На правах рукописи

The

Еремеева Виктория Александровна

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ АСУ ТП

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Челябинск – 2025

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Шестаков Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-измерительной техники ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Михаил Официальные оппоненты: Петушков Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроники и микроэлектроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» Лукьянов Анатолий Валерианович, доктор профессор, технических наук, профессор кафедры «Физика, механика И приборостроение» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» Ведущая организация: ΦΓΑΟΥ BO «Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Защита состоится 2 июля 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.437.02 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», расположенном по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007.

Б.Н. Ельцина»

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», а также на сайте https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243702-d-21229803/eremeeva-viktoriya-aleksandrovna.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим высылать по адресу 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет, тел. (351) 267-91-23.

Автореферат разослан «___» ____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.т.н., доцент

А.В. Голлай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) являются неотъемлемой частью нефтяной, металлургической, химической и других видов промышленности. Основной функцией АСУ ТП является управление технологическими процессами посредством обработки данных, поступающих от совокупности датчиков, установленных на техническом оборудовании, и формирование управляющих воздействий для исполнительных механизмов. К числу таких механизмов относятся насосы, вентиляторы, конвейеры и другие типы оборудования, большинство из которых приводятся в действие асинхронными электродвигателями (АД).

АД является распространённым типом двигателя в промышленности за счёт его надёжности и низкой стоимости. Тем не менее, на практике наблюдается значительный процент отказов АД, обусловленных эксплуатацией в условиях повышенных механических, термических И электрических нагрузок. Непредвиденные отказы АД приводят к существенным финансовым потерям, вызванных простоями производственных линий. Особенно критичными являются отказы уникальных АД большой мощности (до нескольких мегаватт), которые, как правило, не имеют резервирования, а их демонтаж и замена требуют значительных временных и ресурсных затрат вследствие их размеров и сложности конструкции.

Согласно действующим отечественным и зарубежным стандартам, обеспечение надёжности, безопасности и отказоустойчивости оборудования являются ключевыми требованиями при проектировании и эксплуатации АСУ ТП. В связи с этим, программное обеспечение АСУ ТП должно включать в себя средства и алгоритмы непрерывного контроля технического состояния оборудования, в том числе АД. Данные алгоритмы могут быть реализованы на основе анализа физической информации АД, такой как вибрация, ток статора, температура подшипников и др. Анализ данной информации математическими методами и алгоритмами искусственного интеллекта позволяет формировать диагностические критерии, на основе которых АСУ ТП принимает решения об эксплуатации оборудования.

Интеграция алгоритмов технического состояния AЛ оценки исполнительных механизмов в АСУ ТΠ способствует своевременному выявлению неисправностей и минимизации рисков внеплановых простоев оборудования. Таким образом, разработка алгоритмов обработки информации и диагностических критериев для оценки технического состояния AЛ представляет собой актуальную научно-практическую задачу, решение которой позволяет повысить эффективность и надёжность производственных процессов.

Цель работы – разработать новые алгоритмы обработки информации и диагностические критерии для оценки технического состояния асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ ТП.

Задачи исследования:

1) Разработать алгоритм обработки сигналов тока и напряжения АД на основе векторного метода матричных пучков для выделения диагностических признаков, а также получить диагностический критерий на основе метода опорных векторов для обнаружения межвиткового замыкания в статоре АД.

2) Разработать алгоритм обработки сигналов тока и частоты вращения АД на основе векторного метода матричных пучков для выделения диагностических признаков, а также получить диагностический критерий на основе метода опорных векторов для обнаружения обрыва стержня в роторе АД.

3) Разработать алгоритм обработки сигналов виброускорений, измеряемых с вращающегося вала АД, на основе преобразования Гилберта-Хуанга для выделения диагностических признаков, а также получить диагностический критерий на основе свёрточной нейронной сети для обнаружения неисправностей подшипников качения.

Предметом исследования являются алгоритмы обработки информации и диагностические критерии для оценки технического состояния асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ ТП.

Научная новизна:

1) Разработан новый алгоритм обработки сигналов и диагностический критерий для обнаружения межвиткового замыкания в статоре АД в виде функции классификации, отличающийся тем, что критерий формируется в результате обучения метода опорных векторов на выборке диагностических признаков в виде суммы взаимных разностей между фазовыми задержками основных гармоник сигналов токов и напряжений АД.

2) Разработан новый алгоритм обработки сигналов и диагностический критерий для обнаружения обрыва стержня ротора в АД в виде функции классификации, отличающийся тем, что критерий формируется в результате обучения метода опорных векторов на выборке диагностических признаков в виде совокупности значений амплитуд гармоник дефекта ротора, извлечённых из демодулированных сигналов тока, предварительно отфильтрованных в диапазоне 5-ой и 7-ой гармоники частоты питания.

3) Разработан новый алгоритм обработки сигналов виброускорений, измеренных с вращающегося вала АД, с использованием преобразования Гилберта-Хуанга для получения изображений спектра Гилберта, содержащих диагностические признаки неисправностей подшипников качения в виде локальных изменений амплитуды виброускорения, а также диагностический критерий, который представляет собой максимальное значение вероятности принадлежности изображения спектра Гилберта к конкретному классу неисправности подшипника, формируемое свёрточной нейронной сетью.

Теоретическая значимость работы. Впервые векторный метод матричных пучков применён к сигналам тока и напряжения АД для получения диагностических признаков неисправностей статора и ротора (патент РФ №2799985). Предложенные диагностические признаки неисправностей также ранее не использовались при оценке состояния АД. Применение метода опорных

векторов к предложенным диагностическим признакам позволяет получить новые диагностические критерии для оценки состояния АД. Также впервые к сигналам виброускорения, измеренных с вращающегося вала АД, применено преобразование Гилберта-Хуанга. Преобразование Гилберта-Хуанга позволяет преобразовать сигналы виброускорений в изображения, которые затем могут быть распознаны свёрточной нейронной сетью для оценки состояния подшипников качения.

Практическая значимость работы состоит в создании программноаппаратного комплекса, в котором реализованы разработанные алгоритмы обнаружения неисправностей АД исполнительных механизмов АСУ ТП. Работоспособность разработанных алгоритмов и диагностических критериев подтверждена экспериментально, что позволяет рекомендовать их для интеграции в существующие АСУ ТП для непрерывного контроля за техническим состоянием АД. Алгоритмы могут быть адаптированы для оценки состояния других типов электродвигателей и вращающегося оборудования.

Методология и методы исследования основаны на теории электромагнитного поля и механических колебаний, а также на методах спектрального анализа сигналов, теории распознавания образов, методах классификации и теории планирования эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1) Алгоритм обработки сигналов тока и напряжения АД и диагностический критерий, полученный с помощью метода опорных векторов, для обнаружения межвитковых замыканий в статоре.

2) Алгоритм обработки сигналов тока и частоты вращения АД и диагностический критерий, полученный с помощью метода опорных векторов, для обнаружения обрыва стержня в роторе.

3) Алгоритм обработки сигнала виброускорения, измеренного с вращающегося вала АД, и диагностический критерий, полученный с помощью свёрточной нейронной сети, для обнаружения неисправностей подшипников качения.

Достоверность результатов работы подтверждена корректной постановкой задачи и экспериментальной проверкой работоспособности предложенных методов и диагностических критериев.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на следующих конференциях:

1. XXIII мировой конгресс IMEKO – Измерение: запуск завтрашней умной революции (XXIII IMEKO World Congress «Measurement: sparking tomorrow's smart revolution», г. Иокогама, Япония, 2021 г.);

2. Международная конференция IMEKO TC10 – Измерения для диагностики, оптимизации и контроля для поддержки устойчивости и отказоустойчивости (IMEKO TC10 Conference «Measurement for Diagnostics, Optimization and Control to Support Sustainability and Resilience», г. Делфт, Нидерланды, 2023 г.);

5

3. Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2023 (г. Челябинск, Россия, 2023 г.);

4. III Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «ЗА НАМИ БУДУЩЕЕ» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2024 г.).

Реализация результатов исследования. Полученные результаты диссертационной работы внедрены в деятельности НТЦ «Приводная техника».

Публикация результатов работы. По материалам диссертационной работы опубликовано 9 работ, в том числе 2 в изданиях из перечня ВАК, 4 в рецензируемых зарубежных изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 106 источников. Диссертационная работа изложена на 105 страницах, включая 39 рисунков, 16 таблиц и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования, а также отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе проведён анализ асинхронного электродвигателя (АД) исполнительных механизмов АСУ ТП как объекта диагностики. Выявлены три ключевые неисправности АД: межвитковые замыкания в статоре, обрывы стержней в короткозамкнутом роторе и повреждения подшипников качения. Проанализированы существующие алгоритмы обнаружения данных неисправностей такие как, анализ сигнатур тока двигателя (MCSA - Motor Current Signature Analysis), анализ пусковых токов методом кратковременного преобразования Фурье, построение годографов токов методом Парка, демодуляция сигналов тока с применением преобразования Гилберта, анализ гармоник в сигналах тока методом Прони, а также выявление гармоник неисправностей подшипников в сигналах огибающей вибрации, полученных с применением преобразования Гилберта и метода быстрой куртограммы, и анализ вибрации с помощью преобразования Гилберта-Хуанга.

Проведённый анализ показал, что известные диагностические признаки обладают недостаточной чувствительностью к начальным стадиям неисправностей АД. Кроме того, данные признаки могут быть замаскированы или искажены эффектами, обусловленными режимами работы АД. Также установлено, что многие существующие алгоритмы диагностики основаны на использовании преобразования Фурье и преобразования Парка. Данные методы не могут обеспечить удовлетворительный результат диагностики в случае нестационарных режимов работы АД, которые характерны при питании АД от частотного преобразователя. Для надёжной оценки состояния АД требуется применение методов нестационарного анализа сигналов, а также использование методов искусственного интеллекта, позволяющих формировать высокочувствительные диагностические признаки и критерии.

Во второй главе описано влияние межвиткового замыкания в обмотке статора на сигналы тока и напряжения АД. Обмотка статора трёхфазного АД представляет собой преимущественно индуктивную нагрузку, поэтому ток в каждой питающей фазе отстает от напряжения на величину фазовой задержки $\Delta \varphi = \varphi_U - \varphi_I$ (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Фазовая задержка между сигналами тока и напряжения

У исправного АД $\Delta \varphi$ трёх питающих фаз равны между собой независимо от нагрузки и частоты вращения, так как сопротивления и индуктивности обмоток одинаковы. При межвитковом замыкании собственная индуктивность и активное сопротивление повреждённой фазы уменьшаются на величину, пропорциональную доле закороченных витков. Вследствие этого, $\Delta \varphi$ повреждённой фазы будет отличаться от $\Delta \varphi$ двух других фаз. Поэтому, в качестве диагностического признака межвиткового замыкания в статоре предлагается использовать сумму взаимных разностей $\Delta \varphi$:

$$Ind = \left| \Delta \varphi_A - \Delta \varphi_B \right| + \left| \Delta \varphi_B - \Delta \varphi_C \right| + \left| \Delta \varphi_C - \Delta \varphi_A \right|, \tag{1}$$

где А, В, С – индекс питающих фаз двигателя.

Сигналы токов и напряжений АД y_i имеют основную гармонику питания с одинаковой частотой $f_{пит}$, но разными амплитудами и начальными фазами. Векторный метод матричных пучков (ММП) позволяет измерить начальные фазы основных гармоник сигналов АД. ММП аппроксимирует сигнал АД $y_i(n)$, состоящий из N дискретных отсчётов, моделью $\hat{y}_i(n)$, представляющей собой сумму затухающих комплексных экспонент:

$$\hat{y}_{i}(n) = \sum_{k=1}^{M} A_{k} e^{j2\pi f_{k}nT + j\varphi_{k}} = \sum_{k=1}^{M} R_{k} z_{k}^{n}, \qquad (2)$$

где M – число экспонент (одной гармонике сигнала соответствует две комплексно-сопряжённых экспоненты), $0 \le n \le N-1$ – номер отсчёта, T – период дискретизации сигнала, A_k , f_k и θ_k – амплитуда, частота и начальная фаза k-й комплексной экспоненты, $R_k = A_k e^{j\varphi_k}$ – комплексная амплитуда k-й экспоненты, $z_k = e^{j2\pi f_k nT}$ – комплексная экспонента (комплексный полюс).

Алгоритм обнаружения межвиткового замыкания статора АД состоит из следующих этапов:

1. Получение отсчётов трёх сигналов тока и трёх сигналов напряжения АД $y_1, ..., y_i, ..., y_6$. Частота дискретизации должна быть выбрана с учётом полосы полезного сигнала и минимизации эффекта наложения спектров. Рекомендуется выбирать частоту дискретизации $f_{дискр}$ порядка 50 кГц. Далее частота дискретизации должна быть уменьшена с помощью децимации, так как ММП демонстрирует большую эффективность при меньшей $f_{дискр}$. Новую частоту дискретизации рекомендуется выбирать из диапазона от 100 до 5000 Гц.

2. Из N отсчётов каждого сигнала y_i составляются матрицы \mathbf{Y}_{ai} , \mathbf{Y}_{bi} :

$$\mathbf{Y}_{ai} = \begin{pmatrix} y_{i,L} & \cdots & y_{i,2} & y_{i,1} \\ y_{i,L+1} & \cdots & y_{i,3} & y_{i,2} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ y_{i,N-1} & \cdots & y_{i,N-L+1} & y_{i,N-L} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{bi} = \begin{pmatrix} y_{i,L+1} & \cdots & y_{i,3} & y_{i,2} \\ y_{i,L+2} & \cdots & y_{i,4} & y_{i,3} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ y_{i,N} & \cdots & y_{i,N-L+2} & y_{i,N-L+1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где L – параметр, равный округлённому в большую сторону значению N/3. Количество отсчётов N должно соответствовать двум и более периодам основной гармоники питания с частотой $f_{\text{пит}}$.

Из матриц \mathbf{Y}_{ai} , \mathbf{Y}_{bi} , полученных для каждого сигнала y_i , составляются блочные матрицы \mathbf{Y}_{aE} , \mathbf{Y}_{bE} :

$$\mathbf{Y}_{aE} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{a1} \\ \mathbf{Y}_{a2} \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_{a6} \end{pmatrix}, \ \mathbf{Y}_{bE} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{b1} \\ \mathbf{Y}_{b2} \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_{b6} \end{pmatrix}.$$
(4)

Для нахождения начальной фазы основной гармоники питания достаточно найти параметры двух комплексно-сопряженных экспонент z_k , т.е. выбрать параметр M равным 2. Тогда, два комплексно-сопряжённых полюса z_k находятся как обобщённые собственные значения пучка матриц $\mathbf{Y}_{bE} - \lambda \mathbf{Y}_{aE}$ по формуле $\mathbf{Z} = \mathbf{Y}_{aE}^{+} \mathbf{Y}_{bE}$. Псевдообратная матрица \mathbf{Y}_{aE}^{+} находится через сингулярное разложение:

$$\mathbf{Y}_{aE} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^{\mathrm{T}},\tag{5}$$

где U, V – левые и правые сингулярные векторы соответственно, S – диагональная матрица, содержащая сингулярные числа.

Матрица **S** содержит *M* сингулярных чисел, соответствующих основной гармонике питания, и (L - M) чисел, соответствующих шумовым компонентам. Для устранения шума сингулярные числа в матрице **S** упорядочиваются по убыванию, затем матрицы разложения **S**, **U**, **V** усекаются до ранга *M*. После чего находится усечённая матрица $\mathbf{Y}_{aE}^+ = \mathbf{V}_0 \mathbf{S}_0^{-1} \mathbf{U}_0^{\mathrm{T}}$, где $\mathbf{V}_0 = (\mathbf{v}_1, \ldots, \mathbf{v}_M)$, $\mathbf{U}_0 = (\mathbf{u}_1, \ldots, \mathbf{u}_M)$, \mathbf{v}_M и \mathbf{u}_M – сингулярные векторы, $\mathbf{S}_0 = \text{diag}(\sigma_1, \ldots, \sigma_M)$, σ_M – наибольшие сингулярные числа.

Полюса z_k находятся по формуле:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{V}_0 \mathbf{S}_0^{-1} \mathbf{U}_0^{\mathrm{T}} \mathbf{Y}_{bE}.$$
 (6)

Комплексные амплитуды R_{ki} для каждого сигнала y_i находятся с помощью метода наименьших квадратов:

$$R_{ki} = (\mathbf{Z}^{\mathrm{T}}\mathbf{Z})^{-1}\mathbf{Z}^{\mathrm{T}}y_{K} = \mathbf{Z}^{+}y_{K},$$
(7)
 $\Gamma \not\equiv e \ y_{K} = (y_{i,1} \ y_{i,2} \ \dots \ y_{i,N})^{\mathrm{T}}, \ R_{ki} = (R_{1i} \ R_{2i} \ \dots \ R_{Mi})^{\mathrm{T}}, \ \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 \\ z_{1} & \dots & z_{M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{1}^{N-1} & \dots & z_{M}^{N-1} \end{pmatrix}.$

По найденным полюсам *z_k* рассчитываются значения частоты гармоники:

$$f_k = \operatorname{Imag}\left(\ln(z_k) \cdot f_{\partial u c \kappa p}\right) / 2\pi$$

Так как ММП находит комплексно-сопряжённые пары полюсов, в результате расчёта будут получены два значения частоты f_k – положительное и отрицательное. Начальная фаза гармоники рассчитывается по комплексной амплитуде R_{ki} , соответствующей полюсу z_k с положительным значением f_k :

$$\varphi_k = \arg(R_{ki}).$$

Начальная фаза гармоники на частоте питания рассчитывается для трёх сигналов напряжения U_A , U_B , U_C и трёх сигналов тока I_A , I_B , I_C соответственно. Фазовые задержки между сигналами напряжения и тока рассчитываются как:

 $\Delta \varphi_A = \varphi_{UA} - \varphi_{IA}, \ \Delta \varphi_B = \varphi_{UB} - \varphi_{IB}, \ \Delta \varphi_C = \varphi_{UC} - \varphi_{IC}.$

3. Рассчитывается диагностический признак Ind по формуле (1).

4. Следуя описанным пунктам 1–3, необходимо получить выборку диагностических признаков *Ind* для нескольких типовых режимов работы АД (частота питания, уровень нагрузки) при разных технических состояниях (исправный АД, АД с межвитковым замыканием). Из полученной выборки *Ind* и соответствующих значений частоты питания $f_{пит}$ формируются векторы $\mathbf{x}_i = \{Ind; f_{пит}\}$, где i = 1, ..., n, n - размер выборки*Ind* $. Также формируется вектор из меток классов <math>c_i$, где $c_i = +1$ для \mathbf{x}_i , соответствующего исправному АД, и $c_i = -1$ для \mathbf{x}_i , соответствующего АД с межвитковым замыканием.

5. Совокупность выборок **x**_i и c_i образует обучающий набор данных. На основе обучающего набора классификатор опорных векторов (SVM-классификатор) находит разделяющую гиперплоскость, которая отделяет **x**_i с меткой класса $c_i = +1$ (исправный АД) от **x**_i с меткой класса $c_i = -1$ (неисправный АД). Уравнение гиперплоскости имеет вид:

$$\langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b = 0$$
 при условии $c_i (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) \ge 1,$ (8)

где $\langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle$ – скалярное произведение, \mathbf{w} – вектор нормали к гиперплоскости, *b* – смещение гиперплоскости относительно начала координат.

Параметры **w** и b находятся на основе опорных векторов – векторов **x**_i, которые находятся ближе всего к гиперплоскости и для которых выполняется условие $c_i(\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) = 1$. Задача нахождения параметров **w** и b решается с помощью метода множителей Лагранжа. Вектор нормали **w** вычисляется как линейная комбинация **x**_i:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \lambda_i c_i \mathbf{x}_i,$$

где λ_i – множители Лагранжа, которые являются ненулевыми только для опорных векторов.

Смещение *b* вычисляется как:

$$b=c_i-\langle \mathbf{w},\mathbf{x}_i\rangle,\,\lambda_i>0.$$

На основе найденных параметров **w** и *b* формируется диагностический критерий в виде функции бинарной классификации для новых значений **x**:

$$F(\mathbf{x}) = \operatorname{sign}(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b), \tag{9}$$

где $F(\mathbf{x}) = +1$, если АД в исправном состоянии, $F(\mathbf{x}) = -1$, если АД имеет межвитковые замыкания в статоре.

Проверка алгоритма выполнена на данных, полученных на экспериментальном стенде (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Экспериментальный стенд MFS-Magnum

Стенд содержит двухполюсный АД Marathon Electric D391 (0,25 кВт), питаемый от частотного преобразователя, и длинный вал, установленный на двух подшипниковых опорах. Нагрузка на АД задавалась магнитным тормозом, соединенным с длинным валом через ременную передачу. Для измерения сигналов линейных напряжений использованы дифференциальные пробники напряжения Pintek DP-50, для измерения сигналов фазных токов использованы токовые клещи Rigol RP1001C. Сигналы получены с помощью платформы NI PXIe. Для моделирования межвиткового замыкания секция обмотки статора, составляющая приблизительно 8% от общего числа витков, замыкалась накоротко через специальные клеммы. АД работал в исправном и неисправном состояниях при частотах питания 20 Гц, 30 Гц и 40 Гц и при нагрузках 5%, 25%, 50%, 75% от номинальной. Сигналы длительностью по 10 секунд для каждого режима получены с частотой дискретизации кГц. Затем частота 50 дискретизации полученных сигналов была понижена до 2 кГц.

Выборка диагностических признаков *Ind* для всех режимов работы получена в ходе обработки сигналов АД в режиме скользящего окна со сдвигом в 1 отсчёт. Размер окна составил: 250 отсчётов для сигналов с частотой питания

20 Гц, 167 отсчётов – для 30 Гц, 125 отсчетов – для 40 Гц. Средние значения *Ind* для разных режимов работы приведены в таблице 1. Установлено, что значение *Ind* для АД с межвитковым замыканием в среднем в 3 раза больше значения для исправного АД при соответствующей частоте питания.

Частота питация Лиагиостический признак лля Лиагиостический признак лля				
Гц	исправного АД, градусы	неисправного АД, градусы		
Нагрузка 5%				
20	2,66	8,09		
30	3,24	10,34		
40	4,93	11,55		
Нагрузка 25%				
20	2,61	8,10		
30	3,23	10,29		
40	4,64	12,79		
Нагрузка 50%				
20	2,45	7,88		
30	3,18	10,21		
40	4,82	11,50		
Нагрузка 75%				
20	2,39	7,70		
30	3,09	10,03		
40	4,65	12,65		

Таблица 1 – Средние значения диагностического признака Ind

На основе *Ind* и частоты питания $f_{пит}$ сформирована совокупность из 240000 векторов **x**_i для всех режимов АД. В результате обучения SVM-классификатора с линейной функцией разделения получена функция классификации $F(\mathbf{x})$. Найденная функция классификации $F(\mathbf{x})$ протестирована на новых сигналах АД, полученных при изменении частоты питания в диапазоне от 20 до 25 Гц и с увеличением количества замкнутых витков от 0 до 8% при постоянной нагрузке 50% от номинальной (Рисунок 3). Результат тестирования показал 95,25% верно классифицированных случаев состояния АД от общего числа элементов выборки.



Рисунок 3 – Результат обработки нестационарных сигналов АД

В третьей главе проведён анализ влияния обрыва стержня ротора на спектр тока АД в диапазоне 5-ой и 7-ой гармоник частоты питания. Обрыв стержня ротора (Broken Bar, *BB*) приводит к появлению дополнительного магнитного поля в общем поле АД, которое модулирует основную гармонику питания тока статора составляющими с частотами:

$$f_{BB} = 2sk \cdot f_{\Pi \mu \pi}, \tag{10}$$

где $s = (f_{пит} - f_{вращ})/f_{пит}$ – скольжение АД, $f_{вращ}$ – частота вращения АД, k = 1, 2...– порядок гармоники дефекта ротора. Как правило, скольжение АД в рабочем режиме меняется в пределах от 2 до 10%, следовательно, частота гармоники дефекта f_{BB} при k = 1 может принимать значение в диапазоне от 0,4 до 10 Гц при изменении частоты питания от 10 до 50 Гц.

Модуляция также касается нечётных гармоник тока с частотами $5f_{\text{пит}}$ и $7f_{\text{пит}}$, вызванных несинусоидальным напряжением питания, а также пространственными гармониками магнитодвижущей силы. Так, сигналы тока АД с обрывом стержня ротора, отфильтрованного в диапазоне 5-ой гармоники питания, будут иметь вид:

$$i_{a BB}(t) = A_{5}\cos(5 \cdot 2\pi f_{num}t + \varphi_{5}) \cdot [1 + m \cdot i_{BB}(t)]$$

$$i_{b BB}(t) = A_{5}\cos\left[5\left(2\pi f_{num}t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_{5}\right] \cdot [1 + m \cdot i_{BB}(t)], \quad (11)$$

$$i_{c BB}(t) = A_{5}\cos\left[5\left(2\pi f_{num}t + \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_{5}\right] \cdot [1 + m \cdot i_{BB}(t)]$$

где А₅ и ϕ_5 – амплитуда и начальная фаза гармоники питания с частотой $5f_{\text{пит}}$, m – коэффициент модуляции, $i_{BB}(t) = A_{BB}\cos(2\pi f_{BB}t + \varphi_{BB})$ – модулирующий сигнал, A_{BB} , f_{BB} , φ_{BB} – амплитуда, частота и начальная фаза гармоники дефекта ротора.

Для повышения информативности сигналы тока необходимо демодулировать: удалить гармонику питания из сигналов и перенести гармоники дефекта ротора из области частот $5f_{пит}$ в область низких частот. Для этого сигналы тока (11) необходимо возвести в квадрат и суммировать:

$$i_{\partial e M \partial \partial 1}(t) = i_{a BB}^{2}(t) + i_{b BB}^{2}(t) + i_{c BB}^{2}(t) = \left[1 + m \cdot i_{BB}(t)\right]^{2} \cdot \left[\left(A_{5}\cos(5 \cdot 2\pi f_{num}t + \varphi_{5})\right)^{2} + \left(A_{5}\cos\left[5\left(2\pi f_{num}t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_{5}\right]\right)^{2} + \left(A_{5}\cos\left[5\left(2\pi f_{num}t + \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_{5}\right]\right)^{2}\right] = ...(12)$$
$$= \frac{3}{2}A_{5}^{2}\left[1 + m \cdot i_{BB}(t)\right]^{2} = \frac{3}{2}A_{5}^{2}\left[1 + 3m \cdot i_{BB}(t) + m^{2} \cdot i_{BB}^{2}(t)\right]$$

Демодулированный сигнал тока $i_{\partial emod2}(t)$, отфильтрованный в диапазоне 7ой гармоники питания, рассчитывается аналогично. Демодулированные сигналы $i_{\partial emod1}(t)$ и $i_{\partial emod2}(t)$ для исправного АД будут представлять собой постоянные составляющие. Сигналы $i_{\partial emod1}(t)$ и $i_{\partial emod2}(t)$ для АД с обрывом стержня в роторе будут содержать в себе гармоники дефекта ротора (Рисунок 4).



Рисунок 4 – Спектр демодулированного сигнала тока АД с обрывом стержня

Амплитуды гармоник дефекта ротора растут с увеличением обрывов стержней. Поэтому в качестве диагностических признаков предлагается использовать значения амплитуд гармоник дефекта ротора, извлечённых из демодулированных сигналов $i_{demod1}(t)$ и $i_{demod2}(t)$:

 $h5 = (A_{\partial e\phi \ 1,5}, ..., A_{\partial e\phi \ k,5}), h7 = (A_{\partial e\phi \ 1,7}, ..., A_{\partial e\phi \ k,7}),$ (13) где $A_{\partial e\phi \ k,5}$ и $A_{\partial e\phi \ k,7}$ – амплитуды гармоник дефекта ротора k-ого порядка. Как правило, количество гармоник дефекта ротора варьируется от 1 до 4 и зависит от конструкции АД и степени повреждения ротора. В данной работе используются параметры гармоник дефекта до третьего порядка.

Алгоритм обнаружения обрыва стержней ротора АД состоит из следующих этапов:

1. Получение отсчётов трёх сигналов тока и частоты вращения ротора АД. Частота дискретизации сигналов тока должна быть выбрана с учётом полосы полезного сигнала и минимизации эффекта наложения спектров. Далее частота дискретизации сигнала уменьшается с помощью децимации. Сигнал частоты вращения ротора может быть получен с помощью специальных датчиков (датчик Холла, тахометр, энкодер), либо с помощью датчика вибрации.

2. Расчёт скольжения АД *s* и частот гармоник дефекта ротора $f_{BB pacuëm}$ по формуле (10) при k = 1, 2, 3.

3. Фильтрация сигналов тока полосовыми фильтрами с полосой пропускания не менее $[5f_{пит} - f_{BB pacyem}; 5f_{пит} + f_{BB pacyem}]$ и $[7f_{пит} - f_{BB pacyem}; 7f_{пит} + f_{BB pacyem}]$ при k = 3.

4. Получение двух демодулированных сигналов тока $i_{demod1}(t)$ и $i_{demod2}(t)$ по формуле (12).

5. Для каждого сигнала $i_{demod1}(t)$ и $i_{demod2}(t)$ из N отсчётов составляются матрицы \mathbf{Y}_{ai} , \mathbf{Y}_{bi} по формуле (3). Количество отсчётов N должно соответствовать двум и более периодам гармоники дефекта ротора с частотой f_{BB} при k = 1. Из матриц \mathbf{Y}_{ai} , \mathbf{Y}_{bi} составляются блочные матрицы \mathbf{Y}_{aE} , \mathbf{Y}_{bE} аналогично формуле (4).

Для расчёта частот и амплитуд трёх гармоник дефекта ротора необходимо найти параметры M = 6 комплексно-сопряженных экспонент z_k . Для этого находится псевдообратная матрица \mathbf{Y}_{aE}^+ через сингулярное разложение по формуле (5). Матрицы разложения усекаются до ранга M = 6. Находятся шесть полюсов z_k по формуле (6). Комплексные амплитуды R_{Mi} для сигналов $i_{demod1}(t)$ и $i_{demod2}(t)$ находятся по формуле (7).

6. По найденным полюсам z_k и амплитудам R_{Mi} рассчитываются значения частот и амплитуд гармоник:

$$f_k = \operatorname{Imag}\left(\ln(z_k) \cdot f_{\partial u c \kappa p}\right) / 2\pi, \ A_k = 2|R_k|.$$
(14)

Необходимо проверить, соответствуют ли найденные частоты рассчитанным значениям *f*_{BB расчёт}:

- если $|f_k - f_{BB pacyem}| < 0,5$ при k = 1, то $A_{\partial e \phi 1,5} = A_k$ для $i_{\partial e mod1}(t)$ и $A_{\partial e \phi 1,7} = A_k$ для $i_{\partial e mod2}(t)$;

- если $|f_k - f_{BB pacuëm}| < 0,5$ при k = 2, то $A_{\partial e \phi}_{2,5} = A_k$ для $i_{\partial e mod1}(t)$ и $A_{\partial e \phi}_{2,7} = A_k$ для $i_{\partial e mod2}(t)$;

- если $|f_k - f_{BB pacyem}| < 0,5$ при k = 3, то $A_{\partial e \phi}_{3,5} = A_k$ для $i_{\partial e mod1}(t)$ и $A_{\partial e \phi}_{3,7} = A_k$ для $i_{\partial e mod2}(t)$.

Если найденные частоты f_k отличаются от расчётных значений $f_{BB pacyem}$ более чем на 0,5 Гц, значения соответствующих амплитуд $A_{de\phi k,5}$ и $A_{de\phi k,7}$ приравнивается нулю (т.е. найденные гармоники не являются гармониками дефекта ротора).

7. Из значений амплитуд $A_{\partial e\phi}_{k,5}$ и $A_{\partial e\phi}_{k,7}$ формируются вектора диагностических признаков *h5* и *h7* по формуле (13).

8. Следуя пунктам 1–7, необходимо получить выборку из векторов h5 и h7 для нескольких режимов работы АД при разных технических состояниях (исправный АД, АД с обрывом стержня). Из полученной выборки диагностических признаков h5 и h7 формируются векторы $\mathbf{x}_i = \{h5; h7\}$, где $i = 1, ..., n, n - размер выборки. Формируется вектор из меток классов <math>c_i$, где $c_i = +1$ для \mathbf{x}_i , соответствующему исправному состоянию АД, и $c_i = -1$ для \mathbf{x}_i , соответствующему состоянию АД с обрывом стержня ротора.

9. На основе полученного набора \mathbf{x}_i и c_i SVM-классификатор находит параметры разделяющей гиперплоскости \mathbf{w} и *b*. Параметры \mathbf{w} и *b* находятся на основе опорных векторов – векторов \mathbf{x}_i , которые находятся ближе всего к гиперплоскости. Задача нахождения параметров \mathbf{w} и *b* решается с помощью метода множителей Лагранжа. Вектор нормали \mathbf{w} и смещение *b* вычисляются по формулам:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i c_i \mathbf{x}_i, \ b = c_i - \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle, \ \lambda_i > 0,$$

где λ_i – ненулевые множители Лагранжа.

На основе найденных параметров **w** и *b* формируется диагностический критерий в виде функции бинарной классификации:

$$F(\mathbf{x}) = \operatorname{sign}(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b),$$

где $F(\mathbf{x}) = +1$, если АД в исправном состоянии, $F(\mathbf{x}) = -1$, если АД имеет обрывы стержней ротора.

Проверка алгоритма выполнена на данных четырёхполюсного АД W22 WEG (0,74 кВт). Данные соответствуют исправному АД и АД с обрывом одного, двух, трёх и четырёх стержней. Данные получены при постоянной частоте питания 60 Гц и уровнях нагрузки 25%, 50% 75% и 100% от номинальной. Для получения частоты вращения использован сигнал виброускорения, измеренного с корпуса АД с помощью акселерометра Vibrocontrol PU 2001. Для измерения сигналов тока использованы токовые клещи Yokogawa 96033. Длина каждого сигнала составила 180 с при частоте дискретизации 50 кГц.

Наибольшее расчётное значение частоты гармоники дефекта составило 4,88 Гц. Поэтому полосы пропускания эллиптических БИХ-фильтров 10 порядка выбраны равными [285 Гц; 315 Гц] и [405 Гц; 435 Гц]. Отфильтрованные сигналы тока возведены в квадрат и суммированы по формуле (12). Частота дискретизации полученных демодулированных сигналов понижена с 50 кГц до 100 Гц. Демодулированные сигналы обработаны в режиме скользящего окна длиной 60 отсчётов со сдвигом в 1 отсчёт. Из полученных значений диагностических признаков h5 и h7 сформированы векторы $\mathbf{x}_i = \{h5; h7\}$ и вектор меток классов. На основе совокупности из 128000 векторов \mathbf{x}_i , полученных для разных режимов работы АД, обучен SVM-классификатор с радиально-базисной функцией разделения. Найденная функция классификации $F(\mathbf{x})$ протестирована на 32000 значениях \mathbf{x}_i , которые не использовались при обучении. Результат тестирования показал 98,07% верно классифицированных случаев состояния АД от общего числа элементов тестовой выборки.

В четвёртой главе исследовано влияние повреждений подшипников на сигналы виброускорения. Выявлено, что диагностические признаки неисправностей на ранних стадиях проявляются в виде частотных компонентов в диапазонах собственных частот подшипника. Также приводится информация о том, что виброускорение, измеренное с вращающегося вала АД, является более чувствительным к ранним неисправностям подшипников по сравнению с сигналами, полученных от акселерометров на корпусе АД. Поэтому в данной работе диагностические признаки в виде параметров спектра вибрации в диапазоне собственных частот подшипника извлекаются из виброускорений вращающегося вала. Для извлечения диагностических признаков используется преобразование Гильберта-Хуанга.

Преобразование Гильберта-Хуанга представляет собой комбинацию эмпирической модовой декомпозиции (EMD) и преобразования Гильберта. ЕMD раскладывает исходный сигнал виброускорения x(t) на набор из k внутренних мод IMF_k(t) и остаточного члена r(t):

$$x(t) = \sum_{k} IMF_{k}(t) + r(t) \,.$$

Отдельные IMF будут соответствовать компонентам собственных частот подшипника, гармоникам с частотой вращения вала, гармоникам редуктора и другим механическим компонентам. Для диагностики дефектов подшипников необходимо выделить моды, связанные с собственными частотами подшипника. Как правило, это будет несколько IMF с самой высокой частотой.

Преобразование Гилберта используется для получения мгновенных амплитуды $a_k(t)$ и частоты $\omega_k(t)$ каждой IMF:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{n} a_k(t) e^{i \int \omega_k(t) dt}$$
, *n* – число IMF.

На основе мгновенных частот и амплитуд сигнала виброускорения строится спектр Гильберта (Рисунок 5).



Рисунок 5 – Спектры Гилберта для виброускорения подшипников

В спектре Гилберта для исправного подшипника будут отсутствовать выраженные локальные изменения мгновенной амплитуды, тогда как для подшипника с неисправностью будет наблюдаться локальный рост амплитуды в диапазонах собственных частот подшипника. Характер изменения амплитуды будет зависеть от типа неисправности, степени её развития и местоположения.

Наличие цветовых пятен в спектре Гилберта, указывающих на рост амплитуды вибрации, предлагается использовать в качестве диагностического признака неисправности подшипника. Для обнаружения данных пятен на изображении разработана свёрточная нейронная сеть (CNN) следующей архитектуры (Рисунок 6).



Рисунок 6 – Архитектура свёрточной нейронной сети

Размер входных изображений спектра Гилберта равен 32×32 пикселям. Выход сети представляет собой слой из 5 нейронов, каждый из которых соответствует классу неисправности *с*_{*j*}: «Исправный», «Дефект шарика», «Дефект внутреннего кольца», «Дефект внешнего кольца», «Комбинированный дефект». В качестве функции активации нейронов выбрана функция ReLU, в качестве функции ошибки сети – перекрёстная кросс-энтропия:

$$\log \log x = -\frac{1}{q} \sum_{i=1}^{q} \sum_{j=1}^{l} y_{ij} \log a_{ij},$$

где q – число изображений в обучающем наборе, l = 5 – число классов, a_{ij} – рассчитанное значение вероятности принадлежности *i*-ого изображения к *j*-классу, y_{ij} – истинное значение вероятности принадлежности *i*-ого изображения к *j*-классу. $y_{ij} = 1$, если изображение соответствует *j*-классу, в противном случае $y_{ij} = 0$.

Алгоритм обнаружения неисправностей подшипников состоит из следующих этапов:

Измерение виброускорений вращающегося 1. вала с помощью датчика для набора специализированного исправных подшипников И подшипников с разными видами неисправностей. Частота дискретизации сигнала должна быть выбрана с учётом полосы полезного сигнала и минимизации эффекта наложения спектров.

2. Преобразование измеренных сигналов в линейные виброускорения для горизонтального и вертикального направлений относительно оси вращения вала.

2. Разбиение сигналов виброускорения на фрагменты длиной, соответствующей *m* оборотам вала. Рекомендуется выбирать $m \ge 2$.

3. Декомпозиция фрагментов сигналов на моды IMF с помощью EMD.

4. Получение изображений спектров Гилберта для первых трёх найденных IMF с помощью преобразования Гилберта.

5. Формирование обучающего набора изображений и вектора меток классов для разных состояний подшипников.

6. Изображения обучающего набора подаются на вход CNN. В процессе обучения параметры CNN подбираются так, чтобы ошибка logloss была минимальной. Данный процесс останавливается, если в течение 50 итераций обучения ошибка не уменьшается.

7. При подаче на вход обученной CNN нового изображения, сеть выдаёт на выходе пять значений a_j : a_1 – вероятность для класса «Исправный»; a_2 – вероятность для класса «Дефект шарика»; a_3 – вероятность для класса «Дефект внутреннего кольца»; a_4 – вероятность для класса «Дефект внешнего кольца»; a_5 – вероятность для класса «Комбинированный дефект». Максимальное значение вероятности определяет текущее состояние подшипника:

$$C = \arg\max(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5).$$

Проверка алгоритма выполнена на данных, полученных на экспериментальном стенде MFS-Magnum (Рисунок 7). Вал установлен на две подшипниковые опоры с исправным и диагностируемым подшипником модели ER-16K. Беспроводной датчик виброускорений вращающегося вала WAS закреплён на конце вала со стороны диагностируемого подшипника.



Рисунок 7 – Экспериментальный стенд с установленным датчиком WAS

Сигналы виброускорений измерялись последовательно для исправного подшипника, подшипника с дефектом внутреннего кольца и других типов неисправностей. Частота дискретизации составила 31,175 кГц при частоте вращения вала 1200 об/мин (20 Гц). Каждый сигнал линейного виброускорения в вертикальном направлении был разбит на фрагменты длиной в 3897 отсчетов (2,5 оборота вала) со сдвигом в 1559 отсчетов (1 оборот вала). Фрагменты сигналов декомпозированы на IMF с помощью EMD. На основе первых трёх IMF получены спектры Гилберта. Всего было получено 27900 изображений. CNN обучалась на 25110 изображениях. Затем обученная CNN была протестирована на оставшихся 2790 изображениях. Результат тестирования приведён в таблице 2. Количество верно определенных состояний подшипника составило 98,35% от общего числа изображений.

В заключении приведены основные выводы и результаты работы.

Класс подшипника	Точность	Количество	Количество
	классификации	истинных ответов	ложных ответов
Исправный	100,00%	565 из 565	0 из 565
Дефект внутреннего кольца	96,13%	546 из 568	22 из 568
Дефект внешнего кольца	99,08%	540 из 545	5 из 545
Дефект шарика	96,54%	558 из 578	20 из 578
Комбинированный дефект	100,00%	534 из 534	0 из 534

Таблица 2 – Результат тестирования CNN

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1) Разработан алгоритм обработки сигналов АД для обнаружения межвитковых замыканий в статоре на основе диагностического признака в виде разности фазовых задержек между сигналами тока и напряжения. Диагностический критерий определяется на основе выборок диагностических признаков для исправного и неисправного состояний АД с помощью метода опорных векторов. Разработанный алгоритм позволяет оценить состояние АД при разных уровнях нагрузки и частоте питания даже в нестационарном режиме работы. Экспериментальная проверка алгоритма показала 95% вероятность правильной оценки состояния АД.

2) Разработан алгоритм обработки сигналов АД для обнаружения обрывов стержней в роторе на основе диагностических признаков в виде амплитуд гармоник дефекта ротора, извлеченных из демодулированных сигналов тока. Алгоритм демодуляции сигналов тока заключается в фильтрации сигналов в диапазоне 5-ой и 7-ой гармоники частоты питания, возведении отфильтрованных сигналов в квадрат и последующем их суммировании. Диагностический критерий определяется на основе выборок диагностических признаков для исправного и неисправного состояний АД с помощью метода опорных векторов. Разработанный алгоритм позволяет оценить состояние АД при разных уровнях нагрузки. Экспериментальная проверка алгоритма показала 98% вероятность правильной оценки состояния АД.

3) Разработан алгоритм обработки сигналов виброускорений, измеренных с вращающегося вала АД, для обнаружения неисправностей подшипников на основе обнаружения локальных изменений амплитуды виброускорения в диапазонах собственных частот подшипника. Для обнаружения изменений амплитуды сигналы виброускорений преобразуются в изображения спектра Гилберта, которые затем обрабатываются свёрточной нейронной сетью. Свёрточная нейронная сеть позволяет получить вероятность принадлежности изображения к классу с определённым видом неисправности. Разработанный алгоритм показывает 98% вероятность правильной оценки состояния подшипников на экспериментальных данных.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, входящие в рецензируемые научные издания, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1) Еремеева, В.А. Обнаружение дефектов ротора асинхронного двигателя в нестационарных условиях методом матричных пучков / В.А. Еремеева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2025. – Т. 25, №1. – С. 30–42. DOI: http://dx.doi.org/10.14529/ctcr250103 (BAK)

2) Шестаков, А.Л. Обнаружение дефектов ротора асинхронного двигателя по высшим гармоникам тока методом матричных пучков / А.Л. Шестаков, С.Г. Некрасов, В.А. Еремеева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2025. – Т. 25, №2. – С. 55–64 (ВАК) (8 с. из 10 с.)

3) Ibryaeva, O. A novel hybrid method for fault diagnosis of two rolling bearings mounted on the same shaft / O. Ibryaeva, V. Sinitsin, V. Sakovskaya, V. Eremeeva // Measurement: Sensors. – 2021. – Vol. 18. – P. 100210. DOI: 10.1016/j.measen.2021.100210 (Scopus). (1 с. из 4 с.)

4) Ibryaeva, O. Intelligent bearing fault diagnosis method combining mixed input and hybrid CNN-MLP model / O. Ibryaeva, V. Sinitsin, V. Sakovskaya, V. Eremeeva // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 180. – P. 109454. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109454</u> (Scopus). (5 с. из 20 с.)

5) Shestakov, A. The Detection of Rotor Bar Faults in Induction Motors Using the Recursive Matrix Pencil Method / A. Shestakov, O. Ibryaeva, V. Eremeeva, V. Sinitsin // 19th IMEKO TC10 Conference "Measurement for Diagnostics, Optimisation and Control to Support Sustainability and Resilience". – International Measurement Confederation (IMEKO), 2023. – P. 196257. DOI: https://doi.org/10.21014/tc10-2023.015 (Scopus). (2 с. из 6 с.)

6) Shestakov, A. Detection of Broken Bar Fault in Induction Motor Using Higher-Order Harmonics Analysis / A. Shestakov, D. Galyshev, V. Eremeeva, V. Sinitsin, O. Ibryaeva // 19th IMEKO TC10 Conference "Measurement for Diagnostics, Optimisation and Control to Support Sustainability and Resilience". – International Measurement Confederation (IMEKO), 2023. – P. 196257. DOI: https://doi.org/10.21014/tc10-2023.010 (Scopus). (1 с. из 6 с.)

Патент:

7) Еремеева, В.А. Способ контроля состояния электрических машин по сигнатурному анализу токового сигнала: пат. 2799985 Рос. Федерация: МПК G 01 R 31/34 (2006.01) / В.А. Еремеева, О.Л. Ибряева; ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»; Патентный отдел. – № 2023103816; заявл. 20.02.2023; опубл. 14.07.2023, Бюл. № 20. – 9 с. (3 с. из 6 с.)

Другие публикации:

8) Еремеева, В.А. Оценка точности измерения фазовой задержки сигналов методом матричных пучков / В.А. Еремеева, О.Л. Ибряева // Сборник тезисов докладов III Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «ЗА НАМИ БУДУЩЕЕ». – ООО «Типография Литас+», 2024. – С. 295–296. (1 с. из 2 с.)

9) Шестаков, А.Л. Обнаружение обрывов стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя по высшим гармоникам тока статора / А.Л. Шестаков, Д.В. Галышев, В.А. Еремеева, О.Л. Ибряева // Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2023 (ЦИСП'2023): сборник научных статей. – Издательский центр Южно-Уральского государственного университета, 2024. – С. 509–516. (2 с. из 8 с.)

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FENU-2023-0010 (2023010ГЗ)).

Еремеева Виктория Александровна

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ АСУ ТП

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 28.04.2025. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 110 экз. Заказ 110/136.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в типографии Издательского центра ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.