



На правах рукописи

БАННОВ ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**Метод диагностирования обрыва стержней короткозамкнутого ротора
асинхронного двигателя на основе анализа токов статора**

2.4.2. – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Полищук Владимир Иосифович

Официальные оппоненты: **Зюзов Анатолий Мияйлович**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры Электропривода и
автоматизации промышленных установок
федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Уральский
федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

Сушков Валерий Валентинович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры Энергетики
федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Нижневартовский
государственный университет»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Уфимский государственный
нефтяной технический университет», г.
Уфа

Защита диссертации состоится 27 июня 2023 года в 14:00 на заседании
объединенного совета по защите диссертаций на соискание учёной степени
кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук 99.2.094.02,
созданного на базе Омского государственного технического университета и
Омского государственного университета путей сообщения, по адресу: 644050, г.
Омск, пр. Мира, д. 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного
технического университета и на сайте www.omgtu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, диссертационный
совет 99.2.094.02. Тел.: 8-(3812) 65-24-79, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru

Автореферат разослан _____ 2023 года.

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



О.А. Лысенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 IEC/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 АД 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 АД и повышение интенсивности таких публикаций как в российских, так и зарубежных изданиях показывают, что разработка новых методов диагностики обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора АД до сих пор является актуальной и не полностью решенной научно-технической 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: Восьмая Международная научно-техническая конференция «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.; Девятая Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2018», г. Казань, 01-05 октября 2018 г.; Десятая Международная молодежная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2019», г. Иркутск, 16-20 сентября 2019 г.; Региональная научно-техническая конференция 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 Международная IEEE научно-техническая конференция «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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, описывается структура диссертационной работы. Изложены основные положения, выносимые на защиту, соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе рассмотрены основные типы асинхронных двигателей (АД) и виды короткозамкнутых роторов, используемые при эксплуатации электротехнических комплексов. Детально описаны конструктивные особенности короткозамкнутых роторов высоковольтных АД и пути решения проблем затяжного пуска и повышения механических характеристик машин. Описано воздействие температуры и электродинамических сил на конструкцию «беличьей клетки» и последствия обрыва стержня короткозамкнутого ротора.

Проведен анализ существующих методов диагностирования АД с короткозамкнутым ротором по физическим источникам информации, таким как шум, вибрация, температура и анализ токов статора. Выявлено, что кривые токов статора являются носителями информации о техническом состоянии АД, практически по всем видам повреждений, в том числе и по обрыву стержня короткозамкнутой обмотки ротора. Обоснована перспективность применения способов диагностики короткозамкнутых обмоток ротора электродвигателей, основанных на декомпозиции модуля результирующего вектора токов фаз статора.

Во второй главе показано, что регрессионный анализ, в отличие от интерполяции, наиболее приемлем для цифровой обработки информационных сигналов, имеющих стационарные шумы в измерительных каналах связи. В работе использован метод линейной регрессии общего вида, сущность которого состоит в том, чтобы получаемая модель описываемого исходной кривой была максимально приближена к реальному. Минимизация отклонения осуществляется по методу наименьших квадратов. 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.

Сумма квадратов отклонений при этом записана в виде:

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

Обоснован выбор базисных функций, у которых определяются весовые коэффициенты. В работе были применены функции ряда Фурье, поскольку они

имеют свойство ортогональности и их скалярное произведение равно нулю. Это свойство в работе используется для представления весовых коэффициентов в качестве координат вектора в n -мерном пространстве. Функция, описывающая исследуемый массив мгновенных значений, имеет вид:

$$\varphi(n) = A_0 + A_1 \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot k_0 \cdot n) + B_1 \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot k_0 \cdot n) + \dots \\ \dots + A_m \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot k_m \cdot n) + B_m \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot k_m \cdot n),$$

где $A_{1\dots n}$ – 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.

Приведены способы оценки адекватности регрессионной модели по гетероскедантности регрессионных остатков методом их визуального анализа.

Представлена разработанная математическая модель асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, в которой статорные обмотки приведены к роторной мультифазной системе координат (рис. 2). Математическая модель АД адекватно отображает физические процессы в обмотках статора машины при возникновении повреждений в обмотке ротора. Моделирование обрыва стержня осуществляется путем изменения параметров (активного сопротивления R_R и индуктивности) соответствующего контура схемы замещения в системе дифференциальных уравнений (1).

При разработке математической модели АД к ней предъявлялись следующие требования:

- возможность задавать то количество стержней в роторе, которое удовлетворяет требованиям исследования, в том числе имитировать обрыв определенного количества стержней;
- описывать адекватно процессы, возникающие в электрической машине, в нормальных эксплуатационных и аварийных режимах работы АД;
- использовать общепринятые в классической теории электрических машин допущения.

Математическая модель АД в n -фазной системе координат предполагает выбор количества фаз, участвующих в расчете исходя из количества стержней ротора, где n – является количеством стержней в роторе. Параметры обмотки статора приводятся к обмотке ротора.

Для реализации предлагаемой модели АД представляется в виде эквивалентной многоконтурной схемы замещения, в которой каждый контур имеет свое активное сопротивление, индуктивность рассеяния и взаимную индукцию (рис. 1). В качестве существенного допущения, значительно упрощающего математическое описание модели, но незначительно влияющего на результаты моделирования, было принято не учитывать сопротивление контактных колец стержней ротора R_e и их индуктивность L_e (рис. 1).

В n -фазной математической модели были использованы общеизвестные принципы и выражения, применяемые при моделировании асинхронных электродвигателей. Система дифференциальных уравнений для модели n -фазного АД принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_s^{(1)}}{dt} = U^{(1)} - R_s \cdot i_s^{(1)} \\ \dots \\ \frac{d\psi_s^{(n)}}{dt} = U^{(n)} - R_s \cdot i_s^{(n)} \\ \frac{d\psi_r^{(1)}}{dt} = 0 - R_r \cdot i_r^{(1)} \\ \dots \\ \frac{d\psi_r^{(n)}}{dt} = 0 - R_r \cdot i_r^{(n)} \end{cases}, \quad (1)$$

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.

Из представленной системы дифференциальных уравнений (1) видно, что порядок системы определяется числом n (количеством стержней). С увеличением количества стержней в роторе порядок системы повышается, что значительно усложняет расчеты.

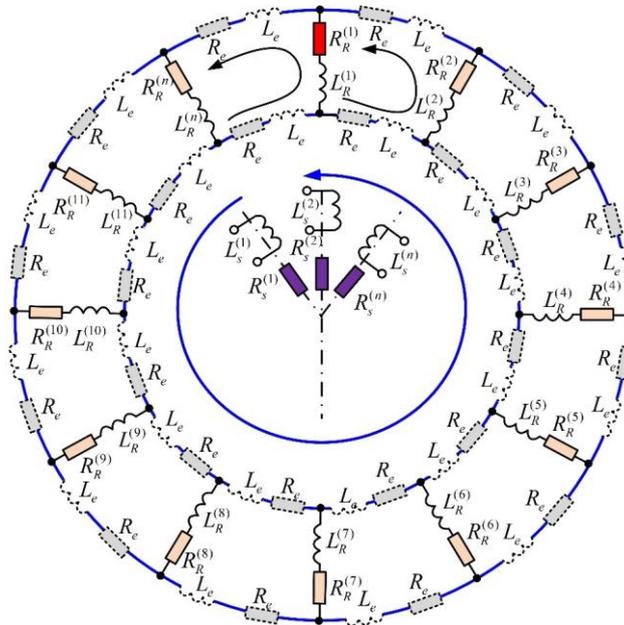


Рис. 1. Схема замещения статора и ротора, применяемая в предлагаемой математической модели

Вектор входных напряжений формируется следующим образом:

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

Составляющие напряжения в многомерной системе координат описываются по следующему выражению:

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

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

Напряжения в трехфазной системе рассчитываются по:

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

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

$$U_c(t) = \sqrt{2}U_c \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

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 в трехфазной системе координат:

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

Угол сдвига $\varphi_{сд}$ зависит от количества стержней и определяется выражением

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

По закону Ампера рассчитывают токи статорной и роторной цепи:

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

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.

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:

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

а матрица собственных индуктивностей ротора:

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

В свою очередь L_{SR} и L_{RS} задаются при помощи вспомогательной матрицы, зависимой 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:

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

где $R = \begin{bmatrix} R_{S0} & 0 \\ 0 & R_{R0} \end{bmatrix}$ – главная матрица сопротивлений; $R_{S0} = \text{diag}[R_s^{(1)}, R_s^{(2)}, \dots, R_s^{(n)}]$

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

На полученной модели проведено моделирование работы АД при обрыве одного, двух, трех, четырех стержней и в целом состоянии (рис.2.), при этом за начальные условия модели были приняты заводские характеристики типового АД АДМ100S4УЗ. Была выявлена зависимость изменения кривой модуля результирующего вектора токов статора от количества оборванных стержней.

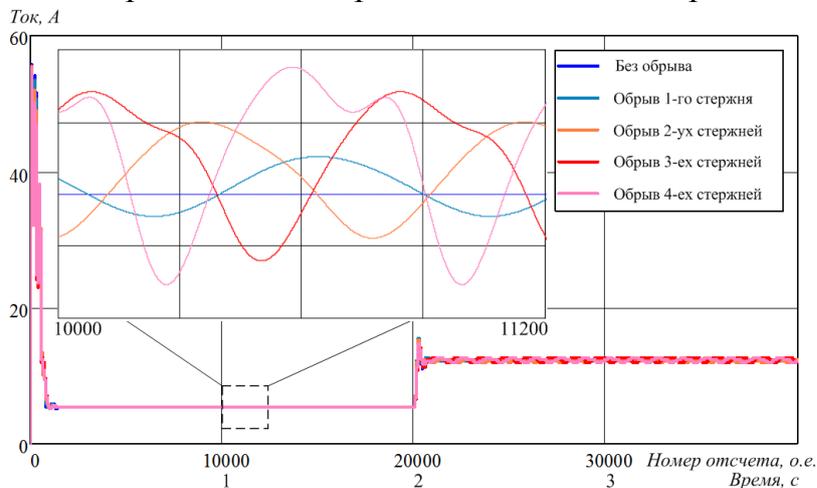


Рис. 2. Кривые модуля результирующего вектора токов статора в нормальном состоянии и с обрывом одного, двух, трех и четырех стержней, полученных математическим моделированием

В третьей главе был проведен анализ обмоток статора на отсутствие несимметрии обмоток фаз статора испытуемого АД. Для проведения соответствующего измерения использовался сертифицированный 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.

Определена схема подключения АД к сертифицированной измерительной установке для определения естественной несимметрии статорных обмоток.

Описаны особенности и принципы получения оцифрованного аналогового сигнала и представлена экспериментальная установка, разработанная в процессе выполнения исследований. Специально для проведения экспериментов по обрыву стержня ротора была создана экспериментальная установка, на основе 12-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с частотой дискретизации 10 кГц (рис.3).

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, токи которого анализируются;
- источник переменного трехфазного напряжения и пусковая аппаратура.

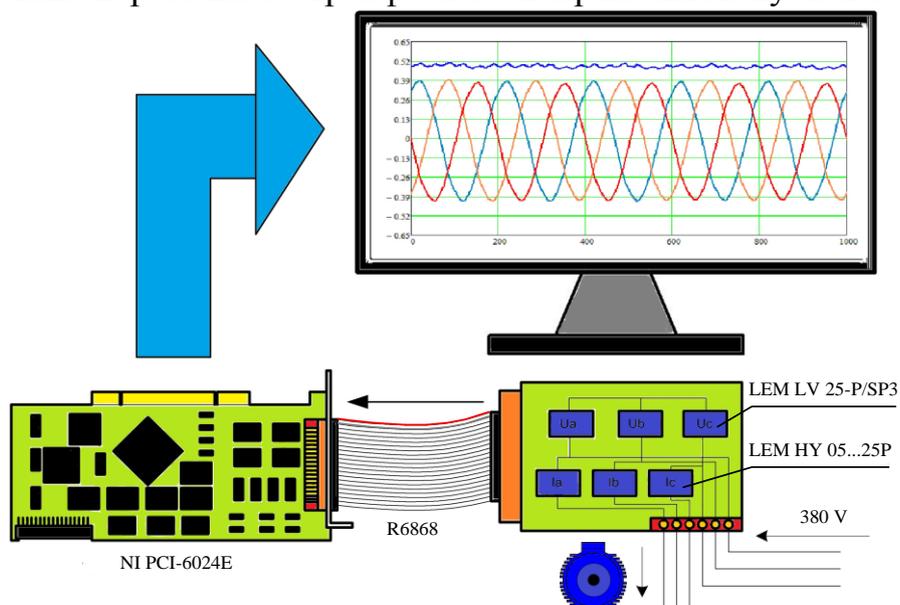


Рис. 3. Функциональная схема экспериментальной установки

Силовая часть экспериментальной установки состоит из двух АД, питаемых от разных источников напряжения. Испытуемый АД питается через пусковую аппаратуру трехфазным переменным напряжением общей сети, нагрузочный АД через выпрямитель постоянным напряжением. Схема подключения обоих АД представлена на рис. 4.

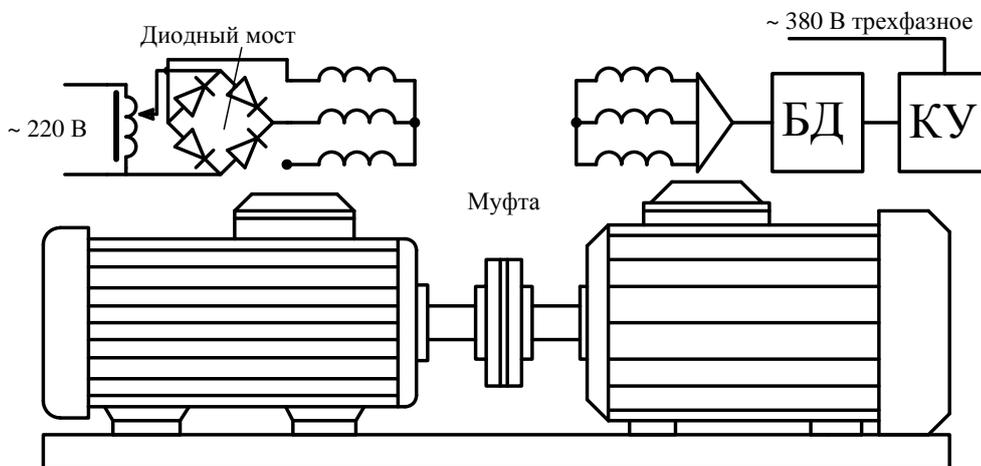


Рис. 4. Схема подключения асинхронных двигателей при проведении эксперимента: БД – блок датчиков; КУ – коммутационное устройство (электромагнитный контактор)

Тормозящий момент в режиме нагрузки и маховый момент в режиме холостого хода исследуемого АД обеспечиваются за счет присоединения через демпферную муфту АД необходимой мощности, на выводы которого подавалось регулируемое постоянное напряжение (рис. 4), что позволяло создавать требуемую нагрузку в номинальном режиме работы АД.

Был спроектирован и построен экспериментальный ротор с новым магнитопроводом и с собранной в нем из меди методом пайки «беличьей клеткой». Данная конструкция позволяет регулировать степень повреждения, за счет имитации обрывов различного количества стержней, путем их отпайки. При этом пайка позволяет многократно повторять эксперимент. Также следует отметить, что отсоединять стержни возможно в различных местах (например, на противоположных полюсах, на обоих короткозамыкающих кольцах и т. д.).

Фотография экспериментального ротора представлена на рис. 5, из которой видно, что получившийся ротор соответствует размерам и характеристикам ротора заводского исполнения. Исследуемый АД с адаптированным магнитопроводом и обмоткой показал полную работоспособность и пригодность к проведению экспериментов с обрывом стержня «беличьей клетки».

На экспериментальной установке были получены массивы дискретных значений токов и напряжений по трем фазам статорной цепи испытуемого АД, а также модуль результирующего вектора токов. Данные снимались во время работы АД в режимах: пуск, холостой ход, включение нагрузки, работа под нагрузкой, снятие нагрузки. Эксперименты проводились при разной степени повреждения роторной цепи: без повреждения, обрыв одного, двух, трех, четырех стержней.



Рис. 5. Готовый экспериментальный ротор с обрывом одного стержня

В результате эксперимента были получены кривые мгновенных значений токов фаз статора для фазы А (рис. 6) и модуля результирующего вектора токов статора (рис. 7).

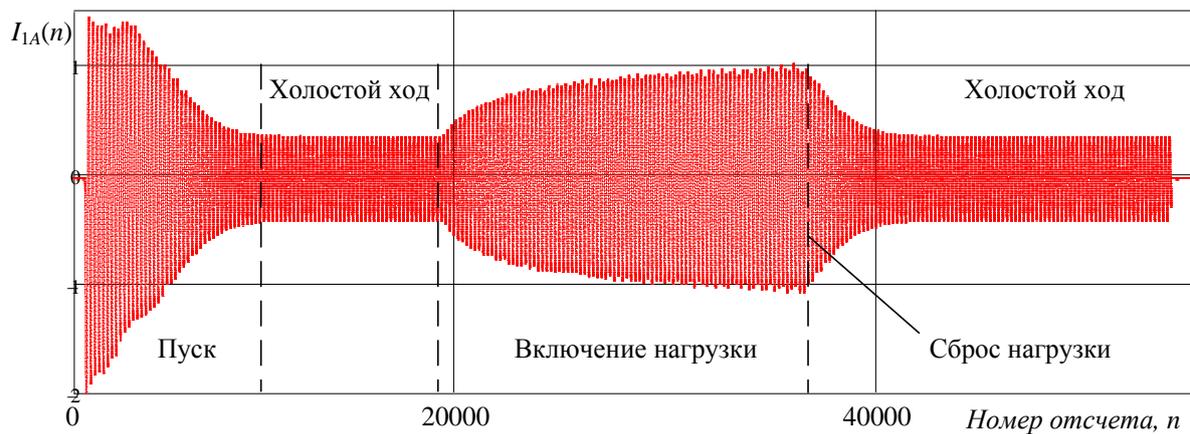


Рис. 6. Кривая переменного тока фазы А $I_{1A}(n)$, потребляемый исследуемым АД в режиме пуска, холостого хода, нагрузки

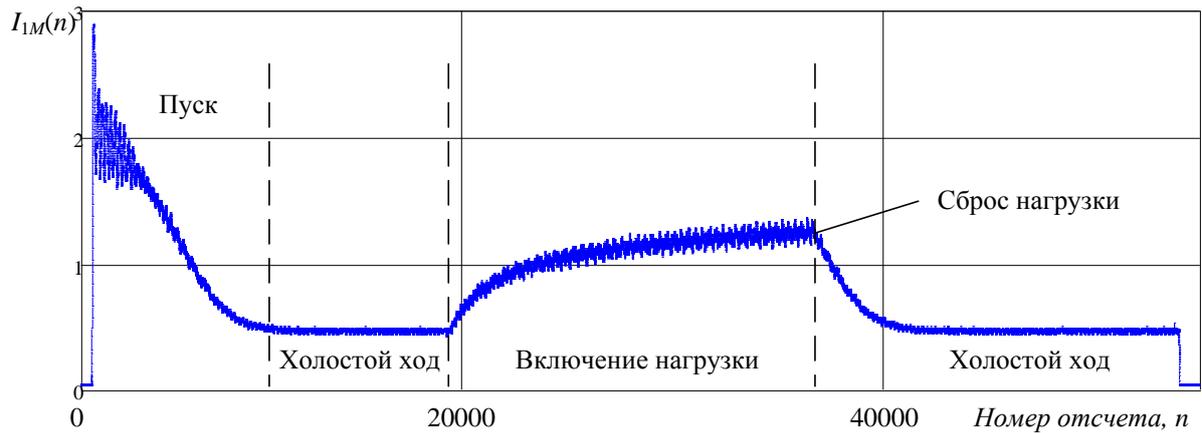


Рис. 7. Кривая мгновенных значений модуля результирующего вектора токов статора $I_{1M}(n)$

В четвертой главе представлен разработанный алгоритм диагностирования на основе регрессионного анализа модуля результирующего вектора токов фаз статора.

Обосновано применение в качестве базисных функций гармонического косинусно-синусного Фурье-базиса.

Определены границы использования регрессионного анализа для описания исходной кривой модуля результирующего вектора токов статора, полученного на 12-битной плате АЦП. Так, нижний предел составляет 6 гармонических составляющих (это соответствует 300 Гц), что обусловлено границей влияния эффекта Гиббса. Верхним пределом является погрешность при аналого-цифровом преобразовании сигнала – шум квантования, что для применяемого АЦП составляет 0,024 %. Данную границу регрессионная модель преодолевает при 18 гармонических составляющих (это соответствует 900 Гц).

Разработан алгоритм представления весовых коэффициентов в качестве координат вектора состояния в многомерном пространстве (рис. 8).

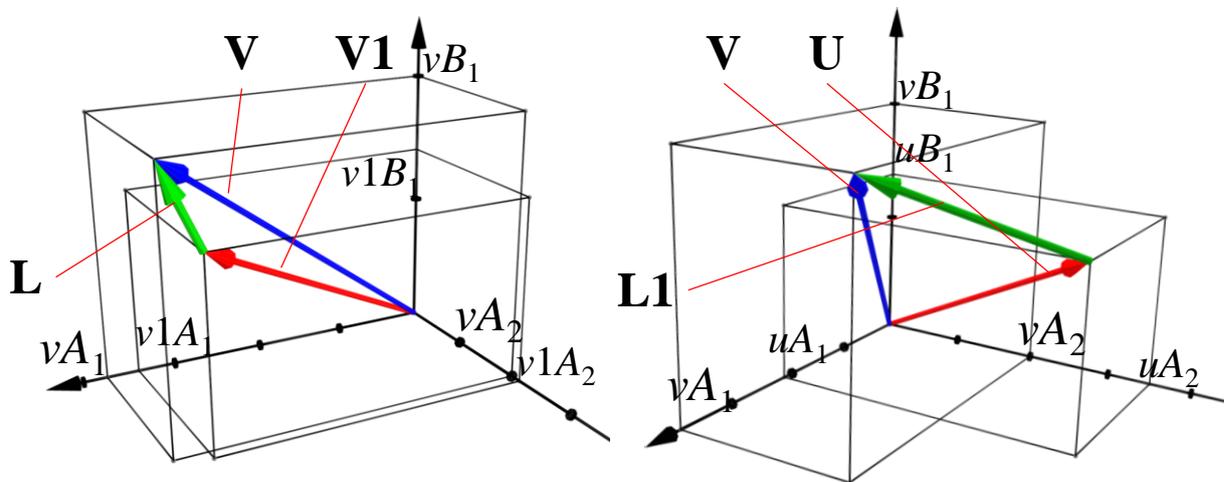


Рис. 8. Трехмерный фрагмент многомерного пространства

На рис. 8 \mathbf{V} – вектор технического состояния при неповрежденной обмотке ротора; $\mathbf{V1}$ – сравниваемый вектор технического состояния при неповрежденной обмотке ротора; \mathbf{L} – вектор, образованный вычитанием вектора \mathbf{V} и $\mathbf{V1}$; \mathbf{U} – вектор технического состояния при поврежденной обмотке ротора; $\mathbf{L1}$ – вектор, образованный вычитанием вектора \mathbf{V} и \mathbf{U} ; $vA1, vB1, vA2$ – координаты вектора \mathbf{V} ; $v1A1, v1B1, v1A2$ – координаты вектора $\mathbf{V1}$; $uA1, uB1, uA2$ – координаты вектора \mathbf{U} .

В качестве диагностического признака предлагается использовать определение частного модулей векторов γ в процентах, где делимое – это модуль вектора-разницы между вектором технического состояния АД с заведомо неповрежденным ротором и вектором исследуемого технического состояния АД, а делитель – это модуль вектора технического состояния АД с заведомо неповрежденным ротором. При этом выявлена зависимость величины диагностического признака от количества оборванных стержней ротора. Для неповрежденного ротора $\gamma = 0,789\%$, для обрыва одного стержня $\gamma = 4,246\%$, для двух отпаянных стержней $\gamma = 5,128\%$, для трех $\gamma = 5,836\%$, для четырех $\gamma = 6,126\%$. Гистограмма зависимости диагностического признака γ от степени повреждения обмотки ротора АД приведена на рис. 9.

Как видно из гистограммы рис. 9 критерий наличия повреждения обмотки ротора асинхронного двигателя γ , основанный на сопряжении изображающих векторов весовых коэффициентов, при базисных функциях регрессионного анализа модуля результирующего вектора токов статора исследуемой и заведомо неповрежденной машины обеспечивает высокую чувствительность диагностирования обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД.

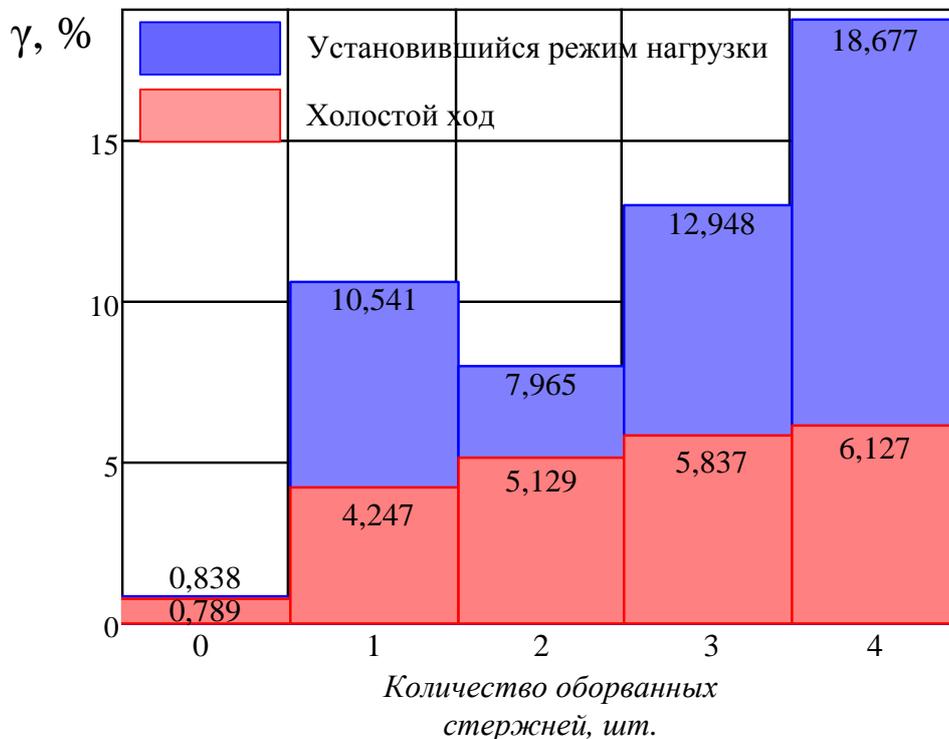


Рис. 9. Диаграмма зависимости диагностического признака γ от степени повреждения обмотки ротора при работе АД на холостом ходу и в установившемся режиме нагрузки

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 работ, опубликованных по теме диссертации
Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ:

1. **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.

2. **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.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах Web of Science и Scopus:

3. **Баннов, Д. М.** Метод диагностики обрывов стержней ротора в асинхронных электродвигателях на основе регрессионного анализа модуля результирующего вектора тока статора / Д.М. Баннов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 33. № 5. – С. 196–208. DOI 10.18799/24131830/2022/5/3675.

4. **Глазырин, А. С.** Математическая модель асинхронного двигателя в мультифазной системе координат при несимметрии роторных цепей / А. С. Глазырин, В. И. Полищук, В. В. Тимошкин, Д. М. Баннов, [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 213–227. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3404.

5. **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.

Патент на изобретение

6. **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.

Научные публикации в прочих изданиях:

7. **Баннов, Д. М.** Оценка эффективности перспективных систем диагностики обмотки ротора асинхронных двигателей / Д. М. Баннов // Научное обозрение. – 2017. – № 25. – С. 60–63.

8. **Баннов, Д. М.** Совершенствование метода диагностирования повреждений обмотки ротора асинхронных двигателей / Д. М. Баннов, С. В. Малышев // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 02–06 октября 2017 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. – С. 82–85.

9. **Малышев, С. В.** Совершенствование методики определения эффективности разрабатываемых защитно-диагностических устройств

диагностирования цепей ротора асинхронного двигателя / С. В. Малышев, Д. М. Баннов, В. И. Полищук // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 02–06 октября 2017 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. – С. 97–98.

10. **Баннов, Д. М.** Разработка способов выявления повреждений роторной цепи асинхронного двигателя / Д. М. Баннов, В. И. Полищук // XIV королевские чтения : международная молодежная научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения академика С. П. Королева, 75-летию КуАИ-СГАУ-СамГУ-Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли: в 2 томах, Самара, 03–05 октября 2017 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2017. – С. 495–496. – Текст непосредственный.

11. **Полищук, В. И.** Совершенствование методики определения эффективности разрабатываемых защитно-диагностических устройств диагностирования цепей ротора асинхронного двигателя / В. И. Полищук, С. В. Малышев, Д. М. Баннов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 6. – С. 29–32.

12. **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 – 2018: материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции: в 3 томах, Казань, 01–05 октября 2018 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. – С. 237–238.

13. **Крицкий, М. В.** Апробация микропроцессорного блока БМРЗ для научно-исследовательских работ / М. В. Крицкий, Д. М. Баннов // Электроэнергетика глазами молодежи-2019: материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции, Иркутск, 16–20 сентября 2019 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 309–312.

14. **Баннов, Д. М.** Метод диагностики внутренних повреждений АД на основе анализа потребляемых токов / Д. М. Баннов, В. И. Полищук, Ю. П. Кубарьков // Современное российское оборудование для повышения надежности экономичности и безопасности энергетического комплекса России: сборник научных трудов. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2019. – С. 14–19.

15. **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. DOI 10.25206/2310-9793-8-3-3-9.

Работы [1, 3, 7] выполнены автором единолично. В работах [2, 4-6, 8-15], написанных в соавторстве, автору принадлежит не менее 70% от общего объема представленного материала.