

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский государственный технический университет»



На правах рукописи

БАННОВ ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБРЫВА СТЕРЖНЕЙ
КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТОКОВ СТАТОРА**

Специальность 2.4.2. – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., доцент
Полищук Владимир Иосифович

Омск 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. РОТОР АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ, ВИДЫ И ОСОБЕННОСТИ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА. ПОВРЕЖДЕНИЕ РОТОРНОЙ ОБМОТКИ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ	12
1.1. Устройство и виды короткозамкнутого ротора	12
1.2. Двигатели с повышенным пусковым моментом.....	16
1.3. Причины и последствия обрыва стержня ротора	24
1.4. Обзор существующих методов технической диагностики АД	31
1.4.1. Комплексные системы мониторинга.....	32
1.4.2. Методы непрерывной технической диагностики,	36
основанные на анализе потребляемых токов	36
Выводы по 1 главе.....	43
2. МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В ДИАГНОСТИКЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	44
2.1. Регрессионный анализ	46
2.1.1. Выбор базисных функций	51
2.1.2. Точность оценки регрессионной модели	52
2.1.3. Проверка аппроксимационной модели оценкой гомоскедантности регрессионных остатков	54
2.2. Мультифазная математическая модель для исследования обрыва стержней ротора	57
2.2.1. Имитационное моделирование АД с электрической несимметрией ротора в программной среде MatLab Simulink.....	62
2.2.2. Имитация повреждения стержней короткозамкнутого ротора АД	64
Выводы по 2 главе.....	65
3. ВЫДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРИЗНАКА МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ОБЩЕГО ВИДА.....	66
3.1. Исследование возможной электрической несимметрии обмоток статора исследуемого асинхронного двигателя.....	66
3.2. Разработка метода диагностики короткозамкнутой обмотки ротора АД	79

3.3. Применение регрессионного анализа к массиву мгновенных значений токов статора для диагностики обрыва стержня обмотки ротора	85
3.4. Экспериментальная установка для получения и цифровой обработки массивов мгновенных значений токов статора для нахождения диагностического признака обрыва стержня ротора.....	89
3.4.1. Аппаратная часть экспериментальной установки	90
3.4.2. Реализация системы сбора данных с датчиков токов в программной среде LabVIEW	91
3.4.3. Силовая часть экспериментальной установки	93
3.4.4. Ротор испытуемого АД.....	94
3.4.5. Полученные данные	97
Выводы по 3 главе.....	99
4. МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРИЗНАКА ОБРЫВА СТЕРЖНЯ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	100
4.1. Исследование влияния размерности регрессионной модели на дисперсию остатков по результатам обработки экспериментальных данных, полученных для исправного и поврежденного роторов АД.....	103
4.2. Критерий наличия обрыва стержня обмотки ротора асинхронного двигателя	109
4.3. Устройство для диагностики обрыва стержня ротора асинхронного двигателя	121
Выводы по 4 главе.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	126
ПРИЛОЖЕНИЯ	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Повышение надежности работы ответственных механизмов, приводимых во вращение электромеханическими преобразователями, за счет новых высокочувствительных методов диагностирования, позволяющих на ранней стадии развития выявлять сложные внутренние дефекты, является одной из важнейших научных задач в электроэнергетике. На сегодняшний день в качестве основных электроприемников в промышленности выступают трехфазные электроприводы с асинхронными двигателями, работающими в составе электротехнических комплексов (АДЭК), на ответственных механизмах в подавляющем большинстве технологических процессов. До 70 % вырабатываемой электроэнергии в мире расходуется именно на электроприводы переменного тока, среди которых особое место занимают электроприводы с высоковольтными АДЭК. Широкое распространение АДЭК обусловлено их неоспоримыми достоинствами, такими как: надежность, относительно малая себестоимость, конструктивная простота, отсутствие обмотки возбуждения и щеточных узлов, возможность стабильной работы при кратковременных перегрузках.

Несмотря на относительную простоту конструкции короткозамкнутой обмотки ротора АДЭК, этот узел является самым нагруженным вследствие воздействия центробежных сил, теплового расширения, ударных токовых нагрузок, перегрева, что неизбежно приводит к снижению его ресурса. В короткозамкнутой обмотке ротора высоковольтного АДЭК наиболее часто возникает неисправность в месте соединения стержней ротора и короткозамыкающего кольца. Свыше 80 % всех повреждений обмотки ротора высоковольтных АДЭК связаны с обрывом стержня.

С 2017 года введен в действие межгосударственный стандарт 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», согласно которому определены основные требования к устройствам диагностики роторов электродвигателей переменного тока. Главными методами обнаружения обрыва стержня обмотки ротора АДЭК являются методы, основанные на спектральном анализе тока статора (MCSA), вибрации и магнитного поля воздушного зазора.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в создание и усовершенствование методов диагностирования роторной цепи по потребляемому току статора внесли многие российские и зарубежные ученые:

М.П. Табинский, Т.А. Глазырина, Е.М. Новоселов, Н.Р. Сафин, М.Г. Баширов, В.А. Рогачев, М.А. Гашимов, А.Е. Козярук, А.Н. Новожилов, О.А. Андреева, В.А. Прахт, К.Б. Вейнреб, В.С. Петухов, А.В. Барков, А.С. Сарваров, А.Н. Назарычев, W.T. Thomson, H.A. Toliyat, J. Antonino-Daviu, D. Hyun, A. Bellini, R.R. Obaid, M.E.H. Benbouzid, M. Blodt, A.J.M. Cardoso, F. Filippetti, N. Mehala, R.R. Schoen и другие.

Анализ существующих путей решения проблемы диагностики повреждения короткозамкнутой роторной обмотки АДЭК позволил обобщить основные трудности, с которыми сталкивается исследователь при разработке и реализации методов ее диагностирования:

1. Сложность математического моделирования асинхронной машины с учетом влияния электрической несимметрии в роторной цепи при количестве фаз ротора более трех.

2. Получение адекватных мгновенных значений токов фаз статорной цепи от математической модели АД с наличием обрыва стержня в короткозамкнутой обмотке ротора для анализа и выделения диагностического признака повреждения.

3. Сложность выполнения реальной физической экспериментальной установки, способной многократно имитировать обрыв стержня ротора.

4. Проблемы получения оцифрованных мгновенных значений токов фаз статора с реального АД с обрывом стержня в обмотке ротора в условиях наличия нестационарных шумов в измерительных каналах связи.

5. Технические ограничения вычислительного аппарата при цифровой обработке исследуемых сигналов.

Значительный объем публикуемых научных работ по диагностике обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора АДЭЖ и повышение интенсивности таких публикаций как в российских, так и зарубежных изданиях показывают, что разработка новых методов диагностики обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора АДЭЖ до сих пор является актуальной и не полностью решенной научной задачей.

Объект исследования: высоковольтные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Предмет исследования: методы и алгоритмы диагностирования повреждений короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей.

Цель работы. Разработка метода и алгоритма синтеза высокочувствительной системы диагностирования короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя на основе анализа токов статора.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих методов диагностики обрыва стержня обмотки ротора асинхронных двигателей.

2. Разработать математическую модель асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, описывающую процессы, происходящие в статорной цепи при наличии электрической несимметрии роторной цепи.

3. Создать физическую экспериментальную установку асинхронного двигателя, с возможностью многократного имитирования повреждения в «беличьей клетке» различного количества стержней, для исследования реальных кривых токов фаз статора при наличии повреждения в обмотке ротора. При этом

исключив возможность влияния электрической несимметрии статорных обмоток на роторную цепь.

4. На основе данных, полученных от математической модели и натурального эксперимента, разработать и апробировать метод и алгоритм выявления возникновения обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора АД.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель асинхронной машины, отличающаяся от известных приведением статорных обмоток к роторной мультифазной системе, что позволило получить и исследовать качественную информацию о функционировании асинхронного двигателя как компонента электротехнического комплекса при внешних электрических воздействиях на статорную обмотку со стороны несимметричных вторичных цепей ротора в различных режимах его работы.

2. Разработан метод выделения диагностического признака обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя, отличающийся использованием регрессионного анализа с обоснованной размерностью функционального базиса при цифровой обработке массива мгновенных значений модуля результирующего вектора фазных токов статора, обеспечивающий высокую селективность системы диагностики асинхронного двигателя в составе электротехнического комплекса.

3. Предложен критерий наличия повреждения обмотки ротора асинхронного двигателя, основанный на регрессионном анализе модуля результирующего вектора фазных токов статора, отличающийся сопряжением изображающих векторов весовых коэффициентов при базисных функциях в различных режимах работы электротехнического комплекса, что позволило получить высокую чувствительность системы диагностики при обрыве одного стержня короткозамкнутой обмотки ротора.

Научная новизна предложенных технических решений подтверждается полученным патентом на изобретение RU2763849C1.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы:

1. Получены результаты моделирования асинхронного двигателя в различных режимах работы (пуск, холостой ход, нагрузка), при различной степени повреждения роторной цепи (целое состояние, обрыв одного, двух, трех, четыре стержней), позволяющие применить к ним выбранный математический аппарат для дальнейшей обработки.

2. На основе данных полученных при математическом моделировании разработан метод, выделяющий диагностический признак обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора, а также позволяющий получить результаты математической обработки соответствующие текущему состоянию асинхронного двигателя.

3. На основе данных полученных при математическом моделировании и натурном эксперименте, разработан и экспериментально апробирован алгоритм выделения критерия обрыва стержней ротора асинхронного двигателя.

4. Разработана экспериментальная установка имитирующая работу электротехнического комплекса, в котором использован асинхронный двигатель, с обмоткой ротора построенной технологически подобно обмоткам роторов высоковольтных асинхронных двигателей, позволяющая многократно производить обрыв стержня «беличьей клетки» с различной степенью тяжести повреждения.

5. Разработано устройство диагностирования обрыва стержня асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора в различных режимах работы.

Результаты диссертационной работы были апробированы на производственных площадях ЗАО «СпецКомплектАвтоматика», применены в программном обеспечении диагностического устройства на базе РЕТОММЕТР-3 в ООО «НПП «Динамика», а также внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «СамГТУ», что подтверждается соответствующими актами.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

В соответствии с пунктом 4 паспорта научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы в диссертации содержится исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач, в диссертационной работе использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследований. Основными теоретическими методами исследования, примененными в работе, являются: теория электрических машин, численные методы аппроксимации экспериментальных данных, теория регрессионного анализа, теория цифровой обработки сигналов, а также метод статистического анализа, теория векторной алгебры и линейной геометрии. Исследование кривых токов статора от асинхронного двигателя как физического объекта проводилось на экспериментальной установке, сконструированной специально для работы машины с возможностью имитации обрыва стержня обмотки ротора. При этом использованы сертифицированные датчики Холла и аналого-цифровой преобразователь.

Положения выносимые на защиту:

1. Математическая модель асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, в которой количество фаз статора приведено к количеству стержней ротора, описывающая работу асинхронного двигателя в составе электротехнического комплекса при различных режимах.

2. Метод диагностики асинхронного двигателя базирующийся на регрессионном анализе мгновенных значений модуля результирующего вектора фазных токов статора асинхронного двигателя.

3. Критерий наличия обрыва стержня в роторе асинхронного двигателя, основанный на сравнении модулей векторов, координатами которых являются

коэффициенты при базисных функциях, показывающие их различия, в рассматриваемых режимах работы электротехнического комплекса.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается корректным и обоснованным применением математических методов статистики, положений и методов цифровой обработки сигналов, математического аппарата регрессионного анализа, использованием основных законов линейной геометрии и векторной алгебры, а также подтверждается хорошим совпадением имитационного моделирования и натурального эксперимента.

Апробация работы. Результаты работы доложены, обсуждались и были одобрены на таких научных-технических мероприятиях, как: Восьмой Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи 2017», г. Самара, 02-06 октября 2017 г.; Международной молодежной научной конференции «XIV Королевские чтения», г. Самара, 03-05 октября 2017 г.; Девятой Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи 2018», г. Казань, 01-05 октября 2018 г.; Десятой Международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи 2019», г. Иркутск, 16-20 сентября 2019 г.; Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современное российское оборудование для повышения надежности экономичности и безопасности энергетического комплекса России», г. Самара, 22-23 мая 2019 г. XIV Международной IEEE научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин», г. Омск, 10-12 ноября 2020 г.

Публикации. Результаты выполненных исследований изложены в 15 научных трудах, в том числе: в двух статьях в периодических изданиях рекомендованных ВАК РФ, двух статьях в журнале входящем в базы цитирования Web of Science, Scopus, одном тезисе доклада в конференции входящей в базу цитирования Scopus, одном патенте на изобретение, девяти статьях в материалах конференций.

Личный вклад автора в получение результатов, изложенных в диссертационной работе. Решения задач исследования, научные положения, вынесенные на защиту, основные выводы и рекомендации принадлежат автору. В диссертационном исследовании предложена и реализована идея создания прототипа ротора асинхронного двигателя взамен ротора заводского исполнения. Главным элементом нового ротора является магнитопровод с медной беличьей клеткой, у которой стержни соединены с короткозамыкающим кольцом методом пайки. Определена взаимосвязь между размерностью гармонического базиса при регрессионном анализе и приближением аппроксимационной модели к исходным данным, а также влияние частоты дискретизации на диагностический признак. Предложена методика определения технического состояния роторной цепи асинхронного двигателя изображающими векторами, координатами которых являются амплитуды при базисных функциях, полученных при регрессионном анализе массива мгновенных значений модуля результирующего вектора токов статора. Выделен диагностический признак, определяющий наличие повреждения одного стержня ротора; описана мультифазная математическая модель асинхронного двигателя с возможностью имитации обрыва стержней короткозамкнутого ротора.

В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит идея мультифазной математической модели, разработка метода выделения диагностического признака, разработка экспериментальной установки, обработка экспериментальных данных, анализ результатов.

Структура диссертации. Диссертационное исследование общим объемом 142 страницы состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 125 страниц основного текста, перечень используемой научно-технической литературы из 106 наименований, приложений на трех страницах, 62 рисунка и 13 таблиц.

1. РОТОР АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ, ВИДЫ И ОСОБЕННОСТИ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА. ПОВРЕЖДЕНИЕ РОТОРНОЙ ОБМОТКИ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ

1.1. Устройство и виды короткозамкнутого ротора

Самыми распространенными электродвигателями, используемыми в электроприводах промышленных предприятий, являются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором (рис. 1.1). При этом диапазон их мощностей варьируется от нескольких сотен Ватт до десятка Мегаватт, а напряжение, питающее АД, достигает 10 кВ. Принцип работ АД всех уровней мощностей и напряжений одинаков.

Конструкция АД с короткозамкнутым ротором проста и надежна. Отсутствие щеточного аппарата, контактных колец, изолированной обмотки ротора, стойкость АД к кратковременным перегрузкам позволило использовать этот тип электродвигателей в подавляющем большинстве электроприводов ответственных механизмов. АД используется как основной силовой агрегат в ответственных технологических процессах, в составе рабочих комплексов. Именно АД обеспечивает непрерывную работу технологических процессов на всех объектах промышленности, в нефтяной и газовой отрасли, при производстве электроэнергии, в коммунальном хозяйстве и на других объектах первой и особой категории электроснабжения.

С момента изобретения АД с короткозамкнутым ротором был одним из основных преобразователей электрической энергии в механическую, а на сегодняшний день он самый распространенный потребитель электроэнергии в большинстве стран.

Тем не менее, на практике встречаются случаи аварийного останова АД ответственных технологических механизмов вследствие возникающих в АД разного рода повреждений.



Рис. 1.1. Высоковольтный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Достоинствами асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором являются:

- простота конструкции и надежность;
- высокий срок службы;
- низкая металлоемкость и себестоимость;
- высокая перегрузочная способность;
- работа напрямую, без пусковой аппаратуры;
- возможность регулировать обороты посредством частотного преобразователя.

Основным и, пожалуй, единственным недостатком электродвигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора, по сравнению с двигателем с фазным ротором, является невозможность запускать его при наличии больших пусковых моментов, когда вал при пуске находится под нагрузкой. Например, такими механизмами являются приводы электротранспорта, грузоподъемные системы, конвейерные линии, то есть везде, где есть необходимость в тяжелом и плавном

пуске [2, 6]. Тем не менее, при необходимости такого пуска АД с короткозамкнутым ротором могут оснащаться специальными пусковыми устройствами, такими как тиристорные пусковые устройства или устройства частотно-регулируемого пуска.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором конструктивно состоит из двух основных элементов – статора и ротора. Статор – неподвижная часть АД, включающая в себя корпус, магнитопровод, элементы изоляции, обмотки образующие статорную цепь. Она представляет собой трехфазную систему равномерно распределенных по внутренней окружности магнитопровода проводников, которые при подаче на них переменного напряжения, создают вращающееся магнитное поле. Они уложены в пазах магнитопровода (рис. 1.2), который закреплен в корпусе АД. Обмотки выполнены, как правило, из меди, физически расположены друг к другу в определенном диапазоне градусов, в зависимости от числа пар полюсов (120, 60, 30 ... град.), от этого зависят номинальные обороты АД. При этом векторно, они всегда образуют между собой угол 120 электрических градусов.

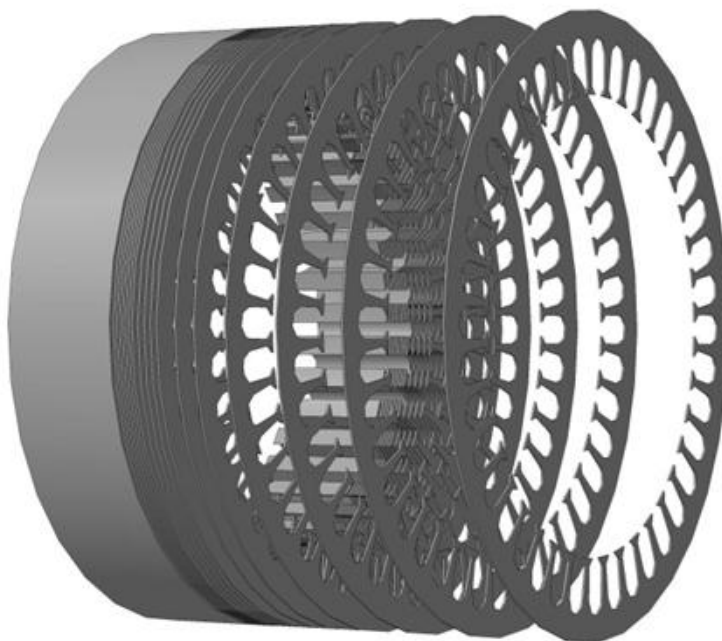


Рис. 1.2. Модель магнитопровода статора АД

Неотъемлемым элементом двигателя является станина, образующая в комплексе с торцевыми щитами его корпус. Эти компоненты необходимы для достижения необходимой жесткости и прочности корпуса, они обеспечивают вращение ротора и охлаждение машины. На корпусе размещается клеммная коробка, в которой расположены болтовые соединения, объединяющие статорную цепь с питающей сетью.

Ротор – вращающаяся часть асинхронного двигателя. Ротор АД состоит из вала, магнитного сердечника и обмотки ротора. Магнитопровод представляет собой цилиндр, набранный из листовой электротехнической стали специальной формы, которая образует во внешнем контуре пазы для проводников роторной цепи. Основным элементом конструкции ротора является его обмотка, представляющая собой стержни из сплавов алюминия или меди, расположенные в пазах магнитопровода. На торцевых частях они объединяются короткозамыкающими кольцами из того же металла, что и стержни. Таким образом, образуется короткозамкнутая обмотка («беличья клетка»), которая является одним из ключевых элементов конструкции АД. Вращающееся магнитное поле статора наводит ЭДС и токи в стержнях. Магнитопровод ротора плотно насаживается на стальной вал, которому передается крутящий момент.

В большинстве случаев для высоковольтных АД, используется конструкция обмотки ротора с применением медных стержней круглого сечения (рис. 1.3). Такие АД, в условиях постоянной нагрузки, имеют повышенный КПД вследствие низкого значения скольжения и малого активного сопротивления стержней. Однако применение стержней круглого сечения неэффективно в АД электроприводов механизмов, требующих повышенного крутящего момента во время пуска двигателя.

Применение стержней круглого сечения обосновано высокой технологичностью изготовления и монтажа при соединении короткозамыкающих колец и стержней. Кроме того, круглая конструкция стержней дает возможность снизить последствия воздействия центробежных сил на стержни обмотки.

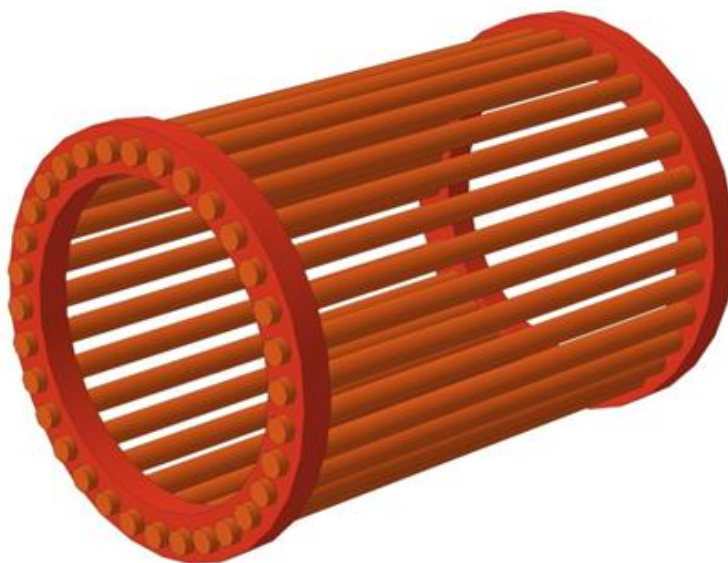


Рис. 1.3. Вид «беличьей клетки» ротора АД

1.2. Двигатели с повышенным пусковым моментом

Для достижения плавного и быстрого запуска механизма, требующего повышенного крутящего момента, к АД с короткозамкнутым ротором предъявляются особые требования. Пусковой момент во время запуска должен быть близок к максимальному значению, во время длительной работы момент на валу должен быть стабильным. Без применения специальных средств выполнить эти два условия невозможно.

Улучшить пусковые характеристики возможно при повышении активного сопротивления обмотки ротора [2]. Повышать сопротивление необходимо только в момент пуска, когда частота тока в роторе близка к частоте тока в статоре и скольжение имеет максимальное значение. Продолжительная работа в таких условиях приведет к выходу из строя асинхронного электродвигателя, так как по обмотке ротора будут проходить большие токи, сильно нагревая машину.

Поскольку в начальный период пуска частота токов в обмотке ротора максимальна и практически равна значению частоты токов обмотки статора,

а по мере набора оборотов вала двигателя она уменьшается до минимальных 3-5 Гц, улучшение пусковых характеристик в некоторых конструкциях высоковольтных АД производится за счет использования «поверхностного эффекта».

«Поверхностный эффект» представляет собой вытеснение тока к наружным частям «беличьей клетки». С повышением частоты тока в момент пуска он концентрируется на внешних частях стержней, и по мере разгона двигателя происходит распределение потока по всему сечению проводника. В стремлении повысить пусковой момент АД, основываясь на этом эффекте, были разработаны несколько специальных конструкций обмоток короткозамкнутых роторов:

- со стержнями продольной формы (глубокопазный);
- двойная короткозамкнутая клетка.

Двигатель с глубоким пазом ротора (рис. 1.4) имеет стержни высотой в 6-12 раз больше ширины [1]. Активное сопротивление стержня увеличивается под влиянием вытесненного к воздушному зазору (поверхности) тока (рис. 1.6, а). В начальный момент пуска частота тока в роторе равна частоте тока питающей сети и ток распределяется пропорционально индуктивным сопротивлениям продольных слоев стержня (рис. 1.5). Нижние части стержня имеют большее индуктивное сопротивление, чем верхние. По мере того, как ротор набирает обороты, частота тока в его обмотке уменьшается и при выходе в нормальный рабочий режим становится значительно низкой. При этом снижаются индуцируемые потоки и ток распределяется по всему сечению стержня более равномерно (рис. 1.6, в). Действие эффекта вытеснения прекращается, и сопротивление обмотки значительно снижается, доходя до омического сопротивления материала, а двигатель переходит в рабочий режим с расчетным КПД.



Рис. 1.4. Ротор АД с глубоким пазом

Вследствие использования описанного выше эффекта $\cos \varphi$ глубокопазных двигателей на 0,02-0,04 меньше, так как стержни глубоко уплотнены в сердечнике ротора [1, 2, 9]. При этом кратность максимального момента глубокопазных двигателей меньше, тогда как пусковой момент значительно больше, чем у двигателей без применения «поверхностного эффекта».

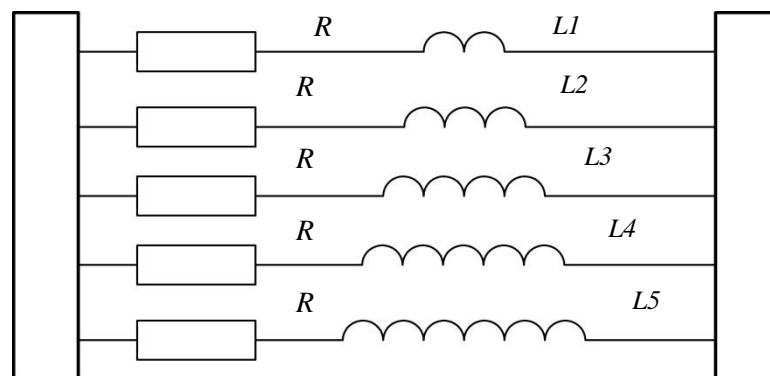


Рис. 1.5. Индуктивность слоев стержня ротора относительно высоты при пуске [11]

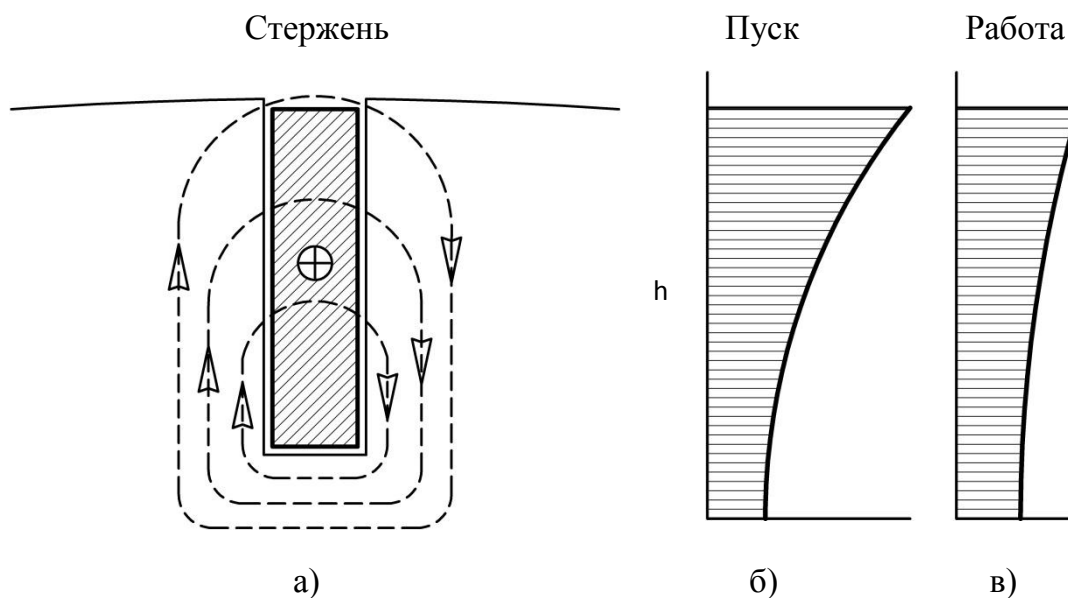


Рис. 1.6. Разрез стержня (а), распределение тока по сечению стержня во время пуска (б), работы (в)

Способ крепления короткозамыкающих колец с глубокими стержнями отличается от стержней круглой формы. При изготовлении данного типа обмоток ротора стержни вставляются в пазы по окружности, формируя при этом «беличью клетку». Для обеспечения механической жесткости и удерживания стержней от смещения при воздействии на них центробежных сил, соединения стержней и короткозамыкающих колец выполняют методом пайки. Припаивают определенными марками припоев ПСр15, ПСр45 и ПМФ7 [10].

Двухклеточные двигатели. Характерной отличительной особенностью двухклеточного двигателя является короткозамкнутый ротор с двумя обмотками. Одна обмотка именуется «пусковая», а другая – «рабочая» (рис. 1.7). При выполнении паяной конструкции обмоток ротора, с целью повышения активного сопротивления, внешнюю (пусковую) клетку изготавливают из материала с большим удельным сопротивлением (латунь, бронза) [4]. Это дополнительно усиливает «поверхностный эффект». Для этих же целей часто выполняют внешнюю обмотку из стержней с заниженным сечением. Стержни внутренней (рабочей) клетки изготавливают из меди.

Поскольку пусковая обмотка при тяжелых условиях пуска выделяет большое количество тепла и может деформироваться, она изготавливается со своими отдельными короткозамыкающими кольцами.

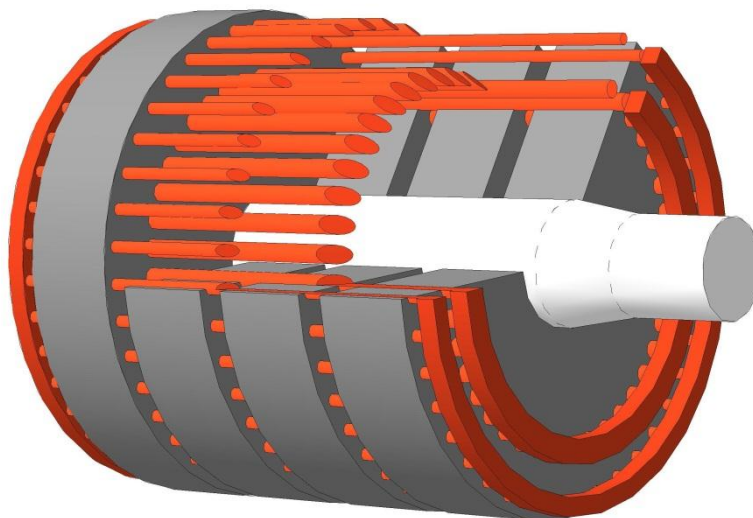


Рис. 1.7. Ротор короткозамкнутого АД с двойной клеткой

В такой конструкции обмотки ротора, вследствие наличия «поверхностного эффекта», так же как и в глубокопазном двигателе, при пуске нагружается наружная (пусковая) клетка ротора, имеющая повышенное сопротивление, а внутренняя (рабочая) практически не нагружена. При наборе оборотов, плотность тока концентрируется от наружной части к внутренней и, соответственно, нагрузка все больше ложится на внутреннюю (рабочую) обмотку. Во время работы двигателя ток ротора распределен между обмотками обратно пропорционально их активным сопротивлениям. Так как, рабочая (внутренняя) клетка имеет меньшее сопротивление, чем пусковая, то при низких частотах ток протекает в основном по ней [3, 9].

По причине относительно низкого активного сопротивления рабочей обмотки двигателя с двухклеточной обмоткой ротора имеют высокие показатели КПД.

Двигатели с обмоткой ротора специальной формы профиля. К специальным формам стержня ротора можно отнести такие виды профиля, как колбообразный и трапецидальный [1-3, 9]. Свойства данных видов двигателей

приближаются к свойствам двухклеточных обмоток за счет утолщения нижней части стержня и усиления эффекта изменения сопротивления во время перехода от пуска к рабочему режиму. При пуске двигателей с колбообразной формой стержня (рис. 1.8, а) ток вытесняется к воздушному зазору, где наружная часть имеет значительно сужение, что увеличивает активное сопротивление в этой части обмотки больше. Пусковые характеристики трапецевидной формы (рис. 1.8, б) приближены к характеристикам прямоугольного профиля и сохраняются высокими (рис. 1.9). Такие обмотки роторов значительно проще в изготовлении, чем двухклеточные, и в основном применяются в низковольтных АД с короткозамкнутым ротором.

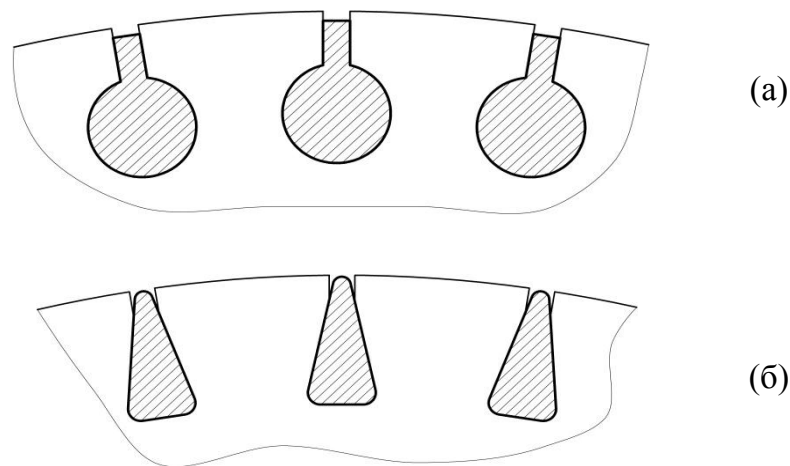


Рис. 1.8. Колбовидная (а) и трапецевидная (б) формы профиля стержней ротора специальной формы

Использование сложных конструкций стержней обмоток роторов высоковольтных двигателей вызвано острой необходимостью повышения их пусковых характеристик. Во всех случаях изменение профиля стержня направлено на увеличение сопротивления в верхней части обмотки, что позволяет использовать «поверхностный эффект» вытеснения токов [1-3, 9] во время пуска АД. Разнообразие характеристик АД дает возможность эффективно использовать их преимущества в различных условиях пуска и работы, однако следует отметить, что улучшение пусковых параметров неизбежно влечет за собой снижение

максимального момента (рис. 1.9) и уменьшение $\cos \varphi$, по сравнению с двигателями со стержнями круглого сечения (с повышенным КПД).

Конструкции обмоток роторов высоковольтных АД с повышенными пусковыми свойствами можно охарактеризовать как двигатели с саморегулируемым моментом. Когда нагрузка на валу возрастает, а частота вращения падает, это провоцирует повышение частоты тока в обмотках ротора, что увеличивает активное сопротивление, концентрируя токи ближе

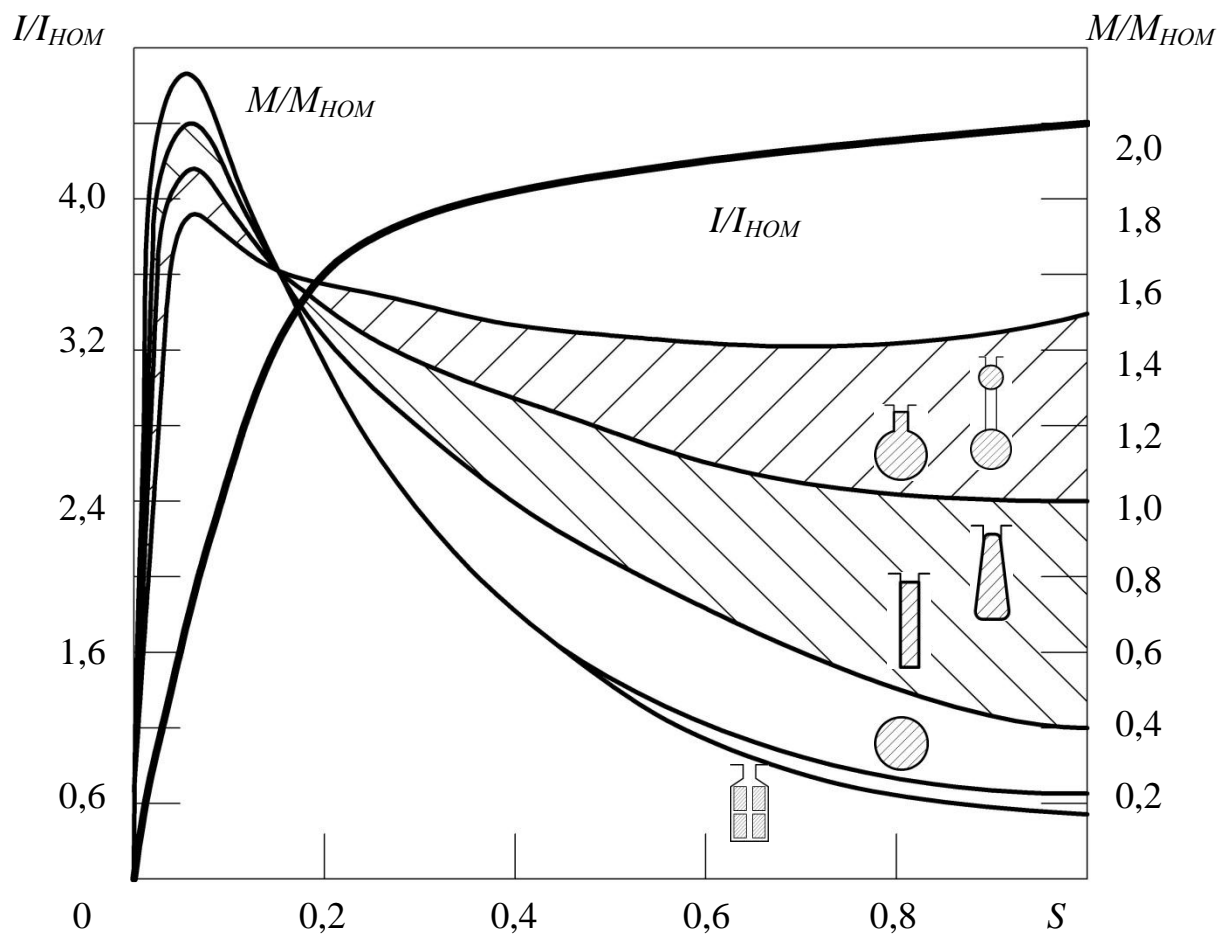


Рис. 1.9. Механические характеристики АД с короткозамкнутым ротором разной формы сечения паза и с фазным ротором

к воздушному зазору. Таким образом, крутящий момент в АД имеет определенный диапазон частоты вращения, в котором он может работать в нормальном режиме.

Двигатели с изменением конструкции короткозамыкающих колец обмотки ротора. Данный тип обмотки ротора АД отличается характерными изменениями

короткозамыкающих колец: целенаправленный технологический разрыв торцевого кольца в определенном порядке и использование второго короткозамыкающего кольца (рис. 1.10).

Еще одним способом повышения пускового момента АД является конструкция обмотки ротора с двойными короткозамыкающими кольцами. Повышение пускового момента АД достигнуто путем разделения короткозамыкающего кольца на рабочее и пусковое [13]. Во время пуска, когда частота тока в роторе равна частоте питающей сети, рабочее кольцо, обладающее большей индуктивностью, не пропускает всего тока и происходит вынужденное замыкание по кольцу с большим сопротивлением. При переходе машины в рабочий режим ток замыкается по обоим кольцам, сопротивление которых в нормальном режиме намного меньше, чем в пусковом. В АД с двойными кольцами форма паза ротора выполнена почти круглой в отличие от стержней специальной формы, поэтому в пазу почти не происходит вытеснения тока к воздушному зазору и это явление проявляется в короткозамыкающих кольцах ротора (рис 1.10).

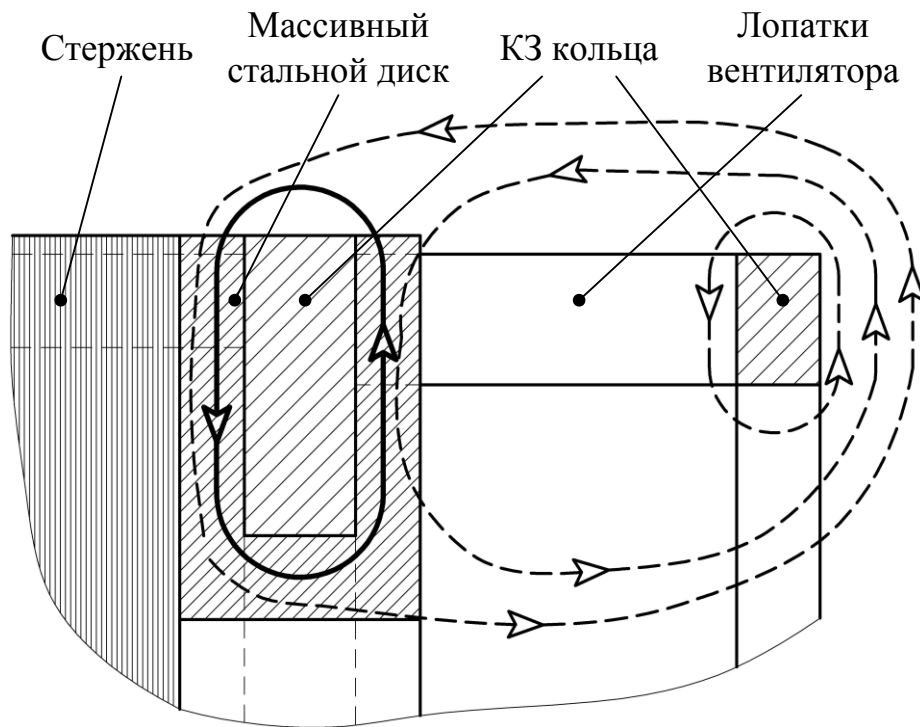


Рис. 1.10. Распределение магнитного потока ротора с двумя кольцами

В двигателях с такой конструкцией ротора вытеснение тока происходит вне магнитопровода, и поэтому конфигурация магнитной цепи главного потока двигателя (пазовая часть ротора) остается такой же, как в двигателе с привычной формой обмотки ротора. Наиболее широко это раскрывается при круглой форме сечения стержня.

1.3. Причины и последствия обрыва стержня ротора

На особо ответственных установках, обеспечивающих непрерывную работу ответственных механизмов, работающих в нефтегазовой и химической промышленности, металлургии, электроэнергетике и других стратегически значимых отраслях страны в большинстве случаев применяется высоковольтный асинхронный двигатель.

Несмотря на довольно простую конструкцию короткозамкнутой обмотки ротора, количество выходов из строя высоковольтных АД по причине повреждений обмотки ротора существенна и достигает до 18 % от всех отказов работы АД [15, 16]. Самым распространенным повреждением короткозамкнутых обмоток роторов АД является обрыв стержня. До 80 % повреждений обмотки ротора, приводящих к аварии АД, происходят именно по этой причине [17].

Особый интерес вызывают данные [15], которые были предоставлены эксплуатационным персоналом тепловых электростанций, из которых видно, что вынужденные остановки энергоблоков электростанций, произошедших по причине выхода из строя электроприводов вспомогательного оборудования, составляют порядка 30 %. Из них по причине отказа электродвигателей – 24 %. Как показали статистические данные [19], обрыв стержней обмотки ротора занимает третье место в оценке повреждаемости АД после повреждений подшипников и повреждений обмотки статора.

Однако в [15] также отмечается, что повреждаемость обмотки ротора АД на тепловых электростанциях, как правило, значительно превышает усредненные статистические данные. Проведя диагностику всех высоковольтных АД на двух

электростанциях, исследователи пришли к выводу, что порядка 35-40 % АД на них работают с несимметричной «беличьей клеткой» ротора. Такое обстоятельство по большей части вызвано наличием целого ряда производственных дефектов (недостаточно пропаяны соединения, окисление поверхности контакта и т. д.), что в дальнейшем неминуемо приводит к обрыву стержня короткозамкнутой обмотки ротора АД.

Как показали данные иностранных специалистов [21-23, 25, 28, 29], эта проблема не теряет своей актуальности и за рубежом. Так, согласно данным Электрического Научно-Исследовательского Института (EPRI) и Института Инженеров Электротехники и Электроники (IEEE), выходы из строя АД по причине вызванной повреждениями обмотки ротора составляют 8-9 % (табл. 1.1) от всех повреждений АД.

Таблица 1.1. Статистика повреждений АД иностранных специалистов, % [23]

Институт	Подшипники	Обмотка статора	Обмотка ротора	Другие
IEEE	42	28	8	22
EPRI	41	36	9	14

В работе [27] особое внимание уделено значительному влиянию повреждений в «беличьей клетке» ротора на статистику аварийной остановки АД. По их данным причиной выхода из строя АД с короткозамкнутым ротором в 7 % случаев является разрыв соединения между стержнем и короткозамыкающим кольцом обмотки ротора. Это соответствует информации, рассмотренной в работах выше. Анализ повреждаемости, приведенный в [16], показывает, что обрыв стержня обмотки ротора остается одной из важных причин аварийных остановок АД. Однако по остальным причинам отказов АД данные несколько разнятся.

В [15] приведен показатель, по которому автор оценивает количество отказов АД вспомогательного оборудования электростанций по причине

повреждения обмотки ротора. В табл. 1.2 приведены данные интенсивности отказов обмотки ротора АД электроприводов на тепловой электростанции.

Основными причинами повреждения короткозамкнутой обмотки ротора высоковольтного АД являются:

- разрыв соединения короткозамыкающего кольца и стержня;
- деформация стержня под действием центробежных сил;
- усталость (обрыв) вала [30, 32].

Таблица 1.2. Интенсивность отказов обмотки ротора АД [15]

Тип АД	Вид механизма	Интенсивность отказов (ед./год)
ДАЗО-15-49-8	Мельница	0,09
ДАМСО-157-8	Мельница	0,1
ДАЗО-15-49-8	Дробилка	0,6
АНЗ 4-65-45-10	Дробилка	0,583
АНЗ 2-17-57-12	Дробилка	0,333
ДАЗО-15-69-10	Дробилка	0,9

Проблема обрыва стержня ротора встречается чаще всего при эксплуатации двигателей, работающих в тяжелых условиях. Затрудненный пуск и пульсирующая нагрузка сильно влияют на количество отказов двигателей по причине повреждения обмотки ротора. Поскольку оборванный стержень перестает участвовать в работе АД, его нагрузку принимают на себя соседние проводники и соседние исправные стержни продолжают работать в более нагруженных режимах. Следовательно, возможность их обрыва также возрастает и чаще всего обрыв одного стержня влечет за собой обрыв других.

При работе АД с оборванным стержнем в обмотке ротора центробежные силы и вибрации, действующие на стержни, могут дополнительно привести к знакопеременной деформации и изгибанию стержня в сторону воздушного зазора. Это приведет к гораздо более тяжелым повреждениям, поскольку аварийная

остановка АД произойдет не только по причине отказа обмотки ротора, но и по причине повреждения обмотки статора отогнутым стержнем в лобовой части [21].

Основным фактором, в значительной степени влияющим на конструктивную прочность элементов обмотки ротора, является температура. При запуске высоковольтного асинхронного двигателя температура стержней может достигать порядка 300°C , а температура короткозамыкающих колец 200°C . Это неизбежно вызовет температурное расширение металла обмотки, которое в некоторых случаях может достигать 0,6 %. Например, если длина стержня «беличьей клетки» составляет 500 мм, то во время пуска стержень будет увеличиваться примерно на 3 мм. Очевидно, что стержни должны иметь возможность свободного хода в пазу ротора. Стержни, находясь в пазу, всегда оказываются в одной точке защемленными гораздо сильнее, чем по всей длине. Такое защемление наиболее вероятно в местах выхода из паза, поскольку стержень при пуске подвержен давлению со стороны расширяющегося и имеющего большой инерционный момент короткозамыкающего кольца (рис. 1.12).

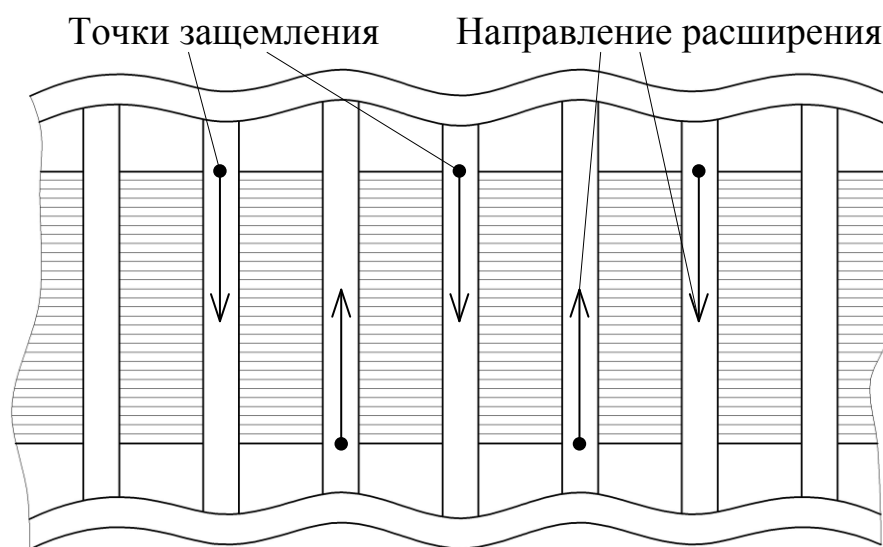


Рис. 1.12. Изображение принципа деформации роторной цепи под влиянием теплового расширения стержней

На рис. 1.12 схематически изображен самый неблагоприятный случай, когда один стержень зажат с одной стороны, а два соседних с противоположной, это приводит к двойному воздействию на короткозамыкающее кольцо.

Как было изложено выше, повышенная температура АД при пуске оказывает воздействие не только на стержни «беличьей клетки» но и на кольцевое соединение стержней, поскольку кольцо выполнено из того же металла, что и стержни. Процесс деформации в короткозамыкающем кольце имеет свою специфику вследствие расширения в сторону стержней, зафиксированных пазами магнитопровода.

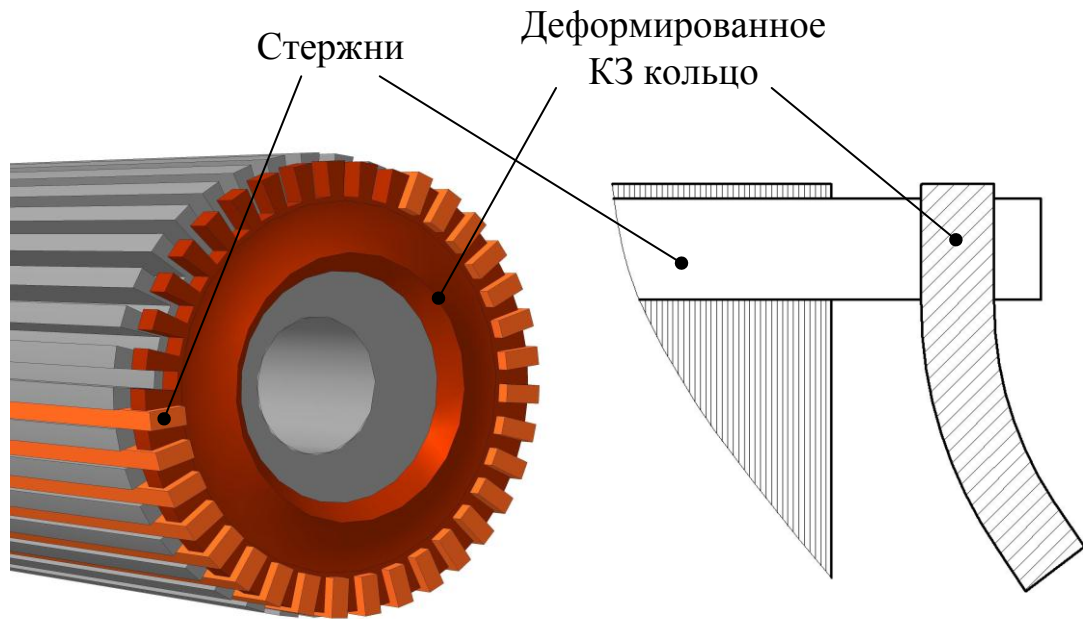


Рис. 1.13. Влияние теплового расширения на короткозамыкающее кольцо АД

Графически, данный процесс представлен в преувеличенном виде на рис. 1.13. Стремясь принять больший диаметр под влиянием высоких температур, короткозамыкающее кольцо вызывает изгиб свободновисящей части стержней на участке выхода из паза.

Во время пуска машины и в процессе эксплуатации конструкция «беличьей клетки» непрерывно испытывает механическое воздействие центробежных сил. Влияние этого фактора напрямую зависит не только от частоты вращения ротора и массы стержня, но и от длины той его части, которая находится вне паза. Этот вылет стержней в лобовой части магнитопровода необходим для увеличения омического сопротивления обмотки ротора. Вылеты стержней обмотки ротора необходимы для обеспечения им вентиляции и теплораспределения внутри

машины.

Поскольку в основном элементы короткозамкнутой обмотки роторов высоковольтных АД соединяются в основном методом пайки, то могут возникнуть технологические дефекты, связанные с надежным соединением короткозамыкающего кольца и стержней. Причинами таких неисправностей могут стать [28]:

- некачественное соединение кольца и стержня на этапе пайки;
- усталостные напряжения металла обмотки;
- отсутствие возможности продольного хода стержня в пазу для компенсации тепловых расширений;
- опасные напряжения в стержнях, вызванные центробежными нагрузками тяжелого короткозамыкающего кольца.

В зависимости от конструкции, обрыв одного стержня незначительно повлияет на работу АД. В таком состоянии двигатель может продолжать работу достаточно продолжительное время, и поскольку не представляется возможным выявление этой проблемы без применения специальных средств, на практике можно встретить значительное количество высоковольтных АД с поврежденным короткозамкнутым ротором.

Однако, исходя из [3, 16, 19], обрыв стержня оказывает значительное влияние на энергопотребление АД. Потери в фазах обмотки ротора определяются как:

$$P = r_2 I_2^2, \quad Q = x_2 I_2^2,$$

где r_2 и x_2 – активное и реактивное сопротивление фаз короткозамкнутой обмотки; I_2 – ток фазы ротора.

Таким образом, повышенное энергопотребление АД можно представить как сумму всех потерь обмотки ротора. Для одной фазы обмотки ротора записано в:

$$P = r_2 I_2^2 = r_C I_C^2 + 2r_k I_k^2, \quad Q = x_2 I_2^2 = x_C I_C^2 + 2x_k I_k^2,$$

где $r_c(r_k)$ и $x_c(x_k)$ – активные и реактивные сопротивления стержня и участка короткозамыкающего кольца; I_c и I_k – токи стержня и участка короткозамыкающего кольца.

Следовательно, потери ротора при обрыве стержня представлены в виде суммы потери всех фаз:

$$\sum_{i=1}^{Z_2} r_{2i} I_{2i}^2 = \sum_{i=1}^{Z_2} r_{ci} I_{ci}^2 + 2 \sum_{i=1}^{Z_2} r_{ki} I_{ki}^2, \quad \sum_{i=1}^{Z_2} x_{2i} I_{2i}^2 = \sum_{i=1}^{Z_2} x_{ci} I_{ci}^2 + 2 \sum_{i=1}^{Z_2} x_{ki} I_{ki}^2,$$

где Z_2 – число фаз обмотки ротора (количество стержней).

Чтобы выявить повышенное энергопотребление АД, необходимо сравнить его до обрыва стержня и после. Исходя из [17], такое сравнение выражено как отношение квадратов токов в стержнях ротора:

$$k_r = \frac{P}{P^*} \approx \frac{I_c^2}{I_c^{*2}}, \quad k_x = \frac{Q}{Q^*} \approx \frac{I_c^2}{I_c^{*2}},$$

где P и P^* , Q и Q^* – активная и реактивная мощность исправного ротора и после обрыва стержня.

В исследованиях [19] было проведено сравнение влияния обрыва стержней трех типов АД, исходя из которых сделан однозначный вывод о влиянии обрыва стержня ротора на энергетические показатели. Как показывают расчетные данные, приведенные в табл. 1.3, с увеличением числа оборванных стержней снижаются технические характеристики АД. При повреждении одного, двух и трех стержней потребляемый ток увеличивается на 1,995; 5,674 и 8,806 % соответственно. Таким же образом возрастают $\cos \phi$ на 0,483; 1,05, 1,413 % и потребление электроэнергии на 1,06; 2,19 и 3,75 %.

Таблица 1.3. Энергетические показатели АД при повреждении обмотки ротора

Степень повреждения	Ток фазы, А	$\cos \phi$	Мощность, кВт
Без повреждений	5,3577	0,8278	2,927
Один стержень	5,4646	0,8318	2,999
Два стержня	5,6617	0,8365	3,126

Три стержня	5,8295	0,8395	3,230
-------------	--------	--------	-------

Помимо снижения общих энергетических показателей машины, основной ущерб от эксплуатации АД с повреждением в «беличьей клетке» заключается в повышенном расходе электрической энергии. Применяя полученные результаты, возможно рассчитать дополнительные затраты на электроэнергию при эксплуатации такого АД:

$$ДЗ = (P^* - P)n_{\text{часов}}C_{\text{ээ}},$$

где $n_{\text{часов}}$ – наработка двигателя в часах (при непрерывной работе в год – 8760 часов); $C_{\text{ээ}}$ – стоимость электроэнергии.

Таблица 1.4. Дополнительные затраты поврежденного АД

Тип АД	Мощность, кВт	Дополнительные затраты на потребление электроэнергии при повреждении, руб.		
		одного стержня	двух стержней	трех стержней
АОЛ-11-4	0,6	49,18	92,9	192,6
АО-31-4	2,7	231,2	437,8	605
AZM 8000/6000	8000	122722	852733,4	1290032,6

1.4. Обзор существующих методов технической диагностики АД

Техническая диагностика электродвигателя определяется как непрерывная оценка работоспособности оборудования на протяжении всего срока службы. При этом важным фактором является наличие возможности обнаружения неисправностей на ранней стадии их развития. Для непрерывной оценки состояния асинхронного двигателя становится все более важным использовать комплексные системы мониторинга его технического состояния. Техническая диагностика может обеспечить своевременное предупреждение о неизбежном

сбое, а также позволяет эффективно планировать объемы ремонтных работ и технического обслуживания. Это повышает производительность механизмов и технических комплексов, поскольку непрерывная техническая диагностика позволяет своевременно прогнозировать отказ оборудования, оптимизировать процесс обслуживания и свести к минимуму время простоя.

Изучение взаимосвязи физических процессов, происходящих во время работы асинхронного двигателя в ненормальных (аварийных) режимах работы, и возможность диагностировать тип и степень развития повреждений в эксплуатационных режимах его работы являются сложной научной задачей. На сегодняшний день существуют методы мониторинга технического состояния АД по таким характеристикам, как: мониторинг вибрации, тепловой и химический мониторинг, мониторинг акустической эмиссии, но для всех этих методов контроля требуется установка дорогостоящих специализированных датчиков, применение уникальных средств и инструментов.

Отдельно следует отметить методы непрерывной технической диагностики, которые основаны на измерении основных электрических величин (тока и напряжения, потребляемых двигателем). Такие методы контроля являются наиболее выгодными по технологическим и экономическим соображениям, поскольку они не требуют установки дополнительных датчиков. Это связано с тем, что исходные данные легко измеряются путем подключения к существующим штатным трансформаторам напряжения и тока, которые всегда устанавливаются. Такая система технической диагностики не является навязчивой и может быть реализована даже удаленно, в центре управления двигателем.

1.4.1. Комплексные системы мониторинга

Комплексные системы мониторинга основаны на анализе физических величин, производимых машиной при помощи внешних измерительных приборов и устройств. К таким величинам относятся: температура, уровень шума и вибрации, крутящий момент и пр. С их помощью анализируется текущее

состояние двигателя, и на основе их изменения принимается решение о неисправности.

Тепловой мониторинг. Тепловой мониторинг электрических машин осуществляется путем измерения температуры машины в целом или температуры в конкретном месте двигателя (изоляция, подшипник и пр.). Термический мониторинг, как правило, используется в качестве косвенного метода обнаружения некоторых неисправностей статора (виткового замыкания) и износа подшипников. Следствием развития виткового замыкания может стать локальный нагрев той части статора, где оно произошло. При этом обнаружение неисправности очень медленное и происходит спустя некоторое время, которого достаточно для достижения разрушительной стадии (межвиткового замыкания и замыкания на корпус). Поэтому наибольшее распространение в системах комплексного теплового мониторинга получила модель с сосредоточенными параметрами.

Тепловая модель с сосредоточенными параметрами эквивалентна тепловой сети, состоящей из сопротивлений, емкостей и соответствующих потерь мощности. Точность модели обычно зависит от количества термически однородных тел, используемых в ней [33-36]. Параметры модели с сосредоточенными параметрами обычно определяются двумя способами. Во-первых, использование всесторонних знаний о двигателях, физических размерах и свойствах используемых материалов. Во-вторых, необходимо идентифицировать параметры от обширного измерения температуры в разных местах двигателя. Исходя из этого предположения, в [36] была описана упрощенная модель, определяющая параметры и коэффициенты тепловой модели, по которой оценивались тепловые характеристики асинхронного двигателя (1 кВт). Эта модель была получена путем анализа потерь мощности и теплопередачи внутри двигателя (с учетом двух частей – статора и ротора) и окружающей среды. Таким образом, выводятся два дифференциальных уравнения, которые в каждый момент времени отражают баланс между потерями мощности, теплом от повреждения и теплом накопленным в процессе эксплуатации.

Аналогичным образом в работе [37] была разработана термическая модель синхронной машины с постоянными магнитами. В данном случае разработка такой модели начинается с оценки зависящих от температуры параметров двигателя и от измерения линейных напряжений и токов. Затем параметры используются для получения оценок температуры двигателя. Электрически оцененные температуры объединяются с динамической тепловой моделью двигателя, чтобы получить оператора, которым является фильтр Калмана.

Мониторинг шума. Акустический шум от эксцентриситета воздушного зазора в асинхронных двигателях используется для обнаружения неисправностей. Мониторинг шума осуществляется путем измерения и анализа спектра акустического шума, однако применение шумовых измерений на установке нецелесообразно вследствие шумового фона от других машин, работающих поблизости. Этот шум снижает точность обнаружения неисправностей. В работе [38] с помощью этого метода на основе теста, проведенного в безэховой камере, был обнаружен эксцентриситет воздушного зазора. Ряд обнаруженных шумовых компонентов, которые значительно меняются с эксцентриситетом ротора, были аналитически идентифицированы из выражений для номеров мод и частот волн магнитной силы, принимая во внимание прорези статора и ротора. Представлен метод расчета вариации важных компонентов шума с эксцентриситетом. Слотовые (щелевые) гармоники в спектрах акустических шумов от асинхронного двигателя малой мощности были функциями статического эксцентриситета.

Мониторинг вибрации. Еще одним источником важной информации о текущем состоянии работающей электрической машины является вибрация. При работе все электрические машины генерируют вибрацию и шум, гармонический состав которых может отличаться у одной и той же машины при разных технических состояниях. Даже самая малая амплитуда вибрации корпусных частей электродвигателя может создавать высокий уровень шума. Данные источники информации в электрических машинах вызваны силами магнитного, механического и аэродинамического происхождения [39]. Их основными источниками выступают радиальные силы, возникающие в поле воздушного

зазора, а так как распределение плотности магнитного потока воздушного зазора создается результирующей МДС, то получаемая МДС также может содержать информацию о возможных нарушениях работы ротора или статора. Таким образом, анализируя вибрационный сигнал электрической машины, можно обнаружить различные типы неисправностей и асимметрий [40].

Неисправности подшипника, эксцентриситеты ротора, неисправности ведомых механизмов и электрически несимметричные обмотки ротора являются лучшими кандидатами для диагностики на основе вибрации. Вибрационный контроль электрических машин осуществляется с помощью широкополосного, узкополосного или спектрального (сигнатурного) анализа измеренной энергии вибрации машины. Вибрационная диагностика – лучший метод диагностики неисправностей, но для этого нужны дорогие акселерометры и соответствующий набор дополнительных элементов (датчики, анализаторы, линии). Это в некоторых случаях ограничивает его использование, особенно в небольших машинах, где стоимость играет важную роль при выборе метода мониторинга и целесообразности его применения в целом.

Так, в [41] был осуществлен контроль вибрации для диагностики повреждений подшипников качения. Окончательные диагнозы сделаны с использованием нейронной сети. Исследование проводилось с использованием имитационных вибраций и реальных измерений. В обоих случаях результаты показывают, что нейронная сеть может быть эффективным инструментом в диагностике различных повреждений подшипников двигателя посредством измерения и интерпретации сигналов вибрации подшипника. В этом исследовании характеристики вибрации получены из частотной области с использованием техники быстрого Фурье-преобразования. Построены пять сигнатур вибрации. Они создаются из спектра мощности вибрационного сигнала и состоят из соответствующих базовых частот с изменяющимися амплитудами на основе присутствующего дефекта. Также учитываются данные временной области, такие как максимальное и среднее значение амплитудно-колебательной формы волны и коэффициент эксцесса формы колебаний. Таким образом, полная

нейронная сеть имеет шесть входных измерений. Исследования показали, как нейронная сеть может эффективно использоваться при диагностике различных повреждений подшипников двигателя посредством соответствующего измерения и интерпретации сигналов вибрации двигателя.

В [42] был предложен подход, который дает лучшие результаты. В этом исследовании нейронной сети помогает генетический алгоритм и статистические оценки вибрационного сигнала, которые рассматриваются как входные характеристики. В исследовании использован генетический алгоритм для выбора наиболее значимых входных признаков в контексте мониторинга состояния машины. При этом выбирается подмножество из шести входных функций из большого набора возможных функций, что дает очень высокую точность классификации – 99,8 %.

Основным недостатком вибрационного мониторинга является стоимость. Например, обычный датчик вибрации стоит несколько сотен долларов. Высокая стоимость системы мониторинга может быть вызвана только за счет использования необходимых датчиков вибрации. Другим недостатком вибрационного мониторинга является то, что он требует доступа к машине и для точных измерений датчики должны быть плотно установлены на электрических машинах, что требует особого подхода к монтажу [43-45]. Кроме того, сами датчики могут выйти из строя.

1.4.2. Методы непрерывной технической диагностики, основанные на анализе потребляемых токов

Вектор Парка, ток нулевой и обратной последовательности и анализ сигнатур тока (MCSA) наиболее часто используются в качестве источников диагностической информации в электрическом мониторинге. Рассматриваемые методы используют информацию, получаемую от датчиков потребляемого тока для обнаружения разного рода дефектов в электродвигателях и описаны ГОСТом ISO 20958—2015 [64].

В большинстве случаев ток статора асинхронного двигателя легкодоступен, поскольку он является одним из основных источников информации для релейной защиты электрических машин от разрушительных перегрузок, токов короткого замыкания на «землю» и т.д. Поэтому мониторинг потребляемого тока – это метод обнаружения на базе штатных датчиков, который может быть реализован без какого-либо дополнительного аппаратного обеспечения.

Анализ сигнатуры тока (MCSA). Motor current signature analysis – обобщенное название комплекса сигналов, получаемых при анализе и последующем преобразовании потребляемых электрической машиной токов. В большинстве случаев для этого применяют преобразование Фурье. Анализ Фурье раскладывает сигнал на синусоиды разных частот, из которых он состоит. Представление сигнала при этом изменяется с временной базы на частотную. Преобразование Фурье непрерывного сигнала $x(t)$ определяется как

$$X^{FT}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt .$$

Это преобразование дает глобальное частотное распределение исходного сигнала $x(t)$ во временной области. Большинство экспериментально полученных сигналов не являются непрерывными во времени, но преобразуются в виде дискретных временных интервалов ΔT . Кроме того, они имеют конечную длину и время измерения T , разделенное на $N = T/\Delta T$ интервалов, и могут анализироваться в частотной области с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Из-за выборки сигнала частотный спектр становится периодическим, поэтому частоты, которые могут быть проанализированы, являются конечными. ДПФ оценивается по дискретной частоте $f_n = n/T$, $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Расчет ДПФ может стать очень трудоемким и ресурсозатратным процессом для сложных сигналов (больших N).

$$X^{DFT}(f_n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{-j2\pi f_n k}$$

Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) не принимает произвольного числа интервалов N , поскольку он работает только с интервалами

$N = 2^m$, $m \in N$. Уменьшение числа интервалов делает БПФ наиболее эффективным.

БПФ широко использовался для диагностики электрических машин и показал свою эффективность при определении разного рода неисправностей. С помощью данного вида диагностики возможно обнаружение таких дефектов, как неисправность подшипников, эксцентриситет ротора, обрыв стержня, межвитковое замыкание и пр. При этом каждому виду неисправности присваивается своя, характерная ей сигнатура (от англ. *signature* – *подпись*). На деле, это название дается определенному набору частот и гармоник, возникающих при той или иной неисправности. В большинстве случаев для использования данного метода необходимо «обучить» систему на двигателе, не имеющем каких-либо неисправностей.

В [46, 47] рассмотрено применение анализа сигнатуры тока двигателя для обнаружения повреждения подшипника качения в асинхронных двигателях. В этих исследованиях определяется эффективность мониторинга тока для обнаружения неисправностей путем корреляции соотношения между вибрационными и токовыми частотами, вызываемыми начальными отказами подшипников. Экспериментально рассмотрены режимы отказа подшипников и определены характерные частоты, связанные с их физической конструкцией. Описано влияние на спектр тока статора и определены соответствующие частоты. Экспериментальные результаты показывают, что колебательные и токовые спектры асинхронной машины с различными неисправностями подшипников можно использовать для проверки связи между колебательной и текущей частотами.

Фильтр избирательной частоты изучает характерные частоты электрической машины при работе во всех нормальных режимах. Сгенерированная таблица частот сводится к управляемому числу с использованием набора экспертных системных правил, основанных на известной физической конструкции машины. Этот список частот формирует входы алгоритма кластеризации нейронной сети, которые сравниваются с эксплуатационными характеристиками, полученными из

начальных характеристик двигателя. Это требует только того, чтобы машина находилась в «хорошем» рабочем состоянии при обучении системы. Поскольку дефект продолжает деградировать текущую сигнатуру (подпись) по мере его прогрессирования с течением времени, система ищет эти изменения в исходных изученных спектрах, которые указывают на состояние неисправности и аварийные сигналы, когда они отклоняются на достаточную величину. Комбинация частотного фильтра с нормированной системой (экспертной системой) и нейронной сетью максимизирует способность системы обнаруживать небольшие спектральные изменения, вызванные начальными условиями сбоя. Надвигающийся отказ двигателя моделировали путем введения вращающегося механического эксцентриситета в испытательную машину. После обучения нейронной сети система смогла легко обнаружить текущие спектральные изменения, вызванные условием отказа.

Однако некоторые исследования выявили ряд недостатков метода MCSA. Так, в [48, 49] исследовали влияние изменяющегося по положению крутящего момента нагрузки на диагностирование эксцентриситета воздушного зазора. Было обнаружено, что колебания крутящего момента вызывают те же самые гармоники, что и эксцентриситет. Эти гармоники всегда намного больше гармоник, связанных с эксцентриситетом. Поэтому сделано заключение, что невозможно разделить крутящие колебания и эксцентриситет, если не известно угловое положение места эксцентриситета относительно характеристики крутящего момента нагрузки.

Анализ влияния изменяющихся по положению нагрузок на спектр текущей гармоники был рассмотрен в [50]. Было также доказано, что гармоники, связанные с крутящим моментом нагрузки, совпадают с гармониками, вызванными сбоем ротора, когда нагрузка изменяется синхронно с положением ротора. Кроме того, поскольку влияние нагрузки и ошибки на единую гармоническую составляющую тока статора пространственно зависима, то часть, вызванная сбоем, не может быть отделена от части нагрузки. Поэтому любая схема обнаружения в реальном времени, которая измеряет спектр одной фазы

тока статора, должна опираться на мониторинг тех спектральных компонентов, на которые не влияют колебания крутящего момента нагрузки.

Тем не менее, дальнейшие разработки позволили использовать данный метод с учетом влияния крутящего момента нагрузки на спектр электрической машины. В [51] было замечено, что ранее представленные схемы мониторинга текущего состояния игнорируют эффект нагрузки или предполагают, что он известен. Поэтому схема определения состояния машины при наличии изменяющегося крутящего момента нагрузки требует некоторого способа разделения данных эффектов. Это достигается путем сравнения фактического тока статора с опорным значением модели, которое включает в себя элемент нагрузки. Разница между двумя сигналами обеспечивает отфильтрованную величину, не зависящую от нагрузочных вариаций, которая позволяет проводить непрерывный мониторинг состояния в непрерывном режиме, не беспокоясь о состоянии нагрузки. Результаты моделирования показали эффективность такой схемы эталонной оценки модели при снятии эффектов крутящего момента нагрузки из контролируемых спектров. Экспериментальные результаты иллюстрируют осуществимость предлагаемой системы. Они продемонстрировали, что характерные спектральные компоненты присутствуют в разностном токе и что эффекты нагрузки могут быть эффективно удалены из контролируемого спектра для улучшения их выявляемости.

Вейвлет-преобразование. «Вейвлет» (от англ. *wavelet* – короткая волна, рябь). Семейство локальных по времени и частоте математических функций, имеющих определенную форму, которые получаются из одной базовой посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени. Соответственно и рассматривают анализируемые функции в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте [52]. Применяя вейвлеты в исследовании, можно обрабатывать и анализировать нестационарные неоднородные сигналы, несущие сведения об определенных локальных координатах, на которых выражаются те или иные группы частотных составляющих. Такой метод разложения дает возможность анализировать сигналы сразу в двух пространствах, поскольку

частота и координата рассматриваются как независимые переменные. Следовательно, в отличие от Фурье-преобразования он обеспечивает двумерную развертку с гораздо более высокой точностью. Локальные особенности сигнала представляются как

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$$

Существует два вида вейвлет-преобразований: непрерывное (CWT – *Continuous Wavelet Transform*) и дискретное (DWT – *Discrete Wavelet Transform*).

Метод обнаружения на вейвлетах показывает хорошую чувствительность, короткое время обнаружения и может быть легко применен для обнаружения неисправностей электрических машин. Из вышесказанного видно, что все сигналы могут быть восстановлены из наборов локальных сигналов разного масштаба и амплитуды, но постоянной формы. В работе [53], таким образом, проанализировали ток статора посредством вейвлет-преобразования для обнаружения дефектов подшипника. Предлагаемый метод имеет ряд преимуществ по сравнению с инструментами анализа Фурье, используемыми при MCSA. Из-за нестационарного характера тока статора вейвлет-преобразование обеспечивает лучший анализ при различных условиях нагрузки. Пакетное преобразование вейвлета позволяет регулировать полосы частот в том диапазоне, который был вызван дефектами подшипника, возникающими в результате изменений частоты вращения ротора.

В [54, 55] применили Вейвлет-преобразование для диагностики неисправностей асинхронного двигателя с фазным ротором. Двигатель был протестирован, когда он считался исправным, и затем с искусственно созданным повреждением ротора. Разностный сигнал на 11-м уровне одномерного дискретного разложения вейвлет-анализа использовался для обнаружения неисправности ротора двигателя. Для сравнения с исправным двигателем использовалось среднеквадратичное значение 11-го вейвлет-коэффициента – d_{11} и ток линии. Наконец, было сделано заключение, что вейвлет-анализ может быть успешно использован для обнаружения повреждений фазного ротора.

В работе [56] был предложен метод диагностики обрывов роторных стержней в асинхронных двигателях на основе анализа тока статора во время запуска с использованием дискретного вейвлет-преобразования. В случае разрыва стержня компоненты более высокого уровня ДПФ тока статора следуют характеристическому шаблону, который подробно описан и физически оценен. Несколько экспериментов проводятся в различных для двигателя условиях (без повреждения и с разным уровнем повреждения) и при разных нагрузках (без нагрузки, при полной нагрузке, пульсирующей нагрузке). В каждом случае результаты сравнивались с результатами, полученными с использованием классического подхода, на основе анализа установившегося тока с использованием преобразования Фурье. Испытания показали, что если переходный момент запуска не очень короткий, надежность предлагаемого метода диагностики разрыва стержня аналогична надежности классического подхода, основанного на преобразовании Фурье. Этот метод позволяет правильно диагностировать двигатель в тех случаях, когда анализ Фурье приводит к ошибочному результату.

Вектор Парка. Еще одним важным методом непрерывного мониторинга является вектор Парка. Этот метод применим к асинхронным двигателям подключенным к сети по схеме «звезда», поскольку в них ток статора не имеет нулевой последовательности. Двухмерным представлением трехфазных токов, называемым вектором Парка, является круговой рисунок, и в идеальных условиях, когда все токи сбалансированы и нет отклонений от нормального режима, эта окружность имеет центр в начале координат и «правильную» форму. Контролируя отклонение данной окружности, диагностируется целый ряд различных повреждений электрических машин.

Исследование, проведенное в [57], показывает, что метод, основанный на векторе Парка, может быть использован для обнаружения дефектов ротора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Испытания проводились на двигателе с двумя одинаковыми роторами, без повреждений и с поврежденными стержнями ротора. Линейные токи двигателя

визуализировали на осциллографе, используя специальную электронную схему, которая смогла синтезировать две ортогональные составляющие тока, напряжения и магнитного потока. Кроме того, линейные токи были получены с помощью платы DAQ на ПК, с использованием виртуальных приборов, созданных в среде LabVIEW. Было построено несколько характеристик изучаемого двигателя. Из-за сломанных стержней ротора наблюдалось значительное колебание крутящего момента машины, а амплитуда тока линии в конце начального периода была довольно высокой. Форма фазового тока неисправного двигателя не была идеально круглой формы, что явилось четким признаком неисправности в индукционной машине с короткозамкнутым ротором.

Как и в большинстве методов, у вектора Парка существуют свои расширения. Так, в [58] исследовали применение анализа сигнатуры тока асинхронного двигателя (MCSA) с использованием преобразования Парка для обнаружения повреждений подшипника качения в трехфазном асинхронном двигателе. В этом исследовании также приведен краткий обзор алгоритма нейронных сетей радиальной базисной функции, достигнутой с помощью языка программирования MATLAB. Сбор данных и алгоритм преобразования Парка проводились при помощи пакета LabVIEW.

Выводы по 1 главе

1. Обрыв стержня короткозамкнутой обмотки ротора является характерным повреждением для высоковольтных АД, у которых элементы конструкции обмотки ротора скрепляются друг с другом посредством пайки. Согласно статистическим данным, на повреждения короткозамкнутой обмотки ротора приходится до 9 % от всех фиксируемых отказов высоковольтных АД.

2. Анализ существующих методов диагностики повреждений короткозамкнутой обмотки ротора АД показал, что в подавляющем большинстве они не представляют практической значимости, поскольку обладают низкой

чувствительностью и не обеспечивают требуемую селективность к диагностированию обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора.

3. Наиболее перспективными методами выявления обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора АД являются методы, основанные на анализе потребляемых токов.

2. МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В ДИАГНОСТИКЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Согласно [59], развитие технической диагностики электроэнергетического оборудования неизбежно связано с применением новых современных методов непрерывного математического анализа, методов искусственного интеллекта на новой вычислительной базе. В ряде работ [61-63] описаны методики получения и цифровой обработки диагностической информации, получаемой с электрических датчиков. В большинстве случаев носителями информации о состоянии диагностируемого объекта выступают сигналы токов и напряжений.

Одним из главных способов диагностирования различных неисправностей в АД является спектральный анализ токов статора, основанный на спектральном анализе тока отдельной фазы статора, регламентированный международным стандартом ГОСТ ISO 20958–2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя» [64].

Однако, помимо классических методов преобразований цифровых сигналов (БПФ, вейвлет и прочие), существует ряд способов идентификации, основанных на математических методах систематизации (методы математической статистики) [65].

Так, например, в работе [66] для решения обратных задач в диагностике была использована аппроксимация степенной полиномиальной функцией и функцией арктангенса кривых намагничивания магнитоэлектрических устройств.

В работе [67] предложен метод диагностики неисправностей трансформатора. При этом авторами статьи предлагается улучшенный метод математической статистики, основанный на аппроксимации и функциях доверия, что дало возможность выявить ряд неисправностей трансформаторов. Кроме того авторами предложено применение статистических подходов для анализа частотных характеристик вращающихся машин переменного тока. В развитии теории применения статистических методов обработки массивов мгновенных значений также заняты и российские исследователи [68].

Следует отметить, что одним из основных методов планирования эксперимента, при обработке данных является аппроксимация. Аппроксимация в планировании эксперимента – это ряд методов получения математической функции, описывающей исходные данные с приемлемой для исследователя точностью. При этом, на основе полученной математической функции можно предсказать промежуточные значения, и регулировать степень точности описания приближая к исходным данным.

Одними из главных способов математического описания исходных данных при аппроксимации являются: интерполяция и регрессионный анализ. Интерполяция – способ подбора различными методами математической функции, описываемой исходные данные, при котором получаемая модель проходит строго через значения амплитуды исходных данных (откликов). Регрессионный анализ – метод нахождения математической функции, описывающей исходные данные приближенно, в отличие от интерполяции, получаемая функция не нулевую ошибку в базовых точках, то есть строго не пересекает их.

На рис. 2.1 проиллюстрирован пример использования итерационного метода (зеленая кривая) и регрессионного метода (синяя кривая) при синтезе функции по экспериментальным данным. Как видно из рис. 2.1, применение методов интерполяции, требуют гарантии адекватности полученных данных, поскольку получаемая модель должна проходить через все известные точки. Методы интерполяции применимы к данным, полученным от источников, имеющих высокий класс точности измерительной системы и без стационарных

помех, либо когда речь идет о точных величинах (дата, время, цена и пр.). Тогда как методы регрессионного анализа дают возможность описывать модель массива мгновенных значений максимально приближенно.

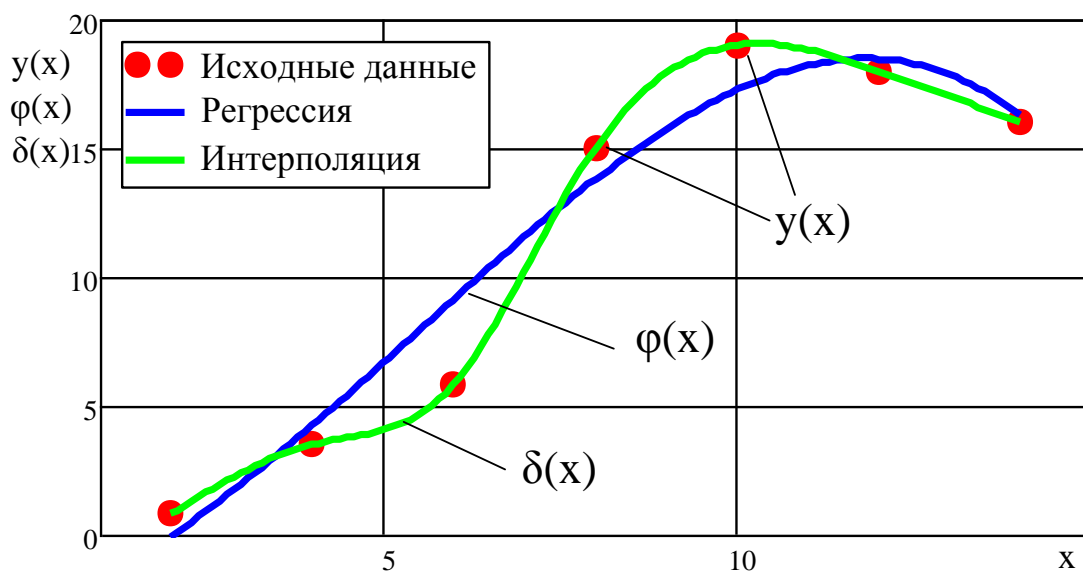


Рис. 2.1. Кривые функций исходных данных $y(x)$, полученных по ним математических моделей $\varphi(x)$ – регрессионным анализом и $\delta(x)$ – интерполяцией

В данном диссертационном исследовании рассматриваются массивы мгновенных значений от АЦП и датчиков токов фаз статора АД. Поскольку получаемые данные содержат в себе погрешности стационарных шумов, погрешности аналого-цифрового преобразования и другие неучтенные погрешности, то для исследования наиболее целесообразным представляется использование методов регрессионного анализа.

2.1. Регрессионный анализ

Регрессионный анализ – это метод изучения статистической взаимосвязи между одной зависимой количественной переменной от одной или нескольких независимых количественных переменных. То есть процесс регрессионного анализа направлен на поиск такой функции, которая описывала бы мгновенные

значения сигнала исходя из различных условий [70]. В общем случае регрессионная модель имеет вид:

$$\hat{y} = A_0 + A_1 \cdot \beta_1 + \dots + A_k \cdot \beta_k,$$

где A_0 – постоянная составляющая; $A_1 \dots A_k$ – весовые коэффициенты при базисных функциях; β – базисные функции.

Как видно, главными элементами регрессионной модели выступают весовые коэффициенты, определяющие влияние той или иной функции в описываемой модели, а также базисные функции, на которых основывается построение модели. Существуют различные методы получения весовых коэффициентов в зависимости от решаемой задачи. По мнению автора, наиболее приемлемым, в рамках данной работы, является метод наименьших квадратов (МНК).

С помощью МНК определяются коэффициенты при базисных функциях по условию минимума расстояния от описываемой математической модели до исходных данных по вертикали. На рис. 2.2 графически представлены значения величин исходных данных и полученная по ним математическая модель.

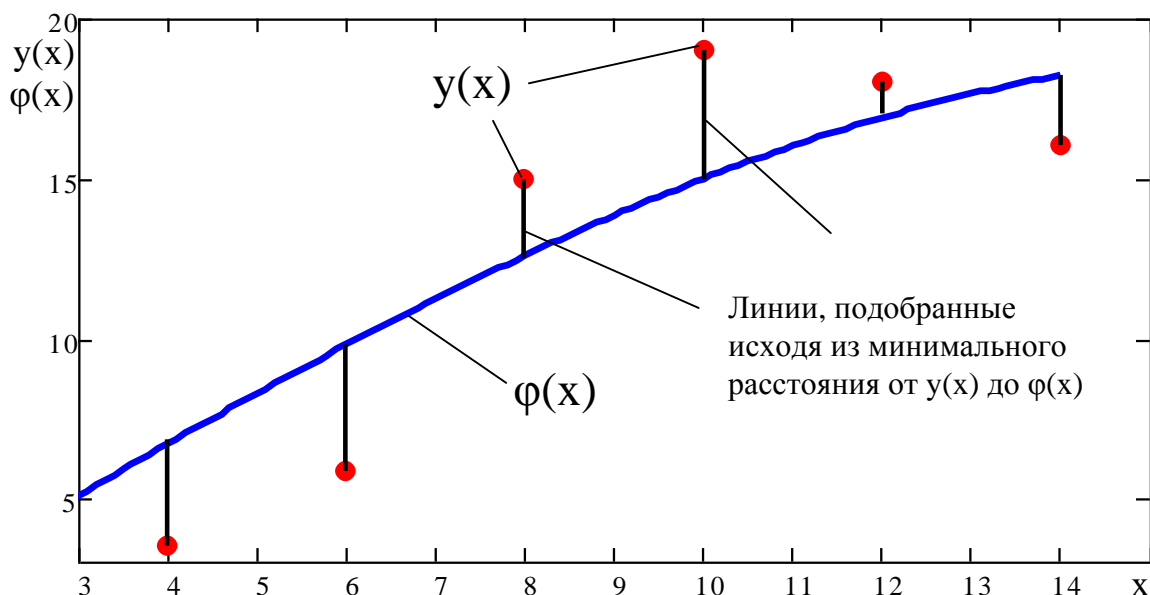


Рис. 2.2. Значения исходных величин $y(x)$, полученная модель $\varphi(x)$ исходя из минимума расстояний от $y(x)$ до $\varphi(x)$ по вертикальной оси

Сумма квадратов отклонений при этом представляется в виде:

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - A_0 + A_1 \cdot \beta_1 + \dots + A_k \cdot \beta_k)^2. \quad (2.1)$$

Вычисление значения A должны, после их подстановки к базисным функциям, давать наименьшее значение S . Для достижения требуемого результата необходимо дифференцировать (2.1) поочередно по всем базисным функциям β :

$$\frac{\partial S}{\partial A_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - A_0 - A_1 \cdot \beta_1 + \dots + A_k \cdot \beta_k),$$

$$\frac{\partial S}{\partial A_1} = -2 \sum_{i=1}^n A_1 (y_i - A_0 - A_1 \cdot \beta_1 + \dots + A_k \cdot \beta_k),$$

$$\frac{\partial S}{\partial A_k} = -2 \sum_{i=1}^n A_k (y_i - A_0 - A_1 \cdot \beta_1 + \dots + A_k \cdot \beta_k).$$

Решая систему нормальных дифференциальных уравнений относительно A , получаем:

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2},$$

$$A_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}.$$

Очевидно, что данный алгоритм предполагает выполнение математических операций при любом количестве членов ряда, следовательно, появляется возможность перейти к матричной форме записи уравнений. При проведении ряда экспериментов (N опытов) было получено определенное количество параметров, например в u -м опыте x_{0u} , x_{1u} , x_{2u} , ..., x_{mu} и аналогично соответствующие им значения y . В матричном виде параметры представляются матрицей \mathbf{X} , все результаты – матрицей \mathbf{Y} , а искомые коэффициенты – матрицей \mathbf{B} :

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{i1} & \dots & x_{m1} \\ x_{02} & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{i2} & \dots & x_{m1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0u} & x_{1u} & x_{2u} & \dots & x_{iu} & \dots & x_{mu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0N} & x_{1N} & x_{2N} & \dots & x_{iN} & \dots & x_{mN} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_1 \\ \dots \\ y_u \\ \dots \\ y_N \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_i \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}.$$

Прямоугольная матрица \mathbf{X} содержит $1+m$ столбцов и N строк, матрица-столбец \mathbf{Y} содержит N элементов, а матрица-столбец \mathbf{B} , в свою очередь – $1+m$. Таким образом, полученные матрицы используют для записи системы нормальных уравнений в матричной форме [71]:

$$\mathbf{X}_t \mathbf{X} \mathbf{B} = \mathbf{X}_t \mathbf{Y},$$

где \mathbf{X}_t – транспонированная матрица \mathbf{X} , в которой все строки заменены столбцами:

$$\mathbf{X}_t = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0u} & \dots & x_{0N} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1u} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2u} & \dots & x_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{iu} & \dots & x_{iN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mu} & \dots & x_{mN} \end{pmatrix}.$$

Далее, решив систему уравнений в матричной форме записи:

$$\begin{aligned}
\mathbf{C} = \mathbf{X} \times \mathbf{X}_t &= \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{i1} & \dots & x_{m1} \\ x_{02} & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{i2} & \dots & x_{m1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0u} & x_{1u} & x_{2u} & \dots & x_{iu} & \dots & x_{mu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0N} & x_{1N} & x_{2N} & \dots & x_{iN} & \dots & x_{mN} \end{pmatrix} \times \\
&\times \begin{pmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0u} & \dots & x_{0N} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1u} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2u} & \dots & x_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{iu} & \dots & x_{iN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mu} & \dots & x_{mN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & \sum_{u=1}^N x_u \\ \sum_{u=1}^N x_u & \sum_{u=1}^N x_u^2 \end{pmatrix}; \\
\mathbf{C} \times \mathbf{B} &= \begin{pmatrix} N & \sum_{u=1}^N x_u \\ \sum_{u=1}^N x_u & \sum_{u=1}^N x_u^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_i \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N \cdot b_0 + b_1 + \dots + b_m & \sum_{u=1}^N x_u \\ \sum_{u=1}^N x_u + b_m & \sum_{u=1}^N x_u^2 \end{pmatrix}; \\
\mathbf{X}_t \times \mathbf{Y} &= \begin{pmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0u} & \dots & x_{0N} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1u} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2u} & \dots & x_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{iu} & \dots & x_{iN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mu} & \dots & x_{mN} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_1 \\ y_1 \\ \dots \\ y_u \\ \dots \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{u=1}^N y_u \\ \sum_{u=1}^N x_u \cdot y_u \end{pmatrix};
\end{aligned}$$

получим, в соответствии с $\mathbf{CB} = \mathbf{X}_t \mathbf{Y}$:

$$\begin{pmatrix} N \cdot b_0 + b_1 + \dots + b_m & \sum_{u=1}^N x_u \\ \sum_{u=1}^N x_u + b_m & \sum_{u=1}^N x_u^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{u=1}^N y_u \\ \sum_{u=1}^N x_u \cdot y_u \end{pmatrix}.$$

Окончательно, чтобы получить матрицу \mathbf{B} , необходимо обе части уравнения $\mathbf{CB} = \mathbf{X}_t \mathbf{Y}$ умножить на матрицу, обратную матрице \mathbf{C}^{-1} [71]:

$$\mathbf{B} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{X}_t \mathbf{Y}.$$

2.1.1. Выбор базисных функций

Одним из главных вопросов при аппроксимации экспериментальных данных методом регрессионного анализа является вопрос выбора базисных функций. От правильного выбора базисной функции зависит адекватность получаемой модели исходной кривой и, соответственно, правильность его описания. Так, например, при аппроксимации исходной кривой, имеющей явный периодический характер негармоническими функциями, получаемая модель описывает исходную кривую иначе, чем гармоническая функция (рис.2.5). Из рис. 2.5 видно, что улучшение регрессионной модели, основанной на негармоническом базисе, путем увеличения базисного функционала не приведет к улучшению модели и не приблизит модель к исходным данным так, как это сделает модель с гармоническим базисом.

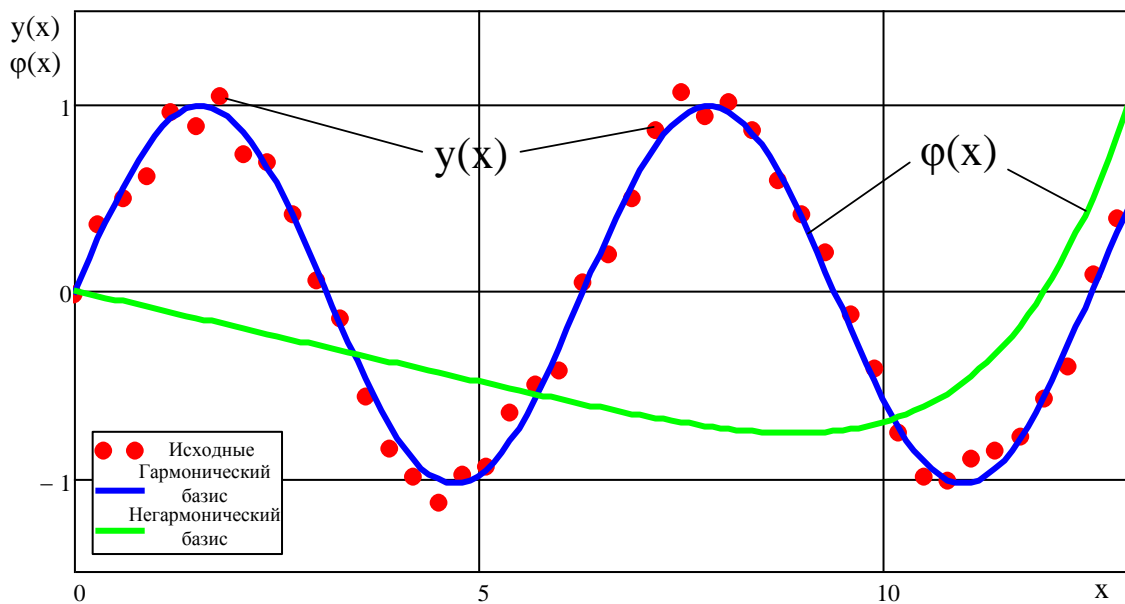


Рис. 2.5. Модель кривой экспериментальных данных периодического характера $y(x)$ и регрессионная модель $\varphi(x)$, основанная на гармоническом и негармоническом базисе

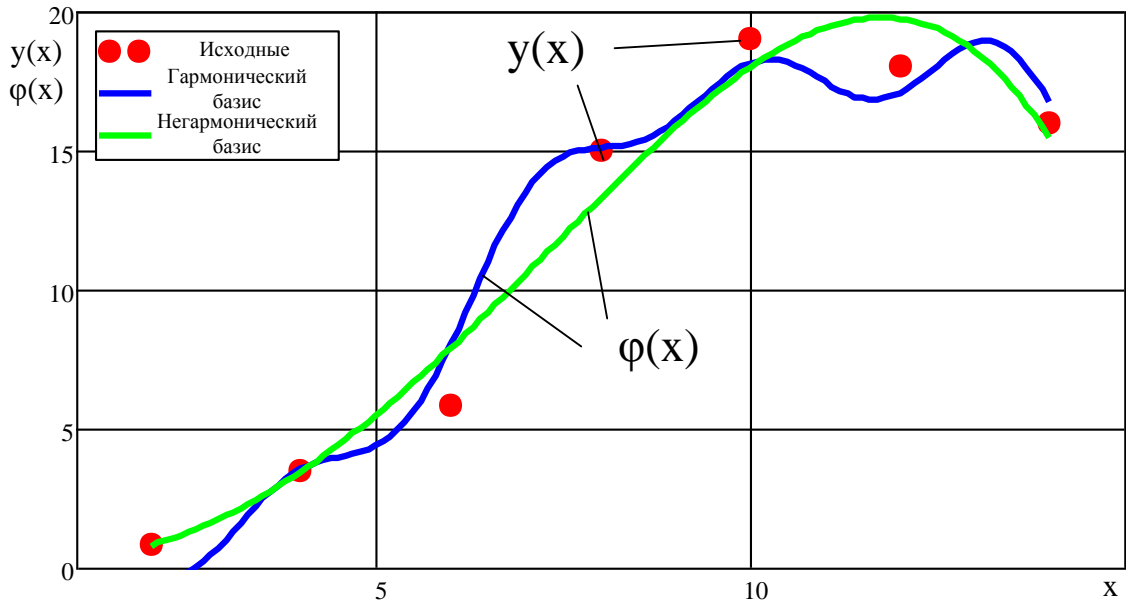


Рис. 2.6. Модель кривой экспериментальных данных неперiodического характера $y(x)$ и регрессионная модель $\varphi(x)$, основанная на гармоническом и негармоническом базисе

И наоборот, аппроксимирование регрессионным анализом с гармоническим базисом кривой с явно выраженным негармоническим характером (рис. 2.6) приведет к неоднозначным результатам, и расширение базисного функционала в сторону увеличения частотных составляющих только добавит колебаний в модель сигнала.

2.1.2. Точность оценки регрессионной модели

Для проверки адекватности получаемых результатов необходимо изучить вопрос о том, какая точность может быть у получаемых математической моделью исходных данных. Согласно [71], для этого следует рассмотреть следующее тождество:

$$y_i - \hat{y}_i = y_i - \bar{y} - (\hat{y} - \bar{y}), \quad (2.2)$$

где y_i – значение измеренной исходной величины в i -м отклике; \hat{y}_i – значение аппроксимирующей регрессионным анализом кривой в i -м отклике; \bar{y} – общее среднее значение всех откликов.

Геометрически, данное тождество представлено на рис. 2.7. Из него видно, что остаток $E_i = y_i - \hat{y}_i$ представляет собой разность между значениями измеренной и смоделированной величины. Средним арифметическим оцененных значений \hat{y}_i является:

$$\begin{aligned} \frac{\sum \hat{y}_i}{n} &= \frac{\sum b_0 + b_1 + \dots + b_m \cdot x_i}{n} = \\ &= \frac{\sum n \cdot b_0 + b_1 + \dots + b_m \cdot \bar{x}}{n} = b_0 + b_1 + \dots + b_m \cdot \bar{x} = \bar{y}. \end{aligned}$$

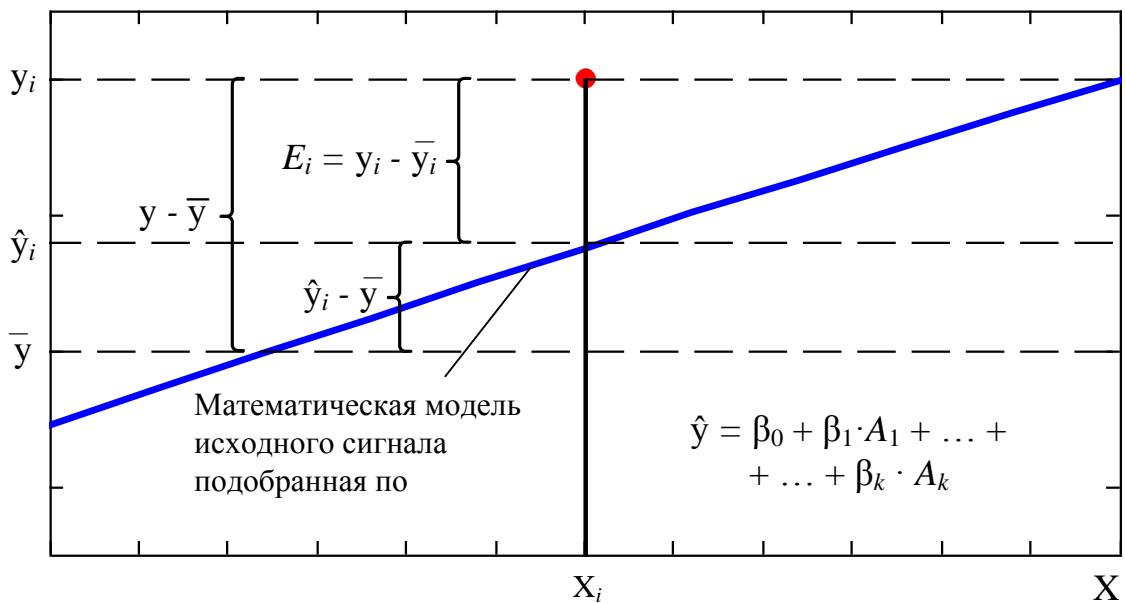


Рис. 2.7. Геометрический смысл тождества (2.2)

Одним из важных способов оценки регрессионной модели выступают предположения о распределении вероятностей. При рассмотрении моделей типа $\hat{y} = A_0 + A_1 \cdot \beta_1 + \dots + A_k \cdot \beta_k$ к ним применяют следующие основные предположения:

– регрессионный остаток ε_i является случайной величиной со средним равным нулю и дисперсией σ^2 . То есть $E(\varepsilon_i) = 0$, $V(\varepsilon_i) = \sigma^2$;

– остатки ε_i и ε_j при $i \neq j$ некоррелированы, то есть $\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$.
Следовательно, $E(y_i) = A_0 + A_1 \cdot \beta_1 + \dots + A_k \cdot \beta_k$, а $V(y_i) = \sigma^2$;

– регрессионный остаток ε_i является нормально распределенной случайной величиной со средним 0 и дисперсией σ^2 по первому положению $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$.

Таким образом, при обработке экспериментальных данных регрессионным анализом предполагается, что каждое наблюдение отклика имеет нормальное распределение относительно вертикали со средним, полученным от модели.

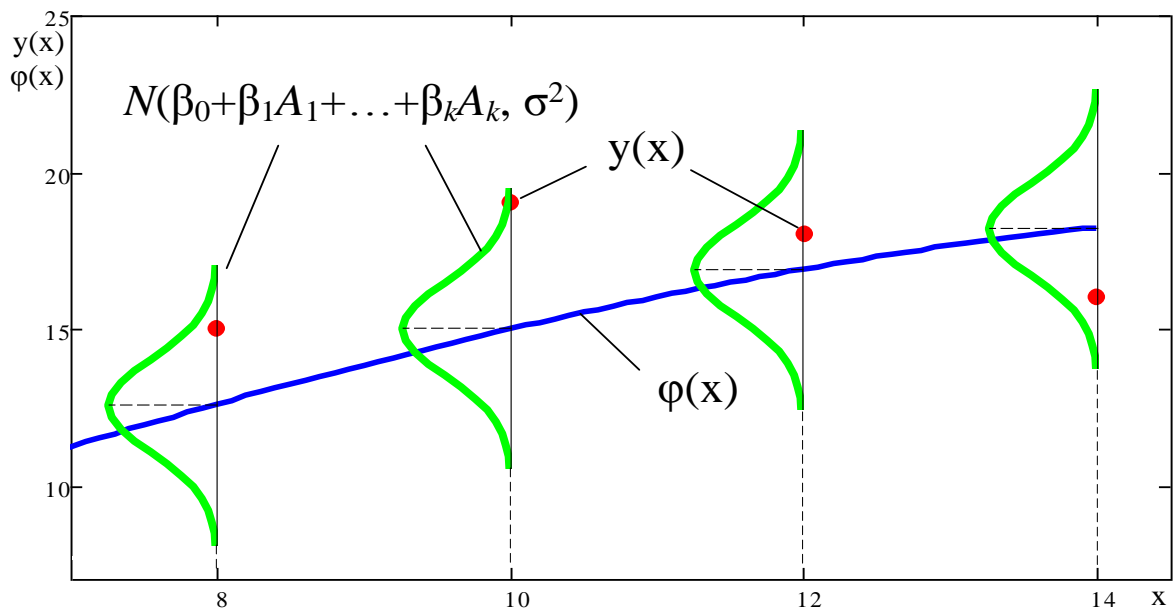


Рис. 2.8. Нормальное распределение каждого отклика относительно вертикали

Дисперсии всех нормально распределенных величин предполагаются одинаковыми и равными σ^2 (рис. 2.8).

2.1.3. Проверка аппроксимационной модели оценкой гомоскедантности регрессионных остатков

В процессе аппроксимации исходных данных методом регрессионного анализа неизбежно возникновение регрессионных остатков (невязки, ошибки). Остатки представляют собой разницу между исходными значениями $y(x)$ и значениями, полученными в результате моделирования $\varphi(x)$. Существуют разные

способы оценки результата аппроксимации исходя из данного свойства регрессионного анализа.

В случае проведения процедуры оценки аппроксимационной модели необходимо провести анализ регрессионных остатков [72, 73]. Данный анализ позволяет получить информацию об адекватности построения регрессионной модели, корректности выбора базисного функционала и метода получения весовых коэффициентов. Для проверки временного ряда регрессионных остатков проводят его оценку на гомоскедантность – постоянство дисперсий. Существуют различные методы проведения оценки на гомоскедантность регрессионных остатков:

1. Критерий Зигеля-Тьюки [73].
2. Критерий нормальности или статистический критерий [74].
3. Статистика Дарбина-Уотсона [75].
4. Критерий Уилкоксона-Манна-Уитни или U-критерий [76].
5. Критерий Вальда-Вольфовица или критерий серий [77].

Для решения задачи в рамках данной работы, при аппроксимации получаемых массивов мгновенных значений регрессионным анализом достаточно провести проверку на гомоскедантность визуальным анализом графика регрессионных остатков.

Для примера, на рис. 2.9 и 2.10 проведен визуальный анализ регрессионных остатков. Как видно из рис. 2.9 и 2.10, регрессионные остатки ϵ , показывающие характер распределения ошибок регрессионной модели с гармоническим и негармоническим базисом периодического сигнала, распределены по разному. Видно, что распределение ошибок регрессионной модели с гармоническим базисом имеют нормальное распределение.

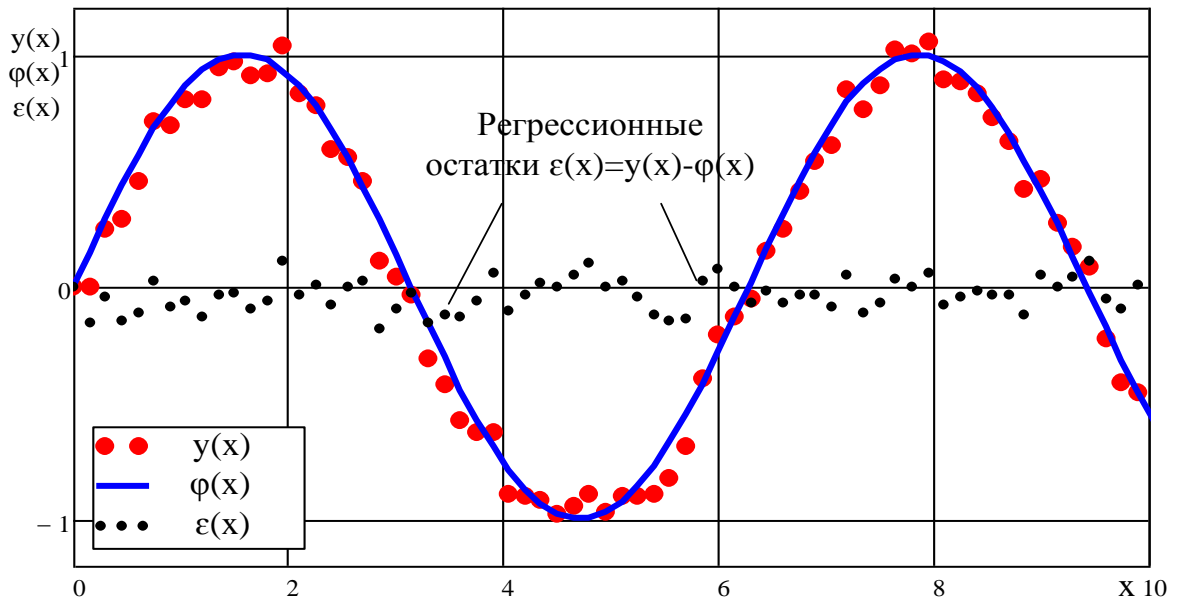


Рис. 2.9. Модель кривой экспериментальных данных периодического характера $y(x)$, регрессионная модель $\varphi(x)$, построенная в гармоническом базисе, регрессионные остатки $\varepsilon(x)$

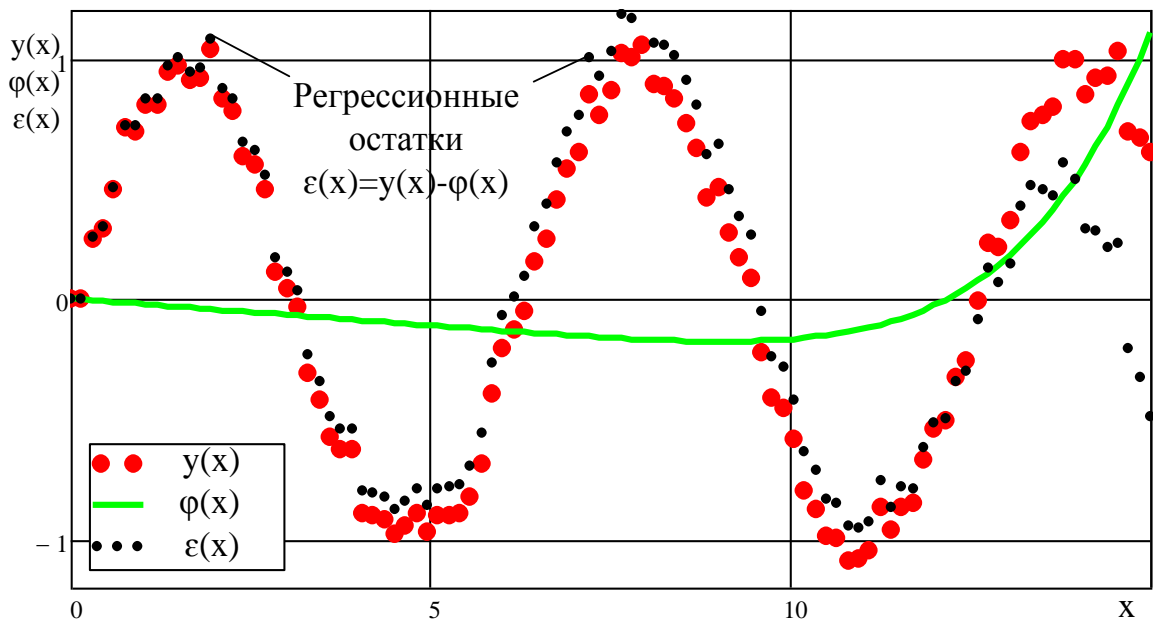


Рис. 2.10. Модель кривой экспериментальных данных периодического характера $y(x)$, регрессионная модель $\varphi(x)$, построенная в негармоническом базисе, регрессионные остатки $\varepsilon(x)$

Проведя один из основных методов предварительного исследования на гомоскедантность – визуальный анализ полученных регрессионных остатков

(рис. 2.9, 2.10), можно с уверенностью сказать, что на графике, представленном на рис. 2.10 наблюдается факт непостоянства дисперсии.

2.2. Мультифазная математическая модель для исследования обрыва стержней ротора

Для исследования обрыва стержней в роторе предлагается использовать математическую модель АД с короткозамкнутым ротором, удовлетворяющую следующим требованиям:

- модель должна иметь возможность задавать разное количество стержней в роторе, в том числе имитировать обрыв разного количества стержней;
- модель должна адекватно описывать процессы, возникающие в электрической машине, в нормальных и аварийных режимах работы АД;
- в модели принимаются общепринятые в классической теории электрических машин допущения.

Предлагается разработать математическую модель асинхронного АД в n -фазной системе, в которой предполагается приведение статорных обмоток к роторным и количество фаз модели определяется исходя из количества стержней ротора (n – количество стержней в роторе). Процессы в роторе и статоре приводятся к одинаковой размерности.

Для математической модели АД с короткозамкнутым ротором в n -фазной системе были приняты следующие допущения:

- напряжение питания АД симметрично;
- напряжение питания АД имеет постоянную амплитуду и частоту;
- питание АД происходит от источника бесконечной мощности;
- кривая намагничивания активной стали прямолинейна;
- пренебрежение насыщением активной стали АД;
- проводники роторной цепи электрически изолированы от стали ротора;
- пренебрежение пространственными высшими гармоническими составляющими намагничивающих сил и полей.

Для реализации модели АД в n -фазной системе создается эквивалентная многоконтурная схема замещения (рис. 2.11), в которой каждый контур имеет свое активное сопротивление, индуктивности рассеяния и взаимную индукцию. Повреждение (обрыв) стержня ротора имитируется путем изменения соответствующего сопротивления $R_R^{(1)}$ в контуре ротора. В процессе реализации модели АД в n -фазной системе, с целью упрощения математического описания, было сделано еще одно не оговоренное ранее допущение: не учитывались сопротивления контактных колец R_e и их индуктивность L_e (рис. 2.11). Вектор входных напряжений сформирован из напряжений статора и ротора, но в связи с тем, что у АД роторная цепь короткозамкнута, то напряжения роторных цепей равны 0.

В предложенной n -фазной математической модели были применены общеизвестные принципы и выражения, используемые при моделировании асинхронных электродвигателей [79-83]. Система дифференциальных уравнений для модели АД в n -фазной системе принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_s^{(1)}}{dt} = U^{(1)} - R_s \cdot i_s^{(1)} \\ \dots \\ \frac{d\psi_s^{(n)}}{dt} = U^{(n)} - R_s \cdot i_s^{(n)} \\ \frac{d\psi_R^{(1)}}{dt} = 0 - R_R \cdot i_R^{(1)} \\ \dots \\ \frac{d\psi_R^{(n)}}{dt} = 0 - R_R \cdot i_R^{(n)} \end{array} \right. , \quad (2.3)$$

где R_s – активное сопротивление статора; R_R – активное сопротивление ротора; i_s – ток статора; i_R – ток ротора; ψ_s – потокосцепление статора; ψ_R – потокосцепление ротора; U – входное напряжение статора.

Порядок системы дифференциальных уравнений (2.3) определяется количеством стержней короткозамкнутой обмотки ротора. С увеличением количества стержней в роторе порядок системы повышается.

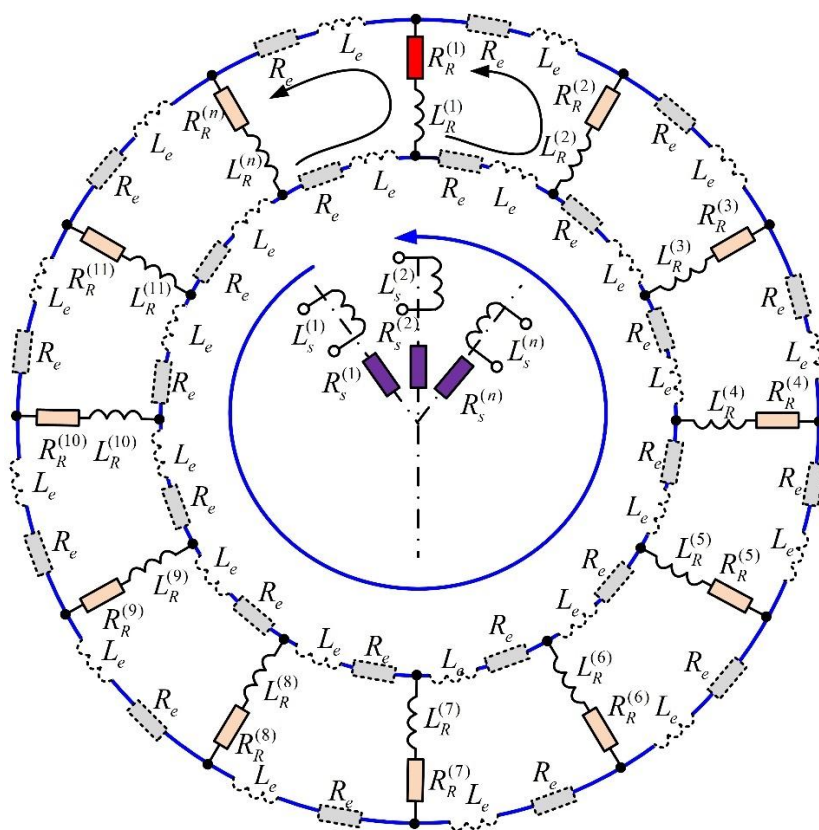


Рис. 2.11. Схема замещения статора и ротора, применяемая в предлагаемой мультифазной математической модели

Вектор входных напряжений формируется следующим образом:

$$U_{\text{BX}} = [U^{(1)} U^{(2)} \dots U^{(n)} 0 \dots 0]^{T}. \quad (2.4)$$

Составляющие напряжения в многомерной системе описываются по следующему выражению:

$$U^{(n)} = U_m \cdot \cos(\Theta + \varphi_{\text{сд}}), \quad (2.5)$$

где U_m – амплитудное значение; $\theta = 2\pi ft = \omega t$; $\varphi_{\text{сд}}$ – угол сдвига.

Напряжения в трехфазной системе следующие:

$$U_A(t) = \sqrt{2}U_A \sin(\omega \cdot t), \quad (2.6)$$

$$U_B(t) = \sqrt{2}U_B \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2.7)$$

$$U_C(t) = \sqrt{2}U_C \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (2.8)$$

Амплитудное значение напряжения для каждой фазы статора не зависит от системы координат:

$$U_m = \sqrt{U_A^2 + \frac{(U_B - U_C)^2}{3}} = \sqrt{2} \cdot U$$

Угол θ определяется из уравнений напряжений при трехфазной системе:

$$\theta = \arctan\left(\frac{U_A \sqrt{3}}{U_B - U_C}\right)$$

Угол сдвига $\varphi_{сд}$ зависит от количества стержней и определяется с помощью выражения

$$\varphi_{сд} = \frac{2 \cdot \pi}{n}$$

По закону Ампера рассчитываются токи статорных и роторных цепей:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Psi}_S \\ \bar{\Psi}_R \end{bmatrix} = L_0 \begin{bmatrix} \bar{I}_S \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \bar{I}_S \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} = L_0^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_S \\ \bar{\Psi}_R \end{bmatrix},$$

где $L_0 = \begin{bmatrix} L_{S0} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{R0} \end{bmatrix}$ – матрица индуктивностей; L_S – собственная матрица индуктивностей для статора; L_R – собственная матрица индуктивностей для ротора; L_{SR} , L_{RS} – матрицы взаимных индуктивностей; $\bar{\Psi}_S = [\psi_S^{(1)}, \dots, \psi_S^{(n)}]^T$ – вектор потокосцепления статора; $\bar{\Psi}_R = [\psi_R^{(1)}, \dots, \psi_R^{(n)}]^T$ – вектор потокосцепления ротора; $\bar{I}_{S1} = [I_S^{(1)}, \dots, I_S^{(n)}]^T$ – вектор тока статора; $\bar{I}_{R2} = [I_R^{(1)}, \dots, I_R^{(n)}]^T$ – вектор тока ротора; $\bar{I}_{S1} = [I_S^{(1)}, \dots, \psi_S^{(n)}]^T$.

Собственные матрицы индуктивностей статора и ротора определяются при помощи вспомогательной матрицы коэффициентов $Corr(\varphi)$:

$$Corr(\varphi) = \begin{bmatrix} 0 & \cos(\varphi) & \cos(2\varphi) & \dots & \cos(-(n-1)\varphi) \\ \cos(-\varphi) & 0 & \cos(\varphi) & \dots & \cos(-(n-2)\varphi) \\ \cos(-2\varphi) & \cos(-\varphi) & 0 & \dots & \cos(-(n-3)\varphi) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \cos(-(n-1)\varphi) & \cos(-(n-2)\varphi) & \cos(-(n-3)\varphi) & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, матрица собственных индуктивностей статора будет:

$$L_{S0} = L_m \cdot Corr(\varphi) + diag[L_S^{(1)}, L_S^{(2)}, \dots, L_S^{(n)}],$$

а матрица собственных индуктивностей ротора:

$$L_{R0} = L_m \cdot Corr(\varphi) + diag[L_R^{(1)}, L_R^{(2)}, \dots, L_R^{(n)}].$$

В свою очередь L_{SR} и L_{RS} заданы при помощи вспомогательной матрицы, зависящей от φ и γ :

$$Cosr(\gamma, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_e) & \cos(\gamma_e - \varphi) & \dots & \cos(\gamma_e - (n-1) \cdot \varphi) \\ \cos(\gamma_e - \varphi) & \cos(\gamma_e - \varphi - \varphi) & \dots & \cos(\gamma_e - (n-1) \cdot \varphi - \varphi) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \cos(\gamma_e - (n-1)\varphi) & \cos(\gamma_e - \varphi - (n-1)\varphi) & \dots & \cos(\gamma_e - (n-1)\varphi - (n-1)\varphi) \end{bmatrix},$$

где $\frac{d\gamma_e}{dt} = z_p \int \omega_r dt$ – угол поворота ротора.

Имея выражения для вычисления L_{SR} и L_{RS} :

$$L_{RS} = L_m \cdot Cosr(\gamma, \varphi),$$

$$L_{SR} = L_m \cdot Cosr(\gamma, \varphi)^T,$$

получена следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Psi_s^{(1)}}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d\Psi_s^{(n)}}{dt} \\ \frac{d\Psi_R^{(1)}}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d\Psi_R^{(n)}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^{(1)} \\ \vdots \\ U^{(n)} \\ 0 \\ \vdots \\ 0^{(n)} \end{bmatrix} - R \cdot L_0^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_s^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi_s^{(n)} \\ \Psi_R^{(1)} \\ \vdots \\ \Psi_R^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

где $R = \begin{bmatrix} R_{S0} & 0 \\ 0 & R_{R0} \end{bmatrix}$ – главная матрица сопротивлений;

$R_{S0} = diag[R_S^{(1)}, R_S^{(2)}, \dots, R_S^{(n)}]$ – матрица сопротивлений статора;

$R_{R0} = diag[R_r^{(1)}, R_r^{(2)}, \dots, R_r^{(n)}]$ – матрица сопротивлений ротора.

На основе токов статора и ротора определяется электромагнитный момент АД:

$$M_{ДВ} = -z_p \cdot \bar{I}_S^T \cdot L_n \cdot \bar{I}_R \cdot \frac{3}{n}, \quad (2.10)$$

где z_p – число пар полюсов; $3/n$ – коэффициент, позволяющий обеспечивать паспортный момент на валу АД независимо от размерности системы дифференциальных уравнений;

$$s(\varphi, \gamma_e) = \begin{bmatrix} \sin(\gamma_e) & \sin(\gamma_e - \varphi) & \dots & \sin(\gamma_e - (n-1)\varphi) \\ \sin(\gamma_e - \varphi) & \sin(\gamma_e - \varphi - \varphi) & \dots & \sin(\gamma_e - (n-1)\varphi - \varphi) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sin(\gamma_e - (n-1)\varphi) & \sin(\gamma_e - \varphi - (n-1)\varphi) & \dots & \sin(\gamma_e - (n-1)\varphi - (n-1)\varphi) \end{bmatrix}$$

– вспомогательная матрица; $L_n = \frac{d[L_{rs}]}{d\gamma_b} = s \cdot L_m$.

Механика предлагаемой математической модели построена на основе одномассовой системы:

$$M_{ДВ} - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.11)$$

где M_C – момент нагрузки; J – момент инерции двигателя.

Обрыв стержня имитируется исключением из расчета одного стержня путем введения добавочного сопротивления в матрицу R_{R0} . Данный способ дает возможность регулировать количество оборванных стержней.

2.2.1. Имитационное моделирование АД с электрической несимметрией ротора в программной среде MatLab Simulink

Многофазная математическая модель АД в реализована в среде графического программирования и анализа Simulink, являющимся приложением пакета прикладных программ MatLab.

Основные элементы блок-схемы многофазной имитационной модели АД в представлены на рис. 2.12, при этом для обеспечения наиболее приемлемых расчетных показателей в качестве основного метода разрешения дифференциальных уравнений был выбран метод Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом расчета 0.00002 с.

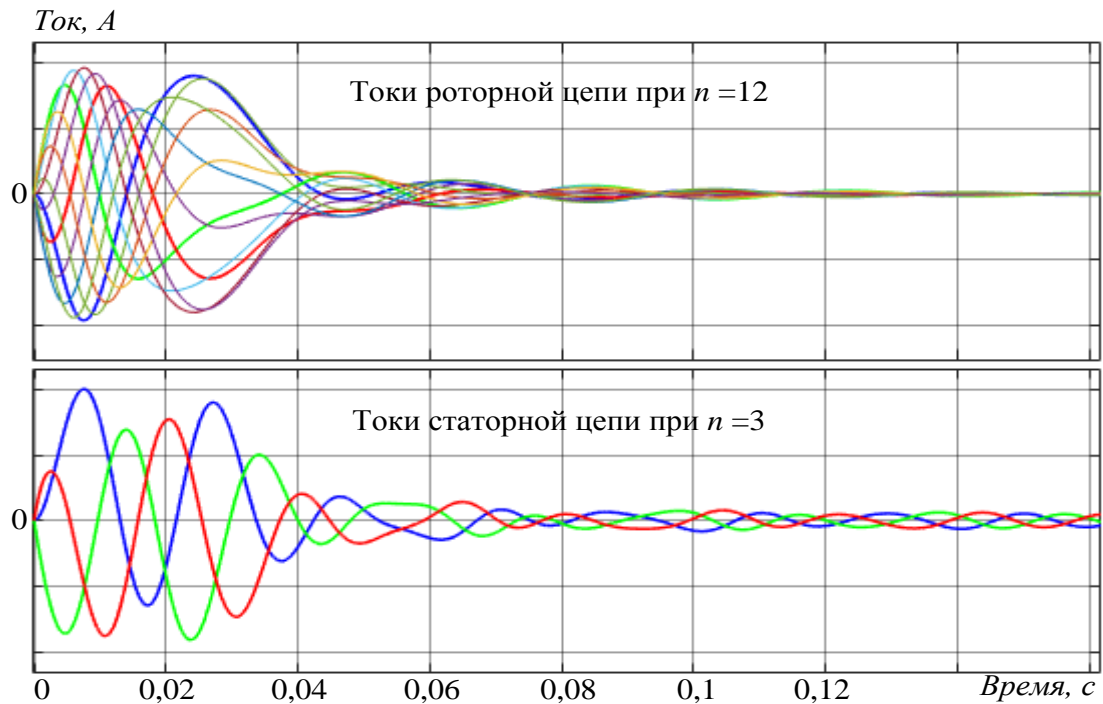


Рис. 2.13. Кривые токов статорной и роторной цепей

Как было доказано в [16], при диагностировании повреждений в короткозамкнутой обмотке ротора АД модуль результирующего вектора токов статора является более информативным, чем токи отдельных фаз. Модуль результирующего вектора токов статора рассчитывается по формуле

$$I_{M1} = \sqrt{I_{S1}^2 + I_{S2}^2 + I_{S3}^2 + \dots + I_{Sn}^2},$$

где I_S – ток фазы статора.

2.2.2. Имитация повреждения стержней короткозамкнутого ротора АД

В ходе моделирования были рассчитаны кривые модуля результирующего вектора токов статора в нормальном и аварийных режимах. Имитировался обрыв одного, двух, трех и четырех стержней. На рис. 2.14 представлены полученные кривые изменения модуля результирующего вектора токов статора, из которых очевидно, что при неповрежденной роторной цепи ток постоянен. При обрыве одного, двух, трех и четырех стержней в исследуемом массиве мгновенных

значений модуля результирующего вектора токов статора появляются колебания, которые усиливаются при увеличении количества оборванных стержней (рис. 2.14).

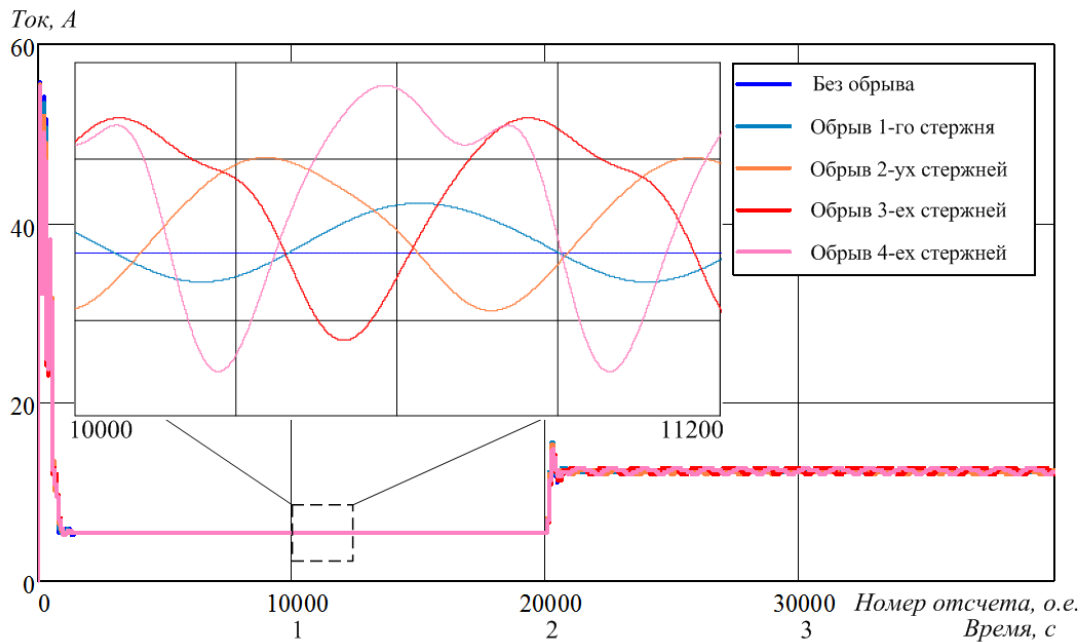


Рис. 2.14. Кривые модуля результирующего вектора токов статора при нормальном и аварийном режимах (со 2-й секунды включена механическая нагрузка на вал)

Выводы по 2 главе

1. Методы математической статистики являются одними из перспективных методов обработки цифровых информационных сигналов при диагностировании повреждений электрических машин.

2. Показано, что для обработки оцифрованных экспериментальных данных рационально использовать математический аппарат регрессионного анализа.

3. Предложена многофазная математическая модель асинхронного двигателя, основной целью которой является исследование работы машины при обрыве стержней короткозамкнутого ротора.

4. При разработке методов диагностики обрыва стержня короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя мгновенные значения модуля результирующего

вектора токов статора в качестве анализируемого сигнала является более информативным, чем токи отдельных фаз.

3. ВЫДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРИЗНАКА МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ОБЩЕГО ВИДА

Как описано ранее носителем информации в данной работе являются массивы мгновенных значений модуля результирующего вектора, полученного путем расчетов мгновенных значений токов статора. Очевидно, что при математическом моделировании, пренебрегается наложением несимметрии питающей сети и естественной несимметрии обмоток статора, в результате получается идеальная модель кривой модуля результирующего вектора не имеющая временных зависимостей, и представляет собой ровную линию. Однако при натурном эксперименте такого невозможно представить и с целью исключения наличия электрической несимметрии в обмотках необходимо провести исследование испытуемой асинхронной машины на соответствие характеристик обмоток друг другу.

3.1. Исследование возможной электрической несимметрии обмоток статора исследуемого асинхронного двигателя

Для анализа уровня достоверности и адекватности экспериментальных данных необходимо измерить возможную несимметрию реального АД, поскольку идеально симметричных электрических машин не существует. Данные об уровне естественной несимметрии реальной электрической машины позволяют учесть влияние разных факторов на проводимый эксперимент и получить более адекватные результаты.

Данное исследование проводилось на основе анализа кривой затухания постоянного тока. При этом основное внимание уделялось схеме подключения источника постоянного тока к обмоткам статора. Существуют разнообразные

схемы подключения обмоток статора к источнику постоянного тока, которые представлены в табл. 3.1. Но в настоящее время на практике для определения электромагнитных параметров машин переменного тока по опыту затухания постоянного тока, реализуемого путем замыкания накоротко питаемой постоянным током обмотки статора, принято использовать схему неполной звезды с параллельным соединением двух фаз и схему обмотки статора при встречном соединении двух фаз [84]. При этом вторая схема не требует нулевого проводника и дополнительных соединений, она проста в технической реализации.

Первая схема выполняется простым объединением начал обмоток фаз «В» и «С» статора АД и традиционно применяется для экспериментального определения частотных характеристик по опыту затухания постоянного тока статора.

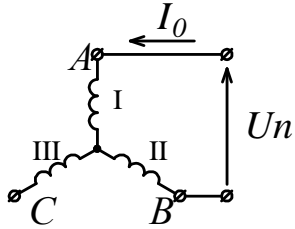
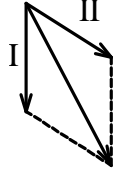
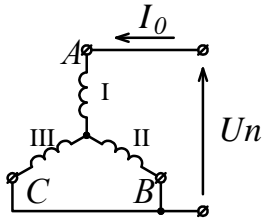
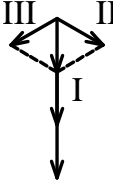
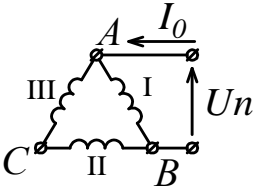
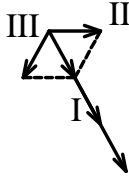
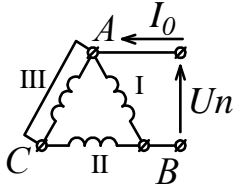

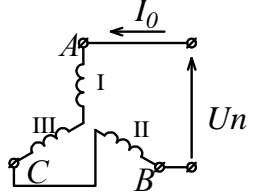
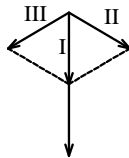
Рассмотрение схем соединения обмоток статора, диаграмм магнитодвижущих сил и пространственных векторов тока, приведенных в табл. 3.1, показывает, что результирующее потокосцепление при однофазном питании по схеме неполной звезды получается таким же, как и при трехфазном питании обмоток статора синусоидальным током, действующее значение которого равно постоянному току I_0 .

Несмотря на равные значения результирующих потокосцеплений, магнитные потоки рассеяния, получаемые в рассматриваемых схемах однофазного питания не полностью совпадают между собой. Различия в магнитных потоках рассеяния отражаются на величинах индуктивности рассеяния L_1 обмоток статора. Однако, как показано в работе [84], изменения L_1 относительно невелики и не могут служить серьезным препятствием для применения рекомендуемых схем соединения обмоток статора.

Результирующее потокосцепление в опыте питания постоянным током по схеме встречного соединения двух фазных обмоток в $\sqrt{3}/1,5$ раза больше, чем по первой схеме питания. Поэтому при равных значениях результирующих потокосцеплений величина тока I_0 во второй схеме, при исследовании обмоток

статора АД должна быть уменьшена в 1.154 раза по сравнению с током I_0 при соединении обмотки статора по схеме неполной звезды.

Таблица 3.1. Характеристика схем соединения обмоток статора

Схема соединения	Диаграмма МДС	Вектор тока
		$\sqrt{3} \cdot I_0 \cdot e^{j30^\circ}$
		$1,5 \cdot I_0 \cdot e^{j0^\circ}$
		$I_0 \cdot e^{j0^\circ}$
		$0,5 \cdot \sqrt{3} \cdot I_0 \cdot e^{j30^\circ}$
		$2 \cdot I_0 \cdot e^{j0^\circ}$

На рис. 3.1 представлена схема подключения обмоток статора исследуемого АД.

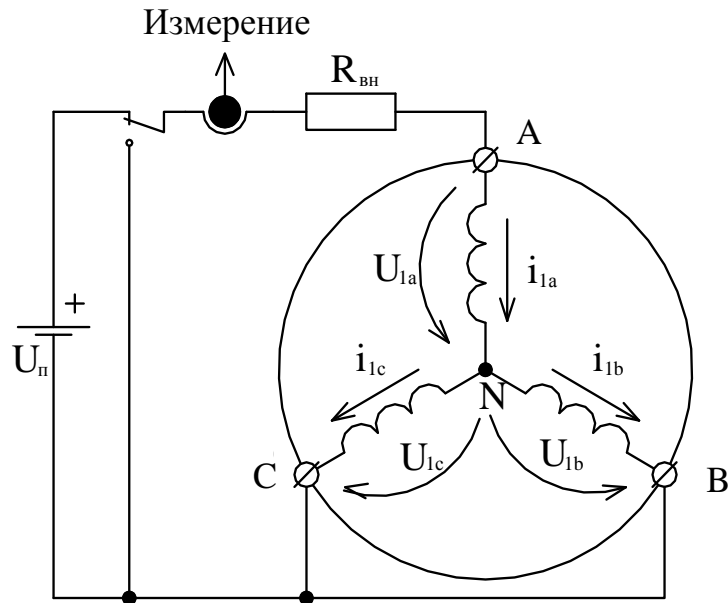


Рис. 3.1. Схема подключения статорной обмотки АД с источнику постоянного тока и измерительной системы, $R_{вн}$ – сопротивление цепи

Для проведения соответствующего исследования использовался переносной стенд, включающий в себя все необходимые для выполнения исследования элементы:

- источник регулируемого постоянного тока;
- измеритель, способный регистрировать с необходимой точностью переходные характеристики;
- силовой коммутатор;
- система управления и синхронизации процессов включения тока и регистрации значений;
- ПЭВМ и соответствующее ПО для коммутации, настройки и передачи получаемых сигналов от измерителя для дальнейшей обработки.

Основные характеристики и подробное описание стенда представлены в работе [80]. Внешний вид устройства приведен на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Переносной стенд для исследования естественной несимметрии статорной обмотки исследуемого АД

Основой измерителя и его функциональной схемы (рис. 3.3) является контроллер ATmega16 DD2, принимающий данные с платы управления для задания режимов силовому модулю на MOSFET транзисторах IRL 2505. Второй контроллер DD1 аналогичной модели обеспечивает необходимые режимы для формирования тока, а также индикацию текущего тока и напряжения на жидкокристаллическом индикаторе в измеряемой цепи посредством датчиков тока, встроенных в выходную цепь измерителя. Источник напряжения на аккумуляторной батарее Delta HR 12-7.2 12 В / 7,2 Ач способен выдавать ток до

20 А при полном отсутствии пульсаций для получения качественной переходной характеристики и стабильности процесса измерения.

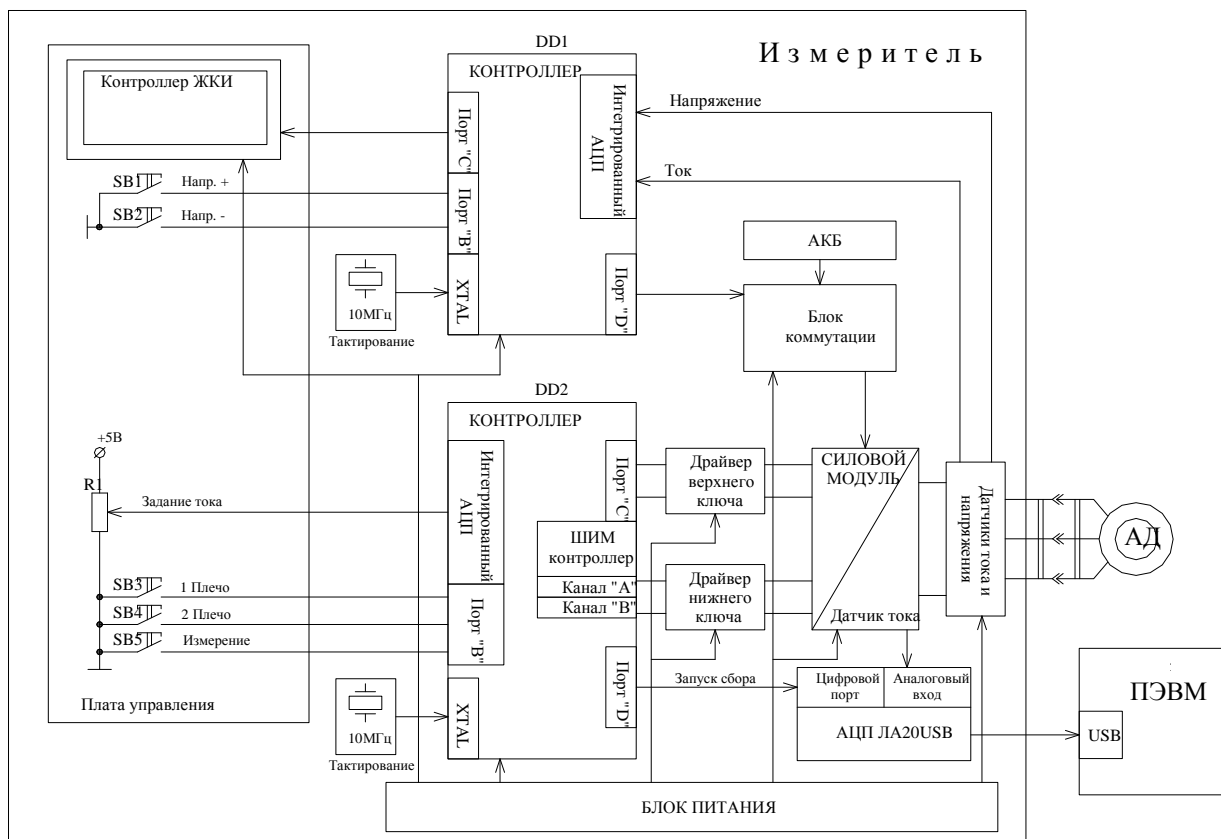


Рис. 3.3. Функциональная схема измерителя

Контроллер, применяемый в составе стенда, серии ATmega16 (таблица 3.2) – 8-разрядный высокопроизводительный AVR микроконтроллер с малым потреблением и прогрессивной RISC архитектурой 130 высокопроизводительных команд, большинство команд выполняется за один тактовый цикл.

Микроконтроллер имеет программируемую блокировку, обеспечивающую защиту программных средств пользователя. Контроллеры DD1, DD2 реализуют настройку измерителя на необходимый режим получения переходной характеристики и организацию процесса измерения в автоматическом режиме с выдачей сигнала запуска сбора данных аналого-цифровому преобразователю.

Архитектура и цоколевка контроллера представлена на рис. 3.4., характеристики в табл. 3.2.

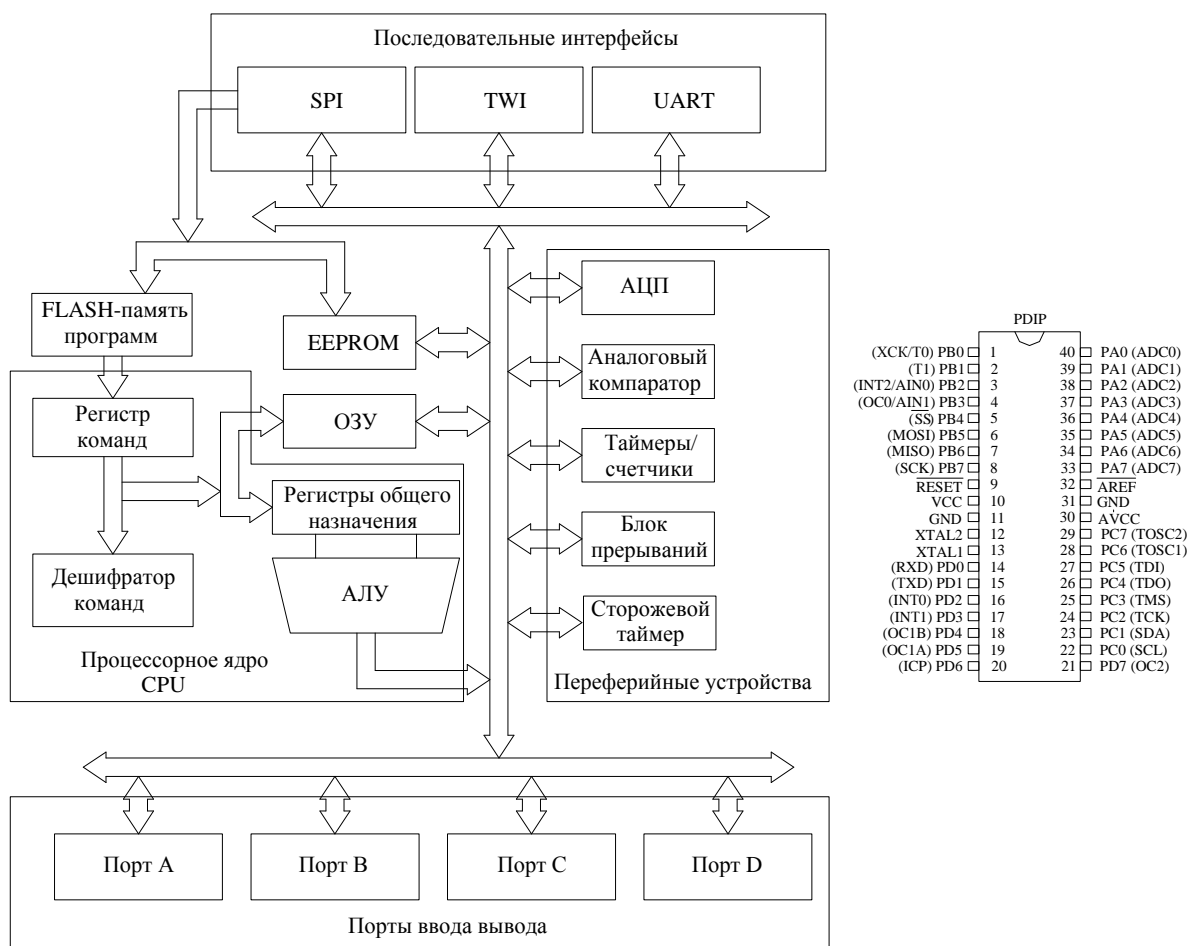


Рис. 3.4. Архитектура и цоколевка контроллера ATmega16

Управление ключами силовой части реализует контроллер DD2 с помощью драйверов верхнего и нижнего ключа, выполненных на микросхеме IR2113 (рис. 3.5), а также производится формирование ШИМ сигнала с регулируемой скважностью для нижних ключей транзисторов силового модуля.

Сила тока регулируется с помощью переменного реостата R1, напряжение с которого измеряется интегрированным АЦП микроконтроллера DD2, канал AIN0. Для регулировки тока в обмотке измеряемого двигателя контроллер пропорционально измеренному напряжению изменяет скважность ШИМ сигнала одного из транзисторов нижних ключей, подключаемых в диагональ моста транзисторов силового модуля (рис. 3.6).

Таблица 3.2. Характеристики микроконтроллера АТmega16

Наименование	Значение параметра
Регистры общего назначения	32 8-разрядных рабочих регистра
Производительность	16 MIPS (при тактовой частоте 16 МГц)
Память программ	Энергонезависимая память программ и данных
	16 Кбайт внутрисистемной программируемой Flash-памяти
	Обеспечивает 1000 циклов стирания/записи
Память EEPROM, байт	256
Память ОЗУ (SRAM), байт	512
Количество прерываний внутр./внеш.	20/3
Таймеры 8/16 бит	2/1
Число каналов ШИМ	4
Число каналов АЦП	8
Аналоговый компаратор	+
Сторожевой таймер	+
Количество команд	130
Тип корпуса	DIP40, TQFP44

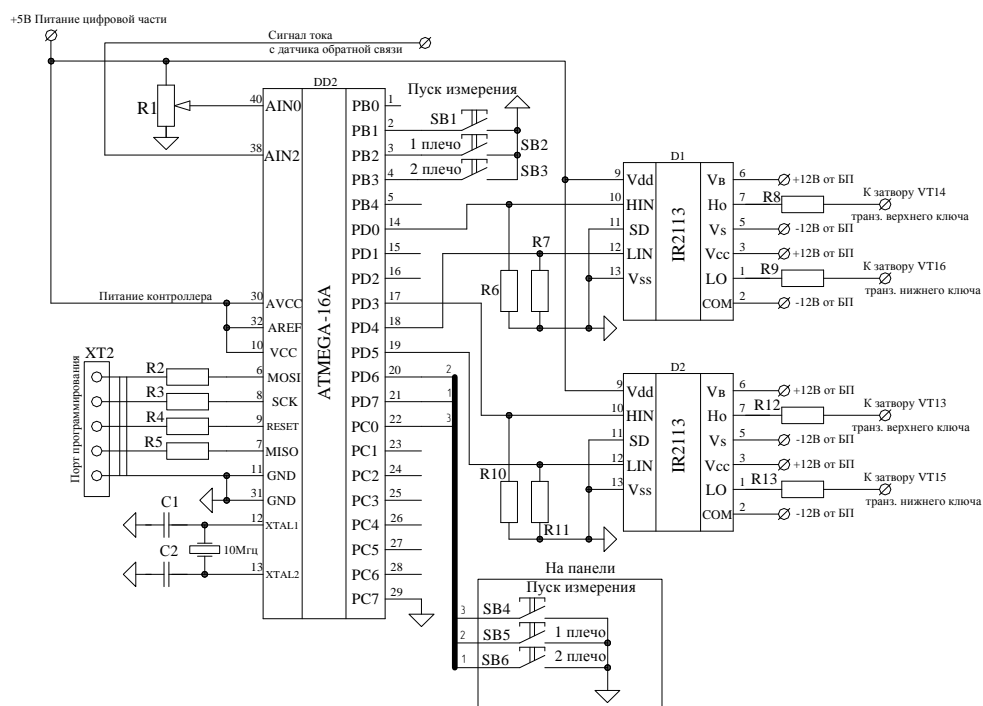


Рис. 3.5. Принципиальная схема управления силовым модулем

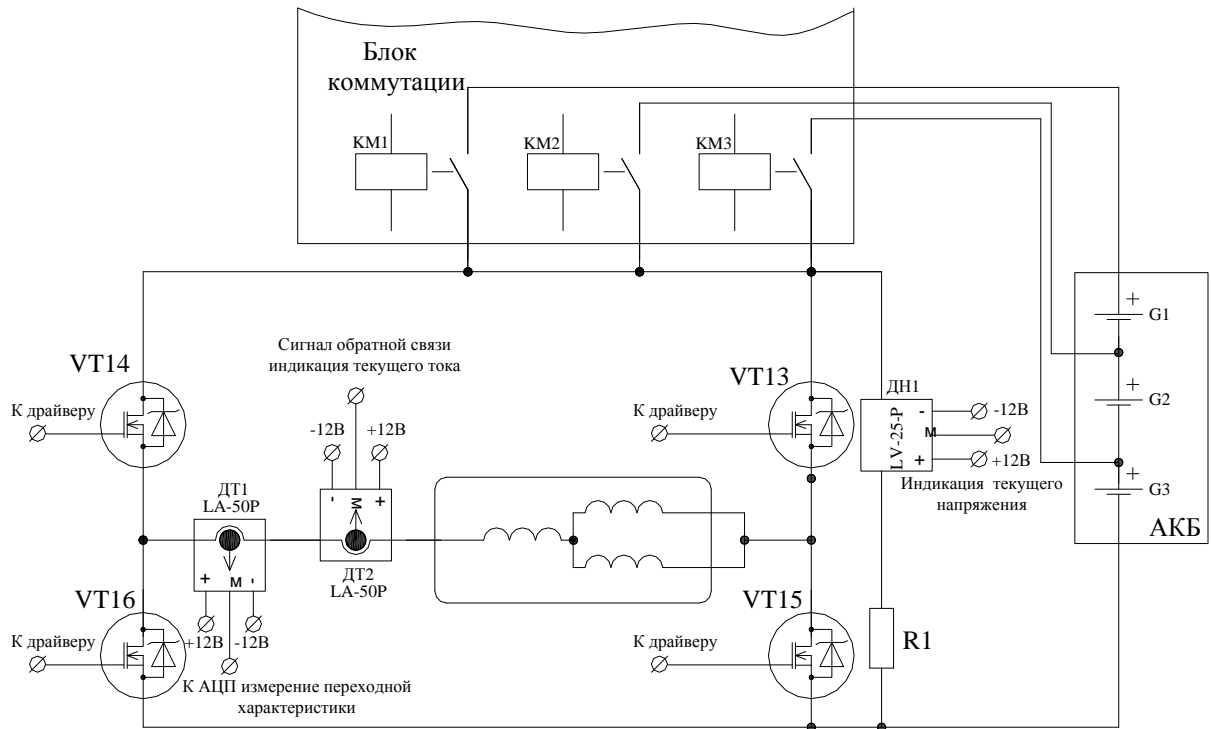


Рис. 3.6. Принципиальная схема силового модуля с датчиками тока

Для измерения тока используются датчики ДТ1, ДТ2 типа LA 50-P (таблица 3.3) – компенсационные датчики Холла, предназначенные для электронного преобразования токов (постоянного, переменного, импульсного и т. д.) в пропорциональный выходной сигнал и имеют гальваническую развязку между первичной (силовой) и вторичной (измерительной) цепями.

Таблица 3.3. Параметры датчика тока LA 50-P

Наименование	Обозначение	Значение
Электрические параметры		
Номинальный входной ток, А	I_{PN}	50 А
Диапазон преобразования	I_P	0...±110 А
Величина нагрузочного резистора при питании ±12В и $T_A=70^\circ\text{C}$	R_M	0...2210 Ом
Номинальный аналоговый выходной ток, мА	I_{SN}	25 мА

Коэффициент преобразования	K_N	1:2000
Точностно-динамические характеристики		
Точность преобразования, % $T_A=25^\circ\text{C}$	I_{NP}	$\pm 0,25 \%$
Нелинейность, %	ε_L	$< 0,15 \%$
Время отклика при 10 % от I_{PN} , нс	$t_{ГВ}$	< 200 нс
Время задержки при 90 % от I_{PN} , нс	t_3	< 500 нс
Скорость нарастания входного тока, А/мкс	di/dt	> 200 А/мкс
Частотный диапазон, кГц	f	0...200 кГц

Измерение напряжения проводилось датчиком ДН1 LV-25-Р (таблица 3.4).

Таблица 3.4. Параметры датчика напряжения LV 25-Р

Наименование	Обозначение	Значение
Электрические параметры		
Номинальное входное напряжение, В	U_{PN}	10...500В
Номинальный входной ток, А	I_{PN}	10 мА
Диапазон преобразования	I_P	0... ± 14 А
Величина нагрузочного резистора при питании ± 12 В и $T_A=70^\circ\text{C}$	R_M	30...190 Ом
Номинальный аналоговый выходной ток, мА	I_{SN}	25 мА
Коэффициент преобразования	K_N	2500:1000
Напряжение питания, В	U_C	$\pm 12...15$ В
Точностно-динамические характеристики		
Точность преобразования, % $T_A=25^\circ\text{C}$	I_{NP}	$\pm 0,8 \%$
Нелинейность, %	ε_L	$< 0,2 \%$
Время задержки при 90 % от I_{PN} , нс	t_3	40 мкс

Сигналы с датчика напряжения ДН1 и датчика тока ДТ2 поступают на вход встроенного аналого-цифрового преобразователя контроллера DD1 (рис. 3.7).

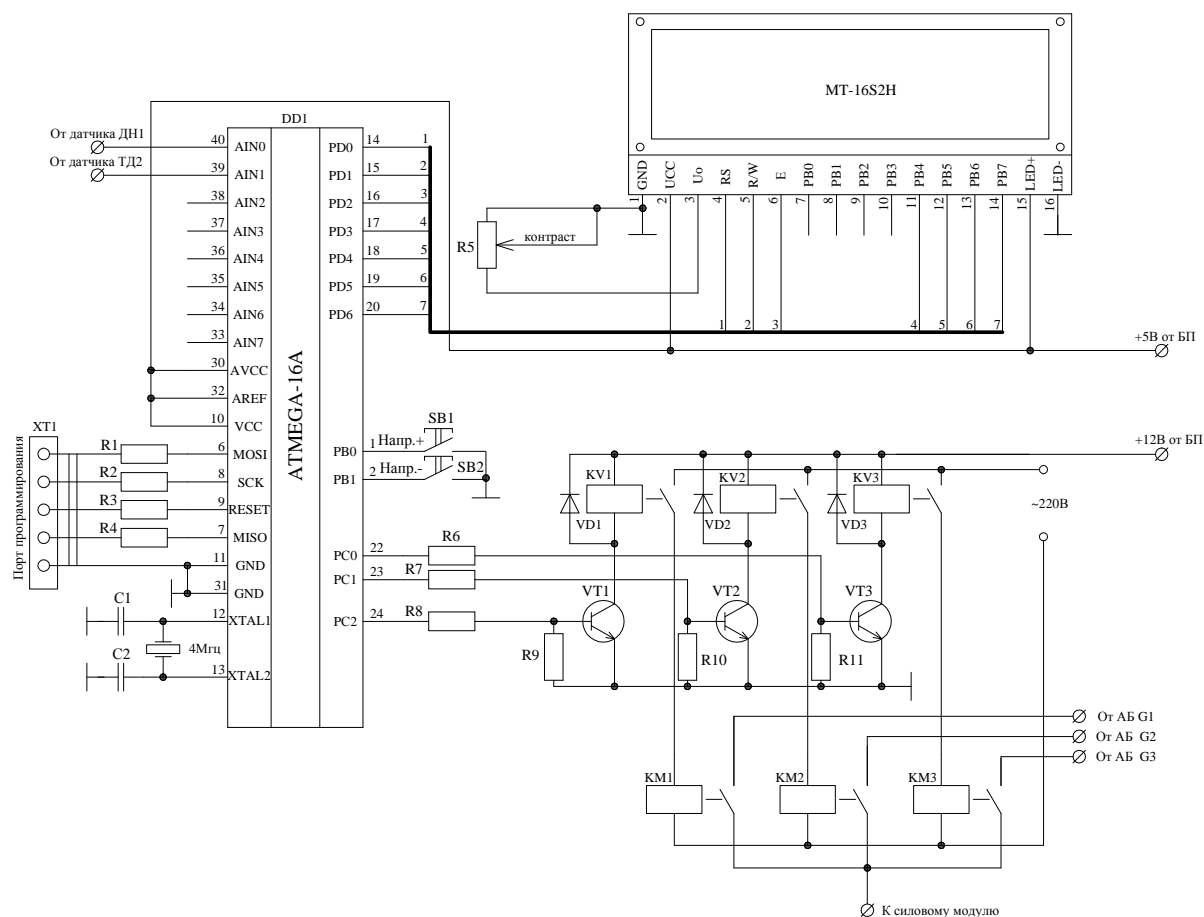


Рис. 3.7. Принципиальная схема контроллера DD1

Измерительная часть (рис. 3.8) состоит из датчика тока ДТ1 с прецизионным резистором R15 390 Ом и отдельным стабилизированным блоком питания. Сигнал с прецизионного резистора поступает на аналоговый вход 16-канальной 12-разрядной платы устройства сбора данных (АЦП) ЛА20USB, которое по USB кабелю соединяется с ноутбуком.

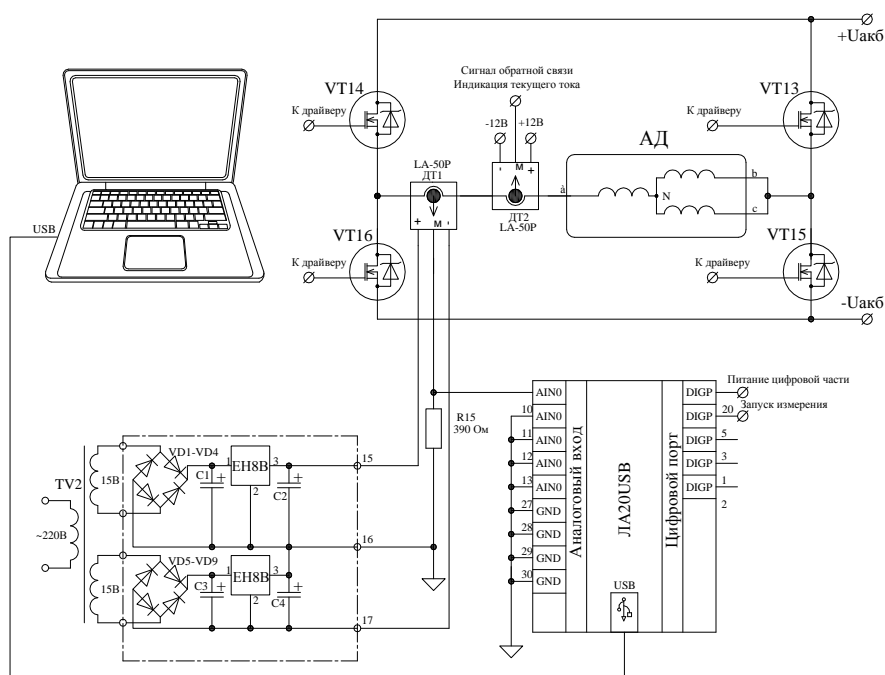


Рис. 3.8. Принципиальная схема измерительной части

Внутренний источник тактовых импульсов АЦП – выход счетчика-таймера. Программируемый делитель частоты используется для задания тактовой частоты счётчика-таймера. На его вход подаётся частота 2 МГц от задающего кварцевого генератора. Коэффициент деления частоты внутреннего источника задаётся 16-битным программируемым делителем частоты. Наличие программируемого делителя позволяет задавать «сетку» частот запуска АЦП от 16 до 50 кГц, основные технические характеристики приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Основные технические характеристики АЦП LA-20USB

Наименование	Обозначение
Количество аналоговых каналов	32 однополюсных или 16 дифференциальных каналов с мультиплексированием
Диапазоны входного сигнала	$\pm 10 \text{ В} \pm 0,05 \text{ В}$
Входное сопротивление	Не менее 5 МОм
Защита по напряжению	$\pm 15 \text{ В}$ (при включенном питании)
АЦП	
Тип АЦП	Последовательного приближения
Напряжение питания, В	12
Количество бит в выходном регистре АЦП	
Диапазон частот выборок	16...50 кГц

Время преобразования	20 мкс
Цифровой порт	
Количество линий	8 выводов и 8 вводов
Уровни и пороговые значения	КМОП (ТТЛ совместимые)

Внутренняя структура портов ввода-вывода предусматривает передачу информации по 4-битной шине, поэтому при смене данных новая информация появляется сначала на младших, а затем на старших 4 битах порта. Операция считывания производится в два этапа: сначала регистрируется информация о младших 4-х битах, затем старших. При считывании данных время неопределенности – 0,6 мкс, а при записи – не более 0,6 мкс.

Полученные на описанном выше устройстве сигналы затухающей постоянного тока статорных обмоток «А», «В», «С» экспериментального АД с замененной активной частью ротора представлены на рис. 3.9.

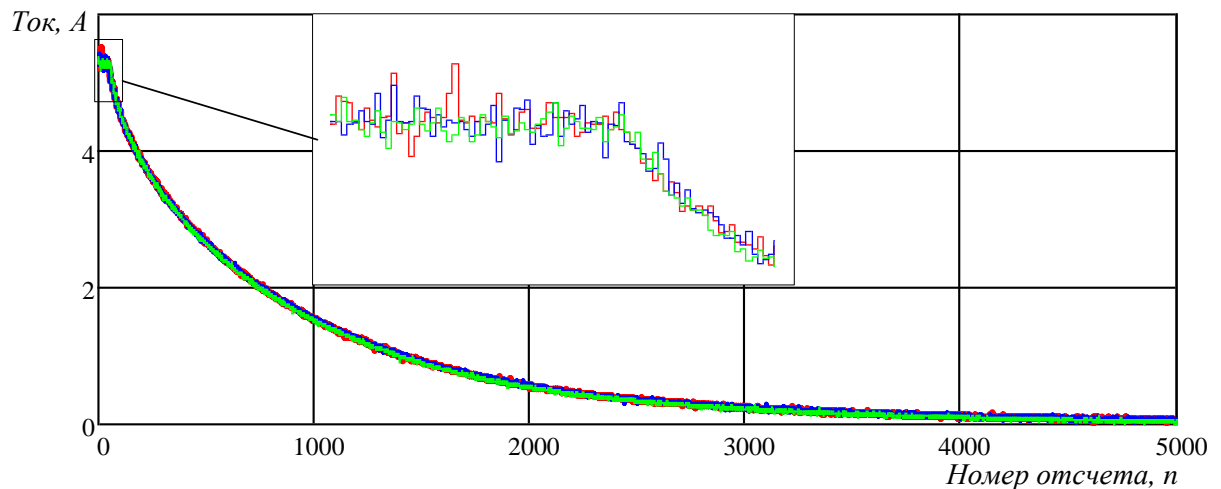


Рис. 3.9. Кривые затухающей постоянного тока статора экспериментального АД с медной «беличьей клеткой»

Как видно, отклонений, указывающих на отличие магнитного поля одной обмотки статора от других, не наблюдается. Для более полного и достоверного результата необходимо провести определение параметров АД по представленному методу и провести их сравнение.

Особенности переходной характеристики затухания тока обмотки статора АД позволяют составить эквивалентные схемы замещения АД (рис. 3.10) с заторможенным ротором в отдельности для пологого, крутого и «сверхпереходного» участков характеристики затухания [85- 87].

Выполнив исследование экспериментального АД по описанному в [84] способу, получены результаты сравнения параметров схем замещения статорных обмоток, которые представлены в табл. 3.6.

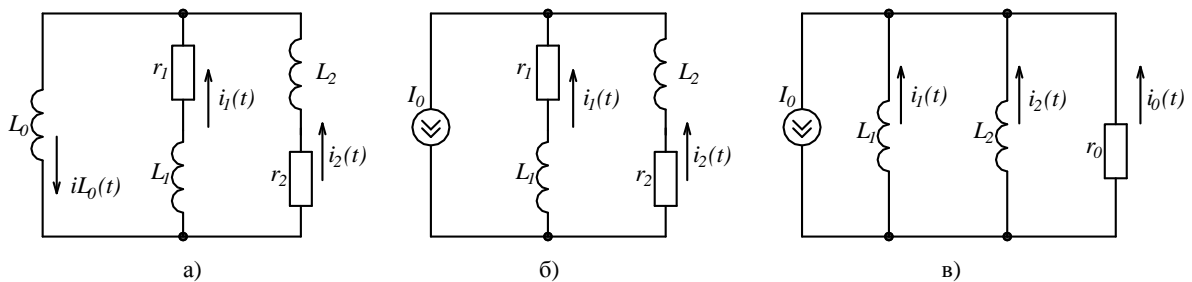


Рис. 3.10. Эквивалентные схемы АД: а – на пологом участке кривой затухания тока статора; б – на крутом участке кривой затухания тока статора; в – на сверхпереходном участке кривой затухания тока статора в области малых времен

Таблица 3.6. Эквивалентные параметры АД пофазно

	I_0 , А	r_1 , Ом	r_2 , Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн
А	5,5	0,598	0,429	5,781	3,511
В	5,5	0,599	0,428	5,782	3,513
С	5,5	0,598	0,428	5,781	3,512

Как видно из табл. 3.6, возможная несимметрия фазных обмоток не проявляет себя в явном виде, а расхождения эквивалентных параметров сопротивлений и индуктивностей статора и ротора отличаются в тысячных долях.

3.2. Разработка метода диагностики короткозамкнутой обмотки ротора АД

В настоящее время практически все системы диагностирования, защиты и

автоматики электроэнергетических объектов базируются на микропроцессорной технике. Первоисточником полезной информации для систем диагностики выступают аналоговые сигналы с соответствующих измерительных датчиков. Цифровая обработка сигналов значительно расширяет возможности диагностики за счет эффективного применения алгоритмов цифровой фильтрации, корреляционного анализа, обратной свертки, спектрального анализа, методов аппроксимации и искусственного интеллекта [88].

При разработке метода диагностирования обрыва стержня ротора АД необходимо решить ряд сопутствующих задач выделения полезной информации микропроцессорными техническими средствами из сигнала с наличием помех со случайным распределением. Для этого надо четко представлять возможности аппаратной части, и, диапазон возможностей изменения ключевых параметров системы (частоту дискретизации, уровень квантования и пр.).

Так как в предложенном исследовании, для разработки и реализации диагностического метода используются экспериментальные данные от физического объекта, то получаемый датчиком аналоговый сигнал неизбежно содержит нежелательные шумы и помехи.

Аналогово-цифровой преобразователь является одним из ключевых элементов системы сбора данных. Он осуществляет создание набора данных дискретных по времени и квантованных по уровню значений амплитуд (уровней отклика). Чем выше частота дискретизации, измерений по количеству значений в секунду, тем точнее будет цифровое представление измеряемого сигнала. Очевидно, что в случае уменьшения количества отсчетов в секунду часть необходимой информации может быть неизбежно потеряна.

При цифровой обработке сигналов необходимо учитывать еще одно важнейшее обстоятельство – наложение спектров. Для получения адекватного результата необходимо соблюдать теорему Котельникова (Шеннона-Найквиста), согласно которой частота дискретизации f_s сигнала с шириной полосы f_a должна удовлетворять условию $f_s > 2f_a$. Этот критерий требует, чтобы частота дискретизации сигнала была минимум в два раза больше частоты измеряемого

аналогового сигнала. Поэтому требуется в полной мере понимать характер диагностического признака и исходного сигнала. Иначе полезная информация, содержащаяся в сигнале, будет теряться.

Свои искажения в сигнал вносит и процесс квантования. Устройства для цифровой обработке сигналов (даже одного производителя) специфицируются по-разному: весом младшего разряда (LSB), долей от полной шкалы размером в один миллион (ppm FS), милливольтами (mV) и т. д. (табл. 3.7). Квантование можно рассматривать как передачу непрерывного сигнала в условиях детерминированных помех, являющихся шумом квантования. Шум квантования образуется как разница непрерывного $U(t)$ и квантованного $U_k(t)$ сигналов (рис. 3.11).

Таблица 3.7. Величина младшего значащего разряда (LSB) для приборов с различной разрешающей способностью

Разрешающая способность, N	2^N	Напряжение (U=10В)	ppm	Погрешность, %	dB
2-бит	4	2,5В	250000	25	-12
4-бит	16	625мВ	62500	6,25	-24
6-бит	64	156мВ	15625	1,56	-36
8-бит	256	39,1мВ	3906	0,39	-48
10-бит	1024	9,77мВ	977	0,098	-60
12-бит	4096	2,44мВ	244	0,024	-72
14-бит	16384	610мкВ	61	0,0061	-84
16-бит	65536	153мкВ	15	0,0015	-96
18-бит	262144	38мкВ	4	0,0004	-108
20-бит	1048576	9,54мкВ	1	0,0001	-120
22-бит	4194304	2,38мкВ	0,24	0,000024	-132
24-бит	16777216	596нВ*	0,06	0,000006	-144

Квантование можно рассматривать как передачу непрерывного сигнала в условиях детерминированных помех – шума квантования. Шум квантования – это разница непрерывного $U(t)$ и квантованного $U_q(t)$ сигналов (рис. 3.11, 3.12).

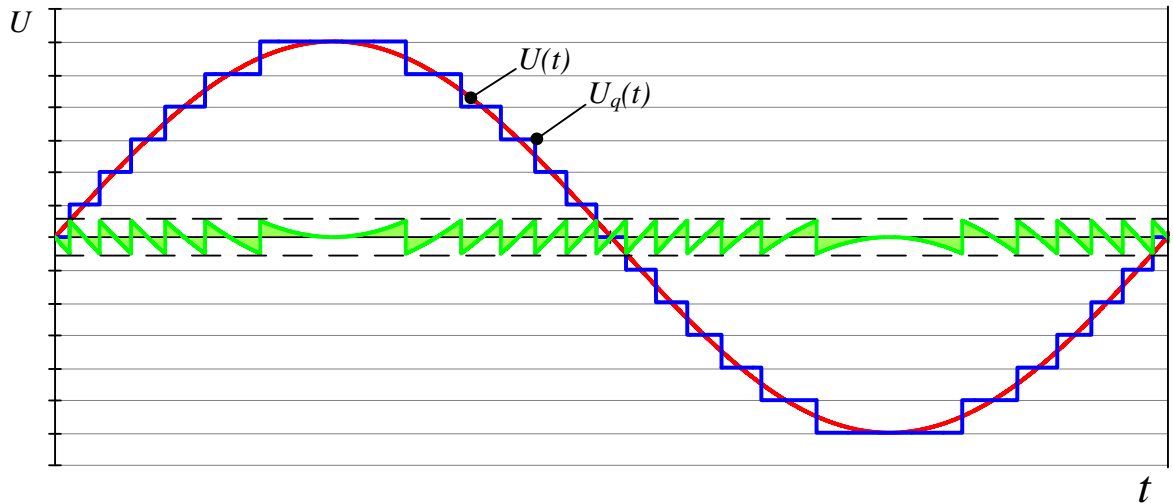


Рис. 3.11. Модель аналогового сигнала $U(t)$, квантованный сигнал $U_q(t)$ и иллюстрация шума квантования

Смена квантованного сигнала $U_k(t)$ происходит ровно в те моменты времени, когда сигнал $U(t)$ принимает значение $U_i(t) \pm \Delta U/2$ (i – номер уровня квантования). На рис. 3.12 показаны семь уровней квантования модели исследуемого сигнала $U(t)$, в данном случае показано квантование с постоянным шагом $\Delta U = const$ [89].

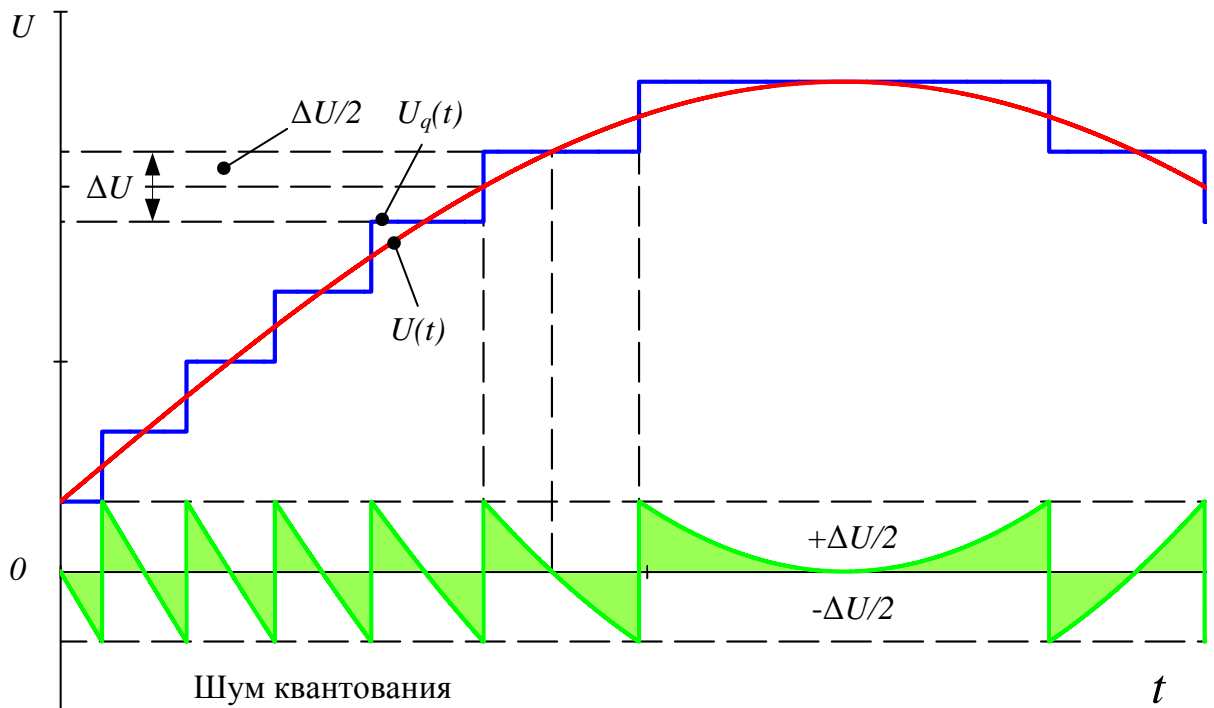


Рис. 3.12. Иллюстрация шума квантования

Выбор разрядности цифровой системы при условии обеспечения требуемого динамического диапазона выполняется по следующему алгоритму [90]:

1. Оценивается величина b_D – разрядность цифрового кода входного сигнала, при которой обеспечивается заданная величина динамического диапазона D без гарантии получения требуемой величины отношения сигнал/шум. Из выражения

$$A_{\min} = 10^{-D/20} \geq A_{\text{exmin}} = 2^{-b}, \quad (3.1)$$

где A_{\min} – амплитуда входного сигнала на нижней границе динамического диапазона; A_{exmin} – минимальная амплитуда входного сигнала, следует:

$$b_D = \frac{D \lg 10}{20 \lg 2} = \frac{D}{20 \lg 2} \approx \frac{D}{6.02}.$$

Величину разрядности b_D округляют в большую сторону.

2. Оценивается допустимая величина мощности выходного шума, при которой обеспечивается заданная величина отношения сигнал/шум. Из

$$R_{uu}^D = 10 \lg \frac{10^{-D/10}}{2P_{uu}} = 10 \frac{-D}{10} - 10 \lg 2 - 10 \lg P_{uu} \approx -D(\text{дБ}) - 3.01 - P_{uu}(\text{дБ}),$$

где R_{uu}^D – заданное отношение сигнал/шум на выходе; P_{uu} – мощность полного выходного шума, получается:

$$P_{u, \text{доп}} = \sigma_{\text{вых, доп}}^2 = \frac{10^{-D/10}}{2 \cdot 10^{R_{uu}^D/10}} = \frac{1}{2} 10^{-\frac{D+R_{uu}^D}{2}}.$$

3. Оценивается величина дисперсии собственного шума системы $\sigma_{\text{сис}}^2$ по формуле

$$\sigma_{\text{сис}}^2 = \int_{-\Delta x/2}^{\Delta x/2} e_k^2 \rho(e_k) de = \frac{1}{3\Delta x} \left(\left(\frac{\Delta x}{2} \right)^3 - \left(-\frac{\Delta x}{2} \right)^3 \right) = \frac{\Delta x^2}{12} = \frac{(2^{-b})^2}{12} = \frac{2^{-2b}}{12}, \quad (3.2)$$

где $\rho(e_k)$ – плотность вероятности ошибки квантования e_k при округлении и усечении; x – величина шага квантования $\Delta x = 2^{-b}$.

4. Оценивается допустимая величина дисперсии составляющей выходного

шума, обусловленной квантованием входного и выходного сигналов, при этом должно выполняться условие:

$$\sigma_{\text{вых,доп}}^2 \geq \sigma_{\text{вых,вх}}^2 + \sigma_{\text{вых,с}}^2 + \sigma_{\text{вых,ввых}}^2,$$

$$\sigma_{\text{вх+ввых}}^2 = \sigma_{\text{вых,вх}}^2 + \sigma_{\text{вых,ввых}}^2 \leq \sigma_{\text{вых,доп}}^2 - \sigma_{\text{вых,с}}^2.$$

5. Оценивается величина b_R – разрядность цифрового кода входного сигнала, при которой обеспечивается заданная величина отношения сигнал/шум без гарантии получения требуемой величины динамического диапазона.

Из выражения:

$$\sigma_{\text{вых}}^2 = \sigma_{\text{вх}}^2 \sum_{k=0}^{\infty} h^2(kT),$$

где $h(kT)$ – импульсная характеристика на входную последовательность $x(kT)$, и (3.2) получим:

$$\sigma_{\text{вх+ввых}}^2 = \sigma_{\text{вх}}^2 \sum_{k=0}^{\infty} h^2(kT) + \sigma_{\text{ввых,ввых}}^2 = \frac{2^{-2b}}{12} \left(1 + \sum_{k=0}^{\infty} h^2(kT) \right), \quad (3.3)$$

отсюда следует:

$$b_R = \frac{1}{2} \log_2 \frac{1 + \sum_{k=0}^{\infty} h^2(kT)}{12\sigma_{\text{вх+ввых}}^2}. \quad (3.4)$$

Величина b_R округляется в большую сторону.

6. Оценивается разрядность входного и выходного сигналов $\sigma_{\text{вх,ввых}}$, при которой обеспечиваются заданные величины динамического диапазона (3.1) и отношения сигнал/шум (4.4) $\sigma_{\text{вх,ввых}} = \max(b_D, b_R)$.

7. Оценивается реальная величина отношения сигнал/шум $R_{\text{ш}}^D$ при разрядности $\sigma_{\text{вх,ввых}}$ входного и выходного сигналов. Для этого оценивается величина мощности полного выходного шума:

$$P_{\text{ш}} = \sigma_{\text{ввых}}^2 = \sigma_{\text{вх+ввых}}^2 + \sigma_{\text{ввых,с}}^2$$

по формуле (3.1) $R_{\text{ш}}^D = -D(\text{дБ}) - 3.01 - P_{\text{ш}}(\text{дБ})$.

Принятие во внимание особенностей и формулировке требований к ЦСП

позволяют корректно осуществить преобразование аналоговых сигналов с датчиков в цифровые с учетом эффектов квантования по уровню и дискретизации по времени [90].

3.3. Применение регрессионного анализа к массиву мгновенных значений токов статора для диагностики обрыва стержня обмотки ротора

Токи в фазах статора АД, как и в других электрических двигателях переменного тока, содержат в себе всю необходимую информацию для определения технического состояния всех элементов АД, в том числе роторной цепи [91]. Любые повреждения в конструкции «беличьей клетки» вызывают несимметрию магнитного поля и его искажение. При работе АД искаженное магнитное поле ротора воздействует на всю магнитную систему машины, влияя тем самым на потребляемые токи.

Выявление внутреннего электрического повреждения вращающейся части электродвигателя, не имеющей электрической связи с источниками напряжения, является крайне трудной задачей. Задачу разработки диагностической системы следует разбить на три подзадачи:

- создание измерительной системы;
- создание экспериментальной установки, на которой возможно физически смоделировать обрыв стержня ротора АД, при этом иметь возможность регулировать количество оборванных стержней и многократно восстанавливать исходное состояние;
- выбор метода математической обработки экспериментальных данных и определения диагностического признака, достоверно связанного с обрывом стержня ротора.

На сегодняшний день главным методом обработки цифровых сигналов с датчиков токов статора для построения диагностических систем электрических машин является спектральный анализ на основе Фурье-преобразования, который не лишен недостатков. Недостатки Фурье-анализа:

1. Алгоритм обработки цифрового сигнала при помощи Фурье-преобразования проводится с помощью быстрого преобразование Фурье (БПФ). Для проведения БПФ исходный сигнал в виде временного ряда амплитуд откликов необходимо предварительно подготовить, применив оконную функцию (Бартлета, Блэкмана, Хемминга, Ланцоша, Ханна, Кайзера, Гаусса и др.). Такой широкий выбор оконных функций обусловлен необходимостью поиска оптимума растекания энергии спектра между частотными составляющими.

2. При использовании БПФ разрешение по частоте обратно пропорционально периоду наблюдения.

Помимо Фурье-преобразования, одними из основных методов обработки экспериментальных данных выступают методы аппроксимации, интерполяция и регрессия. Основная область применения интерполяции – это, в большинстве случаев, восстановление промежуточных значений в технологиях анализа данных. При аппроксимации экспериментальных данных методами интерполяции получаемая функция проходит строго через значения уровней отклика. Регрессия – это метод моделирования измеряемых данных, в котором получаемая описывающая функция строго не проходит через значения уровней отклика, описывая исходный сигнал приближенно [92].

При выборе метода обработки полученного массива значений модуля результирующего вектора токов статора первым требованием было сглаживание кривой получаемых экспериментальных значений для ограничения влияния неизбежных погрешностей измерения и противодействия шумам в каналах связи. Вторым требованием было описание исходного сигнала функцией, максимально приближенной к исходному сигналу, с возможностью регулирования точности описания сигнала.

Самым распространенным методом аппроксимации экспериментальных данных, наилучшим образом удовлетворяющим оба требования при решении поставленной задачи, является регрессионный анализ. Среди всего многообразия методов регрессионного анализа (полиномиальная, Байесовская, ридж-регрессия, степенная, гиперболическая и пр.) выделяется своими свойствами линейная

регрессия общего вида (она же криволинейная регрессия) [93]. Линейная регрессия общего вида дает возможность выбора функционального базиса и его размерности. Линейная регрессия общего вида представляется:

$$Y(x) = A_0 + A_1 \cdot \beta(x)_1 + \dots + A_m \cdot \beta(x)_m,$$

где A_0 – базовая составляющая; $A_{1\dots n}$ – коэффициенты при базисных функциях; β – базисные функции; m – критерий, определяющий количество заданных функций и коэффициентов.

Выбор базисных функций имеет определяющее значение при аппроксимации экспериментальных данных методом регрессии. Очевидно, что исходный сигнал модуля результирующего вектора будет иметь гармонический характер и для его описания логично применить функцию косинуса или синуса. Но, помимо основной гармонической составляющей, в данном сигнале присутствуют и другие несущие в себе полезную информацию составляющие. Поэтому видится целесообразным применение суммы гармонического ряда, где каждая функция косинуса или синуса кратна частоте основной гармоники.

Поскольку коэффициенты при базисных функциях определяют степени влияния их на получаемую модель, то они являются основным элементом описываемой функции. Для того чтобы сделать коэффициенты носителями информации описываемого сигнала и интерпретировать их как диагностический признак, по мнению автора, необходимо представить их как координаты вектора в n -мерном пространстве. Реализация этой идеи возможна, если функция каждого последующего коэффициента была бы ортогональна предыдущей функции, то есть их вектор-функции перпендикулярны друг другу, а их скалярное произведение равнялось нулю.

Такому требованию соответствует базис, состоящий из косинусов и синусов – ряд Фурье. При этом конечная описывающая функция будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \varphi(n) = & A_0 + A_1 \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot k_0 \cdot n) + B_1 \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot k_0 \cdot n) + \dots \\ & \dots + A_m \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot k_m \cdot n) + B_m \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot k_m \cdot n), \end{aligned} \quad (3.5)$$

где A_0 – базовый коэффициент (нулевая гармоническая составляющая); $A_{1\dots n}$ – коэффициенты при косинусах; $B_{1\dots n}$ – коэффициенты при синусах; \cos и \sin –

базисные функции; f_0 – базовая частота; $k_{0\dots m}$ – параметр, определяющий количество гармонических составляющих; m – количество гармонических составляющих.

Способ получения коэффициентов при базисных функциях является типичным для регрессионного анализа и подробно описан. При использовании метода наименьших квадратов, построенная по полученным коэффициентам кривая по критерию близости к описываемому сигналу соответствует минимальной сумме квадратов расстояний от каждой точки до описывающей функции:

$$\sum_{n=1}^N (I_{1M}(n)_n - \varphi(n)_n)^2 = \min$$

где N – количество экспериментальных точек (отсчетов); n – номер отсчета.

Вычисление коэффициентов происходит по ряду известных вычислений [94], запись которых займет значительный объем. Данный метод нахождения коэффициентов также операторно описан во многих пакетах математических программ.

Несмотря на то, что получаемые кривые имеют стационарный и предсказуемый характер, на них накладывается ряд не учитываемых факторов, влияющих на допустимый технологический диапазон измерений:

- ошибка квантования применяемого АЦП;
- соответствие процессоров ПК и АЦП (совместимость входных логических уровней);
- соответствие выбранных датчиков тока и других периферийных компонентов лабораторной установки схеме АЦП;
- качество питающей АД сети при проведении эксперимента;
- погрешность округления при математической обработке получаемого сигнала;
- другие неучтенные погрешности.

3.4. Экспериментальная установка для получения и цифровой обработки массивов мгновенных значений токов статора для нахождения диагностического признака обрыва стержня ротора

Для проведения экспериментов по обрыву стержня ротора была создана специализированная экспериментальная установка, отвечающая современным требованиям по цифровой обработке сигналов. Экспериментальная установка включает в себя:

- ЭВМ с установленной платой аналого-цифрового преобразования National Instruments 6024E и программным пакетом NI LabView;
- блок датчиков тока и напряжения LEM, соединенных через коннектор CB-68LP с платой АЦП шлейфом R6868;
- два АД по 3 кВт, один из которых работает как электродинамический тормоз, второй – испытуемый АД, с которого получают мгновенные значения токов статора;
- источник переменного трехфазного напряжения и пусковая аппаратура.

Функциональная схема установки представлена на рис. 3.13

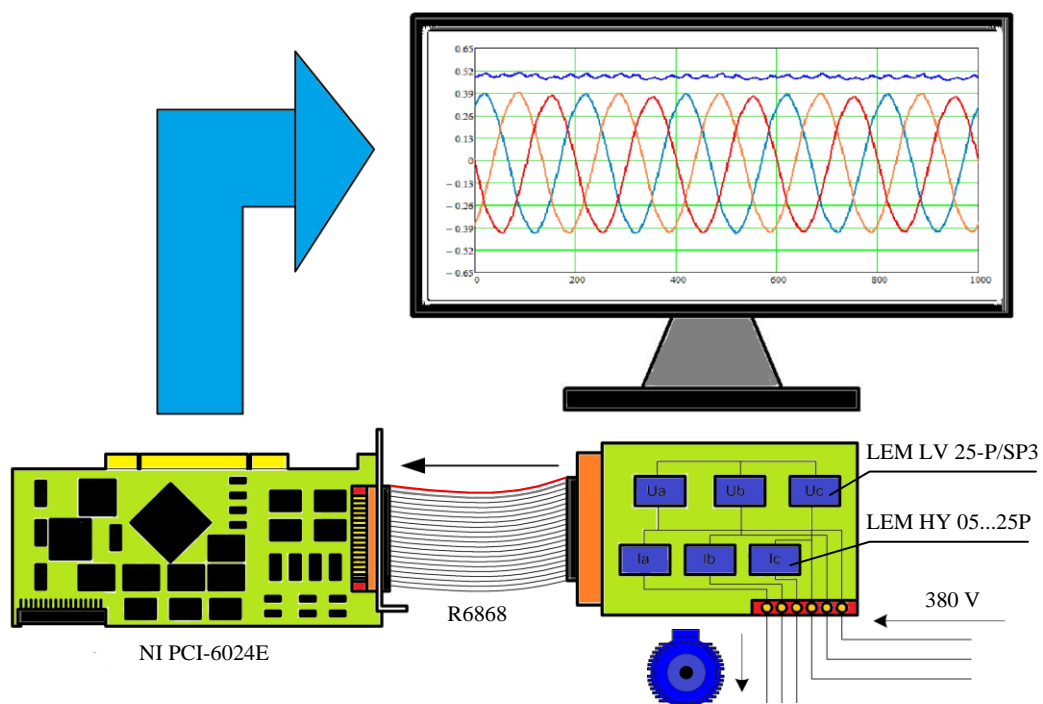


Рис. 3.13. Функциональная схема экспериментальной установки

3.4.1. Аппаратная часть экспериментальной установки

Питание испытуемого АД происходит напрямую от трехфазного источника питания (сеть 380 В), подключенного к зажимам машины последовательно с блоком датчиков токов и напряжений. Данные, получаемые в процессе работы двигателя, измеряются при помощи датчиков на эффекте Холла LEM HU 05...25P – датчик тока и LEM LV 25-P/SP3 – датчик напряжения, с гальванической развязкой между силовой и измерительной цепями. Информация передается на АЦП National Instruments PCI-6024E (рис. 3.14), установленный на материнской плате ПК. Плата имеет 16 однопроводных или 8 дифференциальных аналоговых входов с программируемым диапазоном от $\pm 0,05$ В до ± 10 В, АЦП 12 бит, 200 кГц, два ЦАП 12 бит, 8 дискретных линий ввода/вывода и два таймер-счетчика по 24 бит. В данной плате используется системный контроллер тактирования DAQ-STC, позволяющий реализовать такие операции, как буферизованное генерирование импульсов, эквивалентное временное сэмпирование, а также изменение скорости сэмпирования без возникновения помех.



Рис. 3.14. Плата АЦП NI PCI-6024E

Для получения обработанных данных и взаимодействия операционной системы ПК с АЦП была применена программная среда LabVIEW, поскольку в нее интегрирован терминал ввода (DAQ Assistant), связывающий АЦП с программой виртуального прибора. Формирование конечной информации происходит в требуемом для исследования формате, читаемом различными графическими (NI Diadem), табличными (MS Excel) и текстовыми (notepad) редакторами.

3.4.2. Реализация системы сбора данных с датчиков токов в программной среде LabVIEW

При выборе программного пакета NI LabVIEW от исследователя не требуется углубленных знаний языков программирования, поскольку все действия происходят в интуитивно понятной интерактивной графической системе и сводятся к простому построению структурной схемы. Функционирование программы может происходить непрерывно, и все результаты можно наблюдать на интерфейсной панели (Front Panel), либо получить временной ряд, собранный в файл необходимого формата.

Имеется возможность настройки всех подключений, приходящих по кабелю R6868 от коннектора ввода CB-68LP, и выбора требуемых параметров ввода данных (RSE, NRSE, DIFF). Там же настраивается частота дискретизации (сэмплирование) сигнала и продолжительность измерений.

На данной экспериментальной установке были получены мгновенные значения модуля результирующего вектора токов статора, активная и реактивная мощности АД. На рис. 3.15 показано, как при помощи LabVIEW это было реализовано на блок-диаграмме (Block Diagram) путем графического представления алгоритма, содержащего исходный код виртуального прибора.

При помощи данного алгоритма были получены временные ряды обобщенного вектора токов статора. Экспериментальная установка позволяет

более подробно рассмотреть результаты, уменьшив необходимую для исследования область до требуемого масштаба, вплоть до одного периода.

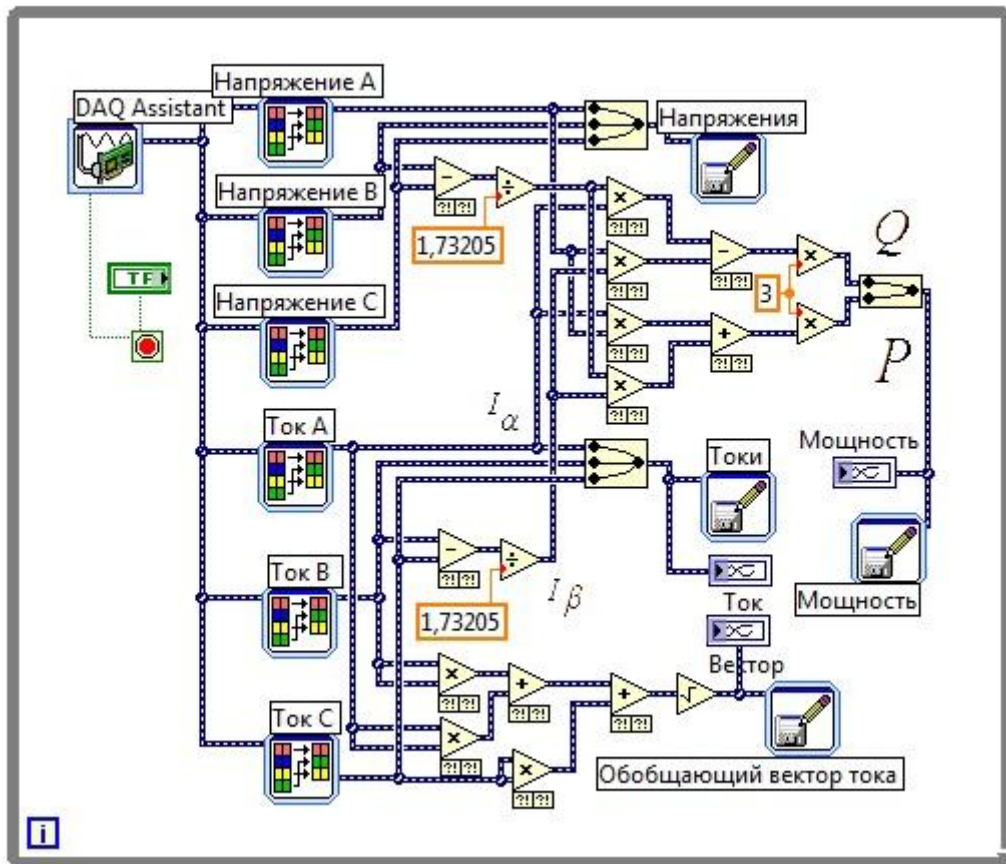


Рис. 3.15. Блок-диаграмма виртуального прибора

Так как частота дискретизации (сэмплирования) АЦП составляет 10 кГц, то он способен совершить 200 замеров за один период промышленной частоты. Что дает возможность получить точное графическое представление требуемых данных.

3.4.3. Силовая часть экспериментальной установки

Силовая часть экспериментальной установки, как сказано выше, состоит из двух АД, питаемых от источников разного напряжения. Испытуемый АД питается через пусковую аппаратуру трехфазным переменным напряжением, нагрузочный АД через выпрямитель постоянным напряжением, и только в тот момент, когда это требуется. Схема подключения обоих АД представлена на рис. 3.16.

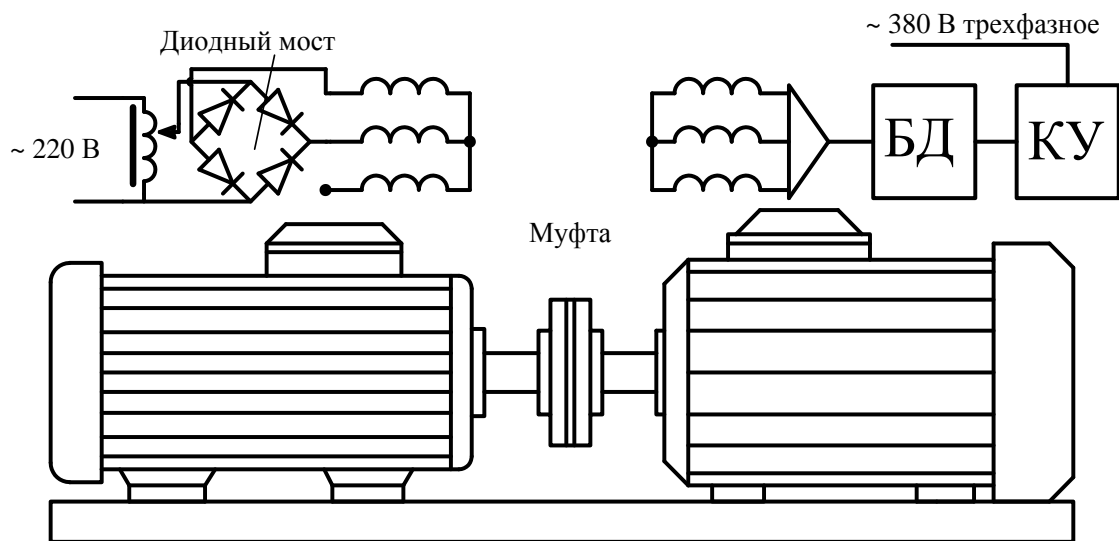


Рис. 3.16. Схема подключения асинхронных двигателей при проведении эксперимента, БД – блок датчиков; КУ – коммутационное устройство (электромагнитный контактор)

Для обеспечения тормозящего момента исследуемого АД, а также для создания махового момента в режиме холостого хода, вал АД через демпферную муфту механически соединен с аналогичным по мощности АД. На второй АД подавалось регулируемое постоянное напряжение (рис. 3.17). Данное решение позволяет создавать требуемые тормозные моменты в номинальном диапазоне и более, вплоть до полной остановки АД в режиме работы.



Рис. 3.17. Испытуемый АД в паре с аналогичным по мощности АД

3.4.4. Ротор испытуемого АД

Во всех ранее известных по литературным источникам экспериментальных установках обрыв стержня имитируется путем безвозвратного разрушения (рассверливания) алюминиевого стержня и части магнитопровода. При этом отсутствует возможность восстановления исходного состояния «беличьей клетки» и ротора и многократного повторения эксперимента.

С целью решения данной проблемы на испытуемом АД была проведена полная замена активной части ротора. Исходя из данных заводского ротора (диаметр и длина сердечника, количество стержней, диаметр вала и т. д.) были спроектированы и изготовлены пластины нового магнитопровода (рис. 3.18), в котором предусмотрены отверстия для расположения новой «беличьей клетки».

Для получения возможности электрического соединения стержней обмотки к короткозамыкающему кольцу она изготовлена из меди, поскольку для создания соединения можно применить пайку. Объединив пластины магнитопровода в единый пакет и расположив в отверстиях проводники обмотки, получившаяся конструкция была насажена на заводской вал (рис. 3.19).



Рис. 3.18. Пластины экспериментального магнитопровода

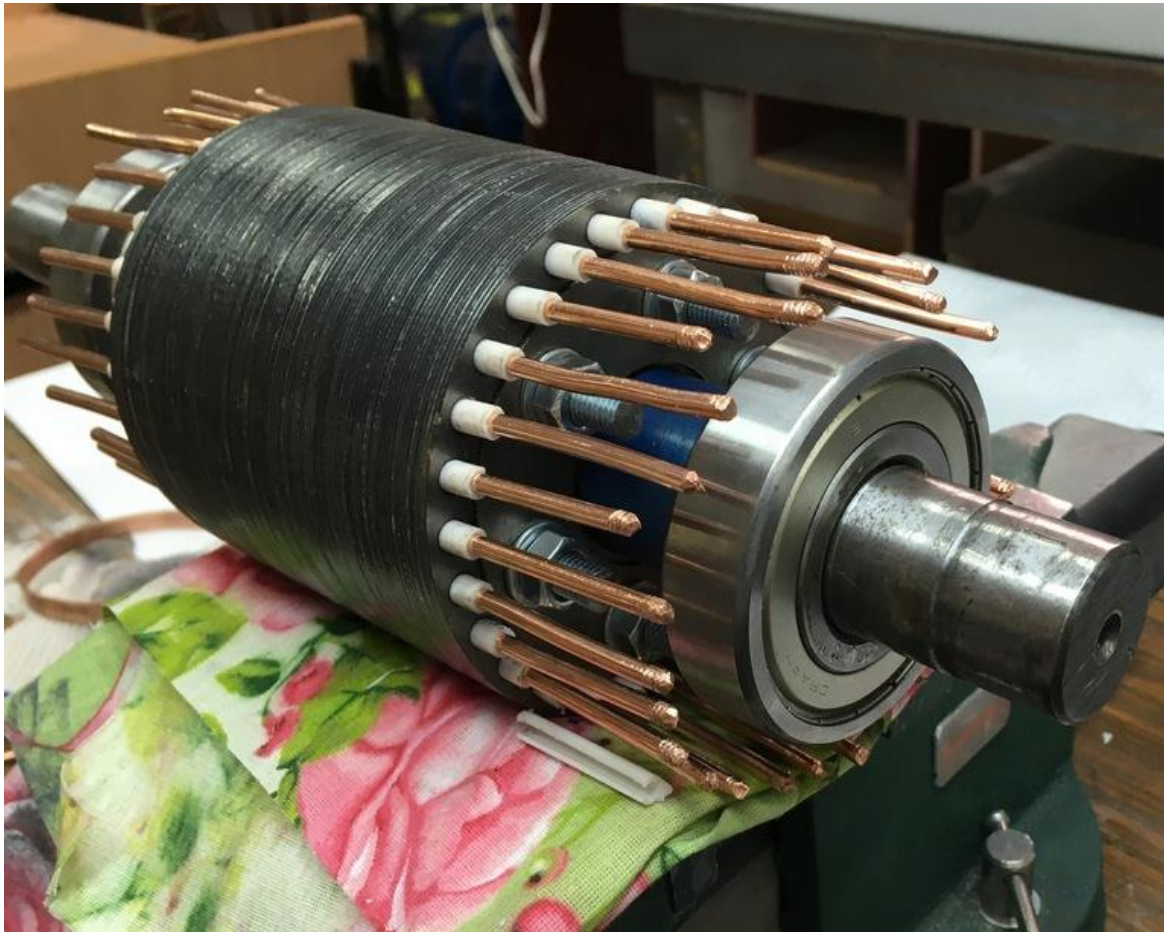


Рис. 3.19. Стержни ротора экспериментального АД

Короткозамыкающее кольцо изготовлено из медной полосы 10×2 мм и, как упоминалось выше, методом пайки оловянным припоем соединено со стержнями обмотки (рис. 3.20).

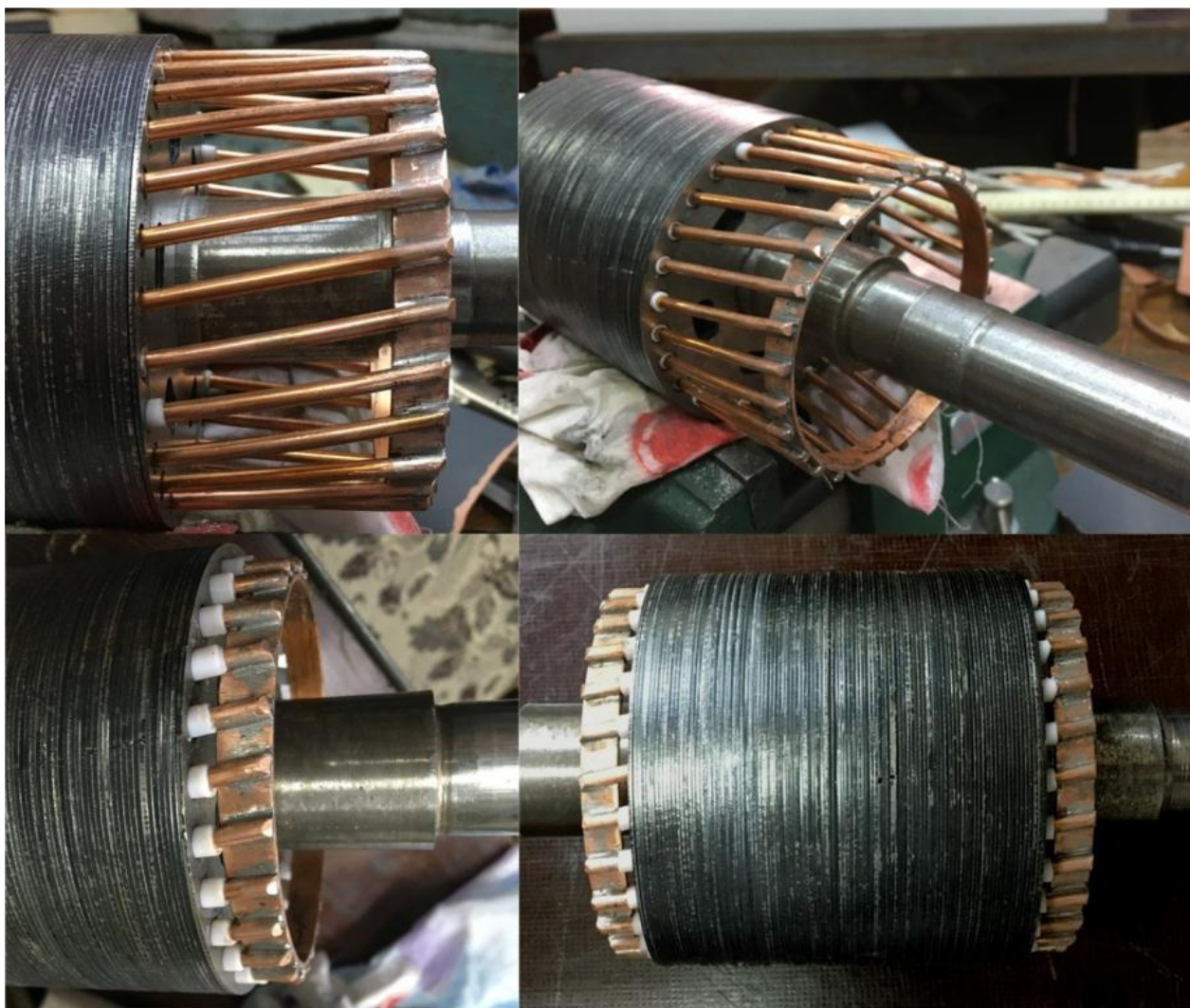


Рис. 3.20. Соединение стержней с короткозамыкающим кольцом

Получившаяся конструкция позволяет регулировать количество оборванных стержней, отпаявая их. При этом, если необходимо восстановить первоначальное состояние обмотки ротора, это делается восстановлением в исходное состояние. Следует отметить, что отсоединять стержни возможно в разных местах (на противоположных полюсах, на обоих короткозамыкающих кольцах и т. д.) [100].

Готовый экспериментальный ротор показан на рис. 3.21, из которого видно, что получившейся ротор соответствует размерам и характеристикам ротора заводского исполнения.



Рис. 3.21. Готовый экспериментальный ротор с обрывом стержня

Исследуемый АД с адаптированным магнитопроводом и обмоткой ротора показал полную работоспособность и пригодность к проведению экспериментов с обрывом стержня «беличьей клетки».

3.4.5. Полученные данные

На описанной выше экспериментальной установке были получены временные ряды значений токов и напряжений по трем фазам статорной цепи испытуемого АД, а также модуль результирующего вектора токов статора. Получение этих данных проводилось во время работы АД в режимах: пуск, холостой ход, включение нагрузки, работа под нагрузкой, снятие нагрузки. Также эксперимент проводился в разных состояниях повреждения роторной цепи: без повреждений, повреждены один, два, три, четыре стержня.

Экспериментальные кривые были представлены в виде таблицы, включающей в себя данные пяти экспериментов. Пример кривой сигнала представлен на рис. 3.22.

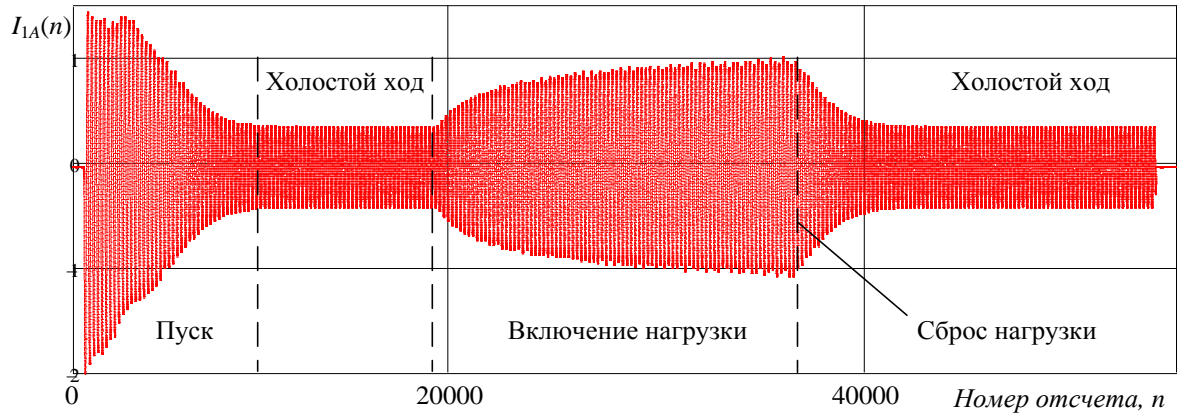


Рис. 3.22. Кривая переменного тока фазы «А» $I_{1A}(n)$, потребляемого исследуемым АД в режиме пуска, холостого хода, нагрузки

Как видно, экспериментальные данные токов трех фаз регистрируются на протяжении времени, достаточного для развития и прекращения переходных процессов пуска и нагрузки, а также холостого хода.

На рис. 3.23 представлена кривая мгновенных значений модуля результирующего вектора токов статора.

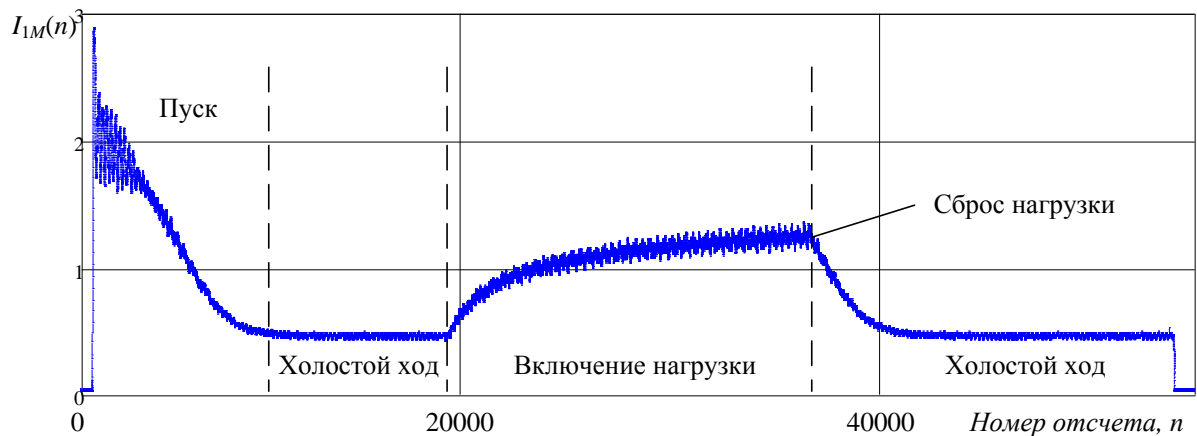


Рис. 3.23. Кривая мгновенных значений модуля результирующего вектора токов статора $I_{1M}(n)$

Выводы по 3 главе

1. Определена схема подключения АД к сертифицированной измерительной установке для определения естественной несимметрии статорных обмоток. Методом аппроксимации кривой затухающего постоянного тока был оценен уровень естественной несимметрии статорных обмоток исследуемого АД.

2. Спроектирован и создан прототип ротора с «беличьей клеткой» из меди, конструктивно подобной обмотке ротора высоковольтному АД. Экспериментальный ротор позволяет обеспечить многократную повторяемость повреждения и регулировать количество оборванных стержней.

3. Создана экспериментальная установка для исследования обрыва стержня обмотки короткозамкнутого ротора АД, сбор данных в которой производится с частотой дискретизации 10 кГц и разрядностью АЦП 12 бит. Разработана программная часть экспериментальной установки, позволяющая в непрерывном режиме обрабатывать мгновенные значения.

4. МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРИЗНАКА ОБРЫВА СТЕРЖНЯ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

На основе данных полученных на разработанной математической модели был предложен и апробирован метод выделения диагностического признака наличия обрыва короткозамкнутой роторной цепи АД. Метод основан на регрессионном анализе модуля результирующего вектора токов статора. На рис. 4.1 представлена одна из кривых полученных в результате моделирования и кривая полученная путем регрессионного анализа математической модели.

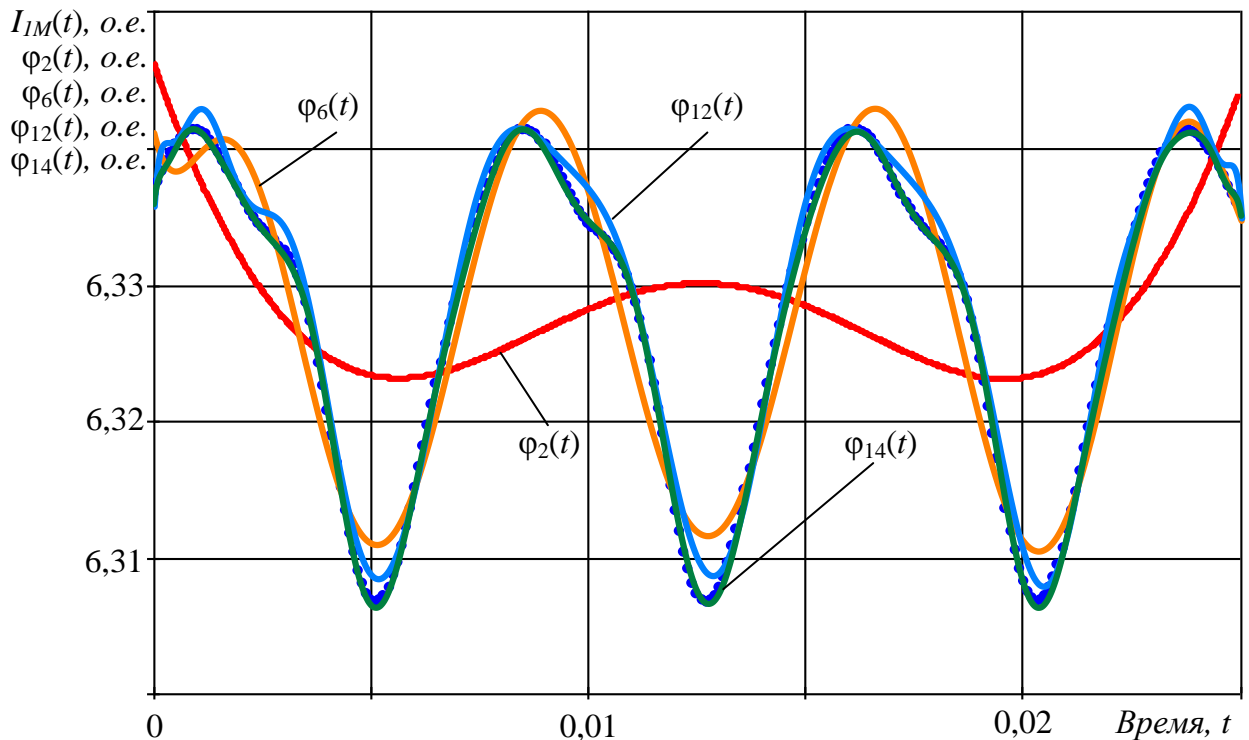


Рис. 4.1. Семейство кривых регрессионной модели, построенных на основе аппроксимации модуля результирующего вектора токов статора $I_{1M}(t)$ полученного математическим моделированием при количестве гармонических составляющих равным двум $\varphi_2(t)$, шести $\varphi_6(t)$, 12 $\varphi_{12}(t)$ и 14 $\varphi_{14}(t)$,

Как описывалось ранее математическое описание данных имеющих явный гармонический характер необходимо производить применяя гармонический базис. Как видно из рис. 4.1 полное описание регрессионным анализом

математической модели исходных данных происходит при количестве гармонических составляющих более 14.

Основываясь на данном свойстве и применяя данные полученные на экспериментальной установке предложено разработать метод выделения диагностического признака определяющего несимметрии вносимые в статорную цепь обрывом стержня ротора.

Фурье-базис обладает свойствами ортогональности, что позволяет получить функцию аналитического описания заданной точности с наиболее коротким отрезком экспериментальных данных, а так же способствует успешному решению обратных некорректно поставленных задач [95].

Полученная по 200 измерениям (один период 50 Гц) временная диаграмма модуля результирующего вектора тока статора и временные диаграммы настраиваемой регрессионной модели, построенные с размерностью базиса 3, 12 и 50 гармонических составляющих, представлены на рис. 4.2.

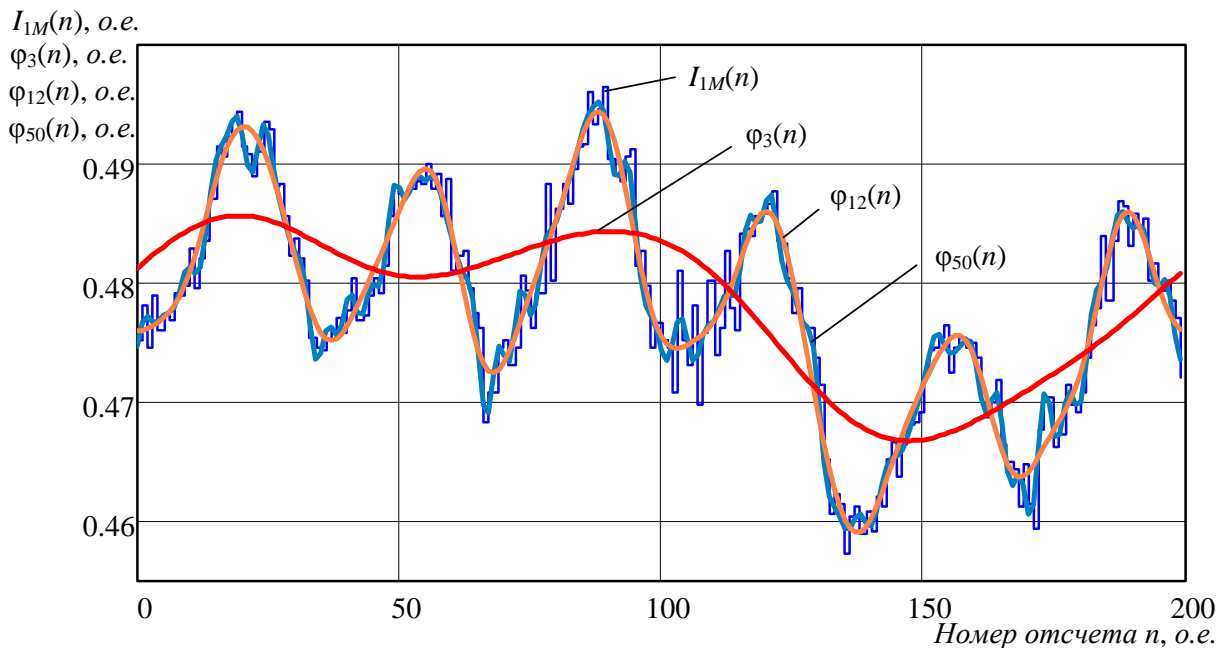


Рис. 4.2. Семейство кривых регрессионной модели, построенных с разным количеством гармонических составляющих: $I_{1M}(n)$ – временная диаграмма модуля результирующего вектора тока статора, полученная на основе экспериментальных данных; $\varphi_{3,12,50}(n)$ – временная диаграмма настраиваемой регрессионной модели, построенная с размерностью базиса 3, 12 и 50 гармонических составляющих

Среди всего многообразия способов получения весовых коэффициентов при базисных функциях был выбран наиболее оптимальный с точки зрения аппаратной реализации и точности – метод наименьших квадратов, который позволит определить наиболее точную по отношению к форме исходной кривой аппроксимирующую функцию.

МНК аппроксимирует данные опыта из условия минимума суммы квадратов отклонений от экспериментальных точек. Также указанный способ может быть применен к задачам идентификации параметров динамических объектов, то есть вычисляет коэффициенты дифференциальных уравнений, описывающих исследуемые процессы.

Аппроксимация, в случае применения МНК, сводится к определению вида функции, по форме максимально приближенной экспериментально снятым точкам. Эта аналитическая функция, как правило, имеет различные функции – линейная, степенная, экспоненциальная, логарифмическая и др. Находятся коэффициенты, содержащиеся в аналитическом описании определенной функции, которые определяются из условия минимизации среднеквадратичной погрешности. По полученным значениям коэффициентов возможно построение аппроксимирующей функции и определение необходимых параметров исследуемого динамического объекта.

Такой способ описания экспериментальных данных дает возможность регулировать точность описываемой функции путем добавления и уменьшения гармонических составляющих базисных функций. При использовании ряда Фурье он сходится к исходному экспериментальному сигналу, по известной теории тригонометрических рядов, при количестве гармоник, стремящихся к бесконечности [96]. Это позволяет адаптировать математическую часть разрабатываемого метода к аппаратной части микропроцессорного контроллера, найдя оптимальный баланс между точностью и вычислительными возможностями. На рис. 4.3 показана зависимость точности описания от размерности базиса.

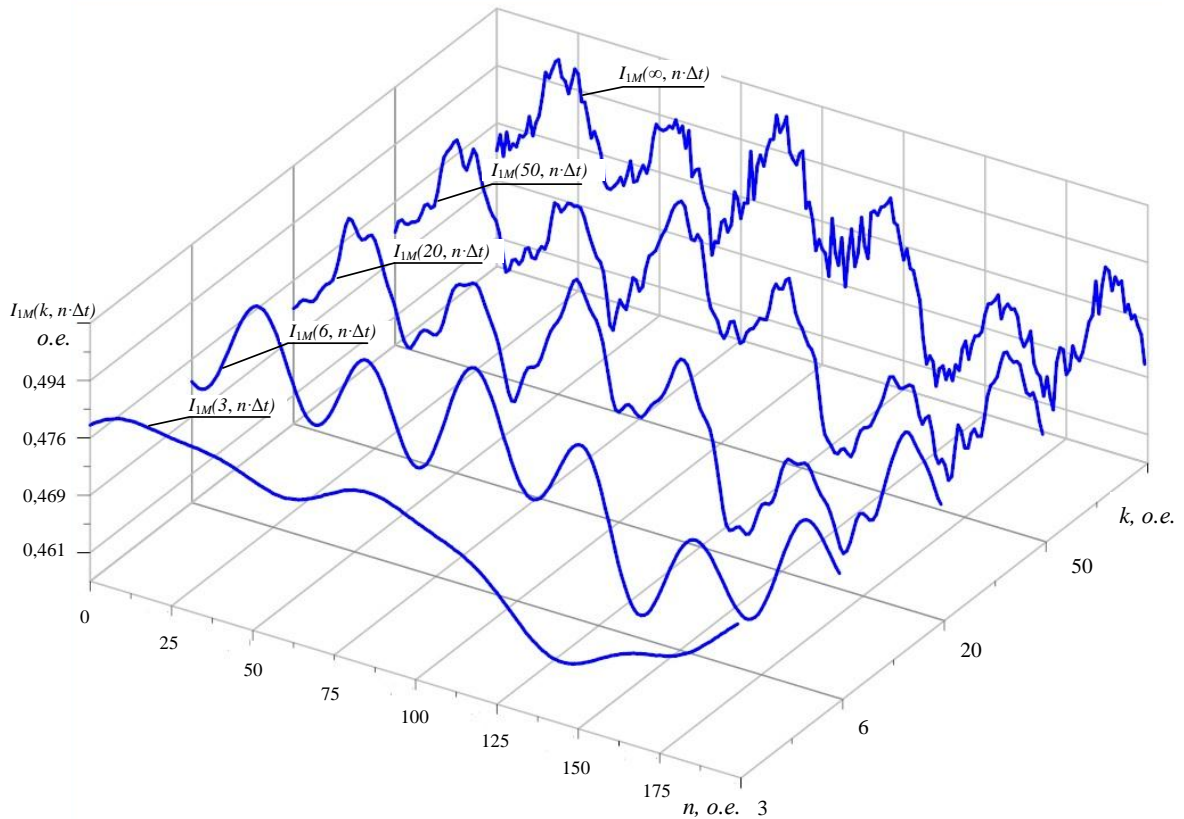


Рис. 4.3. Семейство временных диаграмм результирующего модуля векторов токов статора восстановленного на основе гармонического анализа при различной размерности гармонического базиса 3, 6, 20, 50 k .

4.1. Исследование влияния размерности регрессионной модели на дисперсию остатков по результатам обработки экспериментальных данных, полученных для исправного и поврежденного роторов АД

Для реализации алгоритмов разрабатываемой диагностической системы необходимо знать точное количество составляющих базисных функций. От этого показателя зависит ее чувствительность и точность. Но значительное повышение точности влечет за собой повышенный расход вычислительных ресурсов микропроцессора, используемого в устройстве диагностики.

Для определения оптимальной размерности базиса регрессионной модели, в первую очередь, необходимо описать полученные экспериментальные данные всем спектром его размерностей, при разной величине исходного сигнала и в

разных состояниях ротора АД. Выбрать критерий повреждаемости и охарактеризовать информацию об адекватности аппроксимирующей функции. Для этого воспользуемся анализом регрессионных остатков (рис. 4.4) [97].

Регрессионные остатки определяются по формуле

$$\varepsilon(n) = I_{1M}(n) - \varphi(n).$$

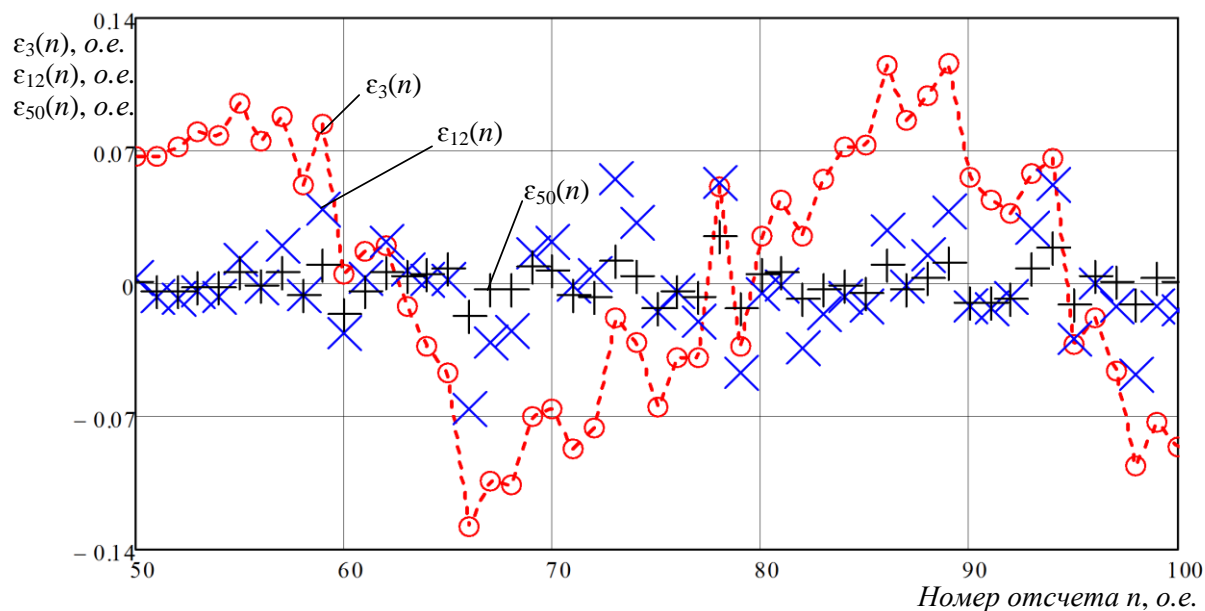


Рис. 4.4. Регрессионные остатки ε для 3, 12, 50 составляющих размерности базиса

Анализ регрессионных остатков, в основном, проводится с целью оценки гомоскедастичности временного ряда, при этом выявляется отсутствие необъяснимых зависимостей описывающей функции. Данное понятие означает неоднородность наблюдений, выраженную в непостоянной дисперсии ошибки регрессионной модели. Для анализа на гомоскедастичность можно использовать следующие методы:

- тест Ансари-Брэдли;
- критерий Голдфельда-Кванта;
- тест Бройша-Пагана;
- тест Глейзера;
- тест ранговой корреляции Спирмена.

Поскольку исследуемые сигналы инициируются одним и тем же объектом и являются достаточно однородными, становится оправданным применение в качестве критерия оценки адекватности модели одного из основных условий методов регрессионного анализа, а именно то, что регрессионные остатки некоррелированы между собой и имеют постоянную дисперсию [96]. С практической точки зрения достаточно воспользоваться простым методом визуального анализа, сводящимся к оценке математического ожидания и дисперсии остатков. Дисперсия для выборки несгруппированных данных определяются как:

$$\sigma(k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon(k)_i^2}{N}},$$

где ε – разница между экспериментальным значением и описывающей функцией (регрессионные остатки, N – количество отсчетов, k – количество гармонических составляющих).

На рис. 4.5 показаны значения зависимости дисперсии от ширины используемого ортогонального базиса, полученные путем обработки одних и тех же экспериментальных данных с разной точностью описывающей функции от 3 до 99 составляющих базиса.

Для этого решено выбрать несколько временных рядов размером 50, 100, 200, 400 и 800 точек экспериментальных данных установившегося режима работы АД с неповрежденным ротором. На рис. 4.6 показаны кривые зависимости дисперсии от размерности базисной функции при разных размерах исследуемого временного ряда.

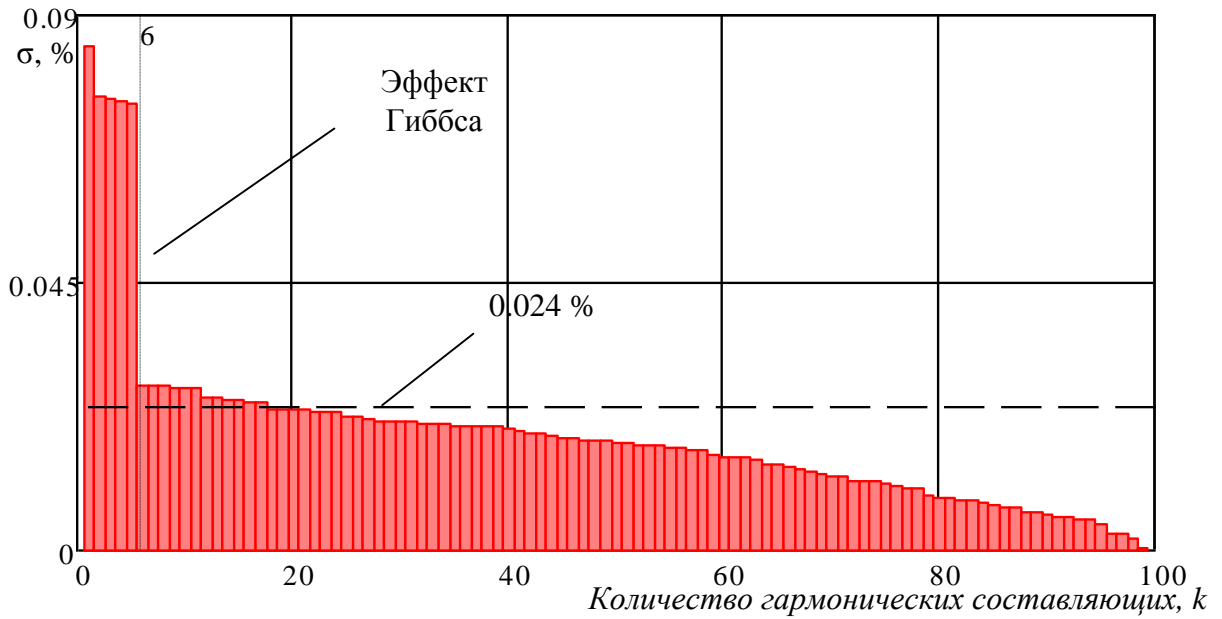


Рис. 4.5. Зависимость оценки дисперсии регрессионных остатков ε от размерности регрессионной модели k (от 1 до 99) при размере массива $n = 200$ отсчетов

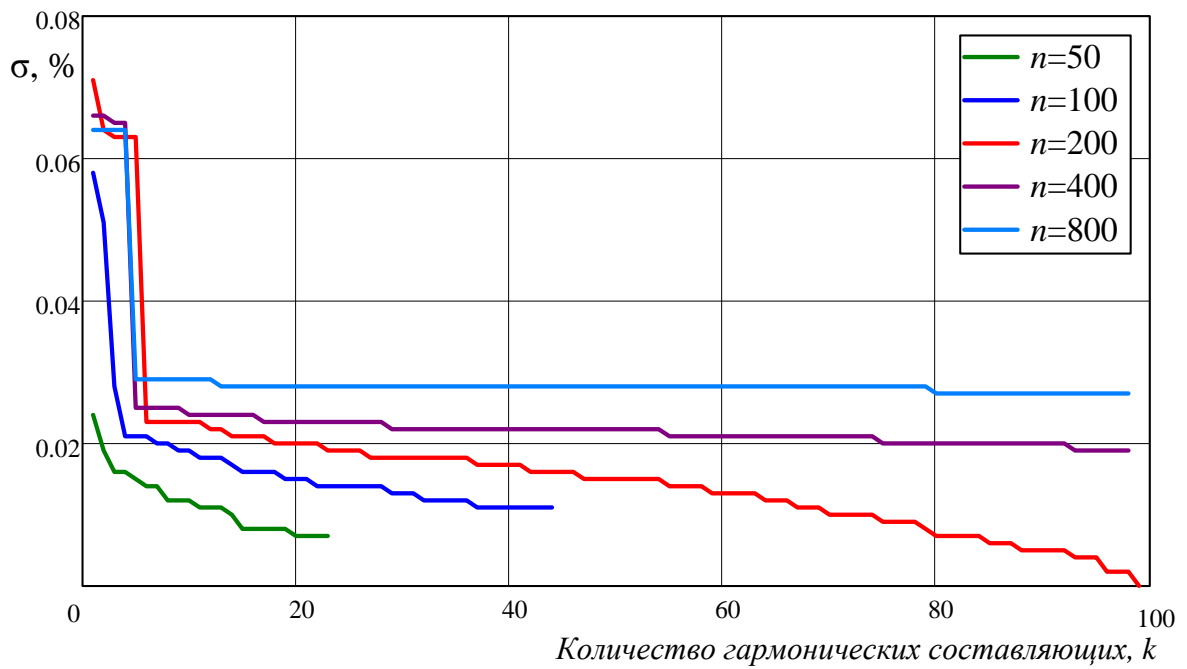


Рис. 4.6. Семейство кривых зависимостей оценки дисперсии регрессионных остатков от ширины временного окна n относительно количества базисных функций k

Кривые, представленные на рис. 4.6, показывают некоторую зависимость влияния величины экспериментальных данных на уровень оценки дисперсии в сторону приближения к исходной описываемой кривой после пяти

составляющих для $n = 400$ и 800 отсчетов и после шести для $n = 200$. А также, определено, что применять размерность меньше шести составляющих, нецелесообразно при любом размере экспериментальных данных из-за явлений, обусловленных наличием разрыва функции и стремлением к значению, равному среднеарифметическому слева и справа от нее – явление Гиббса [89]. Из рис. 4.5 видно, что наиболее приемлемым размером данных для дальнейшего анализа является 200 точек. Следует отметить, что, исходя из параметров АЦП и частоты дискретизации аналогового сигнала в 10 кГц, данный размер сигнала соответствует одному периоду синусоидального переменного тока с частотой 50 Гц.

Как видно из рис. 4.5, график зависимости оценки дисперсии регрессионных остатков от размерности регрессионной модели заметно выравнивается после шести составляющих размерности базиса и повышается его гомоскедантность, следовательно эту величину следует рассматривать как нижний порог размерности. Из рис. 4.5 также видно, что с повышением размерности базиса аппроксимирующей функции дисперсия регрессионных остатков снижается и, следовательно, повышается ее степень приближения к исходным данным. Для получения более полной картины описания экспериментальных данных и подтверждения нижнего порогового значения размерности базисной функции необходимо исследовать зависимость дисперсии всего диапазона размерностей к разным размерам исходных данных и при разных состояниях ротора АД.

Определение размерности представляет собой не только определение нижнего предела набора функций, но и верхнего предела, выше которого нецелесообразно расширять базис. Для оценки верхнего предела размерности в данной работе основным критерием была выбрана неустранимая погрешность от аналого-цифрового преобразования используемой платы АЦП National Instruments 6024Е. Неустранимая погрешность является следствием ограниченного разрешения АЦП и округления получаемого сигнала, данная особенность называется ошибкой квантования.

На используемой при исследованиях плате сбора данных NI 6024E применен 12-разрядный АЦП, уровень квантования которого равен 2^{12} и составляет 4096. Исходя из этого уровня, ошибка квантования составляет 0,024 %. Необходимо определить такую размерность базиса, при которой дисперсия остатков будет принимать значения, соответствующие значению ошибки квантования. Для этого был составлен график (рис. 4.7), на котором изображены кривые дисперсии размерности данных в 200 точек с повреждением роторной цепи АД и при целом состоянии обмотки ротора. На этот график наложена прямая, определяющая ошибку квантования АЦП с целью визуального представления соотношений.

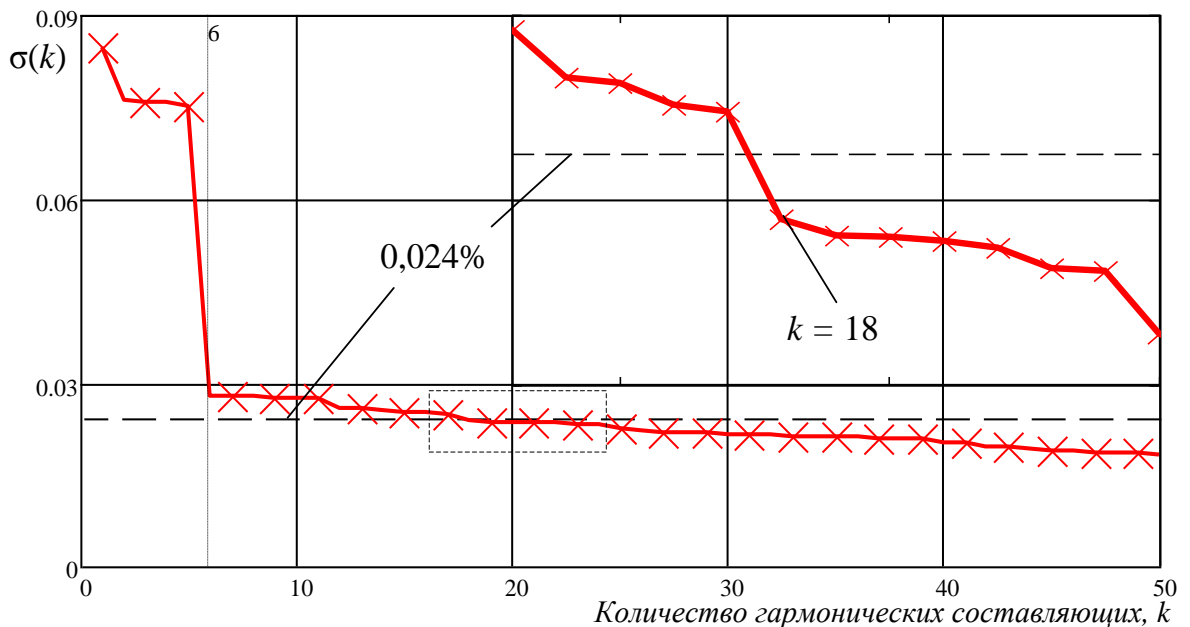


Рис. 4.7. Кривые дисперсии и ошибка квантования

Из рис. 4.7 видно, что точка пересечения кривой оценки дисперсии регрессионных остатков σ для массива размером $n = 200$ отсчетов с уровнем гарантированной погрешности АЦП (шума квантования) $\delta = 0,024\%$ находится между значениями 17 и 18 гармоник. Из этого следует, что для аппроксимации исследуемого массива целесообразно использовать размерность базисной функции выше 18 гармонических составляющих.

4.2. Критерий наличия обрыва стержня обмотки ротора асинхронного двигателя

Для корректной работы системы диагностирования обрыва стержня ротора АД необходимо получить чувствительный к данному виду повреждения диагностический признак и по возможности выявить критерий наличия обрыва стержня «беличьей клетки» ротора, пропорционально зависящий от количества оборванных стержней (зависимость численного уровня критерия от степени развития повреждения).

Поскольку выбранный базисный функционал обладает свойствами ортогональности, то это дает возможность использовать весовые коэффициенты как координаты изображающего вектора в k -мерном ортогональном гиперпространстве. Полученные результаты можно представлять как векторы с координатами изображающего вектора и производить с ними действия по законам векторной алгебры и аналитической геометрии [98]. Для нахождения диагностического признака, соответствующего заведомо исправному состоянию двигателя, необходимо получить многократно подтвержденную кривую модуля результирующего вектора токов статора одного и того же АД (рис. 4.8).

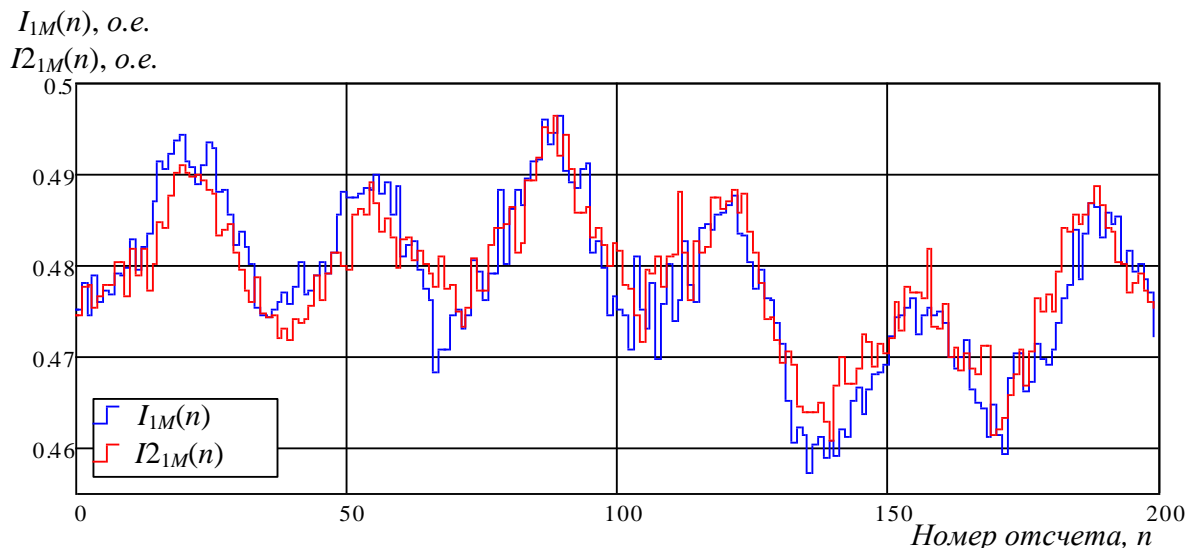


Рис. 4.8. Две кривых мгновенных значений заведомо исправного состояния ротора АД I_{1M} и I_{21M} размером $n = 200$ отсчетов, полученные в разные временные интервалы одного эксперимента

Затем аппроксимировать эти данные с помощью регрессионного анализа, как это описано ранее, и получить два набора весовых коэффициентов A и B . Представить оба набора весовых коэффициентов в виде изображающих векторов, координатами которых служат их весовые коэффициенты.

Получены два вектора коэффициентов заведомо исправного состояния $\mathbf{V}(vA_1, vB_1, \dots, vA_p, vB_p)$ и $\mathbf{V1}(v1A_1, v1B_1, \dots, v1A_p, v1B_p)$, где vA, vB – весовые коэффициенты при базисных функциях косинуса и синуса в составе регрессионной модели, полученной на основе регрессионного анализа мгновенных значений модуля результирующего вектора токов статора I_{1M} в заведомо исправном состоянии. И $v1A, v1B$ – такие же коэффициенты при базисных функциях косинуса и синуса регрессионной модели, полученной на основе регрессионного анализа мгновенных значений модуля результирующего вектора токов статора I_{1M} в заведомо исправном состоянии, но в другом интервале времени.

В качестве диагностического признака предлагается использовать величину вектора, определенную путем векторного вычитания между двумя изображающими векторами весовых коэффициентов при базисных функциях исследуемой и заведомо неповрежденной машины.

Чтобы определить величину диагностического признака, сначала надо вычесть вектор $\mathbf{V1}$ из вектора \mathbf{V} , получив новый вектор – вектор-разница $\mathbf{L} = \mathbf{V}(vA_1, vB_1, \dots, vA_p, vB_p) - \mathbf{V1}(v1A_1, v1B_1, \dots, v1A_p, v1B_p)$. Исходим из того, что поскольку сравниваются два относительно одинаковых сигнала, взятых в разные периоды времени, то и уровни весовых коэффициентов не должны сильно отличаться. На рис. 4.9 показано распределение спектра и влияние весового коэффициента на функцию косинуса или синуса рассматриваемого диапазона частот.

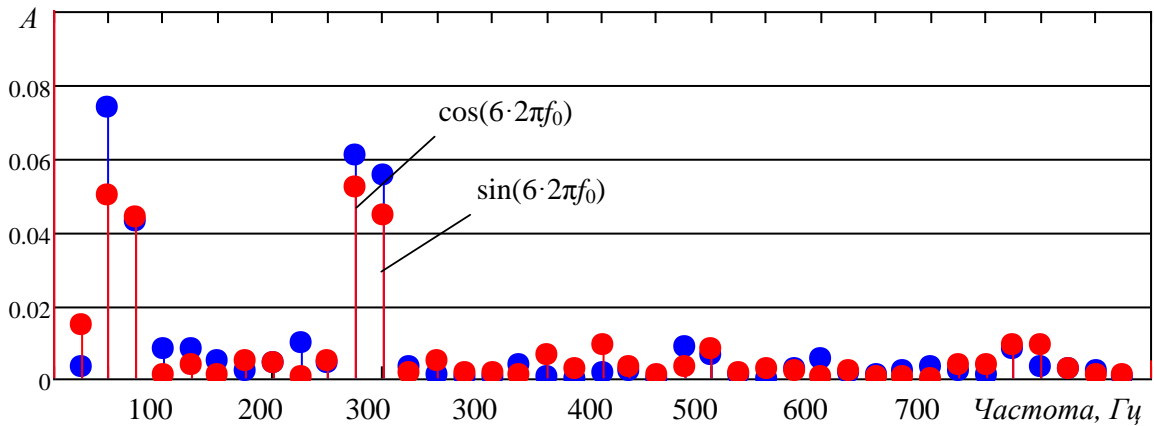


Рис. 4.9. Анализ спектрального косинусно-синусного состава двух сигналов неповрежденного состояния ротора АД

Из рис. 4.9 видно, что основой гармонического состава обоих сигналов являются косинусы и синусы 50, 100 и 300 Гц. Сигналы мало отличаются друг от друга, отличие составляет сотые доли их амплитуд.

Критерием повреждаемости обмотки ротора может служить отношение модулей векторов \mathbf{V} и \mathbf{L} , выраженное в процентах:

$$\gamma_{\text{уст}} = \frac{|\mathbf{L}|}{|\mathbf{V}|} \cdot 100\%.$$

На рис. 4.10 показана геометрическая интерпретация определения диагностического признака. Предложен трехмерный фрагмент гиперпространства с координатами в виде весовых коэффициентов вектора, отложенного в нем. На рис. 4.9 показаны построенные по таким координатам векторы исправного состояния \mathbf{V} и $\mathbf{V1}$ и их вектор-разница \mathbf{L} .

Длина вектора-разницы \mathbf{L} принята за базовую величину (ротор АД не поврежден), относительно которой строится установочный диагностический признак. При превышении данного уровня больше уставки, определяемой в зависимости от типа АД и аппаратной части диагностического устройства.

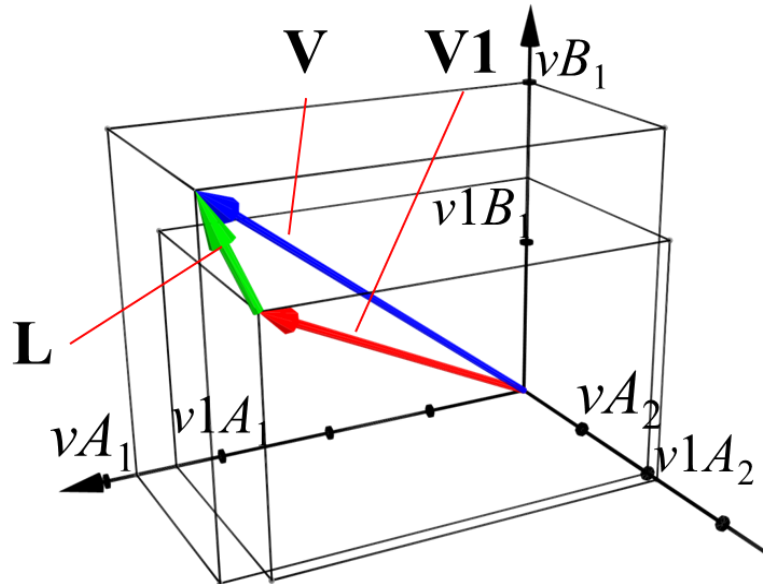


Рис. 4.10. Трехмерный фрагмент многомерного пространства с отложенными на нем векторами $\mathbf{V}(v_{A_1}, v_{B_1}, v_{A_2})$, $\mathbf{V1}(v_{1A_1}, v_{1B_1}, v_{1A_2})$, $\mathbf{L}(v_{A_1} - v_{1A_1}, v_{B_1} - v_{1B_1}, v_{A_2} - v_{1A_2})$, координатами которых являются весовые коэффициенты при базисных функциях регрессионной модели

Проведя аналогичные действия с АД, имеющим различную степень повреждения короткозамкнутой обмотки ротора, были получены значения диагностического признака γ в процентах. На рис. 4.10 показана гистограмма зависимости величины диагностического признака от степени повреждения роторной цепи АД. Как видно из рис. 2.14, исследуемый массив в целом состоянии роторной цепи представляет собой практически идеальную ровную линию, поэтому сравнивая два разных временных участка этого сигнала получается пренебрежительно малую величину (величина диагностического признака при целом роторе $\gamma = 0,0000417$ на холостом ходу и $\gamma = 0,000061$ при установившемся режиме под нагрузкой).

С возрастанием степени имитации повреждения ротора, исключая из расчетов поочередно 1, 2, 3 и 4 стержня, как на холостом ходу, так и под нагрузкой наблюдается значительное увеличение признака γ . Это объясняется тем, что все исследуемые состояния обрыва стержня сравниваются практически

с нулевым значением. Однако тенденция увеличения диагностического признака является показателем того, что признак изменяется тем больше, чем больше повреждена роторная цепь.

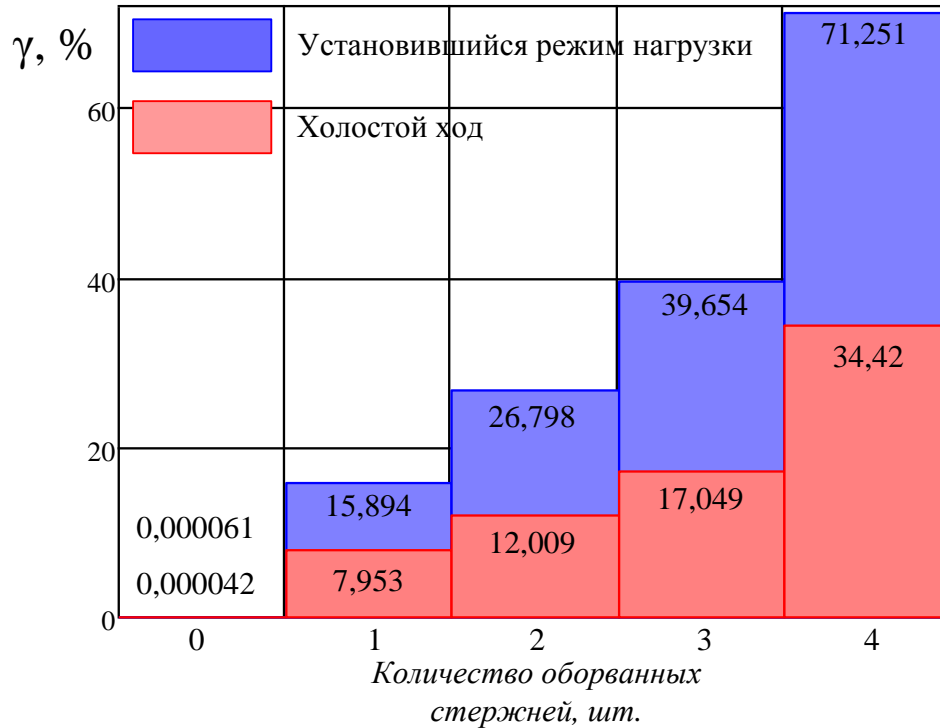


Рис. 4.11. Диаграмма зависимости величины диагностического признака γ от степени повреждения роторной цепи при обработке данных с имитационной модели

Для подтверждения изменения уровня диагностического признака при разном количестве оборванных стержней обмотки ротора на реальной машине были проведены эксперименты с отпаянными стержнями.

На рис. 4.12 показан испытуемый АД в сборе с ротором, у которого был отпаян стержень от короткозамыкающего кольца и изолирован диэлектрическим материалом для обеспечения гарантированного разрыва. Данный разрыв по внешним признакам (шум, вибрация, ненормальная работа и пр.) не повлиял на работу АД во всех режимах работы (пуск, холостой ход, нагрузка, снятие нагрузки).



Рис. 4.12. Ротор испытуемого АД с обрывом одного стержня в сборе со статором

Кривые массивов мгновенных значений модуля результирующего вектора токов статора с неповрежденной короткозамкнутой обмоткой ротора АД и с обрывом одного стержня представлены на рис. 4.13.

Как видно из рис. 4.13, обрыв одного стержня влияет на картину электромагнитного поля АД. Например, в режиме холостого хода заметны искажения кривой относительно неповрежденного состояния, а в режиме нагрузки некоторое повышение среднего уровня данного сигнала.

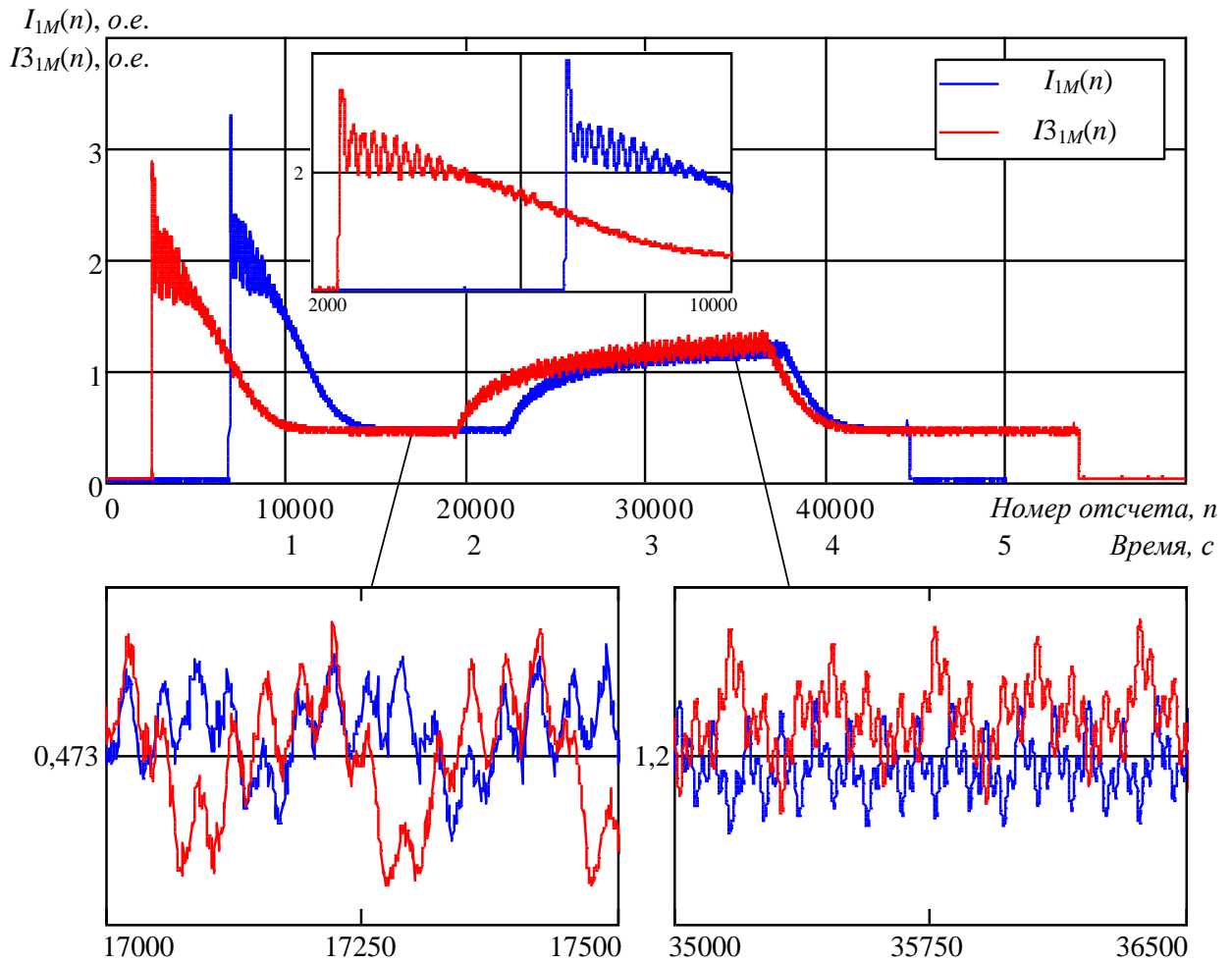


Рис. 4.13. Модуль результирующего вектора токов статора АД, полученный от двигателя с неповрежденным ротором $I_{1M}(n)$ и с повреждением одного стержня ротора $I_{31M}(n)$

Для определения степени влияния полученных искажений на диагностический признак необходимо выделить участок массива мгновенных значений установившегося режима (холостого хода) и сравнить его с таким же участком неповрежденного состояния АД.

На рис. 4.14 представлены два фрагмента кривой изменения модуля результирующего вектора токов статора размером $n = 200$ отсчетов (один период 50 Гц). Как видно, кривые схожи по своей форме, но отличаются по амплитудам и среднему значению.

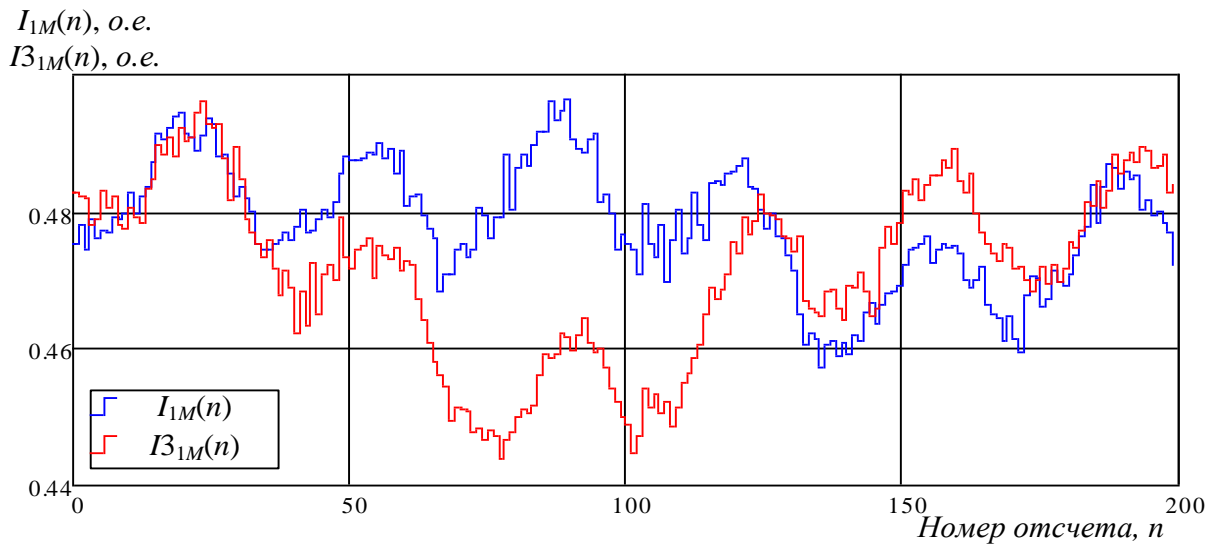


Рис. 4.14. Кривые мгновенных значений заведомо исправного состояния ротора АД I_{1M} и при повреждении одного стержня I_{31M} размером $n = 200$ отсчетов

Проведя регрессионный анализ полученного сигнала с повреждением роторной цепи, получен новый вектор коэффициентов заведомо неисправного состояния $\mathbf{U}(uA_1, uB_1, \dots, uA_p, uB_p)$, отличающегося от имеющегося вектора коэффициентов заведомо исправного состояния $\mathbf{V}(vA_1, vB_1, \dots, vA_p, vB_p)$. Где uA , uB – весовые коэффициенты при базисных функциях косинуса и синуса в составе регрессионной модели, полученной по модулю результирующего вектора токов статора I_{31M} с наличием обрыва одного стержня ротора. Спектральный состав полученных кривых представлен на рис. 4.15.

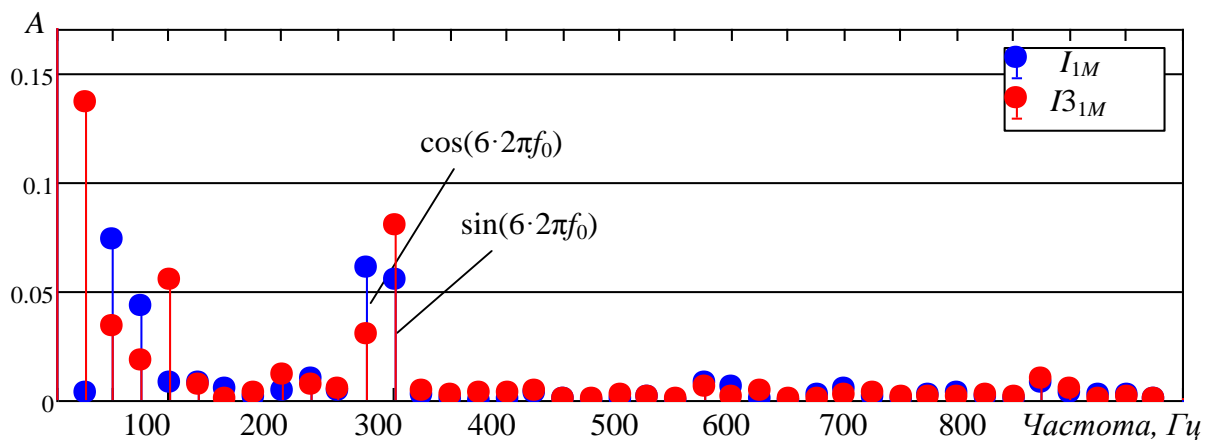


Рис. 4.15. Анализ спектрального косинусно-синусного состава кривой неповрежденного состояния ротора АД I_{1M} и с обрывом одного стержня I_{31M}

Из рис. 4.15 видно, что основой гармонического состава обоих сигналов также являются косинусы и синусы 50, 100 и 300 Гц, но с проявлением некоторых особенностей. Амплитуды некоторых гармоник при косинусах и синусах отличаются уже в большей степени, чем при сравнении кривых неповрежденного состояния ротора АД [101].

Согласно описанной выше последовательности действий, находится вектор-разница $\mathbf{L1}(vA_1-uA_1, vB_1-uB_1 \dots, vA_p-uA_p, vB_p-uB_p)$, и для получения диагностического признака необходимо выделить модули векторов \mathbf{V} и $\mathbf{L1}$ и разделить их, получив диагностический признак обрыва одного стержня ротора «беличьей клетки»:

$$\gamma = \frac{|\mathbf{L1}|}{|\mathbf{V}|} \cdot 100\%.$$

Для геометрической интерпретации данного действия на рис. 4.15 изображен трехмерный фрагмент гиперпространства с координатами \mathbf{V} , \mathbf{U} и $\mathbf{L1}$ в виде весовых коэффициентов [103, 104].

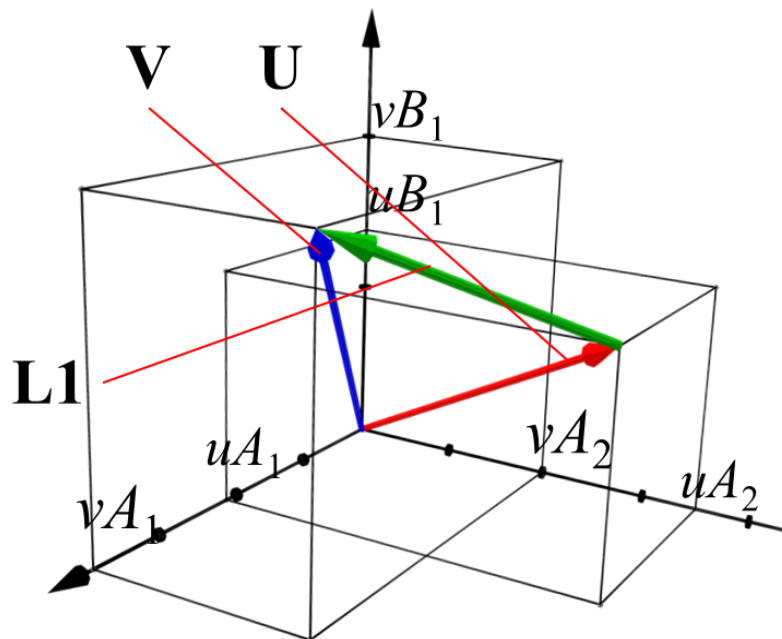


Рис. 4.16. Трехмерный фрагмент многомерного пространства с отложенными на нем векторами $\mathbf{V}(vA_1, vB_1, vA_2)$, $\mathbf{U}(uA_1, uB_1, uA_2)$,

$\mathbf{L1}(vA_1-uA_1, vB_1-uB_1, vA_2-uA_2)$, координатами которых являются весовые коэффициенты при базисных функциях регрессионной модели

Как видно из рис. 4.16, вектор-разница **L1** имеет большую длину по модулю, и соответственно диагностический признак имеет большую величину.

Проведя ряд экспериментов, были получены массивы мгновенных значений модуля результирующего вектора токов фаз статорной обмотки в пяти состояниях роторной цепи. Ротор без повреждения «беличьей клетки», с обрывом одного, двух, трех и четырех стержней. А также при двух установившихся режимах работы – холостого хода и нагрузки. Полученные значения диагностического признака представлены в виде гистограмм на рис. 4.17.

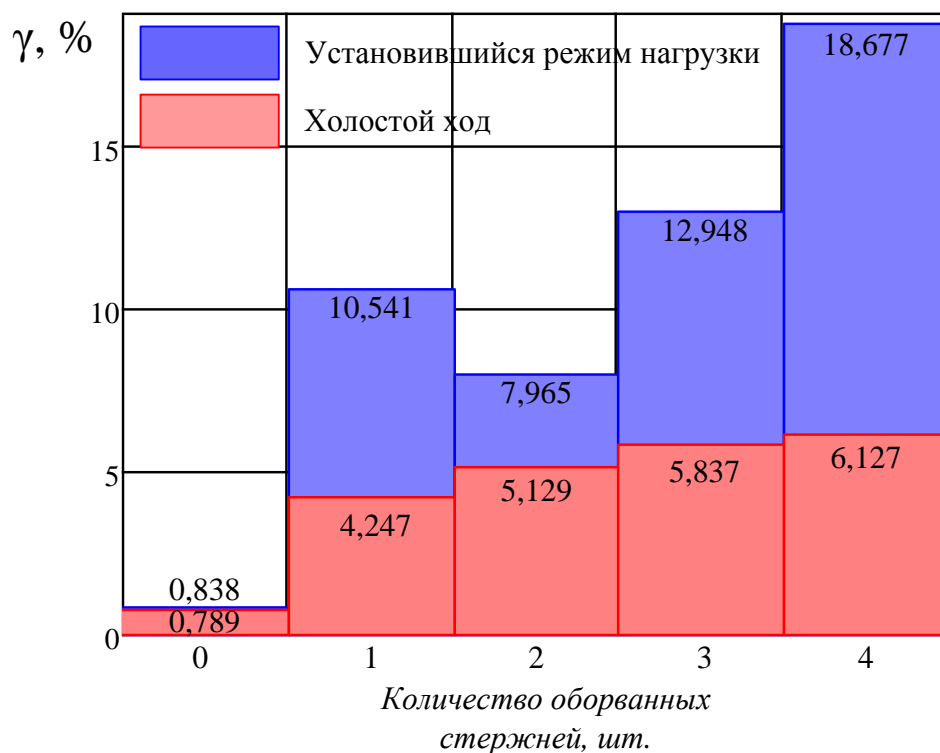


Рис. 4.17. Диаграмма зависимости выходного диагностического признака γ в % от количества оборванных стержней

Как видно из рис. 4.17, диагностический признак имеет зависимость от степени повреждения короткозамкнутой роторной цепи АД, с возрастанием количества оборванных стержней «беличьей клетки», возрастает и его размерность, как на холостом ходу, так и в установившемся режиме нагрузки.

В сравнении с существующими способами диагностирования обрыва стержня короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя, описанными выше,

представленный метод обладает высокой чувствительностью. Диагностический признак γ увеличивает свой уровень относительно исправного состояния более чем в четыре раза на холостом ходу и более чем в 10 раз при установившемся режиме нагрузки.

Предлагаемый метод обладает преимуществами технологической простоты и программной реализации при этом сочетая в себе повышенную чувствительность вплоть до одного стержня.

В таблице 4.1 представлен сравнительный анализ преимуществ и недостатков известных методов диагностирования и их чувствительность относительно не поврежденного состояния. В ней представлены критерии, сформированные на основе экспертной оценки значимости преимуществ разных методов диагностики. Такими критериями для методов диагностики АД являются:

1. Диагностика в режиме работы АД;
2. Обнаружение дефекта на ранней стадии;
3. Наличие внешних устройств и специальных датчиков;
4. Необходимость «обучать» систему диагностики;
5. Возможность адаптации под разные типы двигателей;
6. Воздействие внешних факторов на результат диагностики;
7. Повышенные требования к вычислительным мощностям устройства и наличие аппаратуры АЦП;
8. Перспектива расширения функционала устройства;
9. Чувствительность относительно целого состояния в %.

Методы диагностики, в свою очередь подразделены на основные их типы:

ТМ – термомониторинг;

ВД – вибродиагностика;

ША – шумовой анализ;

МССА – анализ сигнатуры тока статора;

ВА – вейвлет-анализ;

ВП – вектор тока Парка.

Предлагаемые к анализу методы диагностирования внутренних

повреждений асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой рассмотрены и изложены в главе 1 данного диссертационного исследования и описаны автором в работе [105].

Таблица 4.1. Сравнительный анализ предлагаемого метода диагностирования с существующими методами

Крит.	Методы диагностики АД						
	ТМ	ВД	ША	МССА	ВА	ВП	Предл.
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	-	-	+	+	-	+
3	-	-	-	+	+	+	-
4	+	+	+	+	-	-	+
5	+	+	+	-	-	-	+
6	+	-	-	+	+	+	+
7	+	+	+	-	-	-	-
8	-	-	-	+	+	+	+
9	26,3	12,8	32,8	5,8	6,21	4,98	3,18

При проведении данного анализа чувствительность определялась как процентное отношение количества оборванных стержней ротора к общему количеству стержней применяемом в работе двигателя.

4.3. Устройство для диагностики обрыва стержня ротора асинхронного двигателя

Для реализации метода диагностирования обрыва стержня короткозамкнутого ротора АД разработано устройство, блок-схема которого представлена на рис. 4.17. На вход подаются сигналы с датчиков тока статора Д1, Д2, Д3, и в устройстве происходит регистрация мгновенных значений потребляемых фазных токов в течение заданного интервала времени и с заданной периодичностью. Используя мгновенные значения фазных статорных токов АД, определяют модуль результирующего вектора токов статорной цепи в блоке БРМТ. После отстройки от переходного процесса работы АД в блоке БОПП и формирования пакетов данных модуля результирующего вектора токов статора в блоке БФЗ происходит передача сигнала в блок БРА, где он подвергается регрессионному анализу. На основе линейной регрессии общего вида определяются весовые коэффициенты при базисных функциях по МНК, которые используются в качестве координат вектора многомерного пространства.

Вектор коэффициентов поступает в блок БПК, где в запоминающем устройстве уже хранится вектор коэффициентов исправного состояния данного АД. В блоке БОРВ происходит векторное вычитание и получается третий вектор, являющийся геометрической разницей двух векторов. Модуль полученного вектора-разницы делится на модуль вектора неповрежденного состояния в блоке БВМВ. Диагностический признак, характеризующий наличие обрыва стержня ротора, определяется в блоке сравнения БС, и при наличии разницы векторов больше установленного значения увеличивается диагностический признак, и по критерию повреждаемости указывается на наличие и количество оборванных стержней короткозамкнутого ротора АД [106].

Данное устройство может включаться в состав принятого микропроцессорного блока защиты и автоматики как источник дискретного сигнала наличия электрической несимметрии роторной цепи, действующего на

сигнал. Это обеспечит плановый вывод в ремонт поврежденного АД без аварийного останова и позволит сократить сопутствующие убытки.

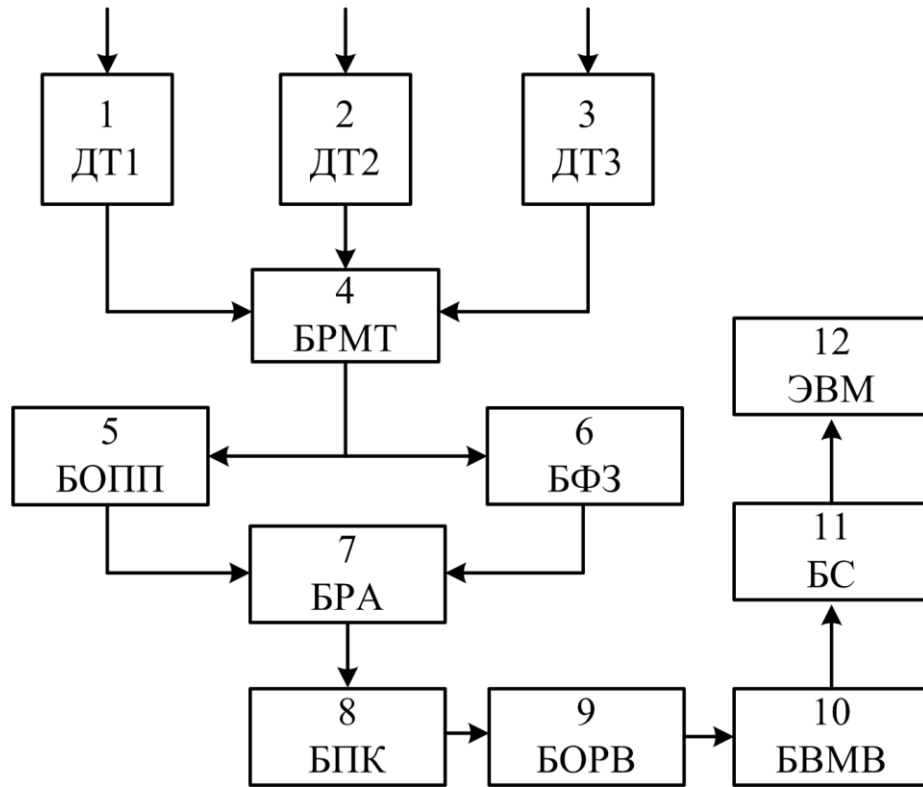


Рис. 4.17. Устройство диагностики обрыва стержня ротора

Выводы по 4 главе

1. Определено, что модуль результирующего вектора токов статорной цепи является наиболее информативным для исследования работы АД в различных неаварийных и аварийных режимах с разной степенью повреждения роторной цепи.

2. Выбран метод преобразования массива мгновенных значений в их математическую модель на базе регрессионного анализа. Обосновано применение в качестве базисных функций гармонического Фурье-базиса косинусов и синусов.

3. Определены границы использования регрессионного анализа для описания исходной кривой модуля результирующего вектора токов статора. Определен нижний предел количества гармонических составляющих и их верхний предел.

4. Описан алгоритм представления весовых коэффициентов как вектора с координатами в многомерном пространстве. Каждому состоянию исследуемого АД соответствует свой вектор.

5. Выделен диагностический признак путем определения частного модулей векторов, где делимое – это модуль вектора-разницы между вектором состояния АД с заведомо неповрежденным ротором и вектором исследуемого состояния АД, а делитель – это модуль вектора состояния АД с заведомо неповрежденным ротором. Определена зависимость величины диагностического признака от степени повреждения ротора. Для ротора в целом состоянии $\gamma = 0,789 \%$, для одного отпаянного стержня $\gamma = 4,246 \%$, для двух отпаянных стержней $\gamma = 5,128 \%$, для трех $\gamma = 5,836 \%$, для четырех $\gamma = 6,126 \%$.

6. Разработано диагностическое устройство, позволяющее своевременно в режиме работы АД выявить обрыв стержня ротора и передать дискретный сигнал в устройство автоматики и управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании решена научная задача, имеющая значение для развития систем диагностики электротехнических комплексов, связанная с исследованием работоспособности, качества функционирования асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях. Наиболее существенные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель асинхронной машины, отличающаяся от известных приведением статорных обмоток к роторной мультифазной системе, что позволило получить качественную информацию о функционировании асинхронного двигателя как компонента электротехнического комплекса при различных режимных воздействиях на статорную обмотку со стороны электрически несимметричного ротора.

2. Разработана экспериментальная установка, состоящая из двух асинхронных двигателей, в одном из которых заменен заводской магнитопровод с литой «беличьей клеткой» на спроектированный согласно заводским характеристикам и изготовленный автором прототип магнитопровода с проводниками из меди.

3. Разработан метод выделения диагностического признака обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя, отличающийся использованием регрессионного анализа с обоснованной размерностью функционального базиса при цифровой обработке массива мгновенных значений модуля результирующего вектора токов статора для исследования работоспособности, качества функционирования и диагностики асинхронного электродвигателя, обеспечивающий высокую селективность и чувствительность к исследуемому виду повреждения. При этом диагностический признак в натурном эксперименте меняет свое значение с 0,789 % при неповрежденной обмотке ротора до 4,246% при обрыве одного

стержня, 5,128; 5,836; 6,126 % при обрывах двух, трех, четырех стержней соответственно.

4. Предложен критерий наличия повреждения обмотки ротора асинхронного двигателя, основанный на регрессионном анализе модуля результирующего вектора токов статора, отличающийся сопряжением изображающих векторов весовых коэффициентов при базисных функциях в различных режимах функционирования электротехнического комплекса, что позволило обеспечить высокую чувствительность системы диагностики при обрыве одного стержня короткозамкнутой обмотки ротора.

5. Разработано устройство диагностики обрыва стержня короткозамкнутого ротора, основанное на предложенных в исследовании решениях.

Рекомендации в дальнейшей разработке предложенной темы состоят в накоплении статистических данных по типам асинхронных двигателей, и изучении поведения диагностического признака в зависимости от количества стержней и числа пар полюсов. В перспективе возможно применение других базисных функций, что значительно расширит способности диагностического устройства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Вольдек, А. И.** Электрические машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 349 с. – ISBN 978-5-469-01381-5.
2. **Шенфер, К. И.** Асинхронные машины / К. И. Шенфер. – 4-е изд., перераб. и доп. – Ленинград, 1938. – 412 с.
3. **Иванов-Смоленский, А. В.** Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский: учебник для вузов в 2 т. Т. 1. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 654 с. – ISBN 978-5-383-01222-2.
4. **Архипцев, Ю. Ф.** Асинхронные электродвигатели / Ю. Ф. Архипцев, Н. Ф. Котелец. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 105 с.
5. **Beaty, H. W.** Electric Motor Handbook: McGraw-Hill/H. W. Beaty, J. L. Kirtley. – New York, 1998 – 415 p. – ISBN 978-0-070-35971-0.
6. **Hughes, A.** Electric Motors and Drives: Fundamental, Types and Applications / A. Hughes, B. Drury. – 4-th edition. – Newnes: USA, 2013. – 413 p. – ISBN-10. 0081026153.
7. **Набиев, Ф. М.** Электрические машины: Учебное пособие. – М.: РадиоСофт, 2008. – 292 с. – ISBN 978-5-93037-285-4.
8. **Радин, В. И.** Электрические машины: Асинхронные машины / В.И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович: Учебное пособие. – М.: Высш. Шк., 1988. – 328 с.
9. **Усольцев, А. А.** Электрические машины: Учебное пособие / А. А. Усольцев – СПб.: НИУ ИТМО, 2013, – 416 с. – ISBN 978-5-4497-0020-9.
10. **Мандыч, Н. К.** Ремонт электродвигателей / Н. К. Мандыч – Библиотека рабочего, 1989, – 152 с.
11. **Stephen J. Chapman.** Electric Machinery Fundamentals: Fifth edition/Chapman, Stephen J. – Australia.: McGrawHill Higher Education, 2012, – 680 p. – ISBN-10. 0072465239.

12. **Штурман, Г. И.** Разомкнутые беличьи клетки в короткозамкнутых асинхронных двигателях / Г. И. Штурман // *Электричество*. – 1951. – № 9. – С. 36–43.
13. **Штерн, Г. М.** Асинхронный короткозамкнутый двигатель с двойными кольцами на роторе / Г. М. Штерн // *Электричество*. – 1950. – №6. – С. 21–25.
14. **Иосифов, С. С.** Короткозамкнутый асинхронный двигатель с вставными пусковыми стержнями / С. С. Иосифов // *Электричество*. – 1951. – №2. – С. 71–75.
15. **Скоробогатов, А. А.** Разработка методов контроля состояния короткозамкнутых обмоток роторов электродвигателей собственных нужд электростанций / А. А. Скоробогатов: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2006. – 155 с.
16. **Глазырина, Т. А.** Совершенствование методов диагностики асинхронных двигателей на основе анализа потребляемых токов / Т. А. Глазырина: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2012. – 120 с.
17. **Клоков, Б. К.** Ремонт обмоток электрических машин высокого напряжения / Б.К. Клоков, Р.Б. Уманцев: учебное пособие. - М.: Высшая школа, 1991. – 191 с.
18. **Ермолин, Н. П.** Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 247 с.
19. **Андреева, О. А.** Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций / О. А. Андреева: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 171 с.
20. **Tavner, P.** Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / P.Tavner, L.Ran, J.Penman, H.Sedding. // London.: Institution of Engineering and Technology, 2008, 277 p.
21. **Siddiqui, K. M.** Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor // Sahay K., Giri V. K. // *IJAREEIE*. – vol. 3, Jan. 2014, P. 6549–6565.
22. **Abdulbaqi, I. M.** Design and Implementation of an On-line Diagnosis System of IM Electrical Faults Using MCSA and ANN Based on Labview / A. T. Humod, O. K. Alazzawi // *AJBAS*. – Nov. 2016, P. 223–240.
23. **Thomson, W. T.** Current and Vibration Monitoring for Fault Diagnosis and Root

Cause Analysis of Induction Motor Drives / W. T. Thomson, P. Orpin // Proceedings of the Thirty-first Turbomachinery Symposium. – 2002. P. 61–67.

24. **Ciobanu, A.** Comparative Analysis of Two Rotor Broken Bars/Rotor Faults Diagnosis Method and the Influence of These Faults on Induction Motors Operating Parameters / A. Ciobanu, E. Helerea, S. A. Abagiu // Acta Technica Jaurinensis. – vol. 6, No. 1., 2013, 21–29.

25. **Akar, M.** Broken rotor bar fault detection in inverter-fed squirrel cage induction motors using stator current analysis and fuzzy logic / M. Akar, I. Cankaya // Turk J Elec and Comp Sci. – Vol. 20, No.Sup.1., 2012, P. 1077–1089.

26. **Rigoni, M.** Detection and Analysis of Rotor Faults in Induction Motors by the Measurement of the Stray Magnetic Flux / M. Rigoni, N. Sadowski, N. J. Batistela, J.P.A. Bastos, S. L. Nau, A. Kost // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Application. – Vol. 11, No. 1, June 2012, P. 68–80.

27. **Gritly, Y.** Diagnosis and Fault Detection in Electrical Machines and Drives based on Advanced Signal Processing Techniques / Y. Gritly: Ph.D thesis. – University of Bologna – Italy, 2014. – 117 p.

28. **Mehala, N.** Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor using Motor Current Signature Analysis / N. Mehala, R. Dahia. – Kurukshetra.: Electrical engineering department national institute of technology Kurukshetra (Haryana), India, 2010. – 121 p.

29. **Joshi, A. R.** On-line measurement of partial discharges in high voltage rotating machines. Master's thesis. / A. R. Joshi. Robert Gordon University. – Great Britain. – 2011. – 159 p.

30. **Bonnett, A. H.** Root Cause AC Motor Failure Analysis with Focus on Shaft Failures. / A.H. Bonnett // IEEE Transactions on industry applications. – 2000. – vol. 36, № 5. – P. 1435-1448.

31. **Назарычев, А. Н.** Диагностика обрывов стержней обмотки ротора электродвигателя на основе анализа тока статора / А. Н. Назарычев, А. А. Скоробогатов, Е. М. Новоселов. Дефектоскопия. – № 3. – 2011. – С. 74–82.

32. **Иноземцев, Е. К.** Ремонт и эксплуатация электродвигателей с непосредственным водяным охлаждением типа АВ-8000 / Е. К. Иноземцев – М.: Энергия, 1980. – 109 с.
33. **Ammar, K.** Three-phase induction motor fault detection based on thermal image segmentation / K. Ammar, Al-Musawi, F. Anayi, M. Packianather // *Infrared Physics & Technology*. – 2020. volume 104. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103140>.
34. **Smolyanov, I.** Calculation of linear induction motor features by detailed equivalent circuit method taking into account non-linear electromagnetic and thermal properties / I. Smolyanov, F. Sarapulov, F. Tarasov // *Computers and Mathematics with Application*. – 2019. – P. 3187–3199. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2019.05.015>.
35. **Adam, G.** Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using thermal images MoASoS and selected classifiers / G. Adam, G. Zygfyrd // *Measurement*. – 2016. – P. 86–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.008>.
36. **Dongmei, Wang.** Thermal equivalent network method for calculating stator temperature of a shielding induction motor / Dongmei Wang, Yanping Liang, Cangxue Li, Peipei Yang, Chunlei Zhou, Lianlian Gao. // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2020. – Vol. 147. – P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106149>.
37. **Guoyun, Fang.** Thermal management integrated with three-dimensional heat pipes for aircooled permanent magnet synchronous motor / Guoyun Fang, Wei Yuan, Zhiguo Yan, Yalong Sun, Yong Tang // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 152. – P. 594–604. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.120>.
38. **Canepa, E.** Effect of rotor deformation and blade loading on the leakage noise in low-speed axial fans / E. Canepa, Andrea Cattanei, Francesco Jafelice, Fabio Mazzocut Zecchin, Davide Parodi // *Journal of Sound and Vibration*. – 2018. – Vol. 433. – P. 99–123. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.07.005>.
39. **Changle, X.** Nonlinear dynamic behaviors of permanent magnet synchronous motors in electric vehicles caused by unbalanced magnetic pull / Changle, Xiang, Feng

Liu, Hui Liu, Lijin Han, Xun Zhang // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – Vol. 371. – P. 277–294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.02.015>.

40. **Singh, G.** Detection of half broken rotor bar fault in VFD driven induction motor drive using motor square current MUSIC analysis / G. Singh, V.N.A. Naikan // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Vol. 110. – P. 333–348. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.03.001>.

41. **Shaojiang, Dong.** Rolling bearing performance degradation assessment based on improved convolutional neural network with anti-interference / Shaojiang Dong, Wenliang Wu, Kun He, Xiaoyan Mou // Measurement. – 2020. – Vol. 151. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107219>.

42. **Hosseini, Sadegh.** Classification of acoustic emission signals generated from journal bearing at different lubrication conditions based on wavelet analysis in combination with artificial neural network and genetic algorithm / Hosseini Sadegh, Ahmadi Najafabadi Mehdi, Akhlaghi Mehdi // Tribology International. – 2016. – Vol. 95. – P. 426–434. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.11.045>.

43. **Zhao, Haisen.** Loss and Air-gap Force Analysis of Cage Induction Motors With Non-skewed Asymmetrical Rotor Bars Based on FEM / Zhao Haisen, Wang Yilong, Wang Yuhan, Zhan Yang, Xu Guorui. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2017. – Vol. 53. – P. 1–4. doi: 10.1109/TMAG.2017.2660762.

44. **Finley, W. R.** An analytical approach to solving motor vibration problems / W. R. Finley, M. M. Hodowanec, W. G. Holter // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2000. – Vol. 36, No.5. – P. 1467–1480.

45. **Rui, Zhao.** Deep learning and its applications to machine health monitoring / Rui Zhao, Ruqiang Yan, Zhenghua Chen, Kezhi Mao, Peng Wang, Robert X. Gao // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol. 115. – P. 213–237.

<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.050>.

46. **Deekshit Kompella, K. C.** Bearing fault detection in a 3 phase induction motor using stator current frequency spectral subtraction with various wavelet decomposition techniques / Deekshit Kompella K. C., Venu Gopala Rao Mannam, Srinivasa Rao Rayapudi // Ain Shams Engineering Journal. – 2018. – Vol. 9, No 6. – P. 2427–2439.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2017.06.002>.

47. **Novoselov, E. M.** Diagnostics of Breaks of Rotor Winding Bars in Electric Motors Based on Stator Current Analysis / E. M. Novoselov, A. N. Nazarychev, A. A. Skorobogatov // Russian Journal of nondestructive Testing. – 2011. – Vol. 47, №. 3. – P. 209–215.
48. **Thomson, W. T.** On-Line Motor Current Signature Analysis Prevents Premature Failure of Large Induction Motor Drives maintenance & asset management. – 2009. – № 3. – P. 30–35.
49. **Safin, N. R.** Stator current fault diagnosis of induction motor bearings based on the fast Fourier transform / N. R. Safin, V. A. Prakht, V. A. Dmitrievskii, A. A. Dmitrievskii // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87. Iss. 12. – P. 661–665.
50. **Сафин, Н. Р.** Токовая диагностика неисправностей подшипников асинхронных двигателей на основе быстрого преобразования Фурье / Н. Р. Сафин, В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский, А. А. Дмитриевский // Электротехника. – 2016. – № 12. – С. 14–19.
51. **Antonino-Daviu, J.** DWT analysis of numerical and experimental data for the diagnosis of dynamic eccentricities in induction motors / J. Antonino-Daviu, P. Jover, M. Riera, A. Arkkio, J. Roger-Folch // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2007. – № 21. – P. 2575–2589.
52. **Воскобойников Ю. Е.** Фильтрация сигналов и изображений: Фурье и Вейвлет алгоритмы / Ю. Е. Воскобойников, А. В. Гочаков, А. Б. Колкер. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010. – 188 с. – ISBN: 978-5-7795-0755-4.
53. **Eren, L.** Bearing damage detection via wavelet packet decomposition of the stator current / L. Eren, M. J. Devaney // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No. 2, pp. 431 – 436, April 2004. – Текст : непосредственный.
54. **Szabo, L.** Wound rotor induction machine's rotor faults detection method based on wavelet transform / L. Szabó, K.Á. Bíró, B.J. Dobai, D. Fodor, J. Vass // Oradea University Annals, Electrotechnical Section. – 2004. – P. 127–133.

55. **Szabo, L.** Discrete Wavelet Transform based rotor faults detection method for induction machines / L. Szabó, B.J. Dobai, K.Á. Bíró // *Intelligent Systems at the Service of Mankind. Ubooks, Augsburg (Germany)*. – 2005. – Vol. 2. – P. 63–74.
56. **Jose A. Antonino-Daviu.** A method for the diagnosis of rotor bar failures in induction machines / Jose A. Antonino-Daviu, Martin Riera-Guasp, José Roger Folch, and M. Pilar Molina Palomares // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2006. – Vol. 42, No. 4. – P. 990–996.
57. **Szabo, L.** Rotor faults detection method for squirrel cage induction machines based on the park's vector approach / L. Szabo, E. Kovacs, F. Toth, G. Fekete // *Oradea University Annals, Electrotechnical Fascicle, Computer Science and Control Systems Session*. – 2007. – P. 234–239.
58. **Izzet Y O Nel.** Detection of bearing defects in three-phase induction motors using Park's transform and radial basis function neural networks / Izzet Y O Nel, K Burak Dalci and I Brahim Senol // *Sadhana*. – 2006. – Vol. 31, No. 3. P. 235–244.
59. **Сарваров, А. С.** Современные методы диагностики и разработки асинхронных двигателей / А. С. Сарваров, М. Ю. Петушков, В. В. Купцов. – Магнитогорск : МГТУ, 2010. – 247 с.
60. **Malhotra, S.** Fault Diagnosis of Induction motor / S. Malhotra, M.K. Soni. // *1-st Annual International Interdisciplinary Conference*. 2013. – P. 154–159.
61. **Konstsntinos N. Gyftakis.** Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number / Konstsntinos N. Gyftakis, Antonio J. Marques Cardoso, Jose A. Antonio-Daviu // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 93. – 2017. – P. 30–50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.01.046>.
62. **Juan C. Quiroz.** Fault detection of broken rotor bar in LS-PMSM using random forests / Juan C. Quiroz, Norman Mariun, Mohammad Rezazadeh Mehrjou, Mahdi Izadi, Norhisam Mison, Mohd Amran Mohd Radzi // *Measurement*. 116. – 2018. – P. 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.004>.

63. **William, T. Thomson.** Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors / William, T. Thomson, I. Culbert // *Industrial Application and Case Histories*. Wiley-IEEE Press. – 2017. – 440 p. – ISBN 9781119029595.
64. **ГОСТ ISO 20958–2015.** Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя = Condition monitoring and diagnostics of machine systems. Electrical signature analysis of three-phase induction motors : Межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 марта 2016 г. №2 155-ст : введен впервые : дата введения 2016-11-01 / подготовлен Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АО «НИЦ КД»). – Москва : Стандартинформ, 2016. – V. ; 24 см.
65. **Дилигенская, А. Н.** Идентификация объектов управления / А. Н. Дилигенская. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2009. – 126 с.
66. **Lankin, A. M.** Approximation of Family Basic Magnetization Curves of the Magnetic Electrical Devices for the Solution of Inverse Problems of the Diagnostics / A. M. Lankin, M. V. Lankin, O. A. Naugolnov // *International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. Procedia Engineering 150*. – 2016. – P. 1020–1026. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.207.
67. **Xu, Y.** Improved few-shot learning method for transformer fault diagnosis based on approximation space and belief functions / Y. Xu, Y. Li, Y. Wang, D. Zhong, G. Zhang // *Expert Systems with Applications*. – 2021. – Vol. 167. – P. 1–10. doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114105.
68. **W. Cesar Sant Ana.** Influence of rotor position on the repeatability of frequency response analysis measurements on rotating machines and a statistical approach for more meaningful diagnostics / W. Cesar Sant Ana, G. Lambert-Torres, L. Eduardo da Silva, E. Leonardo Bonaldi, L. Ely de Lacedra de Oliveira, C Paes Salomon, J. Guedes Borges da Silva // *Electric Power Systems Research*. – 2016. Vol. 133. – P. 71–78. doi.org/10.1016/j.epsr.2015.11.044.

69. **Шамаль, М. А.** Прогнозирование диагностических параметров электротехнических комплексов главных приводов мощных экскаваторов / М. А. Шамаль : дис. ... канд. техн. наук : Екатеринбург. – 2013. – 153 с.
70. **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ, 3-е издание: пер. с англ. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М. : Диалектика. – 2017. – 912 с. – ISBN 978-5-8459-0963-3.
71. **Ивоботенко, Б. А.** Планирование эксперимента в электротехнике / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М. : Энергия, 1975. – 181 с.
72. **Hsing, T.** Theoretical Foundations of Functional Data Analysis, with an Introduction to Linear Operators / T. Hsing, R. Eubank – John Wiley & Sons, Ltd. Published, 2015. – 384 p. – ISBN 9781118762547.
73. **Lehmann, E. L.** Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks / E.L. Lehmann. – Springer-Verlag New York, USA. – 2006. – 457 p. – ISBN 13: 9780387352121.
74. **Filliben, J. J.** The Probability Plot Correlation Coefficient Test for Normality / J. J. Filliben // Technometrics (American Society for Quality). – 1975 – Vol. 17. – P. 111–117.
75. **Durbin, J.** Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression / J. Durbin, G.S. Watson // Biometrika. – 1950. – Vol. 37. – P. 409–428.
76. **Mann, H. B.** On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other / H. B. Mann, D. R. Whitney // Annals of Mathematical Statistics. – 1947. – Vol. 18. – P. 50–60.
77. **Wald, A.** On a test whether two samples are from the same population / A. Wald, J. Wolfowitz // Ann. Math Statist. – 1940. – Vol. 11. – P. 147–162.
78. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – 10-е изд. – М. : Академия, 2005. – 576 с. – ISBN 978-5-406-00565-1.
79. **Tarek, A.** Modeling and Diagnostics of Inductions Machines Under Rotor Failure / A. Tarek, K. Yassine, T. Ahmed // Automatic Control and System Engineering journal. – 2007. – V. 7. – №2. – P. 9–18.
80. **Сивокобыленко, В. Ф.** Математическое моделирование асинхронных двигателей при повреждениях стержней короткозамкнутого ротора / В. Ф.

Сивокобыленко, В. А. Павлюков, В. П. Сердюков, В. И. Бондаренко, С. П. Яременко // ДонНТУ. – 2009. – Т. 158. – №9. – С. 222–226.

81. **Виноградов, А. Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново : Ивановский государственный энергетический университет, 2008. – 298 с.

82. **Новожилов, А. Н.** Моделирование процессов в асинхронном двигателе с поврежденным стержнем короткозамкнутого ротора в режиме выбега / А. Н. Новожилов, А. О. Потапенко, Т. А. Новожилов // Электротехника. – 2017. – № 1. – С. 2–6.

83. **Funk, T. A.** Mathematical model of induction motor with series-connected stator and rotor windings / T. A. Funk, Yu. S. Usynin, A. I. Grebnev, D. A. Ponosov // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. – 2017. – V. 17. – № 1. – P. 77–87.

84. **Рогозин, Г. Г.** Определение электромагнитных параметров машин переменного тока / Г. Г. Рогозин – Киев : Техніка, 1992. – 168 с.

85. **Кузнецов, Е. М.** Определение электромагнитных параметров погружных электродвигателей установок электроцентробежных насосов / Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин // Динамика систем, механизмов и машин – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 95–99.

86. **Kovalev, A. Yu.** Diagnostic unit for electrical submersible motors and their rotor packs / A. Yu. Kovalev, E. M. Kuznetsov, V. V. Aninkin // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – 2014. – P. 11–13.

87. **Кузнецов, Е. М.** Методическая погрешность идентификации эквивалентных параметров асинхронных электродвигателей, определенных методом затухания фазного тока статора / Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: матер. V Всероссийской молодеж. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Кн. 2. – Омск, 2013. – С. 275–279.

88. Программа инновационного развития. ПАО «Россети» на период 2016-2020 гг. с перспективой до 2025. – М., 2016. – 320 с.

89. **Гольдштейн, Е. И.** Информационное обеспечение управления энергосистемами / Е. И. Гольдштейн, Е. Л. Собакин : Часть 1. уч. пособие. – Томск : ТПУ, 2020. – 128 с. – ISBN 978-5-9912-0266-7.
90. **Бушнев, Д. В.** Теоретические основы цифровой обработки сигналов / Д.В. Бушнев, А. В. Романов: учеб. пособие. – Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – 116 с. – ISBN 978-5-7996-2464-4.
91. **Полищук, В. И.** Развитие теории построения систем диагностики синхронных машин / В. И. Полищук : дис. ... док. техн. наук. – Самара, 2016. – 292 с.
92. **Макаричев, Ю. А.** Методы планирования эксперимента и обработки данных / Ю.А. Макаричев, Ю. Н. Иванников : учеб. пособие. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.
93. **Гребенникова, И. В.** Методы математической обработки экспериментальных данных / И.В. Гребенникова : учебно-методическое пособие. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. –124 с. – ISBN 978-5-7996-1456-0.
94. **Линник, Ю. В.** Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник – М. : Гос. изд. физ-мат лит., 1958. – 333 с.
95. **Дедус, Ф. Ф.** Классические ортогональные базисы в задачах аналитического описания и обработки информационных сигналов / Ф.Ф. Дедус, Л.И. Куликова, А.Н. Панкратов, Р.К. Тетуев : – МГУ, 2004. – 141 с.
96. **Магнус, Я. Р.** Эконометрика / Я.Р. Магнус, П.К. Катышев, А.А. Пересецкий. Начальный курс : учебник. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Дело, 2004. – 576 с.
97. **Hsing, T.** Theoretical Foundations of Functional Data Analysis, with an Introduction to Linear Operators / T. Hsing, R. Eubank // John Wiley & Sons, Ltd. Published, 2015. – 384 p. – ISBN 9781118762547.
98. **Вадутов, О. С.** Математические основы обработки сигналов / О.С. Вадутов: учебное пособие. Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 212 с. – ISBN 978-5-9916-6551-3.

99. **Умнов, А. Е.** Аналитическая геометрия и линейная алгебра / А.Е. Умнов : учеб. пособие. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : МФТИ, 2011. –544 с. – ISBN: 978-5-7417-0378-6.
100. **Баннов, Д. М.** Разработка экспериментальной установки для исследований диагностических признаков повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя / Д.М. Баннов, М.В. Крицкий // Электроэнергетика глазами молодежи: восьмая Международная молодежная научно-техническая конференция 01 – 05 октября 2018: в 3 т. Т. 3. – Казань : Казанский гос. энергетический. ун-т, 2018. С. 237–238.
101. **Малышев, С. В.** Совершенствование методики определения эффективности разрабатываемых защитно-диагностических устройств диагностирования цепей ротора асинхронного двигателя / С.В. Малышев, Д.М. Баннов // Электроэнергетика глазами молодежи: восьмая Международная молодежная научно-техническая конференция 02 – 06 октября 2017: в 3 т. Т. 1. – Самара : Самарский гос. техн. ун-т, 2017. С. 97-98.
102. **Полищук, В. И.** Применение унифицированных блоков микропроцессорной релейной защиты в задачах диагностики электрических машин / В.И. Полищук, М.В. Крицкий, Д.М. Баннов, С.В. Малышев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – т. 21, № 6. – С. 93–100. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100.
103. **Баннов, Д. М.** Динамическая идентификация внутренних повреждений в асинхронном электроприводе на основе регрессионного анализа результирующего вектора тока статора в гармоническом базисе / Д.М. Баннов, В.И. Полищук, Д.И. Антяскин // XIV Международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин». – Омск, 2020, ноябрь. – С. 3–9.
104. **Bannov, D.** Dynamic identification of internal damages in induction motors based on analysis vector of stator currents / D. Bannov, V. Polishchuk, D. Antyaskin // XIV International scientific and technical conference «Dynamics of Systems, Mechanisms

and Machines» (Dynamics) 10-12 November 2020, Omsk, Russia. – P. 1–5. DOI 10.1109/Dynamics50954.2020.9306123.

105. **Баннов, Д. М.** Анализ методов диагностики обрыва стержня ротора асинхронного двигателя / Д. М. Баннов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2021. – Т. 17. – № 3–4. – С. 5–23. – DOI 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-5-23.

106. **Патент № 2763849 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34.** Устройство для диагностики состояния асинхронного электродвигателя : № 2021114881 : заявл. 26.05.2021 : опубл. 11.01.2022 / А. С. Глазырин, И. А. Набунский, Д. М. Баннов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – 8 с. : ил.

ПРИЛОЖЕНИЯ

428015, г. Чебоксары, ул. Анисимова, 6
Тел./факс: (8352)325200, 458126, 580713
dynamics@chtts.ru, www.dynamics.com.ru



Динамика

научно-производственное предприятие

20.12.2021 № _____

На № _____ от _____

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Баннова Дмитрия Михайловича

«Метод диагностики обрыва стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя
на основе модуля результирующего вектора токов статора»

В результате решения комплекса научно-технических и практических задач, диссертантом получены результаты, нашедшие практические применения при разработке диагностического устройства для исследования обмоток асинхронных двигателей.

1. Разработанный диссертантом метод для определения состояния короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей использован для создания диагностического устройства на базе устройства РЕТОМЕТР-МЗ.
2. Разработанные методы интерпретации результатов измерения с расчетом вектора коэффициентов регрессионного анализа сигнала модуля результирующего вектора токов статора использованы в программном обеспечении для диагностического устройства на базе устройства РЕТОМЕТР-МЗ.
3. Диагностические модели изображающих векторов использованы в программном обеспечении для диагностического устройства на базе устройства РЕТОМЕТР-МЗ для интерпретации результатов диагностики вторичных цепей асинхронных двигателей.

Начальника отдела первичного оборудования
ООО «НПП «Динамика»



Н.М. Александров

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ЗАО «СпецКомплектАвтоматика»

«04» февраля 2022 г.

Манихин Денис Юрьевич

**Акт**

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Баннова Д.М. на

ЗАО «СпецКомплектАвтоматика»

Комиссия ЗАО «СпецКомплектАвтоматика» в составе: начальника производственного отдела Горбатов В.М., и.о. начальника электротехнической лаборатории Ногина Н.Ю., заместителя начальника отдела испытаний и технического контроля Хромчук К.А., провела анализ возможности применения метода диагностики разработанного Банновым Д.М. на участках производства.

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований в виде метода, описанного в патенте на изобретение № 27963849 соискателя ученой степени кандидата технических наук Баннова Д.М. были использованы при приемо-сдаточных испытаниях высоковольтного асинхронного двигателя типа 4АЗМ-630/6000 и подтвердили исправное техническое состояние по части роторной цепи двигателя зав. № 00453720.

Начальник ПО

Горбатов В.М.

И.о. начальника ЭТЛ

Ногин Н.Ю.

Начальник ОИТК

Хромчук К.А.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего образования
 «Самарский государственный технический университет»
 (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
 Баннова Дмитрия Михайловича

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Баннова Дмитрия Михайловича на тему «Метод диагностики обрыва стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя на основе анализа модуля результирующего вектора токов статора» внедрены и используются в учебном процессе Самарского государственного технического университета при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» на Электротехническом факультете на кафедре «Электрические станции».

Результаты диссертационной работы Баннова Д.М. использованы в учебном процессе по курсам: Б1.В.ДВ.05.01 «Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций», Б1.В.ДВ.05.02 «Диагностика электрооборудования установок высокого напряжения»

Заведующий кафедрой «Электрические станции»
 к.т.н., доцент Ведерников А.С.