

ОТЗЫВ

официального оппонента

Лукьянова Анатолия Валериановича

на диссертационную работу **Еремеевой Виктории Александровны**
*«Алгоритмы обработки информации для оценки технического состояния
асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ ТП»*,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

Актуальность темы исследования

Асинхронные двигатели занимают ключевое место в составе исполнительных механизмов автоматизированных систем управления технологическими процессами. Их отказоустойчивость напрямую влияет на бесперебойность работы критически важных производственных объектов. Однако даже высокая конструктивная надежность асинхронного двигателя не исключает риска возникновения неисправностей, вызванных эксплуатационными нагрузками, старением изоляции или механическим износом. Внезапный выход двигателя из строя способен остановить работу целого технологического участка, что влечет за собой значительные экономические потери. В связи с этим разработка эффективных алгоритмов диагностики технического состояния асинхронных двигателей приобретает особую значимость, отвечая требованиям современных стандартов промышленной безопасности.

Исследование Еремеевой В.А. направлено на решение актуальной научно-технической задачи, связанной с разработкой алгоритмов обнаружения наиболее распространенных неисправностей асинхронного двигателя, таких как обрыв стержней ротора, межвитковые замыкания обмотки статора, повреждения подшипниковых узлов. Своевременное выявление данных неисправностей позволяет предотвратить прогрессирующее развитие повреждений и катастрофический отказ двигателя. Предлагаемые в работе алгоритмы, основанные на анализе сигналов тока, напряжения и виброускорения двигателя обеспечивают высокую вероятность обнаружения указанных неисправностей.

Структура и содержание диссертации

Диссертация Еремеевой Виктории Александровны состоит из введения, четырех глав, заключения (основных выводов и результатов) и двух приложений. Общий объем диссертации 105 страниц, из них 87 страниц текста, включая 39 рисунков. Библиография включает 106 наименований.

Введение содержит обоснование актуальности исследования, описание объекта и методов, научной новизны, теоретической и практической значимости работы. В введении сформулированы цель и задачи исследования, приведены данные по апробации, публикациям и внедрению результатов работы, выделены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ предметной области, включая статистику отказов асинхронных двигателей, а также обзор современных методов и алгоритмов обработки сигналов для диагностики неисправностей асинхронных двигателей. На основании статистических данных, приведенных автором из трех независимых исследований, повреждения подшипников, межвитковые замыкания в обмотке статора и обрыв стержней ротора являются наиболее распространенными неисправностями асинхронного двигателя. В связи с этим автор в своей работе делает верный акцент на обнаружении данных видов неисправностей. Рассмотрены причины появления указанных неисправностей, существующие подходы к их выявлению, преимущества и ограничения методов.

Во второй главе представлен разработанный алгоритм диагностики межвитковых замыканий в обмотке статора, основанный на анализе расхождений между фазовыми задержками сигналов тока и напряжения двигателя. Достоинством предложенного алгоритма является использование нового метода частотного анализа сигналов – векторного метода матричных пучков. Данный метод обладает высокой устойчивостью к шуму и обеспечивает точное измерение фазовых задержек за счёт совместной обработки сигналов тока и напряжения двигателя. Отличие метода матричных пучков от преобразования Фурье заключается в способности работать с сигналами малой длительности с сохранением высокого спектрального разрешения, что позволяет извлекать диагностические признаки неисправностей из нестационарных сигналов при изменении режима работы двигателя.

Использование метода опорных векторов для формирования диагностического критерия позволяет достоверно классифицировать состояние двигателя при наличии шума в сигналах за счёт максимизации расстояния между двумя классами диагностических признаков («Исправный двигатель» и «Неисправный двигатель»).

Разработанный алгоритм верифицирован на сигналах, полученных с помощью математической модели асинхронного двигателя с межвитковыми замыканиями статора, и на экспериментальных данных, полученных на лабораторной установке с заложенным дефектом. Результаты тестирования подтвердили высокую эффективность предложенного подхода, обеспечивающего точность обнаружения дефекта свыше 95%, а также возможность диагностики двигателя в широком диапазоне режимов работы.

В третьей главе представлен разработанный алгоритм диагностики обрыва стержня ротора, основанный на комплексном анализе сигналов тока двигателя. Основным преимуществом алгоритма является использование амплитуд гармоник дефекта ротора высших порядков (в районе 5-ой и 7-ой частоты питания) в качестве диагностических признаков. Согласно приведенным автором исследованиям, данные гармоники обладают большей информативностью по сравнению с более известными боковыми гармониками дефекта в районе основной частоты питания.

Предложенный алгоритм обеспечивает совместную обработку трёх сигналов тока двигателя для двух разных частотных диапазонов, что позволяет с высокой достоверностью обнаружить признаки дефекта ротора. Совместная обработка сигналов тока реализована на основе векторного метода матричных пучков, который позволяет получить точные оценки амплитуд и частот гармоник дефекта ротора за счёт высокого спектрального разрешения и устойчивости к шуму.

Метод опорных векторов использован для формирования диагностического критерия на основе вектора из шести диагностических признаков (амплитуд гармоник дефекта), что позволяет определить наличие обрыва стержня ротора даже при низком уровне нагрузки двигателя за счёт способности метода находить нелинейную пороговую границу с максимальным расстоянием между двумя классами состояний («Исправный двигатель» и «Неисправный двигатель»).

Алгоритм применен к сигналам, полученных на математической модели двигателя с обрывом стержня ротора, а также к экспериментальным данным, полученных на лабораторной установке. Особую ценность представляет тестирование алгоритма на независимых данных бразильского университета Сан-Паулу, полученных для асинхронного двигателя с четырьмя полюсами, что исключает возможную субъективность при интерпретации результатов. Результаты испытаний подтвердили эффективность предложенного алгоритма диагностики, обеспечивающего точность обнаружения обрывов стержней ротора свыше 93% и возможность диагностики в широком диапазоне нагрузок двигателя.

В четвертой главе представлен разработанный алгоритм диагностики подшипниковых узлов на основе комбинированной обработки сигналов виброускорения вращающегося вала с применением преобразования Гилберта-Хуанга и свёрточной нейронной сети. Особенностью алгоритма является обработка сигналов виброускорения вращающегося вала, которые отличаются большей чувствительностью к механическим повреждениям по сравнению с вибрацией, измеренной с опоры подшипника.

Преобразование Гилберта-Хуанга позволяет получить частотно-временные распределения сигналов вибрации в виде двумерных изображений, которые затем анализируются свёрточной нейронной сетью. Данный подход к обработке виброускорений позволяет автоматизировать процесс определения состояния подшипников на основе амплитудно-частотных особенностей сигналов вибрации.

Экспериментальная проверка алгоритма проведена на лабораторной установке с набором подшипников с разными типами неисправностей. Результаты испытаний продемонстрировали точность классификации повреждений свыше 98%.

Заключение содержит основные выводы и результаты по диссертационной работе.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

В работе акцентировано внимание на трех видах неисправностях асинхронного двигателя. Выбор анализируемых неисправностей обоснован приведенной статистикой отказов асинхронных двигателей из трех независимых исследований. На основе литературного обзора, состоящего преимущественно из зарубежных источников, автором проведен анализ причин и особенностей развития выбранных для исследования неисправностей, необходимых для их выявления диагностических признаков, а также методов обработки сигналов для выявления данных признаков. На основе проведенного обзора сформировано три научных задачи диссертации, решение которых раскрывают цель работы и опирается на результаты модельных и экспериментальных исследований.

Теоретические исследования влияния неисправностей на сигналы тока, напряжения и вибрации позволили разработать комплекс алгоритмов обработки информации асинхронного двигателя и диагностические критерии для выявления дефектов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертационной работе, подтверждается взаимным соответствием результатов математического моделирования и экспериментальных исследований.

Научная новизна

В качестве научного результата в работе предложен комплекс алгоритмов обработки сигналов тока, напряжения и виброускорения, а также соответствующих диагностических критериев для обнаружения трех основных неисправностей асинхронных двигателей: межвитковых замыканий обмотки статора, обрывов стержней ротора и повреждений подшипниковых узлов.

Основная научная новизна работы заключается в применении принципиально новых методов обработки диагностических сигналов, таких как векторный метод матричных пучков и преобразование Гилберта-Хуанга. Впервые в задаче диагностики асинхронных двигателей использован векторный метод матричных пучков, который обеспечивает получение точных оценок диагностических признаков неисправностей из сигналов двигателя даже при нестационарных режимах работы. Также предложена новая методика анализа вибрационных характеристик для диагностики подшипниковых узлов, где впервые комбинация преобразования Гилберта-Хуанга и сверточной нейронной сети применена к сигналам виброускорения вращающегося вала. Сочетание данных подходов позволяет выделить диагностические признаки повреждений подшипников в широкополосном спектре вибрации и автоматизировать процесс классификации неисправностей.

Предложенные алгоритмы позволяют проводить диагностику асинхронного двигателя в широком диапазоне рабочих режимов, включая различные уровни механической нагрузки и частоты питающего напряжения, обеспечивая высокую вероятность обнаружения неисправностей.

Новизна полученных результатов подтверждается проведенным литературным обзором и опубликованными работами автора, в том числе, в высокорейтинговых зарубежных изданиях (9 работ, из них 1 патент на изобретение).

Научная и практическая значимость

Научный вклад работы включает применение векторного метода матричных пучков к сигналам тока и напряжения двигателя для выявления ранее не использовавшихся диагностических признаков неисправностей статора и ротора (защищено патентом РФ №2799875), разработку новых диагностических критериев на основе метода опорных векторов, а также первое использование комбинации преобразования Гилберта-Хуанга и сверточной нейронной сети для обработки сигналов вибрации вращающегося вала.

Практическая реализация результатов заключается в создании программно-аппаратного комплекса, экспериментально подтвердившего эффективность предложенных алгоритмов для диагностики состояния асинхронного двигателя в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами. Разработанные методы обладают потенциалом для адаптации к другим типам электродвигателей, что открывает перспективы их широкого внедрения в промышленные системы диагностики.

Оценка содержания диссертации, её завершенность

Содержание и структура диссертации демонстрируют логическую целостность и полностью соответствуют поставленной цели. Изложение материала в диссертации и автореферате Еремеевой В.А. выполнено в соответствии с требованиями к кандидатским диссертациям: текст соответствует научному стилю, имеет логическую последовательность и доказательность всех положений, с обязательным цитированием соответствующих литературных источников. Автореферат отражает ключевые аспекты диссертации и передает основное содержание и научные результаты работы.

Хотя объем диссертации может показаться небольшим, работа отличается высокой информативной плотностью и отсутствием избыточных описаний. Каждый раздел содержит только значимые выводы и обоснованные результаты, что соответствует принципам эффективной научной коммуникации и облегчает восприятие материалов исследования.

Основные замечания по диссертационной работе

1.Обращает внимание слабая проработка автором отечественных исследований и литературных источников по рассматриваемым вопросам анализа вибрации и вибродиагностики: межвитковые замыкания в асинхронных электродвигателях (АЭД), обрывы стержней АЭД, дефекты подшипников АЭД.

В частности, вибрационные признаки этих и других дефектов уже были рассмотрены :

а) в 3-х монографиях А. В. Баркова и Н. А. Барковой (Санкт-Петербург), 2000-2006 гг. (предложен и рассмотрен метод огибающих высокочастотной вибрации);

б) те же авторы и Балицкий Ф.Я. подробно рассмотрели эти и другие дефекты в 7 томе «Вибродиагностика» справочника «Неразрушающий контроль», изд. «Машиностроение», 2006 г. 829 стр.;

в) в монографии Шубова И.Г. «Шум и вибрация электрических машин», 1986 г. подробно рассмотрены эти и другие дефекты электродвигателей, в частности АЭД;

г) в монографии Ширман А.Р, Соловьев А.Б. «Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования». М. 1996, 226 г. также рассмотрены диагностические признаки перечисленных дефектов АЭД.

В этих и других трудах советских и российских ученых приведены практически все признаки дефектов машинного оборудования, в частности асинхронных электродвигателей, по которым созданы успешно действующие коммерческие программы вибродиагностики в железнодорожной, судостроительной, машиностроительной, нефте-газо-добывающей и перерабатывающей отраслей промышленности, в гидро- и теплоэнергетике. Автор в данной диссертации (объем 105 стр. текста) из 106 источников привела 80 иностранных источников (статей), в основном начала 21 века, игнорируя отечественные разработки, что вызывает естественное удивление.

2. Обрывы стержней роторов АЭД достаточно распространенный дефект и однозначно диагностируется современными методами и программами. В частности, проведенное лабораторией Технической диагностики ИрГУПС обследование около 700 АЭД мотор-вентиляторов и мотор-компрессоров электровазов показало, что вибродиагностические признаки дефектов данного типа в разной степени их развития присутствовали примерно в 25-30 % случаев. Обрыв стержней ротора АЭД (от одного стержня и более) развивается с нарастающей интенсивностью, имеет наглядные диагностические признаки на спектре виброскорости (боковые полосы частот прохода поля вокруг гармоник оборотной частоты) и хорошо диагностируется авторской и имеющимися коммерческими программами. Главная проблема при этом дефекте – допустимое количество отгоревших стержней, при котором АЭД однозначно должен выводиться в ремонт. Аналогичная вибродиагностика шпинделей обрабатывающих центров (АЭД с управлением по частоте питающего тока) успешно проводилась нашей лабораторией в 2003 – 2018 гг. и на Иркутском авиазаводе.

3. В третьем разделе диссертации автор предлагает установить датчик ускорения на основе МЭМС акселерометра на вращающейся оси электродвигателя, т.е. на внутреннем кольце подшипника (переходная посадка на вал с небольшим натягом), мотивируя это тем, что вибрация, измеренная на

корпусе электродвигателя (внешнее кольцо подшипника, переходная посадка в корпус АЭД) значительно меньше, чем вибрация самого подшипника. Но внутреннее и наружные кольца подшипников находятся на одинаковом расстоянии от тел качения - генераторов вибрации.

При этом МЭМС акселерометры по сравнению с классическими пьезоакселерометрами обладают серьезными недостатками:

- меньшей точностью, более низким частотным диапазоном (как правило, менее 4 кГц), что важно при анализе высокочастотного вибросигнала от тел качения;
- температурными ограничениями (подшипники при работе нагреваются)
- смещением нулевой точки;
- ошибками масштабного коэффициента;
- внутренними шумами датчиков, которые ограничивают порог разрешения устройства.
- влиянием вибрации на показания МЭМС датчика.

4. Лабораторные установки, их описание и данные экспериментов настоящей диссертации взяты из иностранных источников. Здесь может возникнуть вопросы соавторства и авторских прав иностранных разработчиков лабораторных установок (рис.2.8; рис.3.6; рис.4.7).

Следует отметить, что замечания, высказанные по работе, не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку работы и могут рассматриваться как направления дальнейших исследований.

Публикации, отражающие основное содержание работы

По теме диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, из них 2 входят в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий в соответствии с требованиями ВАК Минобрнауки РФ по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», 4 входят в перечень ведущих рецензируемых зарубежных изданий, индексируемых наукометрической базой Scopus. Получен патент РФ на изобретение.

Заключение

Диссертационная работа Еремеевой Виктории Александровны представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, соответствующую современному уровню развития науки и техники. Тема и содержание диссертации Еремеевой Виктории Александровны «Алгоритмы обработки информации для оценки технического состояния асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ ТП» соответствует паспорту специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» по пунктам 3, 4 и 12.

По критериям актуальности, научной новизны, объёма проведённых исследований и практической значимости полученных результатов работа

удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям в области технических наук.

На основании вышеизложенного, автор диссертации Еремеева Виктория Александровна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

На обработку персональных данных согласен.

Профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение», доктор технических наук (специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (железнодорожный транспорт)»), профессор

Лукьянов
Анатолий
Валерианович



«5» июня 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»,
адрес: 664074, Сибирский федеральный округ, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15
тел.: +7(3952) 638-383
e-mail: mail@irgups.ru

Подпись Лукьянова Анатолия Валериановича заверяю



М.П.

Подпись

Лукьянова А.В.

ЗАВЕРЯЮ:

Начальник общего отдела Иргупс

Подпись

Ильинская И.И.

05

06

20 25 г.