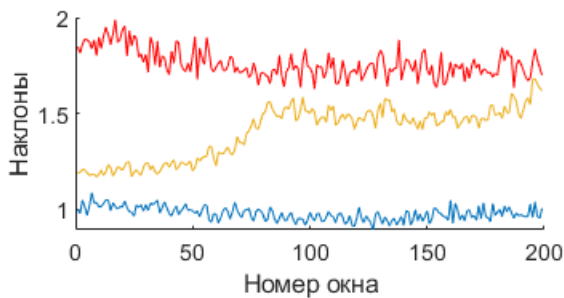
Записанные сигналы, а также сигналы записанные при других значениях нагрузки (без нагрузки и 50% от номинальной нагрузки) были обработаны с помощью разработанного алгоритма. Полученные наклоны для моторов при разной нагрузке для $IFR_{vib2,brb}$ и $IFR_{vib2,ecc}$ представлены на рисунке 3.14:



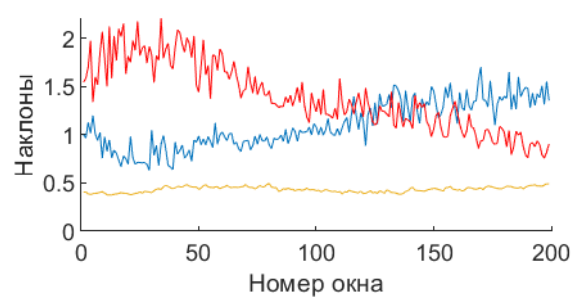
(а)



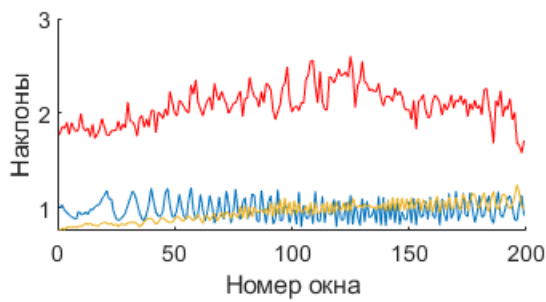
(б)



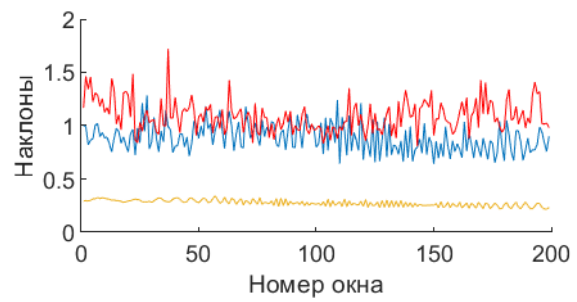
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 3.14 – Наклоны, полученные для осевых вибрационных сигналов АД в разных условиях нагрузки: без нагрузки (а) – $IFR_{vib2,brb}$, (б) – $IFR_{vib2,ecc}$, половина номинальной нагрузки (в) – $IFR_{vib2,brb}$, (г) – $IFR_{vib2,ecc}$, полная номинальная нагрузка (д) – $IFR_{vib2,brb}$, (е) – $IFR_{vib2,ecc}$. Голубые кривые соответствуют исправному АД, красные – АД с дефектом в стержне ротора, желтые – АД с эксцентриситетом

Средние значения и максимальные отклонения наклонов, полученных для осевых вибрационных сигналов исправного АД, АД с дефектом в стержне ротора и АД с эксцентриситетом, а также значения критерия Sex представлены в таблице 3.6. В данной таблице средние значения и максимальные отклонения указаны в формате $mean \pm deviation$, где $mean$ – среднее значение, а $deviation$ – максимальное отклонение.

Таблица 3.6 – Статистические параметры наклонов, полученных для осевых вибраций АД

Параметр	$IFR_{vib2,brb}$	$IFR_{vib2,ecc}$
----------	------------------	------------------

Уровень нагрузки, %		Исправный АД	АД с дефектом в одном стержне ротора	АД с эксцентриситетом	Исправный АД	АД с дефектом в одном стержне ротора	АД с эксцентриситетом
0	<i>mean ± deviation</i>	0.839 ± 0.376	2.162 ± 1.100	1.370 ± 0.303	1.007 ± 0.346	0.900 ± 0.134	0.461 ± 0.056
	<i>Cex</i>	2.000	0.950	1.213	2.000	1.409	0.696
	<i>mean ± deviation</i>	0.977 ± 0.109	1.761 ± 0.227	1.402 ± 0.279	1.101 ± 0.601	1.392 ± 0.817	0.433 ± 0.062
50	<i>Cex</i>	2.000	0.506	0.896	2.000	1.598	0.898
	<i>mean ± deviation</i>	0.979 ± 0.236	2.083 ± 0.517	0.958 ± 0.284	0.885 ± 0.399	1.091 ± 0.631	0.275 ± 0.066
	<i>Cex</i>	2.000	0.798	1.859	2.000	1.443	0.718
100	<i>mean ± deviation</i>	0.979 ± 0.236	2.083 ± 0.517	0.958 ± 0.284	0.885 ± 0.399	1.091 ± 0.631	0.275 ± 0.066
	<i>Cex</i>	2.000	0.798	1.859	2.000	1.443	0.718
	<i>mean ± deviation</i>	0.979 ± 0.236	2.083 ± 0.517	0.958 ± 0.284	0.885 ± 0.399	1.091 ± 0.631	0.275 ± 0.066

Голубые кривые (исправный АД) и красные кривые (АД с дефектом в стержне ротора) на рисунке 3.14 (а), (в), (д), полученные кривые для первого ИЧД – $IFR_{vib2,brb}$ – не пересекаются между собой, что подтверждается также критерием Cex значения которого, для ИЧД $IFR_{vib2,brb}$ и дефекта в стержне ротора лежат в диапазоне (0;1). Вышесказанное показывает, что дефект в стержне ротора может быть обнаружен с помощью анализа ИЧД $IFR_{vib2,brb}$. Однако на рисунке 3.14 (а), (д) желтые кривые (АД с эксцентриситетом) пересекаются с голубыми. Это подтверждается критерием Cex значения которого лежат для АД с эксцентриситетом для ИЧД $IFR_{vib2,brb}$ при отсутствии нагрузки и полной нагрузке лежат в диапазоне [1;2]. Это говорит о том, что обнаружение эксцентриситета затруднительно, анализируя данный ИЧД. Для диагностики эксцентриситета предложен второй ИЧД – $IFR_{vib2,ecc}$. Голубые и

желтые кривые на рисунке 3.14 (б), (г), (е), полученные для $IFR_{vib2,ecc}$ не пересекаются между собой, что также подтверждается критерием S_{ex} значения которого для данного ИЧД $IFR_{vib2,ecc}$ для эксцентриситета лежат в диапазоне (0;1). Вышесказанное позволяет сделать вывод, анализ ИЧД $IFR_{vib2,ecc}$ позволяет обнаружить эксцентриситет.

Полученные результаты показывают, что предложенный алгоритм при обработке осевых вибросигналов, позволяет обнаружить и диагностировать дефект в стержне ротора и эксцентриситет, при разных нагрузках АД. Особенностью осевых вибросигналов при применении алгоритма является то, что необходимо анализировать два ИЧД.

3.4 Выводы

1. Теоретически рассчитанные частоты боковых составляющих, характеризующих дефект(ы) в стержне(ях) ротора подтверждены на реальных данных.

2. С помощью разработанного алгоритма обработаны предварительно записанные токовые сигналы исследуемых асинхронных двигателей в различных состояниях. Подобран информативный частотный диапазон для обработки токовых сигналов. Экспериментально доказана эффективность разработанного алгоритма для диагностики дефекта в стержне ротора и эксцентриситета при обработке.

3. Предварительно записанные сигналы вертикальных радиальных вибраций исследуемых асинхронных двигателей в различных технических состояниях обработаны с помощью разработанного алгоритма. Эмпирически подобраны два информативных частотных диапазона для обработки указанных сигналов при диагностике дефекта в стержне ротора и

эксцентриситета. Экспериментально доказана эффективность разработанного алгоритма при обработке вертикальных радиальных вибросигналов для диагностики дефекта в стержне ротора и эксцентриситета.

4. Предварительно записанные сигналы осевых вибраций исследуемых асинхронных двигателей в различных технических состояниях обработаны с помощью разработанного алгоритма. Эмпирически подобраны два информативных частотных диапазона для обработки указанных сигналов при диагностике дефекта в стержне ротора и эксцентриситета. Экспериментально доказана эффективность разработанного алгоритма при обработке осевых вибросигналов для диагностики дефекта в стержне ротора и эксцентриситета.

5. Пункты 2–4 проделаны для АД в разных условиях нагрузки: без нагрузки, половина номинальной нагрузки, полная номинальная нагрузка.

ГЛАВА 4. Разработка типовой системы непрерывного контроля и диагностики состояния электродвигателей и её экспериментальное исследование

4.1 Введение

Разработанные алгоритмы обработки сигналов асинхронного двигателя (АД), на основе метода моментов дробного порядка, оптимизированы по требованиям памяти и вычислительной сложности для реализации в приборах непрерывного контроля и диагностики технического состояния.

Экспериментальное исследование алгоритмов планировалось проводить в рамках гранта Erasmus в 2020 году, однако в силу ковидных ограничений во время мобильности по гранту данное исследование провести не удалось. Измерительные установки с АД, на которых планировалось проводить эксперименты, находятся в Политехническом университете г. Бари (Италия) и университете г. Нови-Сад (Сербия). Также в силу ковидных ограничений в 2020–2021 годах, уже не в рамках мобильности по гранту, посетить очно указанные университеты для проведения эксперимента не удалось. В связи с этим было принято решение проводить эксперимент удаленно совместно с сербском университетом. Для этого был разработан стенд, позволяющий опрашивать датчики, закрепленные на измерительной установке в сербском университете, в непрерывном режиме через Интернет получать данные с этих датчиков в Казани и «пропускать» их через прототип прибора мониторинга, в котором реализованы предложенные алгоритмы.

В главе приведено: (а) разработка типовой структурной схемы системы непрерывного контроля и диагностики, которая соответствует схеме разрабатываемого стенда; (б) разработка ПО для типовой системы, которое используется в стенде; (в) алгоритмическое обеспечение, которое используется в

разработанном для стенда прототипе прибора непрерывного контроля и диагностики; (г) экспериментальное исследование разработанной системы на стенде.

4.2 Разработка стенда для проведения удаленных измерений и применения приборов контроля и диагностики в непрерывном режиме

Структурная схема стенда представлена на рисунке 4.1:

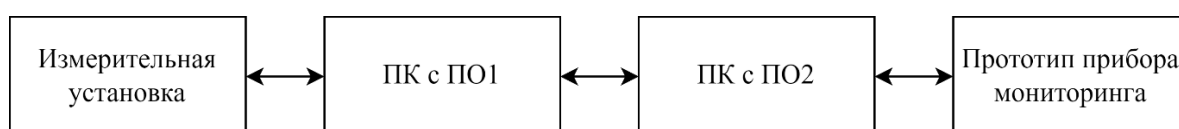


Рисунок 4.1 – Структурная схема стенда для удаленных измерений и применения прототипа прибора мониторинга

Стенд включает в себя:

1. Измерительную установку, состоящую из: два АД, двух акселерометров и датчика тока, а также АЦП.
2. Персональный компьютер с программным обеспечением №1 (ПК с ПО1 на рисунке 4.1) предназначен для настройки и опроса датчиков и передачи данных по Интернету на ПК с ПО2.
3. Персональный компьютер с программным обеспечением №2 (ПК с ПО2 на рисунке 4.1) предназначен для получения данных по Интернету, отображения, сохранения и передачи данных на прибор в непрерывном режиме.
4. Прототип прибора мониторинга, реализующий разработанные алгоритмы обработки сигналов для контроля и диагностики технического состояния АД.

Измерительная установка предназначена для: (а) измерения горизонтальных и вертикальных радиальных вибраций, а также тока одной из фаз статора АД, (б) аналого-цифрового преобразования измерений и (в) последующей передачи измерений в цифровом виде на персональный компьютер по USB в непрерывном режиме. Измерительная установка включает в себя: первый АД, с которого снимаются данные, второй АД для создания нагрузки первому, частотный регулятор оборотов для управления вторым АД, датчики вибраций, токовые клещи и АЦП. Оба АД с короткозамкнутым ротором. Фотографии измерительной установки представлены на рисунках 4.2 и 4.3:

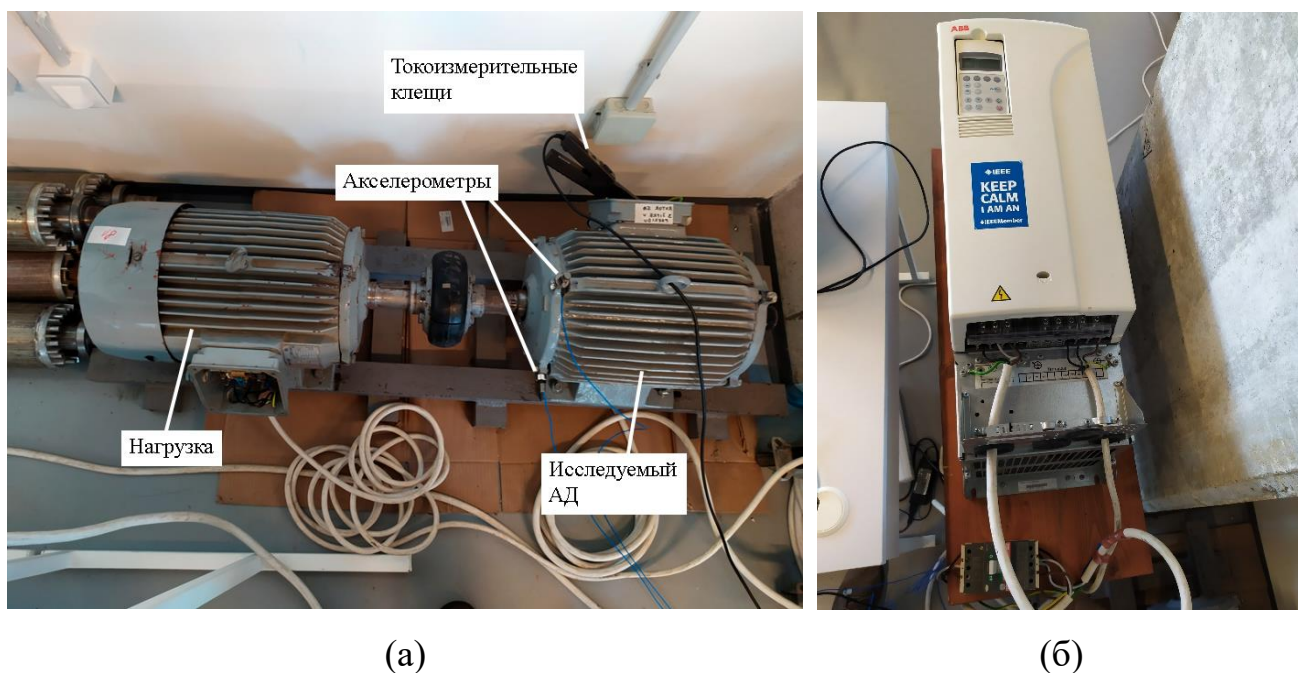


Рисунок 4.2 – Фотографии измерительной установки: (а) - исследуемой АД с датчиками и нагрузка, (б) - частотный регулятор оборотов

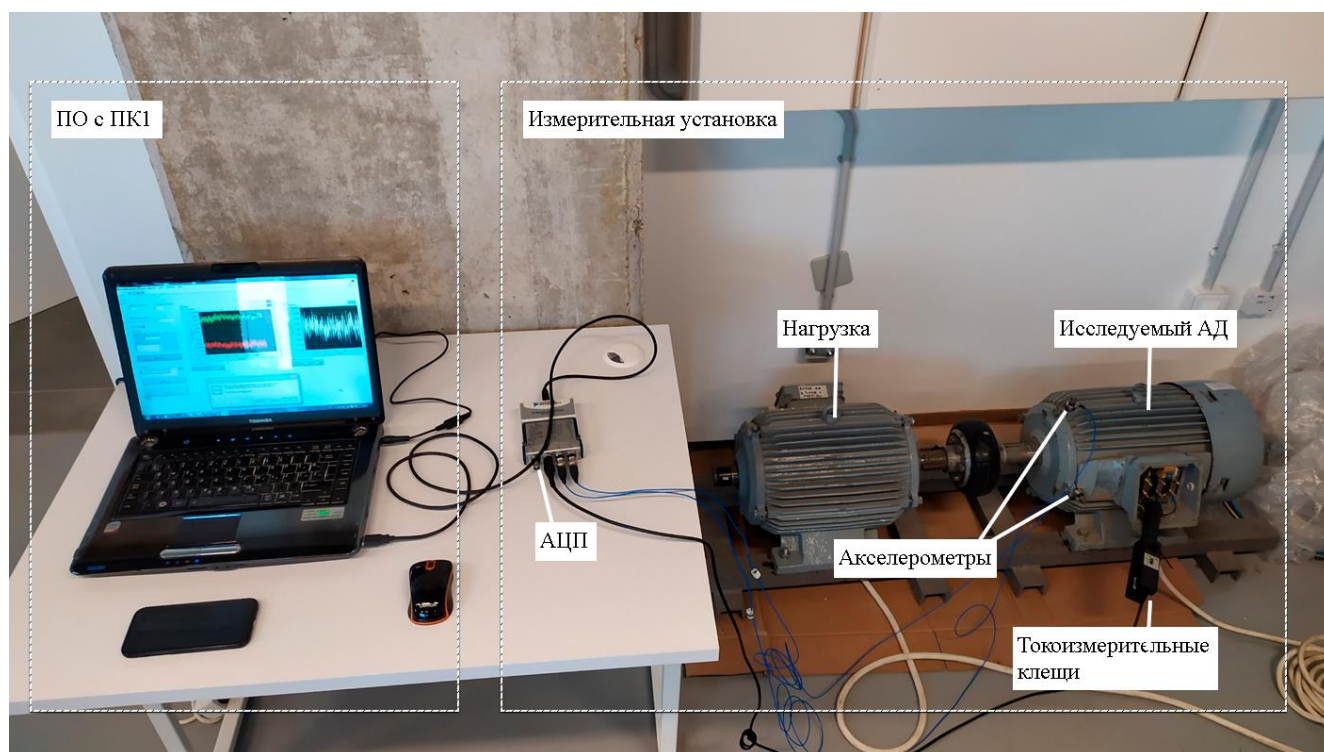


Рисунок 4.3 – Фотография измерительной установки и ПО с ПК1

Параметры исследуемого АД представлены в таблице 4.1:

Таблица 4.1 – Параметры исследуемого АД

Параметр	Значение
Модель	АТВ Sever 432083001-001/15
Номинальная мощность	11 кВт
Частота питания	50 Гц
Номинальное напряжение питания	400 В
Номинальный ток	22 А
Коэффициент мощности	$\cos \varphi = 0.86$
Номинальная скорость вращения	1438 об/мин

Количество пар полюсов, p	2
Общее количество стержней в роторе, N_B	28

Питание для исследуемого АД подавалось напрямую, без частотного регулятора, подаваемое напряжение – 400 В, частота – 50 Гц.

Нагрузка создавалась с помощью другого, нагрузочного АД, управляемого частотным регулятором оборотов. Частотный регулятор устанавливал крутящий момент нагрузочного АД, направленный в противоположную сторону крутящему моменту вращающего исследуемого АД, таким образом создавая для него нагрузку. С помощью указанного регулятора исследовались следующие уровни нагрузки: 10% от номинальной нагрузки АД, 25% от номинальной нагрузки АД и 50% от номинальной нагрузки АД, 75% от номинальной нагрузки АД. Используемый частотный регулятор – ACS800-11-0016-3, его параметры представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры частотного регулятора оборотов

Параметр	Значение
Модель	ACS800-11-0016-3
Производитель	ABB (Швеция)
Номинальный ток	32 А
Номинальная мощность	15 кВт
Номинальное напряжение	400 В

Для исследования прототипа прибора мониторинга использовался исправный ротор АД и ротор с тремя просверленными отверстиями в стержнях

ротора. Таким образом, было выведено из строя два стержня. Ротор с дефектами представлен на рисунке 4.4:



Рисунок 4.4 – Ротор с просверленными отверстиями. Два стержня сломано

Для измерения вертикальных и горизонтальных радиальных вибрационных сигналов использовались акселерометры РСВ 352С33 [164] (от компании РСВ Piezotronics). Для измерения токового сигнала использовался токовый пробник Tektronix А622 [165] (от компании Tektonix). Основные параметры датчиков приведены в таблице 4.3:

Таблица 4.3 – Параметры используемых датчиков

Акселерометр	Датчик тока
--------------	-------------

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Модель	PCB 352C33	Модель	A622
Производитель	PCB Piezotronics (США)	Производитель	Tektronix (США)
Чувствительность	10.2 мВ/(м/с ²)	Чувствительность	10 мВ/А
Диапазон	±490 м/с ²	Диапазон	0.05–100 А
Частотный диапазон	0.5–10000 Гц	Частотный диапазон	До 100 кГц

Для преобразования сигналов в цифровой вид и передачи на компьютер по USB использовалось АЦП – NI-9234 (от National Instruments) и многофункциональное устройство – USB-6251 (от National Instruments) – для передачи данных с АЦП на компьютер по USB. Основные параметры АЦП представлены в таблице 4.4:

Таблица 4.4 – Параметры АЦП

АЦП	
Модель	NI-9234
Производитель	National Instruments (США)
Разрешение	24 бит
Тип АЦП	Сигма-дельта
Частотный диапазон	1.652–51.200 кГц

ПО1 предназначено для: (а) управления АЦП, (б) сбора данных с АЦП, (в) отображения этих данных и (г) их передачи по сети Интернет. Данное программное обеспечение разработано в среде LabVIEW [166]. Скриншот лицевой панели программного обеспечения ПО1 представлен на рисунке 4.5:

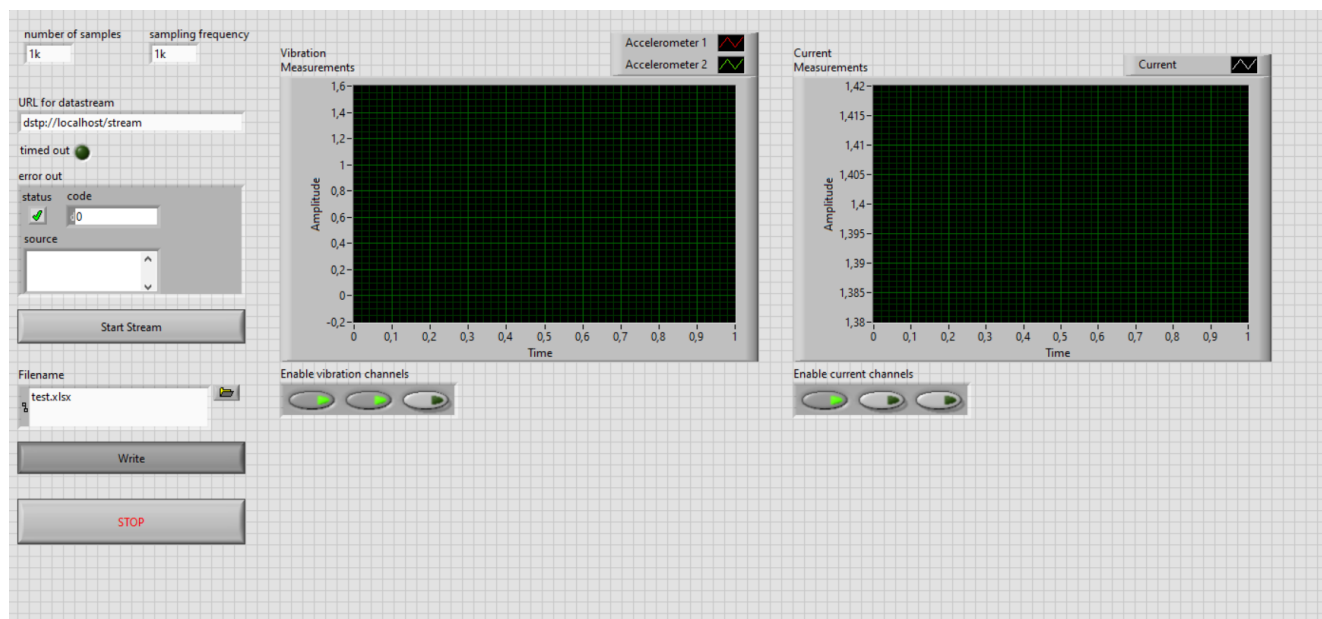


Рисунок 4.5 – Скриншот лицевой панели программного обеспечения ПО1

ПО2 предназначено для: (а) получения данных с ПО1 по сети Интернет, (б) сохранения данных в файл, (в) настройки прототипа прибора мониторинга, (г) передачи данных в непрерывном режиме на прототип прибора по USB и (д) отображению диагностической информации от прибора мониторинга. Скриншот лицевой панели программного обеспечения ПО2 представлен на рисунке 4.6:

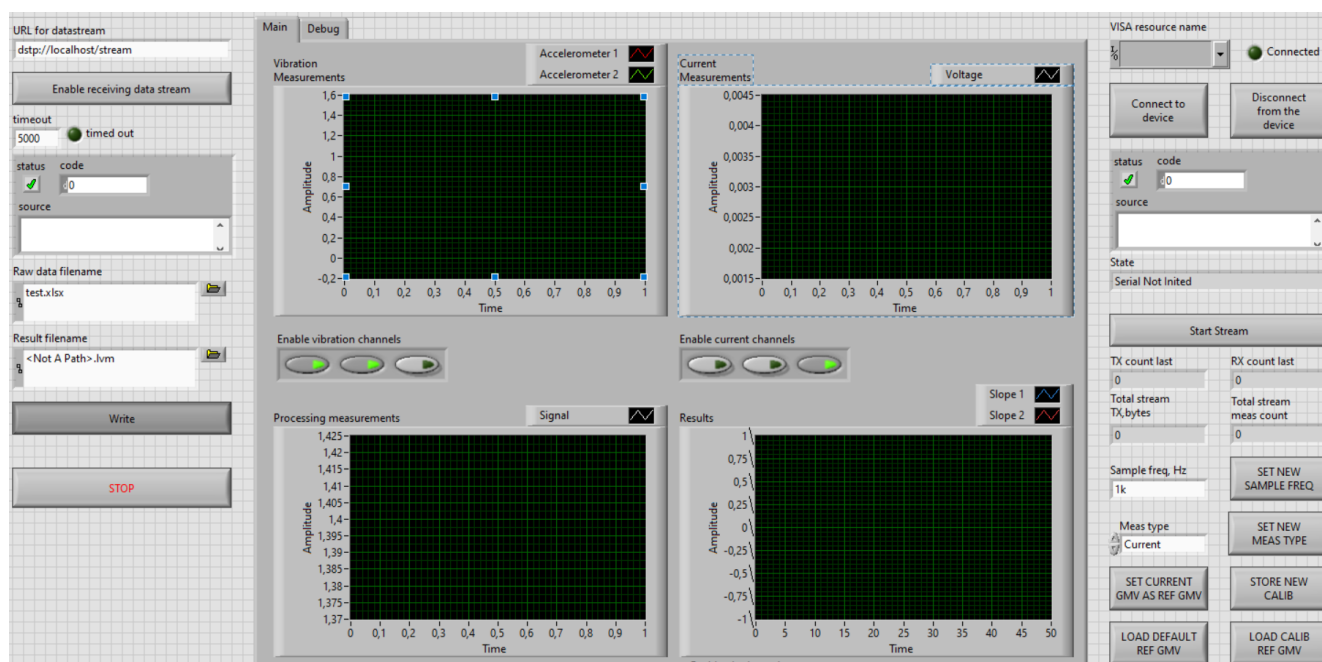


Рисунок 4.6 – Скриншот лицевой панели программного обеспечения ПО2

Прототип прибора мониторинга технического состояния асинхронных двигателей предназначен для обработки получаемых по USB с ПО2 данных с датчиков с помощью разработанных алгоритмов и передачи диагностических данных по USB на ПО2.

4.3 Разработка прототипа прибора контроля и диагностики асинхронных двигателей в непрерывном режиме

Основной целью разработки прототипа прибора является апробация предложенных алгоритмов. Особенностью данного прототипа является то, что датчики являются не встроенными в прибор и измерения на прибор поступают не напрямую с датчиков, а с компьютера по USB. С учетом выше указанного сформулированы следующие функциональные требования, которые должен выполнять прототип прибора:

1. Получение данных в непрерывном режиме по USB с ПО2.
2. Обработка получаемых данных в непрерывном режиме с помощью разработанных алгоритмов.
3. Отправка данных с результатами обработки в непрерывном режиме по USB на ПО2.
4. Возможность настройки следующих параметров алгоритма:
 - а. Частота входного сигнала. Данный параметр необходим для подстройки коэффициента децимации.
 - б. Тип входного сигнала: ток, вертикальные радиальные вибрации, горизонтальные радиальные вибрации. Данный параметр необходим для автоматического выбора информативного частотного диапазона.
5. Калибровка.

4.3.1 Описание аппаратной платформы прототипа прибора

В качестве аппаратной платформы необходимо выбрать микроконтроллер, на базе которого будет разрабатываться прототип прибора. Основным элементом микроконтроллеров является ядро. Одной из самых распространенных семейств архитектур микроконтроллеров на данный момент является ARM Cortex M. Внутри этого семейства, архитектуры отличаются между собой поддержкой разного количества инструкций процессора [167]. Чем больше инструкций поддерживает ядро, тем выше стоимость контроллера, поддерживаемая частота и производительность. В системах, где используется цифровая обработка сигналов, для ускорения вычислений и снижения энергопотребления применяют модуль операций с плавающей запятой. Данный блок поддерживается в контроллерах с ядром ARM Cortex M4F и выше, поэтому остановимся на этой архитектуре.

Таким образом, главными критериями выбора микроконтроллеров являются: доступность, цена, ядро Cortex M4F, аппаратная поддержка интерфейса USB High Speed, наличие отладочной платы.

В качестве микроконтроллера выбран – STM32G474RE. Основные функции данного устройства [168] представлены в таблице 4.5:

Таблица 4.5 – Основные параметры выбранного микроконтроллера

Параметр	Значение
Ядро	ARM Cortex-M4F
Модуль защиты памяти	Есть
Модуль работы с плавающей запятой	Есть
Энергонезависимая память	FLASH, 512 Килобайт
Оперативная память	SRAM, 128 Килобайт
Аналоговая периферия	5 12-битных АЦП, 7 компараторов, 7 ЦАП, 6 операционных усилителей, датчик температуры, внутренний источник напряжения
Периферия таймеров	5 16-битных таймеров, 2 32-битных таймера, 1 16-битный таймер с низким энергопотреблением, 1 таймер высокого разрешения
Периферия для связи	4 SPI, 4 I2C, 6 UART, 1 USB 2.0, 1 USB-C PD3.0 (PHY), 3 CAN FD, 2 I2S
Периферия для внешних устройств	FSMC (8-/16-битный), QuadSPI

Математические ускорители	Ускоритель тригонометрических операций, ускоритель фильтров
---------------------------	--

В качестве аппаратной платформы прототипа прибора использовалась отладочная плата микроконтроллера STM32G474RE – B-G474-DPOW1 Discovery Kit. Фотография данной платы представлена на рисунке 4.7:

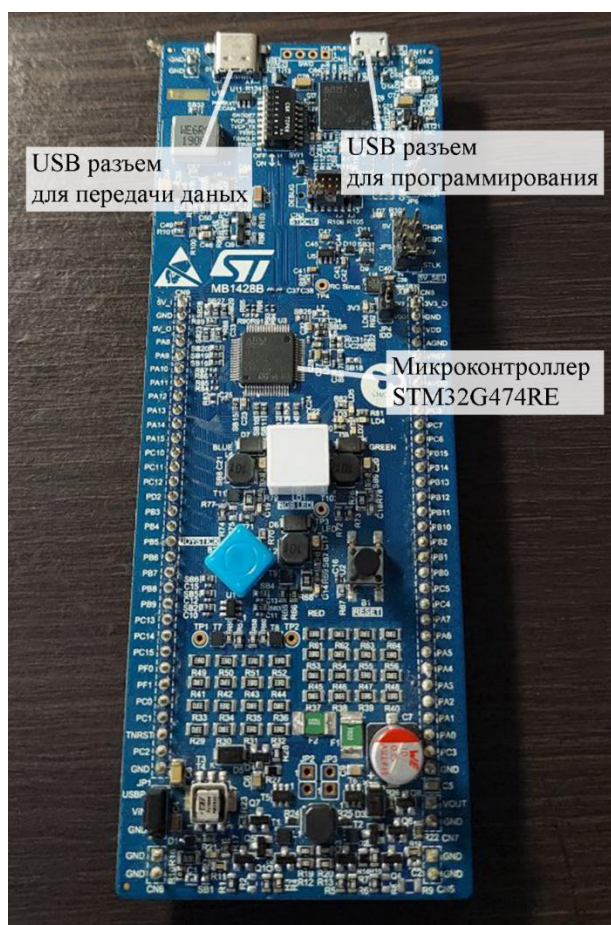


Рисунок 4.7 – Фотография отладочной платы B-G474-DPOW1

4.3.2 Описание программного обеспечения прототипа прибора

Программное обеспечение (ПО) прототипа прибора разработано на базе операционной системы реального времени FreeRTOS [169] на языке программирования «С». Использование операционной системы реального времени обусловлено необходимостью выполнения нескольких потоков одновременно. Использовался компилятор GCC [170]. В ПО реализованы следующие потоки:

- поток для обслуживания коммуникации по USB с ПО2, а именно: обработка пакетов с данными полученными, по USB и отправка результатов обработки данных, т. е. диагностической информации;
- поток для обработки данных с помощью разработанных алгоритмов;
- отладочный поток, для вывода в терминал данных о выполнении программы.

Кроме потоков, также использовались следующие очереди данных:

- очередь входящих пакетов с данными, полученными по USB. Очередь наполняется в обработчике прерывания о поступлении новых пакетов от периферии USB, а опустошается в задаче, обслуживающей коммуникацию по USB;
- очередь данных с измерениями. Очередь наполняется в задаче, которая обслуживает коммуникацию по USB, при получении измерений, а опустошается в потоке, который обрабатывает данные с помощью предложенных алгоритмов;
- очередь с диагностической информацией. Очередь наполняется в потоке, выполняющем обработку измерений, а опустошается в потоке, который обслуживает коммуникацию по USB.

В потоке, выполняющем обработку данных реализованы разработанные алгоритмы обработки сигналов для диагностики асинхронных двигателей.

С учетом ограниченной производительности и малых объемов оперативной и энергонезависимой памяти микроконтроллера, использовалась функция быстрого преобразования Фурье (БПФ), поставляемая в стандартной библиотеке ARM CMSIS DSP [171]. БПФ требует, чтобы входное количество отсчетов было степенью двойки. При частоте сигнала после децимации 1 кГц и длине временного окна 0.5 секунд, на вход БПФ должно подаваться 500 отсчетов. Однако 500 не является степенью двойки. Ближайшее число, являющееся степенью двойки – 512, поэтому временное окно было расширено до 0.512 секунды.

Для тестирования реализации алгоритма на микроконтроллере и сравнения результатов обработки сигналов на микроконтроллере и в MATLAB разработан дополнительный отладочный функционал в ПО2. Скриншот с вкладкой отладочного функционала в ПО2 представлен на рисунке 4.8. Указанный отладочный функционал позволяет отправить заранее записанный файл с измерениями на устройство и получить вычисленные на устройстве наклоны для данных измерений. Кроме этого, на вкладке с отладочным функционалом отображаются измерения, открытые из файла, для отправки на устройство и полученные от устройства наклоны для разных информативных частотных диапазонов. Также с устройства для отладочных целей передается вычисленный Фурье спектр и вычисленная функция обобщенного среднего. В ПО2 эти сигналы принимаются и отображаются.

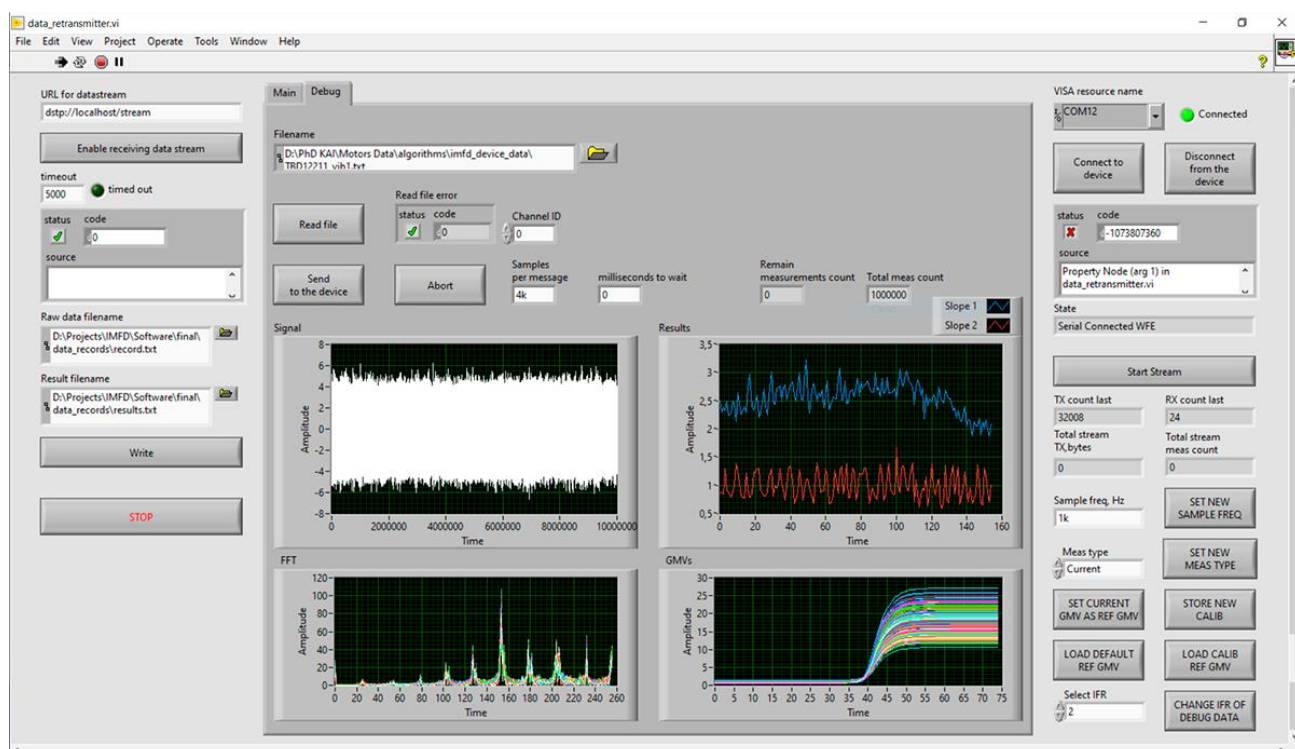
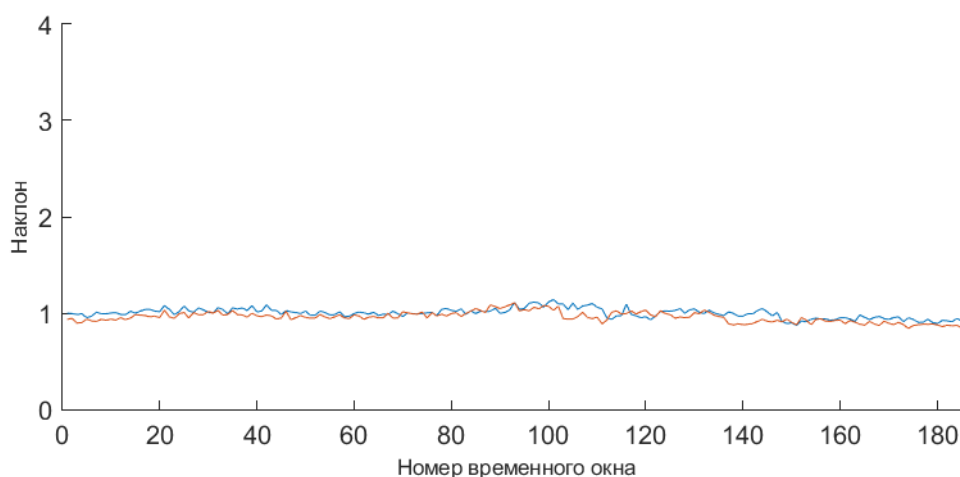
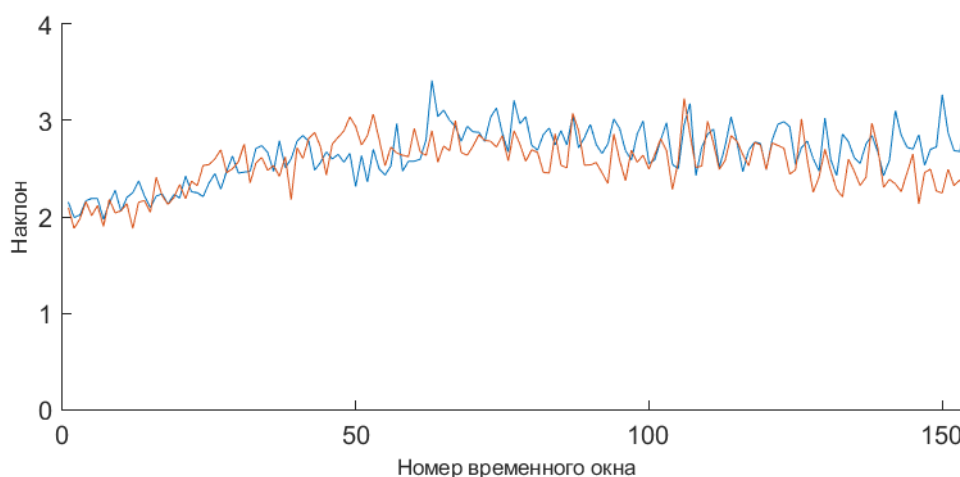


Рисунок 4.8 – Скриншот ПО2, вкладка с отладочным функционалом

Через отладочный функционал в ПО2 записанный сигнал был обработан с помощью реализованного алгоритма в MATLAB и с помощью реализованного алгоритма в прототипе прибора. Реализацию алгоритма в MATLAB считаем эталонной. Наклоны, полученные для одного и того же сигнала в MATLAB и на микроконтроллере, представлены на рисунке 4.9:



(а)



(б)

Рисунок 4.9 – Наклоны, полученные при обработке одних и тех же вибросигналов (а) - исправного АД, (б) - АД с дефектом в стержне ротора: синяя кривая соответствует наклонам полученным в MATLAB, красная кривая - на микроконтроллере

В таблице 4.6 представлены статистические данные полученных кривых. В данной таблице результаты представлены в формате $mean \pm max_dev$, где $mean$ – среднее значение наклонов, max_dev – максимальное отклонение от среднего значения.

Таблица 4.6 – Статистические параметры диагностической информации (наклонов), полученных в MATLAB и на прототипе прибора

Радиальный вибросигнал, полученный от	Наклоны, полученные в MATLAB	Наклоны, полученные на прототипе прибора	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность, %
АД в исправном состоянии	0.993 ± 0.148	0.960 ± 0.150	- 0.033	3.36
АД с дефектом в стержне ротора	2.634 ± 0.782	2.547 ± 0.682	0.086	3.28

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что реализация алгоритма на микроконтроллере имеет относительную погрешность около 3% по сравнению с эталонной версией в MATLAB.

Для коммуникации прототипа прибора с ПО2 по USB, разработан коммуникационный протокол ONECOM. Описание этого протокола представлено в приложении 1.

4.4 Результаты экспериментального исследования прототипа прибора для диагностики и контроля асинхронных двигателей в непрерывном режиме

4.4.1 Параметры разработанных алгоритмов во время проведения экспериментального исследования прототипа прибора

Для экспериментального исследования разработанных алгоритмов проведен удаленный эксперимент на разработанном стенде, который описан в предыдущем

параграфе. Измерялись токовые сигналы с одной из фаз статора АД, вертикальные и горизонтальные радиальные вибросигналы. Сигналы измерялись с частотой 1 кГц. Сигналы измерялись при следующих уровнях нагрузки АД: 10 % от номинальной нагрузки, 25% от номинальной нагрузки и 50% от номинальной нагрузки, 75% от номинальной нагрузки. Длительность выборки каждого сигнала – 60 секунд. Параметры алгоритма, используемые для удаленного эксперимента, представлены в таблице 4.7:

Таблица 4.7 – Параметры алгоритмов, используемые в удаленном эксперименте

Параметр	Значение
Коэффициент децимации, K_d	1 (частота сигнала после децимации 1 кГц)
Длина временного окна, T	0.512 с (при частоте после децимации 1 кГц, временное окно состоит из 512 отсчетов)
Параметры ФОС	$P = 75$, диапазон порядка моментов [-15;15]

Коэффициент децимации выбирался так, чтобы частота после децимации была 1 кГц, так же как это было в экспериментальном исследовании разработанных алгоритмов, которое описано в 3-й главе. Поэтому при исходной частоте опроса датчиков 1 кГц, для того чтобы частота после децимации была также 1 кГц, коэффициент децимации был выставлен равным 1.

Длина временного окна также взята как в экспериментальном исследовании разработанных алгоритмов, которое описано в 3-й главе, а именно 0.5 с. Однако это значение было модифицировано с учетом специфики реализации БПФ на микроконтроллере, так как требуется, чтобы количество отсчетов во временном сигнале было степенью двойки. Так, при частоте после децимации 1 кГц, при длине

временного окна 0.5 с, количество отсчетов получалось равным 500. Для того чтобы реализовать алгоритм на микроконтроллере, длина временного окна была расширена до 0.512 с, таким образом при частоте после децимации 1 кГц, количество отсчетов получилось 512.

Параметры ФОС взяты такие же, как в экспериментальном исследовании разработанных алгоритмов, которое описано в 3-й главе.

Информативные частотные диапазоны (ИЧД) для токового и радиальных вибрационных сигналов были подобраны в экспериментальном исследовании разработанных алгоритмов, которое описано в 3-й главе. В экспериментальном исследовании прототипа прибора взяты эти же значения. ИЧД, используемые в экспериментальном исследовании прибора представлены в таблице 4.8:

Таблица 4.8 – Информативные частотные диапазоны, используемые в экспериментальном исследовании прототипа прибора

ИЧД для токовых сигналов	ИЧД для радиальных вибросигналов
[0 Гц; 100 Гц]	[200 Гц; 275 Гц]

В качестве эталонных функций обобщенного среднего (ФОС), относительно которых считались наклоны, взяты ФОС, полученные для исправного АД. Для этого, при подключении исправного АД, текущие ФОС сохранялись в память и использовались как эталонные. Таким образом были записаны ФОС для исследуемых уровней нагрузки исправного АД, а именно 10% номинальной нагрузки, 25% номинальной нагрузки и 50% номинальной нагрузки, 75% от номинальной нагрузки АД. Относительно полученных ФОС рассчитывались наклоны исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора.

4.4.2 Результаты обработки токового сигнала

Результаты обработки токовых сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 10% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора представлены на рисунке 4.10:

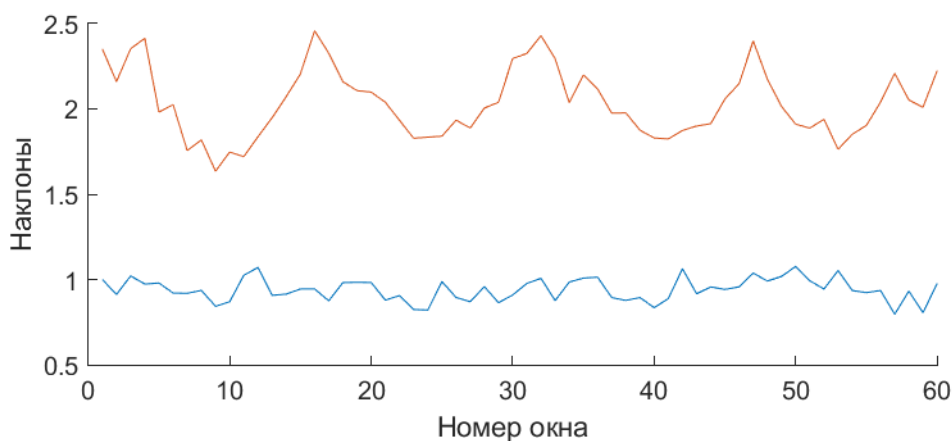


Рисунок 4.10 – Результаты обработки токовых сигналов при 10% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Результаты обработки токовых сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 25% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора представлены на рисунке 4.11:

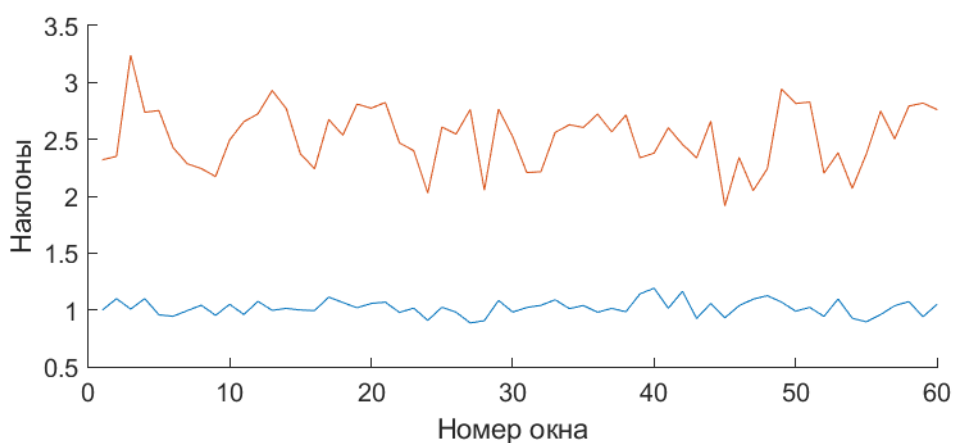


Рисунок 4.11 – Результаты обработки токовых сигналов при 25% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Результаты обработки токовых сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 50% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора представлены на рисунке 4.12:

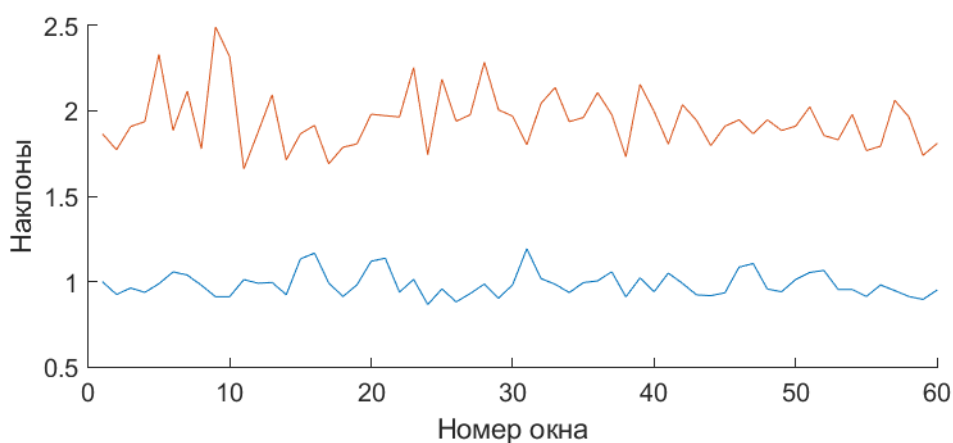


Рисунок 4.12 – Результаты обработки токовых сигналов при 50% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Результаты обработки токовых сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 75% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора представлены на рисунке 4.13:

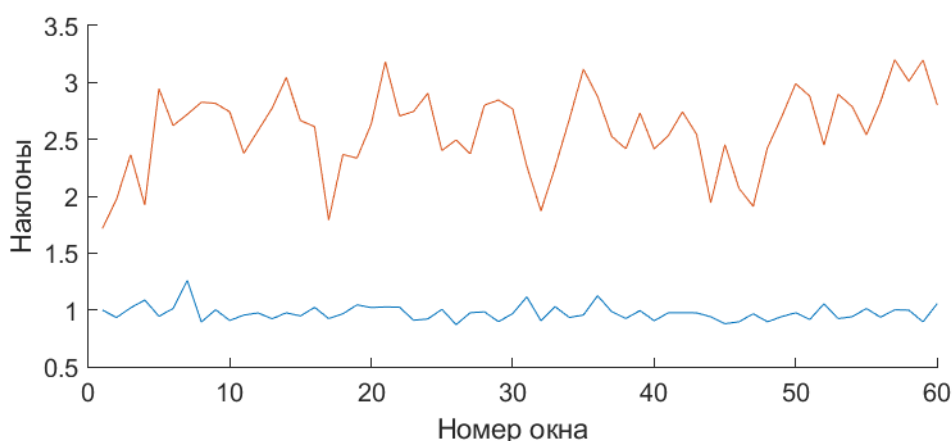


Рисунок 4.13 – Результаты обработки токовых сигналов при 75% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Статистические параметры полученных результатов представлены в таблице 4.9. В данной таблице результаты представлены в формате $mean \pm max_dev$, где $mean$ – среднее значение наклонов, max_dev – максимальное отклонение от среднего значения.

Таблица 4.9 – Статистические параметры полученных результатов для токовых сигналов

Уровень нагрузки от номинальной нагрузки АД, %	Наклоны, полученные на исправном АД, в	Наклоны, полученные на АД с дефектом в стержне	$С_{ex}$

	формате <i>mean ± max_dev</i>	ротора, в формате <i>mean ± max_dev</i>	
10	0.950 ± 0.223	2.059 ± 0.463	0.738
25	1.025 ± 0.367	2.513 ± 0.725	0.779
50	0.988 ± 0.205	1.957 ± 0.722	0.760
75	0.957 ± 0.303	2.610 ± 0.894	0.821

Полученные кривые на рисунках выше не пересекаются между собой, что подтверждается результатами, приведенными в таблице 4.9. Значения выходных параметров, получаемых с прототипа прибора – наклонов, позволяют отличить токовые сигналы рассматриваемых АД между собой. Таким образом, с помощью разработанного прототипа прибора, обрабатывая токовые сигналы АД, можно обнаружить и идентифицировать дефекты в стержне ротора.

4.4.3 Результаты обработки радиальных вибросигналов

Радиальные вертикальные вибрации

Результаты обработки радиальных вертикальных вибрационных сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 10% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора, представлены на рисунке 4.14:

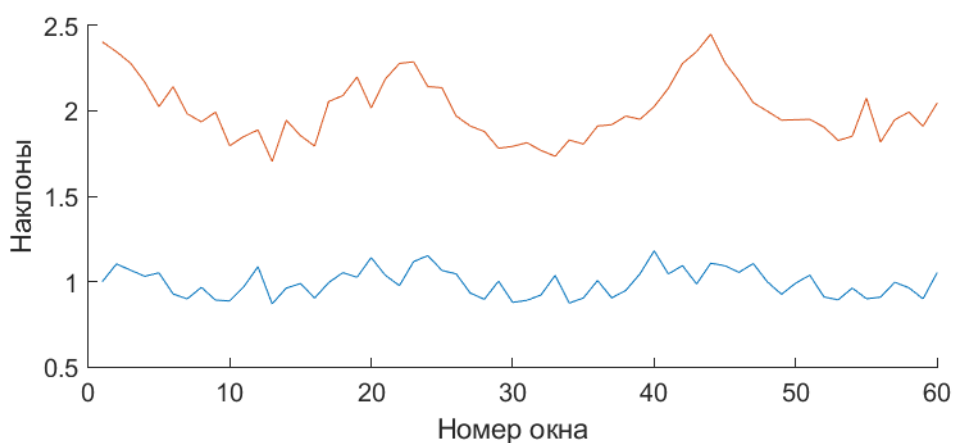


Рисунок 4.14 – Результаты обработки радиальных вертикальных вибросигналов при 10% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Результаты обработки радиальных вертикальных вибрационных сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 25% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора, представлены на рисунке 4.15:

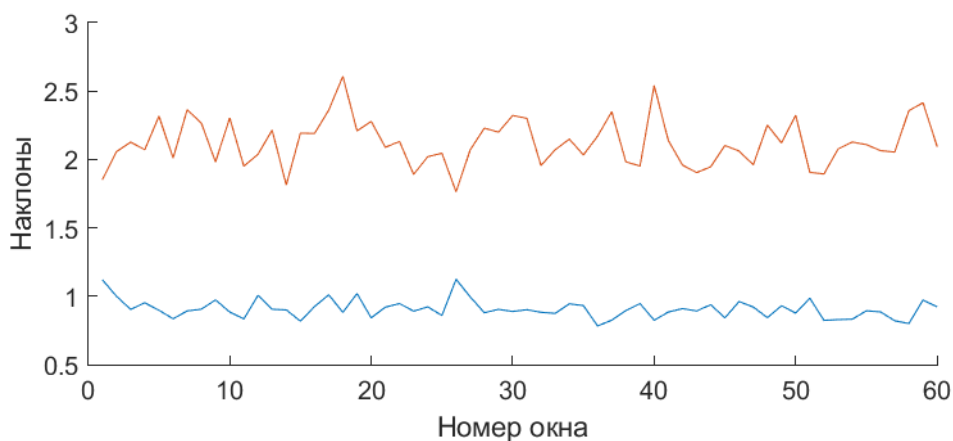


Рисунок 4.15 – Результаты обработки радиальных вертикальных вибросигналов при 25% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Результаты обработки радиальных вертикальных вибрационных сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 50% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора, представлены на рисунке 4.16:

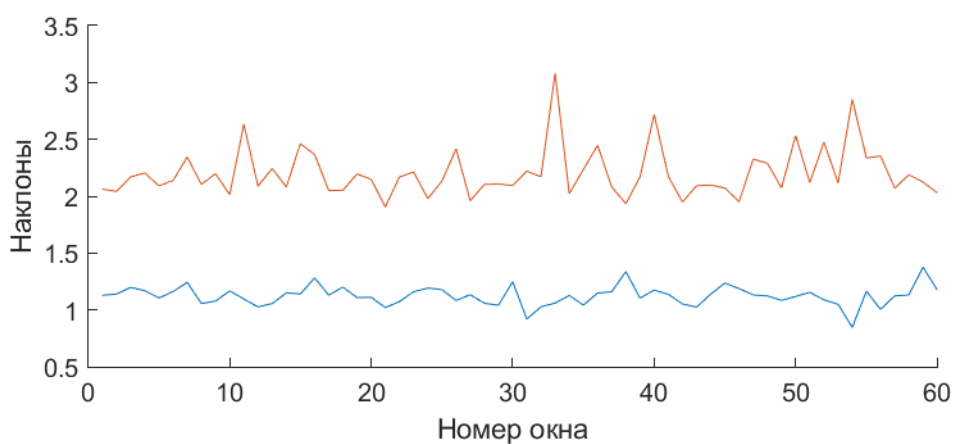


Рисунок 4.16 – Результаты обработки радиальных вертикальных вибросигналов при 50% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Результаты обработки радиальных вертикальных вибрационных сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 75% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора, представлены на рисунке 4.17:

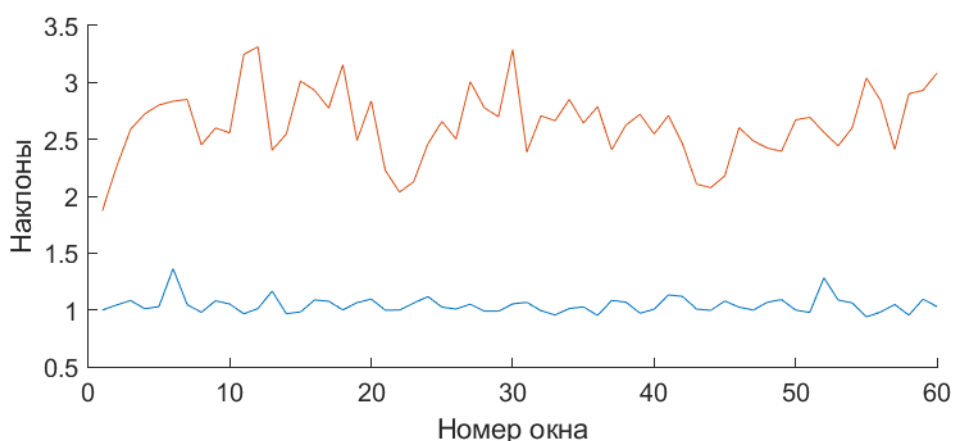


Рисунок 4.17 – Результаты обработки радиальных вертикальных вибросигналов при 75% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Статистические параметры полученных результатов представлены в таблице 4.10. В данной таблице результаты представлены в формате $mean \pm max_dev$, где $mean$ – среднее значение наклонов, max_dev – максимальное отклонение от среднего значения.

Таблица 4.10 – Статистические параметры полученных результатов для радиальных вертикальных вибросигналов

Уровень нагрузки от номинальной нагрузки АД, %	Наклоны, полученные на исправном АД	Наклоны, полученные на АД с дефектом в стержне ротора	C_{ex}
10	0.980 ± 0.314	2.019 ± 0.431	0.771
25	0.915 ± 0.210	2.115 ± 0.492	0.650
50	1.135 ± 0.288	1.957 ± 0.722	0.776

75	1.053 ± 0.311	2.610 ± 0.894	0.785
----	-------------------	-------------------	-------

Радиальные горизонтальные вибрации

Результаты обработки радиальных горизонтальных вибрационных сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 10% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора, представлены на рисунке 4.18:

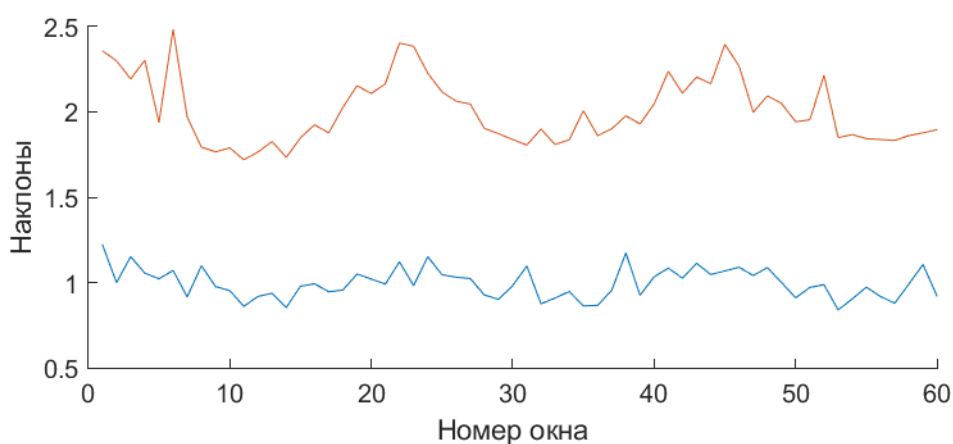


Рисунок 4.18 – Результаты обработки радиальных горизонтальных вибросигналов при 10% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Результаты обработки радиальных горизонтальных вибрационных сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 25% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора, представлены на рисунке 4.19:

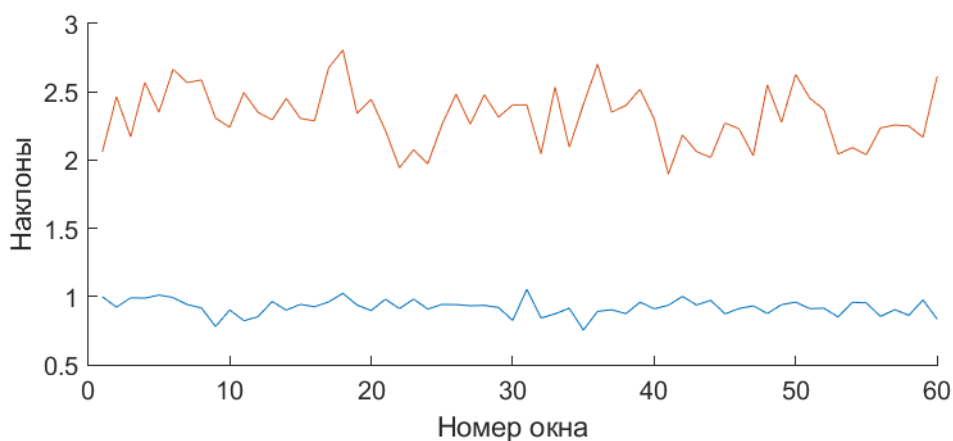


Рисунок 4.19 – Результаты обработки радиальных горизонтальных вибросигналов при 25% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Результаты обработки радиальных горизонтальных вибрационных сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 50% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора, представлены на рисунке 4.20:

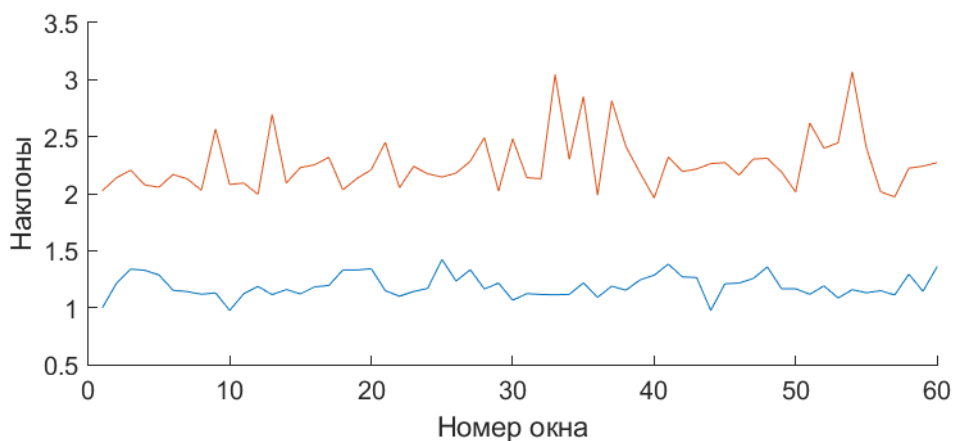


Рисунок 4.20 – Результаты обработки радиальных горизонтальных вибросигналов при 50% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Результаты обработки радиальных горизонтальных вибрационных сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора при 75% от номинальной нагрузки АД, полученные на прототипе прибора, представлены на рисунке 4.21:

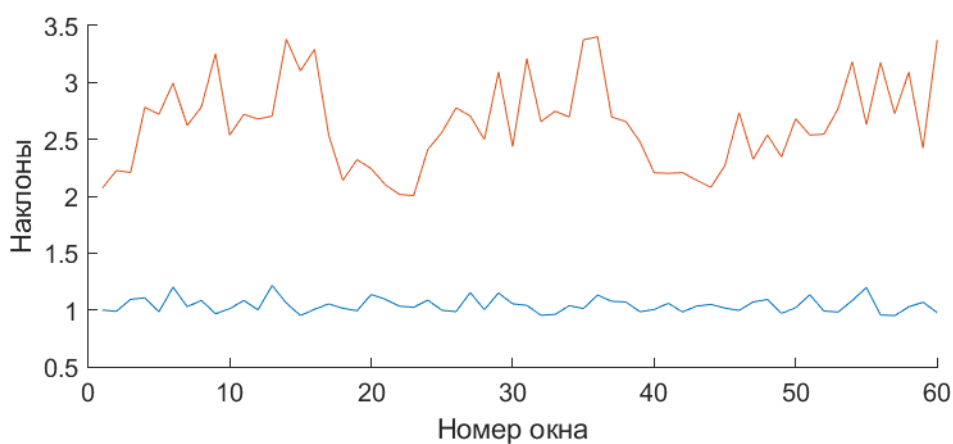


Рисунок 4.21 – Результаты обработки радиальных горизонтальных вибросигналов при 75% нагрузки: синяя кривая - исправный АД, красная кривая - АД с дефектом в стержне ротора

Статистические параметры полученных результатов представлены в таблице 4.11. В данной таблице результаты представлены в формате $mean \pm max_dev$, где $mean$ – среднее значение наклонов, max_dev – максимальное отклонение от среднего значения.

Таблица 4.11 – Статистические параметры полученных результатов для радиальных горизонтальных вибросигналов

Уровень нагрузки от номинальной нагрузки АД, %	Наклоны, полученные на исправном АД	Наклоны, полученные на АД с дефектом в стержне ротора	<i>Cex</i>
10	0.989 ± 0.235	2.016 ± 0.467	0.699
25	0.932 ± 0.176	2.325 ± 0.488	0.637
50	1.192 ± 0.236	2.287 ± 0.841	0.760
75	1.051 ± 0.219	2.614 ± 0.885	0.711

Полученные кривые на рисунках выше для радиальных вертикальных и горизонтальных вибросигналов не пересекаются между собой, что подтверждается результатами, приведенными в таблицах 4.10 и 4.11. Значения выходных параметров, получаемых с прототипа прибора – наклонов, позволяют отличить вибросигналы сигналы рассматриваемых АД между собой. Таким образом, с помощью разработанного прототипа прибора, обрабатывая радиальные вертикальные и горизонтальные вибрационные сигналы АД, можно обнаружить и идентифицировать дефекты в стержне ротора.

4.5 Выводы

1. Разработана структурная схема, алгоритмическое и программное обеспечение типовой системы контроля и диагностики.
2. Разработан стенд для удаленных измерений и применения приборов контроля и диагностики технического состояния электрических двигателей, на

основе разработанной структурной схемы, алгоритмического и программного обеспечения.

3. Разработан прототип прибора контроля и диагностики технического состояния АД в непрерывном режиме. Прототип прибора позволяет получать измерения непрерывно по USB, обрабатывать их с помощью разработанных алгоритмов, отправлять результаты диагностики непрерывно по USB, получать конфигурационные параметры по USB, отправлять отладочные параметры непрерывно по USB. Для коммуникации по USB между ПО2 и прототипом прибора разработан коммуникационный протокол ONECOM.

4. Корректность реализации разработанных алгоритмов в виде программы для микроконтроллера верифицирована и относительная ошибка результатов диагностики, а именно наклонов составила не более 5%. Для верификации в ПО2 разработан дополнительный отладочный функционал, который позволяет осуществить имитацию отправки измерений отправкой заранее записанного файла. Таким образом, заранее записанный файл был обработан реализацией алгоритма на языке MATLAB на ПК и с помощью прототипа прибора. Относительная погрешность результатов составила 3.36%.

5. Проведено экспериментальное исследование прототипа прибора путем обработки токовых сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора. Исследование показало эффективность прототипа прибора, полученные значения наклонов не пересекались между собой, что позволяло различить исправный АД и АД с дефектом в стержне ротора. Результаты исследования подтверждены при разных уровнях нагрузки АД: 10–75% от номинальной нагрузки.

6. Проведено экспериментальное исследование прототипа прибора путем обработки радиальных горизонтальных и вертикальных сигналов исправного АД и АД с дефектом в стержне ротора. Исследование показало эффективность прототипа прибора, полученные значения наклонов не пересекались между собой, что

позволяло различить исправный АД и АД с дефектом в стержне ротора. Результаты исследования подтверждены при разных уровнях нагрузки АД: 10–75% от номинальной нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена научная задача, связанная с научным обоснованием применения метода моментов дробного порядка для контроля и диагностики технического состояния электродвигателей, и достигнута цель, заключающаяся в развитии и разработке метода моментов дробного порядка для решения задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей. В ходе достижения цели получены следующие основные результаты:

1. Проведен обзор литературных источников в области контроля надежности технического состояния электродвигателей. Обзор показал актуальность этого направления исследований, а также открытость вопроса обнаружения и диагностирования на ранних стадиях таких дефектов АД как неисправность в стержне(ях) ротора и эксцентриситет. Среди стратегий технического обслуживания наиболее эффективной и экономически выгодной является техническое обслуживание (ТО) по состоянию. ТО по состоянию, как правило, представляет из себя непрерывный мониторинг технического состояния АД, находящегося в рабочем режиме. В связи с этим возникает необходимость разработки соответствующих приборов, которые позволят осуществлять контроль и диагностику в непрерывном режиме. Подробный анализ существующих методов контроля и диагностики технического состояния АД, показал, что наиболее перспективными и востребованными являются подходы основанные на измерениях тока статора и вибраций, по следующим причинам: указанные сигналы чувствительны к основным видам неисправностей, удобны для измерения, а также существующие датчики этих сигналов оказываются экономически выгодны. Среди существующих методов основанных на обработке токовых и вибрационных сигналов, выделены следующие проблемы с точки зрения реализации в приборах непрерывного мониторинга:

- требуется длительная выборка измерений, около 100 секунд;
- высокая вычислительная сложность.

Эти проблемы приводят к требованиям высокой производительности процессора и большому объему оперативной памяти, что приводит к удорожанию, увеличению габаритов, увеличению энергопотребления и большому объему канала связи.

Среди наиболее перспективных подходов выделена статистика дробных моментов (СДМ), в рамках которой разработана функция обобщенного среднего (ФОС). ФОС обладает высокой чувствительностью при обнаружении малых различий в сравниваемых сигналах, а также невысокой вычислительной сложностью $O(n^2)$ за счет малого количества итераций $n = 75$. Ранее данный подход не применялся в задачах диагностики технического состояния АД.

2. Разлит и разработан метод моментов дробного порядка для применения в задачах контроля и диагностики электродвигателей. Метод представляет из себя комбинацию преобразования Фурье и статистики дробных моментов. БПФ является эффективным алгоритмом с низкой вычислительной сложностью – $O(n \log n)$. Недостатком БПФ является требование длинной выборки сигнала, для получения спектра с высоким разрешением. При использовании короткой выборки сигнала, БПФ спектр имеет низкое разрешение. Для решения этой проблемы, извлеченная диагностическая информация из спектра с низким разрешением, обрабатывается с помощью ФОС. Далее ФОС полученная на исследуемом электродвигателе сравнивается с ФОС, полученной на эталонном исправном электродвигателе.

3. Разработаны алгоритмы обработки токовых и вибрационных сигналов на основе метода моментов дробного порядка для контроля и диагностики технического состояния АД. Данный алгоритм адаптирован для реализации в

приборах непрерывного мониторинга. Разработанный алгоритм имеет следующие параметры: длина временного окна, коэффициент децимации, информативные частотные диапазоны, а также параметры ФОС. Разработанный алгоритм верифицирован на смоделированных токовых сигналах исправного АД, АД с дефектом в стержне ротора и эксцентриситете. Показана эффективность обнаружения дефекта в 1 стержне ротора, а также обнаружения эксцентриситета, при коэффициенте модуляции $\alpha = 0.1$, в обоих случаях соотношение сигнал/шум было $SNR = 25$ дБ.

4. Проведена верификация разработанных алгоритмов на экспериментальных данных. Во время экспериментального исследования были записаны токовые сигналы и радиальные и аксиальные вибросигналы АД. Указанные сигналы были обработаны с помощью разработанного алгоритма, реализованного в программном обеспечении в среде MATLAB. Показана эффективность диагностики с помощью разработанного алгоритма неисправности в двух стержнях ротора и 30% эксцентриситета при различных уровнях нагрузки АД.

5. Разработана типовая структурная схема, алгоритмическое и программное обеспечение для системы, реализующей предложенный метод непрерывного контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей.

6. Создан экспериментальный стенд для проведения удаленных измерений и применения приборов непрерывного контроля и диагностики технического состояния электродвигателей, а также проведение экспериментальных исследований разработанного метода на созданном стенде. Стенд создан на основе разработанной типовой схемы, алгоритмического и программного обеспечения. В рамках создания стенда также разработан прототип прибора мониторинга технического состояния АД, реализующий предложенный

метод моментов дробного порядка. Прибор осуществляет получение измерений по USB в непрерывном режиме, обработку данных и передачу по USB диагностической информации. Реализация алгоритма в приборе имеет некоторые отличия, связанные со спецификой аппаратного обеспечения. Для оценки степени различий результаты обработки данных с помощью реализации алгоритма на приборе и на ПК в MATLAB были сопоставлены. Относительная погрешность не превышала величины 5%.

7. Проведено экспериментальное исследование разработанного прототипа прибора с помощью удаленного эксперимента. В экспериментальном исследовании с помощью прибора обрабатывались токовые сигналы, а также радиальные вертикальные и горизонтальные вибросигналы исправного АД и АД с дефектом в двух стержнях ротора. Исследование проводилась на четырех различных уровнях нагрузки: 10%, 25%, 50%, 75% от номинальной нагрузки. Результаты обработки данных для указанных сигналов позволяют обнаружить дефект в стержне ротора АД. Таким образом подтверждена эффективность разработанного прототипа прибора.

8. Результаты диссертационной работы внедрены в научно-исследовательскую деятельность и образовательный процесс Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, а также на предприятии ООО «Миркод». Акты о внедрении представлены в приложениях к диссертации №3 и №4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Christian Cavallo, All About Induction Motors - What They Are and How They Work [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/all-about-induction-motors-what-they-are-and-how-they-work/> (дата обращения: 22.08.2022).
2. Fortune Business Insights, Induction Motor Market Size, Share, & Forecast 2029 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/induction-motor-market-101639> (дата обращения: 23.08.2022).
3. ГОСТ Р 57329-2016 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Системы технического обслуживания и ремонта. Термины и определения.
4. ГОСТ Р 27.601-2011 Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание и его обеспечение.
5. E. Houssin El Bouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid, E. Elbouchikhi, Induction Machine Diagnosis using Stator Current Advanced Signal Processing // International Journal on Energy Conversion. 2015. № 3 (3). С. 76–87.
6. A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, G. A. Capolino, Advances in diagnostic techniques for induction machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. № 12 (55). С. 4109–4126.
7. F. T. Aníbal de Almeida Fernando J T E Ferreira João Fong Paula Fonseca, EUP Lot 11 Motors. 2008.
8. ГОСТ ИСО 10816-1-97 Контроль состояния машин по результатам измерений вибраций на невращающихся частях. Часть 1 Общие требования.
9. ГОСТ Р ИСО 17359-2015 Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство.

10. ГОСТ ИСО 20958-2015 Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя.

11. 50% - Motor Power Consumption [Электронный ресурс]. URL: https://www.nidec.com/en/ir/_individual/motor/ (дата обращения: 16.10.2022).

12. P. Waide, C. U. Brunner, Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems // Internationale energy agency. 2011.

13. K. M. Siddiqui, K. Sahay, V. K. Giri, P. D. Scholar, Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor-A Review. 2007.

14. Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std 493 - IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997.

15. P. F. Albrecht, J. C. Appiarius, R. M. McCoy, E. L. Owen, D. K. Sharma, Assessment of the reliability of motors in utility applications — updated // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1986. № 1 (1). С. 39–46.

16. A. Nabhan, N. M. Ghazaly, A. Samy, M. M.O, Bearing fault detection techniques - a review // Turkish Journal of Engineering, Sciences and Technology. 2015. № 2 (3).

17. G. H. Bazan, P. R. Scalassara, W. Endo, A. Goedel, W. F. Godoy, [и др.], Stator fault analysis of three-phase induction motors using information measures and artificial neural networks // Electric Power Systems Research. 2017. (143). С. 347–356.

18. L. Lin, A. Kang, J. Song, Z. Lei, Y. Zhao, [и др.], Influences of humidity and temperature on oil contamination discharge of HV motor stator windings // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2016. № 5 (23). С. 2695–2703.

19. W. S. Abu-Elhaija, A. M. Takbash, J. Faiz, B. M. Ebrahimi, Eccentricity fault diagnosis in induction motors using global processors-A review 2012.С. 1–6.

20. J. Faiz, B. M. Ebrahimi, M. B. B. Sharifian, Different faults and their diagnosis techniques in three-phase squirrel-cage induction motors-a review // *Electromagnetics*. 2006. № 7 (26). С. 543–569.

21. J. Faiz, B. M. Ebrahimi, B. Akin, H. A. Toliyat, Comprehensive eccentricity fault diagnosis in induction motors using finite element method // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009. № 3 (45). С. 1764–1767.

22. S. Nandi, H. A. Toliyat, X. Li, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors - A review // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2005. Т. 20. № 4. С. 719–729.

23. Hasnain Jivajee, Ian Culbert, Detecting Broken Rotor Bars Prevents Catastrophic Damage // Диссертация [Электронный ресурс]. URL: <https://www.efficientplantmag.com/2004/11/detecting-broken-rotor-bars-prevents-catastrophic-damage/#:~:text=Broken%20bars%20cause%20torque%20and,bearings%20and%20other%20driven%20components>. (дата обращения: 23.08.2022).

24. M. Riera-Guasp, J. A. Antonino-Daviu, G. A. Capolino, Advances in electrical machine, power electronic, and drive condition monitoring and fault detection: State of the art // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. № 3 (62). С. 1746–1759.

25. Сафин Н. Р., Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором 2017.

26. J. S. Hsu, Monitoring of Defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1995. № 5 (31). С. 1016–1021.

27. Youness Trachi, On induction machine faults detection using advanced parametric signal processing techniques 2017.

28. М. Б. Лейтман, Автоматическое измерение выходных параметров электродвигателей М. Б. Лейтман, М.: Энергоатомиздат, 1983. 152 с.

29. W. T. Thomson, A. Barbour, On-line current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static airgap eccentricity in three-phase induction motors // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1998. № 4 (13). С. 347–357.

30. S. Nandi, S. Ahmed, H. A. Toliyat, R. M. Bharadwaj, Selection criteria of induction machines for speed-sensorless drive applications // IEEE Transactions on Industry Applications. 2003. № 3 (39). С. 1131–1138.

31. J. Grieger, R. Supangat, N. Ertugrul, W. L. Soong, D. A. Gray, [и др.], Estimation of static eccentricity severity in induction motors for on-line condition monitoring 2006.С. 2312–2319.

32. Л. Г. Сидельников, Д.О. Афанасьев, Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. (7). С. 127–137.

33. М. Е. Садовников, Надежность и диагностика электрооборудования. Введение в надежность электромеханических и электротехнических систем. Учебное пособие М. Е. Садовников, Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. 44 с.

34. ГОСТ ИЕС/TS 60034-24— 2015 Машины электрические вращающиеся Часть 24 Онлайнное обнаружение и диагностика потенциальных отказов активных деталей вращающихся электромашин и деталей с подшипниковым током. Руководство по применению.

35. N. Bessous, S. E. Zouzou, S. Sbaa, A. Khelil, New Vision about the Overlap Frequencies in the MCSA-FFT Technique to Diagnose the Eccentricity Fault in the Induction Motors 2017.С. 1–6.

36. J. H. Jung, J. J. Lee, B. H. Kwon, Online diagnosis of induction motors using MCSA // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. № 6 (53). С. 1842–1852.

37. Wikipedia, Fast Fourier Transform [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform (дата обращения: 23.08.2022).

38. ARM, Real FFT Functions [Электронный ресурс]. URL: https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/group__RealFFT.html (дата обращения: 23.08.2022).

39. A. Sapena-Baño, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, Ž. Kanović, Low-Cost Diagnosis of Rotor Asymmetries in Induction Machines Working at a Very Low Slip Using the Reduced Envelope of the Stator Current // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2015. № 4 (30). С. 1409–1419.

40. A. Sapena-Bano, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, J. Perez-Cruz, J. Roger-Folch, [и др.], Harmonic Order Tracking Analysis: A Novel Method for Fault Diagnosis in Induction Machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2015. № 3 (30). С. 833–841.

41. R. D. J. Romero-Troncoso, Multirate Signal Processing to Improve FFT-Based Analysis for Detecting Faults in Induction Motors // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. № 3 (13). С. 1291–1300.

42. A. Sapena-Bano, J. Burriel-Valencia, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, M. Riera-Guasp, The Harmonic Order Tracking Analysis Method for the Fault Diagnosis in Induction Motors under Time-Varying Conditions // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2017. № 1 (32). С. 244–256.

43. M. Ouadah, O. Touhami, R. Ibtouen, Novel Method for Rotor Bar Fault Diagnosis of Induction Machines Containing Space Harmonics 2019.С. 112–116.

44. A. Sapena-Baño, M. Riera-Guasp, R. Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, J. Perez-Cruz, [и др.], Harmonic Order Tracking Analysis: A Speed-Sensorless Method for Condition Monitoring of Wound Rotor Induction Generators in Wind Turbines A. Sapena-Baño, M. Riera-Guasp, R. Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, J. Perez-Cruz, [и др.],.

45. M. Ouadah, O. Touhami, R. Ibtouen, Improvement of the detection of the defect squirrel cage rotor by the study of additional components of the space harmonics // *Electrical Engineering*. 2018. № 4 (100). С. 2485–2497.

46. B. Zhang, C. Sconyers, C. Byington, R. Patrick, M. E. Orchard, [и др.], A probabilistic fault detection approach: Application to bearing fault detection // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. № 5 (58). С. 2011–2018.

47. S. H. Kia, H. Henaou, G. A. Capolino, Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009. № 4 (45). С. 1395–1404.

48. R. Puche-Panadero, M. Pineda-Sanchez, M. Riera-Guasp, J. Roger-Folch, E. Hurtado-Perez, [и др.], Improved resolution of the MCSA method via Hilbert transform, enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2009. № 1 (24). С. 52–59.

49. B. Xu, L. Sun, L. Xu, G. Xu, Improvement of the Hilbert method via esprit for detecting rotor fault in induction motors at low slip // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2013. № 1 (28). С. 225–233.

50. J. Faiz, V. Ghorbanian, B. M. Ebrahimi, EMD-Based analysis of industrial induction motors with broken rotor bars for identification of operating point at different supply modes // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. № 2 (10). С. 957–966.

51. V. Ghorbanian, J. Faiz, A survey on time and frequency characteristics of induction motors with broken rotor bars in line-start and inverter-fed modes // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Т. 54. С. 427–456.

52. A. M. da Silva, R. J. Povinelli, N. A. O. Demerdash, Induction machine broken bar and stator short-circuit fault diagnostics based on three-phase stator current envelopes // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. № 3 (55). С. 1310–1318.

53. J. Wang, S. Liu, R. X. Gao, R. Yan, Current envelope analysis for defect identification and diagnosis in induction motors // *Journal of Manufacturing Systems*. 2012. № 4 (31). С. 380–387.

54. Y. H. Wang, C. H. Yeh, H. W. V. Young, K. Hu, M. T. Lo, On the computational complexity of the empirical mode decomposition algorithm // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2014. (400). С. 159–167.

55. Wikipedia, Discrete wavelet transform [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_wavelet_transform (дата обращения: 23.08.2022).

56. R. Bilato, O. Maj, M. Brambilla, An algorithm for fast hilbert transform of real functions // *Advances in Computational Mathematics*. 2014. № 5–6 (40). С. 1159–1168.

57. Y. Trachi, E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid, Stator Current Analysis by Subspace Methods for Fault Detection in Induction Machines 2015.С. 3479–3484.

58. E. Houssin, E. Bouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid, J. F. Charpentier, Induction Machine Fault Detection Enhancement Using a Stator Current High Resolution Spectrum 2012.С. 3913–3918.

59. Y. H. Kim, Y. W. Youn, D. H. Hwang, J. H. Sun, D. S. Kang, High-resolution parameter estimation method to identify broken rotor bar faults in induction motors // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. № 9 (60). С. 4103–4117.

60. M. El, H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys, Induction Motors' Faults Detection and Localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques. 1999.

61. E. Houssin El Bouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid, E. Elbouchikhi, Induction Machine Diagnosis using Stator Current Advanced Signal Processing. 2015.

62. F. Cupertino, E. de Vanna, L. Salvatore, S. Stasi DEE -Politecnico di Bari Via Orabona, B. -Italy, Comparison of Spectral Estimation Techniques Applied to Induction Motor Broken Bars Detection 2003.С. 129–134.

63. A. Bellini, A. Yazidi, F. Filippetti, C. Rossi, G. A. Capolino, High frequency resolution techniques for rotor fault detection of induction machines // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. № 12 (55). C. 4200–4209.

64. S. H. Kia, H. Henaoui, G. A. Capolino, A high-resolution frequency estimation method for three-phase induction machine fault detection // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007. № 4 (54).

65. A. Garcia-Perez, R. J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, R. A. Osornio-Rios, J. D. J. Rangel-Magdaleno, [и др.], Startup current analysis of incipient broken rotor bar in induction motors using high-resolution spectral analysis 2011. C. 657–663.

66. A. Garcia-Perez, R. D. J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, R. A. Osornio-Rios, The application of high-resolution spectral analysis for identifying multiple combined faults in induction motors // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. № 5 (58). C. . 2002-2010.

67. S. M. A. Cruz, A. J. M. Cardoso, Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended park's vector approach // *Electric Machines and Power Systems*. 2000. № 4 (28). C. 289–299.

68. S. M. A. Cruz, A. J. Marques Cardoso, Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extended Park's Vector Approach // *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 2001. № 5 (37). C. 1227–1233.

69. A. J. Marques Cardoso, E. S. Saraiva, Computer-Aided Detection of Airgap Eccentricity in Operating Three-phase Induction Motors by Park's Vector Approach // *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*. 1993. № 5 (29). C. 897–901.

70. S. M. A. Cruz, A. J. Marques, C. D. S. B. Fonseca, Inter-Turn Stator Winding Fault Diagnosis in Three-phase Induction Motors, by Park's Vector Approach // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999. № 3 (14). C. 595–598.

71. T. G. Vilhekar, M. S. Ballal, H. M. Suryawanshi, Application of multiple parks vector approach for detection of multiple faults in induction motors // *Journal of Power Electronics*. 2017. № 4 (17). C. 972–982.

72. M. Sahraoui, A. J. M. Cardoso, A. Ghoggal, The use of a modified prony method to track the broken rotor bar characteristic frequencies and amplitudes in three-phase induction motors // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. № 3 (51). C. 2136–2147.

73. K. Yahia, M. Sahraoui, A. J. Marques Cardoso, A. Ghoggal, The Use of a Modified Prony's Method to Detect the Airgap-Eccentricity Occurrence in Induction Motors // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. № 5 (52). C. 3869–3877.

74. M. Sahraoui, A. J. M. Cardoso, K. Yahia, A. Ghoggal, The Use of the Modified Prony's Method for Rotor Speed Estimation in Squirrel-Cage Induction Motors // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. № 3 (52). C. 2194–2202.

75. G. W. Chang, C. I. Chen, An accurate time-domain procedure for harmonics and interharmonics detection // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. № 3 (25). C. 1787–1795.

76. F. Fang, S. Yang, X. Hou, Z. Wu, Application of the Prony's Method for Induction Machine Stator Fault Diagnosis 2008.C. 827–831.

77. V. F. Borulko, G. P. Zouros, Modified Prony Method for Integration of Highly Oscillating Functions 2018.

78. L. Qi, L. Qian, S. Woodruff, D. Cartes, Prony analysis for power system transient harmonics // *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*. 2007. C. 12.

79. J. Zhuzhi, Z. Hongyu, L. Xuyang, S. Hang0, Incipient Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Based on Extended Prony Spectral Analysis Technique 2018.C. 5705–5710.

80. Shuo Chen, Rastko Zivanovic, A Novel High-resolution Technique for Induction Machine Broken Bar Detection 2007.C. 1–5.

81. R. R. Nigmatullin, A. L. Morozov, J. Awrejcewicz, M. Ludwicki, Modeling and experimental validation of walking processes // *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2020. № 1 (40). С. 200–210.

82. R. R. Nigmatullin, W. Zhang, D. Striccoli, General theory of experiment containing reproducible data: The reduction to an ideal experiment // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2015. № 1–3 (27). С. 175–192.

83. R. R. Nigmatullin, G. Maione, P. Lino, F. Saponaro, W. Zhang, The general theory of the Quasi-reproducible experiments: How to describe the measured data of complex systems? // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2017. (42). С. 324–341.

84. R. Nigmatullin, R. Rakhmatullin, Detection of quasi-periodic processes in repeated measurements: New approach for the fitting and clusterization of different data // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2014. № 12 (19). С. 4080–4093.

85. Грищенко А. В., Хамидов О. Р, Мониторинг и диагностика технического состояния асинхронного тягового электродвигателя локомотивов с применением искусственных нейронных сетей на железных дорогах Республики Узбекистан // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – СПб.: ПГУПС., 2020. № 4 (17). С. 514–524.

86. C. Y. Lee, K. Y. Huang, L. Y. Jen, G. L. Zhuo, Diagnosis of defective rotor bars in induction motors // *Symmetry*. 2020. № 11 (12). С. 1–24.

87. A. Khiam, N. Ngote, M. Ouassaid, A hybrid TSA-fuzzy logic approach to detect induction motor rotor faults 2018.С. 254–259.

88. L. Nouredine, A. Hafaifa, A. Kouzou, Fuzzy Logic System for BRB Defect Diagnosis of SCIG-Based Wind Energy System 2019.С. 1–6.

89. F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, S. Member, P. Vas, Recent Developments of Induction Motor Drives Fault Diagnosis Using AI Techniques // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. 2000. № 5 (47). С. 994–1004.

90. F. Filippetti, M. Martelli, G. Franceschini, C. Tassoni, Development of expert system knowledge base to on-line diagnosis of rotor electrical faults of induction motors 1992.С. 92–99.

91. Хамидов О. Р., Грищенко А. В., Шрайбер М. А, Разработка интеллектуальных методов оценки технического состояния локомотивного асинхронного электродвигателя на основе экспертных систем // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. № 2. С. 77–89.

92. Z. Cao, J. Fang, H. Chen, G. He, E. Ritchie, Support vector machine used to diagnose the fault of rotor broken bars of induction motors 2003.С. . 891-894.

93. H. Guo, M. K. Liu, Induction motor faults diagnosis using support vector machine to the motor current signature 2018.С. 417–421.

94. R. R. Nigmatullin, The statistics of the fractional moments: Is there any chance to «read quantitatively» any randomness? // Signal Processing. 2006. № 10 (86). С. 2529–2547.

95. Р. Р. Нигматуллин, Статистика дробных моментов: новый метод количественного прочтения произвольной случайной последовательности // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2005. № 2 (147). С. 129–161.

96. R. R. Nigmatullin, G. Maione, P. Lino, F. Saponaro, W. Zhang, The general theory of the Quasi-reproducible experiments: How to describe the measured data of complex systems? // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2017. (42). С. 324–341.

97. R. R. Nigmatullin, C. Ceglie, G. Maione, D. Striccoli, Reduced fractional modeling of 3D video streams: the FERMA approach // *Nonlinear Dynamics*. 2015. № 4 (80). С. 1869–1882.

98. R. R. Nigmatullin, C. Ceglie, G. Maione, D. Striccoli, Statistics of fractional moments applied to 3D video streams 2014.С. 1–6.

99. R. R. Nigmatullin, S. I. Osokin, S. O. Nelson, Application of Fractional-moments Statistics to Data for Two-phase Dielectric Mixtures // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008. № 5 (15). С. 1385–1392.

100. Raoul R Nigmatullin, Geoff Smith, The generalized mean value function approach: a new statistical tool for the detection of weak signals in spectroscopy // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. № 2 (38). С. 328–337.

101. Н.С. Перминов, М.А. Смирнов, Р.Р. Нигматуллин, А.А. Талипов, С.А. Моисеев, Сравнение возможностей гистограмм и метода ранжированных амплитуд при анализе шумов однофотонных детекторов // *Компьютерная оптика*. 2018. № 2 (42). С. 338–342.

102. A. Mugdadi, R. Rashid Nigmatullin, M. R. al Shami, A. R. Mugdadi, R. R. Nigmatullin, [и др.], Application of fractional moments for comparing random variables with varying probability distributions // *Applications and Applied Mathematics: An International Journal (AAM) AAM: Intern. J.* 2013. № 2 (8). С. 366–390.

103. Шиндор О. В., Методика контроля критических режимов работы высокоэнергетических установок на основе Вейвлет-анализа их нестационарных флуктуационных и шумовых сигналов 2015.

104. Ю. В. Сарапулов, В. А. Сидоров, Т. Наук, А. Е. Сушко, Р. А. Хасанов, [и др.], Прогнозирование измерений технического состояния подшипника качения по значениям виброускорения // *Контроль. Диагностика*. 2020. № 10. С. 12–19.

105. Зубренков Б. И., Маслов К. Г., Частотная вибродиагностика асинхронных двигателей шпиндельного исполнения на подшипниках качения // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2009. № 1 (108). С. 19–24.

106. А. В. Лукьянов, Ю. С. Мухачев, И. О. Бельский, Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 61–69.

107. M. A. Ebeoğlu, D. Üniversitesi, S. Güçlü, A. Ünsal, M. A. Ebeoğlu, Vibration Analysis of Induction Motors with Unbalanced Loads // 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). 2017. С. 365–369.

108. Калинов А. П., Браташ О. В., Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2012. (5). С. 43–51.

109. Кан Ш., Микулович А. В., Микулович В. И., Спектральный анализ огибающей высокочастотных составляющих сложных сигналов на основе эмпирической декомпозиции мод и преобразования Гильберта // Информатика. 2010. № 4 (28). С. 16–24.

110. A. Kabul, A. Unsal, An Alternative Approach for the Detection of Broken Rotor Bars and Bearing Faults of Induction Motor Based on Vibration Signals Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021.С. 126–131.

111. F. Dalvand, A. Kalantar, H. Bevrani, S. Member, S. Shokoohi, Time-Domain Bearing Condition Monitoring in Induction Motors Using Instantaneous Frequency of Motor Voltage 2014.С. 1–7.

112. D. M. Yang, Induction motor bearing fault detection using wavelet-based envelope analysis IEEE Computer Society, 2014.С. 1241–1244.

113. Мынцов А. А., Применение метода огибающей для диагностики механических узлов оборудования [Электронный ресурс]. URL: <http://vibration.ru/pmodmuo/pmodmuo.shtml> (дата обращения: 24.08.2022).

114. Кан Ш., Микулович А. В., Микулович В. И., Вибрационная диагностика подшипников качения на основе эмпирической декомпозиции мод и машин на опорных векторах // Контроль. Диагностика. 2010. (12). С. 26–35.

115. Кан Ш., Микулович В. И., Применение методов EMD для удаления шумов в вибрационных сигналах 2009.С. 139–142.

116. Кан Ш., Микулович В. И., Анализ вибрационных сигналов машин с применением эмпирического метода декомпозиции // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2010. № 3. С. 41–46.

117. Z. Wu, N. E. Huang, Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise-Assisted Data Analysis Method // Advances in Adaptive Data Analysis. 2008. № 1 (18). С. 1–41.

118. M. A. R. Alicando, G. M. Ramos, C. F. Ostia, Bearing Fault Detection of a Single-phase Induction Motor Using Acoustic and Vibration Analysis Through Hilbert-Huang Transform 2021.

119. P. A. Delgado-Arredondo, D. Morinigo-Sotelo, R. A. Osornio-Rios, J. G. Avina-Cervantes, H. Rostro-Gonzalez, [и др.], Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. (83). С. 568–589.

120. G. K. Singh, S. A. K. Sa'ad Ahmed, Vibration signal analysis using wavelet transform for isolation and identification of electrical faults in induction machine // Electric Power Systems Research. 2004. № 2 (68). С. 119–136.

121. Панин В. В., Енчев С. В., Товкач С. С., Вейвлет-диагностика вибросостояния элементов газотурбинного двигателя // Вісник двигунобудування. 2014. № 2. С. 233- 237.

122. S. Y. Shao, W. J. Sun, R. Q. Yan, P. Wang, R. X. Gao, A Deep Learning Approach for Fault Diagnosis of Induction Motors in Manufacturing // Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). 2017. № 6 (30). С. 1347–1356.

123. N. T. Nguyen, J. M. Kwon, H. H. Lee, Fault diagnosis of induction motor using decision tree with an optimal feature selection 2007.С. 729–732.

124. Poyhonen S., Jover P., Hyotyniemi H., Signal processing of vibrations for condition monitoring of an induction motor 2004.С. 499–502.

125. Морозов А. Л., Оптимизация НАЧАСС Преобразования Для Спектрального Анализа Сигналов 2019.С. 235–237.

126. Морозов А. Л., Компрессор информации для систем передачи данных в реальном времени на основе промежуточной модели 2019.С. 47.

127. Морозов А. Л., Нигматуллин Р. Р., Тарасов М. Л., Вдовин А. Ю., Одиванов В. Л., [и др.], Определение углов ориентации объекта в пространстве и измерение механического воздействия с помощью МЭМС акселерометров и гироскопов применительно в дефектоскопах нефтяных скважин 2018.С. 87–89.

128. Морозов А. Л., Определение углов ориентации объекта в пространстве и измерение механического воздействия с помощью MEMC акселерометра применительно в дефектоскопах нефтяных скважин 2018.С. 27.

129. R. R. Nigmatullin, A. K. Rybin, K. S. Nepeina, P. A. Kaznacheev, NOCFASS: Quantitative description of the seismic noise-like signals in the earthquake-prone areas // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2021. (185).

130. Nigmatullin R. R., Osokin S. I., Toboev V. A., NAFASS: Discrete spectroscopy of random signals // Chaos Solitons Fract. 2011. № 44. С. 226–240.

131. R. R. Nigmatullin, W. Zhang, NAFASS in action: How to control randomness? // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2013. № 3 (18). С. 226–240.

132. R. R. Nigmatullin, I. A. Gubaidullin, NAFASS: Fluctuation spectroscopy and the Prony spectrum for description of multi-frequency signals in complex systems // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2018. (56).

133. R. R. Nigmatullin, A. S. Vorobev, The «universal» Set of Quantitative Parameters for Reading of the Trendless Sequences // Fluctuation and Noise Letters. 2019. № 4 (18).

134. R. R. Nigmatullin, A. v. Sidelnikov, E. I. Maksyutova, H. C. Budnikov, E. v. Govorov, Differentiation of Different Sorts of Sugars by the CAPoNeF Method // Electroanalysis. 2021. № 12 (33).

135. R. Nigmatullin, S. Dorokhin, A. Ivchenko, A novel approach to radiometric identification 2020.

136. Морозов А. Л., Статистическая методика и алгоритм диагностики асинхронных двигателей на основе вибросигналов // Вестник КНИТУ-КАИ. 2021. № 2 (77). С. 60–67.

137. A. L. Morozov, R. R. Nigmatullin, P. Lino, G. Maione, S. Stasi, An Improved Nonparametric Method for Fault Detection of Induction Motors Based on the Statistics of the Fractional Moments.

138. Kanović Ž., Matić D., Jeličić Z., Rapaić M., Jakovljević B., [и др.], Induction Motor Broken Rotor Bar Detection Using Vibration Analysis – A Case Study 2013.С. 64–68.

139. Y. Maouche, A. Boussaid, M. Boucherma, A. Khezzer, Modeling and simulation of stator turn faults. Detection based on stator circular current and neutral voltage 2013.С. 263–268.

140. Морозов А. Л., Комбинированный метод обработки сигналов тока статора для диагностики и контроля асинхронных двигателей оптимизированный для встраиваемых систем 2021.С. 345–353.

141. F. Duan, R. Zivanovic, A model for induction motor with stator faults 2012.C. 1–5.
142. I. Ouachtouk, S. el Hani, S. Guedira, L. Sadiki, K. Dahi, Modeling of squirrel cage induction motor a view to detecting broken rotor bars faults 2015.C. 347–352.
143. C. Concari, G. Franceschini, C. Tassoni, A. Toscani, Validation of a faulted rotor induction machine model with an insightful geometrical interpretation of physical quantities // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. № 9 (60). C. 4074–4083.
144. S. N. Hussain, S. S. H. Zaidi, Modeling and analysis of three phase induction motor with broken rotor bar 2015.C. 488–493.
145. M. Blödt, J. Regnier, J. Faucher, Distinguishing load torque oscillations and eccentricity faults in induction motors using stator current wigner distributions // IEEE Transactions on Industry Applications. 2009. № 6 (45). C. 1991–2000.
146. M. Blödt, M. Chabert, J. Regnier, J. Faucher, Mechanical load fault detection in induction motors by stator current time-frequency analysis // IEEE Transactions on Industry Applications. 2006. № 6 (42). C. 1454–1463.
147. B. Trajin, M. Chabert, J. Regnier, J. Faucher, J. F. Hilbert, Hilbert versus Concordia transform for three-phase machine stator current time-frequency monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. 2009. № 8 (23). C. 2648–2657.
148. A. H. Boudinar, N. Benouzza, A. Bendiabdellah, M. E. A. Khodja, Induction motor bearing fault analysis using a root-MUSIC method // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. № 5 (52). C. 87–92.
149. M. El, A. Khodja, A. Hamida Boudinar, N. Benouzza, A. Bendiabdellah, Stator Current Modeling of an Induction Motor for Rotor Faults Diagnosis 2016.C. 1091–1096.
150. COMSOL, Modeling Vibration in an Induction Motor [Электронный ресурс]. URL: <https://www.comsol.ru/model/modeling-vibration-in-an-induction-motor-47871> (дата обращения: 24.08.2022).

151. C. Wang, J. C. S. Lai, Vibration analysis of an induction motor // Journal of Sound and Vibration. 1999. № 4 (224). C. 733–756.
152. Costello M. J., Understanding the vibration forces in induction motors 1990.C. 67–76.
153. J. de J. Rangel-Magdaleno, R. de J. Romero-Troncoso, R. A. Osornio-Rios, E. Cabal-Yepez, L. M. Contreras-Medina, Novel methodology for online half-broken-bar detection on induction motors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. № 5 (58). C. 1690–1698.
154. J. Rangel-Magdaleno, H. Peregrina-Barreto, J. Ramirez-Cortes, R. Morales-Caporal, I. Cruz-Vega, Vibration Analysis of Partially Damaged Rotor Bar in Induction Motor under Different Load Condition Using DWT // Shock and Vibration. 2016.
155. D. Matic, Z. Kanovic, Vibration based broken bar detection in induction machine for low load conditions // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2017. № 1 (17). C. 49–54.
156. A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, G. B. Kliman, Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis // IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. № 5 (37). C. 1248–1255.
157. F. Filippetti, A. Bellini, G. A. Capolino, Condition monitoring and diagnosis of rotor faults in induction machines: State of art and future perspectives 2013.C. 196–209.
158. P. J. Tavner, Review of condition monitoring of rotating electrical machines // IET Electric Power Applications. 2008. № 4 (2). C. 215–247.
159. Kumar T. C. A., Singh G., Naikan V. N. A., Sensitivity of Rotor Slot Harmonics due to Inter-Turn Fault in Induction Motors through Vibration Analysis 2018.C. 1–3.

160. K. Tian, T. Zhang, Y. Ai, W. Zhang, Induction motors dynamic eccentricity fault diagnosis based on the combined use of WPD and EMD-simulation study // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018. № 10 (8). С. 1709.

161. M. Sahraoui, A. Ghoggal, S. E. Zouzou, M. E. Benbouzid, Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motors - Simulation and analytical study of its spectral signatures on stator currents // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008. № 9 (16). С. 1503–1513.

162. J. R. Cameron, W. T. Thomson, A. B. Dow, Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors // *IEE Proceedings B: Electric Power Applications*. 1986. № 3 (133). С. 155–163.

163. Морозов А. Л., Комбинированный метод обработки вибросигналов для диагностики и контроля асинхронных двигателей, оптимизированный для встраиваемых систем // *Контроль. Диагностика*. 2021. С. 18–27.

164. PCB Piezotronics, PCB Model 352C33 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pcb.com/products?m=352c33> (дата обращения: 24.08.2022).

165. Tektronix, A621 & A622 Datasheet [Электронный ресурс]. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/2239667.pdf> (дата обращения: 24.08.2022).

166. National Instruments, What Is LabVIEW? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html> (дата обращения: 24.08.2022).

167. ARM, Arm Cortex-M Processor Comparison Table [Электронный ресурс]. URL: https://developer.arm.com/-/media/Arm%20Developer%20Community/PDF/Cortex-A%20R%20M%20datasheets/Arm%20Cortex-M%20Comparison%20Table_v3.pdf?revision=a2b3e330-d417-49cc-8037-7f034a19197e&hash=87AF3D4C6743322A02ACD8B5396FF47A1765E24C (дата обращения: 24.08.2022).

168. STMicroelectronics, STM32G474RE - Mainstream Arm Cortex-M4 MCU 170 MHz with 512 Kbytes of Flash memory, Math Accelerator, HR Timer, High Analog level integration [Электронный ресурс]. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g474re.html> (дата обращения: 24.08.2022).

169. Amazon Web Services, FreeRTOS is a market-leading real-time operating system (RTOS) for microcontrollers and small microprocessors [Электронный ресурс]. URL: <https://www.freertos.org/> (дата обращения: 24.08.2022).

170. GCC Team, GCC, the GNU Compiler Collection [Электронный ресурс]. URL: <https://gcc.gnu.org/> (дата обращения: 24.08.2022).

171. ARM, CMSIS DSP Library [Электронный ресурс]. URL: https://arm-software.github.io/CMSIS_5/DSP/html/index.html (дата обращения: 24.08.2022).

Приложение №1. Протокол связи

ONECOM

Online Experiment Communication

Described protocol version **1.0.0**

Author: Morozov Arsenii L

Document revision history

Protocol version	Changelog	Author
1.0.0	Released first version	Morozov Arsenii L

Protocol transport

Protocol developed above USB Communication Device Class.

Protocol basics

Protocol provides duplex data exchange, without receive confirmation. Messages integrity, order and delivery guarantee relies on USB layer. Both host and device can send messages without time limitations.

All data have Little-Endian

Message structure

Section name	Header			Payload (optional)
Field name	Message type	Reserved	Payload length	Data
Bytes	[0]	[1-3]	[4-7]	[8-Payload length]

All data sends in Little-endian format.

Message types for sending from host to device

Value	Meaning
0xAA	Measurements (data)
0xAB	Set frequency
0xAC	Set measurement type
0xCA	Use default GMVs as references
0xCB	Use calibrated GMVs as references
0xCC	Use current GMVs as references
0xCD	Store current GMVs as calibrated GMVs
0xDD	Change IFR of debug GMV

Message types for sending from device to host

Value	Meaning
0xBA	Single slope
0xBB	Double slopes
0xDC	Debug FFT
0xDF	Debug GMV

Message “Measurements”

Message contains measurements. Message internally by USB system can be divided on packets, depending on measurements number sending over message. Measurements sends without timestamp and measurements must have stable sample frequency. Measurements sends in double precision float point format. Message with measurements have following structure

Section name	Header			Payload		
Field name	Message type	Reserved	Payload length	Meas. 1	...	Meas. N/8
Value	0xAA	0x00	N	<> (double)	...	<> (double)
Bytes	[0]	[1-3]	[4-7]	[8-15]	...	[(N-7-8)-(N-8)]

Message “Set frequency”

Message set frequency sets sample frequency of the measurement, in order to internally calculate timestamps and frequencies. Frequency sends in unsigned 32-bit format, so frequency range is 0-4294967295. Message with frequency have following structure:

Section name	Header	Payload

Field name	Message type	Reserved	Payload length	Frequency
Value	0xAA	0x00	4	<> (uint32)
Bytes	[0]	[1-3]	[4-7]	[8-11]

Message “Set measurement type”

Message used to set type of measured signals. Measurement type is single byte value with uint8 type. Message have following structure:

Section name	Header			Payload
Field name	Message type	Reserved	Payload length	Measurement type
Value	0xAA	0x00	1	<> (uint8)
Bytes	[0]	[1-3]	[4-7]	[8]

Supported measurement types:

Value	Measurement type
0x00	Current from single phase
0x01	Radial vibrations
0x02	Axial vibrations

Messages for manipulating with GMV

Messages “Use default GMVs as references”, “Use calibrated GMVs as references”, “Use current GMVs as references”, “Store current GMVs as calibrated GMVs” are payload less and have following values:

Message type	Value
--------------	-------

Use default GMVs as references	Use default (preconfigured) GMVs as reference GMV. Default value can't be changed without reflashing firmware.
Use calibrated GMVs as references	Use calibrated GMVs (which stored in calibrations section on device) as reference GMV. To use this, some GMVs should be stored in calibrations section previously.
Use current GMVs as references	Use current GMV (calculated based on received data) as reference.
Store current GMVs as calibrated GMVs	Store current reference GMV in calibrations section on the device.

Message “Change IFR of debug GMV”

Message used to change IFR (Information Frequency Range) of the GMV which sends for algorithm debugging. New IFR sends as unsigned 8-bit value uint8. Possible values: “1”, “2”. Message have following structure:

Section name	Header			Payload
Field name	Message type	Reserved	Payload length	New IFR
Value	0xAA	0x00	1	<> (uint8)
Bytes	[0]	[1-3]	[4-7]	[8]

Message “Single slope”

Message used to send calculated on device diagnostic information, namely single slope. Slope sends in double precision float point format. Message have following structure:

Section name	Header			Payload
Field name	Message type	Reserved	Payload length	Slope
Value	0xAA	0x00	8	<> (double)
Bytes	[0]	[1-3]	[4-7]	[8-15]

Message “Double slopes”

Message very similar to single slope format, but sends 2 slopes obtained for 2 IFRs. Message have following structure:

Section name	Header			Payload	
Field name	Message type	Reserved	Payload length	Slope 1	Slopes 2
Value	0xAA	0x00	16	<> (double)	<> (double)
Bytes	[0]	[1-3]	[4-7]	[8-15]	[16-23]

Message “Debug FFT”

Message sends array with calculated magnitude of the FFT spectrum (only half because, second half is similar). This message used to debug FFT computation. Each point have double precision float point format. Message have following structure:

Section name	Header			Payload		
Field name	Message type	Reserved	Payload length	FFT point. 1	...	FFT point. M/8
Value	0xAA	0x00	M	<> (double)	...	<> (double)
Bytes	[0]	[1-3]	[4-7]	[8-15]	...	[(M-7-8)-(M-8)]

Message “Debug GMV”

This message very similar to Debug FFT, but sends calculated GMV function to debug its calculation. Message have following structure:

Section name	Header			Payload		
	Message type	Reserved	Payload length	GMV point. 1	...	GMV point. P/8
Value	0xAA	0x00	P	<> (double)	...	<> (double)
Bytes	[0]	[1-3]	[4-7]	[8-15]	...	[(P-7-8)-(P-8)]



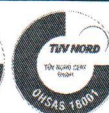
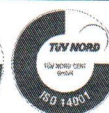
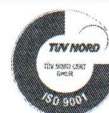
UNIVERSITY
OF NOVI SAD



FACULTY OF
TECHNICAL SCIENCES

Trg Dositeja Obradovića 6
21000 Novi Sad, Republic of Serbia
Tel. + 381 21 6350 413; + 381 21 450 810; Fax: + 381 21 458 133
e-mail: ftndean@uns.ac.rs

INTEGRATED
MANAGEMENT
SYSTEM
CERTIFIED BY:



Our ref: _____

Your ref: _____

Date: 12/9/2022

Subject: The act of implementation

This act confirms that in December 2021, the graduate student A. L. Morozov, Prof. R. R. Nigmatullin from KNRTU-KAI (Kazan, Russia), and Zeljko Kanovic, associate professor and Dejan Reljic, assistant professor from the University of Novi Sad (Novi Sad, Serbia) successfully conducted an "online experiment".

The reasons for conducting of the experiment are COVID restrictions that did not allow graduate student A. L. Morozov (supervisor Prof. Nigmatullin R. R.) to personally participate in conducting experiments with a device for monitoring and diagnosing the technical condition of asynchronous electric motors, developed within the framework of joint scientific and technical work.

To conduct the "online experiment", a special stand was developed that allows:

- to poll sensors placed on asynchronous motors at Novi Sad University;
- to transmit this sensors data via the Internet in real time and receive it at KNIRU-KAI;
- to "pass" this data through the monitoring device and output the received diagnostic information.

It is noted that these developments are made and the experience received have a great potential for implementation in the following areas:

- distance education;
- remote diagnostic systems;
- remote scientific researches.

Prof. Zeljko Kanovic fully confirmed that this experience merits full implementation in other areas when the corresponding laboratory equipments/sets are spatially distant from a potential researcher.

In Novi Sad, 12/9/2022

Head of the Laboratory for Electric machines

Dr Veran Vasic, Full Professor

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по
образовательной деятельности



КНИТУ-КАИ

Е.И. Загребина

10 2022 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Морозова Арсения Леонидовича

Комиссия в составе:

председатель – Надеев А.Ф., директор института радиоэлектроники,
фотоники и цифровых технологий (ИРЭФ-ЦТ), д-р физ.-мат. наук, профессор;

члены комиссии:

Шахтурин Д.В., председатель учебно-методической комиссии института
радиоэлектроники, фотоники и цифровых технологий (УМК ИРЭФ-ЦТ);

Шахтурин Д.В., исполняющий обязанности заведующего кафедрой
радиоэлектроники и информационно-измерительной техники (РИИТ), канд.
техн. наук, доцент;

Салахова А.Ш., доцент кафедры радиоэлектроники и информационно-
измерительной техники (РИИТ), канд. техн. наук, доцент;

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы на
соискание ученой степени кандидата технических наук Морозова А. Л.,
подготовленной по научной специальности 2.2.8. «Методы и приборы
контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»,
основанные на оригинальных методе и методиках онлайн контроля и
диагностики технического состояния асинхронных двигателей, использованы
в форме новых разделов лекционного материала, описания лабораторных

работ и их макетов, а также оригинального программного обеспечения в образовательном процессе на кафедре радиоэлектроники и информационно-измерительной техники института радиоэлектроники, фотоники и цифровых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ) при разработке учебно-методических материалов по дисциплинам «Цифровые системы управления», «Интеллектуальные системы контроля и диагностики» образовательной программы высшего образования – программы бакалавриата по направлению подготовки 11.03.01 Радиотехника, «Цифровая обработка сигналов» образовательной программы высшего образования – программы магистратуры по направлению 11.04.01 Радиотехника.

Комиссия отмечает, что использование результатов работы Морозова А. Л. позволило повысить научный уровень и отразить современные достижения науки и техники в содержании указанных дисциплин, способствуя совершенствованию образовательного процесса и качественной профессиональной подготовки выпускников.

Председатель комиссии:

Директор ИРЭФ-ЦТ,

д-р физ.-мат. наук, профессор

А.Ф. Надеев

Члены комиссии:

Председатель УМК ИРЭФ-ЦТ

Д.В. Шахтурин

И. о. заведующего кафедры РИИТ,

канд. техн. наук, доцент

Д.В. Шахтурин

Доцент кафедры РИИТ,

канд. техн. наук, доцент

А.Ш. Салахова

Общество с ограниченной
ответственностью «МИРКОД»

Фактический адрес: 420111, Республика Татарстан,
г. Казань, ул. Федосеевская, д. 58

Юридический адрес: 420043, Республика Татарстан,
г. Казань, ул. Лейтенанта Шмидта, д. 8, кв. 60

+7 (966) 260-99-93

info@mircod.com

ИНН: 1655359346; КПП: 165501001;

ОГРН: 1161690098184



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Морозова Арсения Леонидовича

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящим подтверждаю, что результаты диссертационной работы Морозова А. Л. на соискание ученой степени кандидата технических наук, подготовленной по научной специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды», внедрены и частично используются на предприятии, а именно:

- комбинированный метод контроля и диагностики технического состояния технического состояния электродвигателей;
- стенд для проведения удаленных измерений сигналов электродвигателей и онлайн контроля и диагностики их технического состояния;
- алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечения систем онлайн контроля и диагностики технического состояния асинхронных двигателей

Отмечаю, что полученные Морозовым А. Л. результаты могут быть использованы для создания систем и комплексов онлайн контроля и диагностики технического состояния сложных систем.

Директор ООО «МИРКОД»



Терегулов Р.В.