



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, тел.: +7 (343) 375-45-07
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

03 ИЮН 2025

№ 01.09 - 04/483

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный уни-
верситет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»,
д.ф.м.н., доцент



А.В. Германенко

« 3 » июня 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», на диссертацию Еремеевой Виктории Александровны «Ал-
горитмы обработки информации для оценки технического состояния асинхронного электро-
двигателя исполнительных механизмов АСУ ТП», представленной на соискание ученой сте-
пени кандидата технических наук по специальности
2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

1. Актуальность работы

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) являются неотъемлемой частью нефтяной, металлургической, химической и других видов промышленности. Основной функцией АСУ ТП является управление технологическими про-
цессами и формирование управляющих воздействий для исполнительных механизмов. Боль-
шинство из таких механизмов приводятся в действие асинхронными электродвигателями (АД).

АД является распространённым типом двигателя в промышленности за счёт его надёж-
ности и низкой стоимости. Тем не менее, на практике наблюдается значительный процент от-
казов АД, обусловленных эксплуатацией в условиях повышенных механических, термических
и электрических нагрузок. Непредвиденные отказы АД приводят к существенным финансо-
вым потерям, вызванных простоями производственных линий.

Согласно действующим отечественным и зарубежным стандартам, обеспечение надёж-
ности, 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 оценки технического состояния АД исполнительных механизмов в АСУ ТП способствует своевременному выявлению неисправностей и минимизации рисков внеплановых простоев оборудования. Таким образом, разработка алгоритмов обработки информации и диагностических критериев для оценки технического состояния АД представляет собой актуальную научно-практическую задачу, решение которой позволяет повысить эффективность и надёжность производственных процессов.

На основе вышесказанного можно утверждать, что тема диссертации Еремеевой В.А. является актуальной, все задачи полностью обоснованы как с теоретической, так и с практической точки зрения.

2. Полученные результаты, их научная значимость

Основные научные результаты, полученные в диссертационной работе Еремеевой В.А., заключаются в следующем:

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.

3. Практическая значимость работы

Заключается в создании программно-аппаратного 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.

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

4. Оценка обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Основные научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, получены на основе теории электромагнитного поля и механических колебаний, а также на методах спектрального анализа сигналов, теории распознавания образов, методах классификации и теории планирования эксперимента. Достоверность результатов работы подтверждается результатами компьютерного моделирования и экспериментальной проверкой работоспособности предложенных методов и диагностических критериев.

5. Рекомендации по использованию результатов и выводов работы

Результаты диссертационной работы Еремеевой В.А. рекомендуются к использованию в науке и промышленности, а именно:

– разработанные способы контроля состояния обмоток статора и ротора асинхронного двигателя на основе анализа тока и напряжения могут быть рекомендованы для использования в программно-аппаратных комплексах диагностики, что позволит повысить надежность работы соответствующего оборудования и уменьшить расходы, связанные с внеплановыми ремонтами.;

– разработанный алгоритм обработки сигнала виброускорений, измеренных с вала АД и диагностический критерий, полученный с помощью свёрточной нейронной сети, для обнаружения неисправностей подшипников качения могут быть адаптированы для оценки состояния других типов электродвигателей и вращающегося оборудования.

6. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности

Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, соответствуют паспорту специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика, а именно:

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» в следующих областях исследования:

п. 3: разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта;

п. 4: разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта;

п. 12: визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.

7. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата полностью отражает содержание диссертационной работы, включая все полученные научные результаты, основные выводы и рекомендации.

8. Публикации и апробация диссертационной работы

Основные положения диссертации опубликованы в 8 работах, в том числе 1 в изданиях из перечня ВАК, 4 в рецензируемых зарубежных изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Результаты докладывались на 3 международных и 1 всероссийской научных конференциях.

9. Замечания

1) В работе не обоснована специфика АСУ ТП, требующая рассмотрения именно в контексте АСУ ТП, хотя в названии диссертации «АСУ ТП» присутствует. В том смысле, который придается в работе понятию «АСУ ТП», под этот термин попадают практически все электроприводы, работающие в как-либо управляемых системах. Вместе с тем, существует и большое количество неуправляемых автоматикой (управляемых вручную) электроприводов, которые не попадут под понятие работающих в составе АСУ ТП. Асинхронные (и прочие) двигатели таких систем выпадают из рассмотрения в данной работе при ее названии «Алгоритмы обработки информации для оценки технического состояния асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ ТП»?

2) На стр. 29 рис. 2.1 – форма графика напряжения соответствует прямому подключению АД к сети. При питании АД от преобразователя частоты с ШИМ, при достаточно близком к синусоидальному току, график напряжения будет совершенно не такой. Напряжение, например, при двухуровневой ШИМ (в диссертации нет информации о типе ШИМ у используемого в эксперименте преобразователя), приобретает только два ненулевых значения (если не учитывать наложенные шумы): $+U$ и $-U$. Следовательно, возникают вопросы об особенностях использования метода диагностики межвитковых замыканий в статоре АД, предлагаемого в главе 2, для частотно-регулируемого электропривода, а это значит – для практически всех регулируемых асинхронных электроприводов. Этот вопрос в диссертации не освещен.

3) На стр. 33: Почему выбран именно Метод опорных векторов (SVM) для диагностики межвитковых замыканий? Есть и другие методы, но в диссертации нет их обзора и сравнения. Только констатации, что он «является одним из наиболее эффективных методов машинного обучения для задач классификации данных» недостаточно.

4) На стр. 33: констатируется, что «Недостаток использования статистических характеристик в качестве диагностических признаков заключается в том, что они характеризуют не исправное состояния АД преимущественно на предаварийной стадии», однако из описания в главе 2 (п. 2.4) алгоритма не ясно – как предложенный алгоритм может решить эту проблему.

5) На стр. 36: «Рекомендуется выбирать частоту дискретизации $f_{\text{дискр}}$ порядка 50 кГц. Далее частота дискретизации должна быть уменьшена с помощью децимации, так как ММП (Метод матричных пучков) демонстрирует большую эффективность при меньшей $f_{\text{дискр}}$ ». Не ясно – до каких частот это повышение эффективности происходит? Как связана минимальная частота дискретизации с выходной частотой ПЧ и несущей частотой ШИМ? Как связана ошибка расчета диагностического признака с используемой частотой дискретизации и этими частотами? Все эти вопросы никак в диссертации не отражены.

6) На стр. 39: Проверка работы векторного ММП проведена на сигналах, полученных при питании АД в виде трёхфазного синусоидального источника напряжения с частотой 50 Гц. Что мешало сделать проверку на модели с питанием от источника с ШИМ, чтобы это было хоть как-то согласовано с последующей проверкой в эксперименте? Будет ли в случае ШИМ

оценка комплексного полюса выглядеть так, как на рисунке 2.5 и какова будет величина ошибки?

7) На стр. 55 (п. 3.2): «Частота дискретизации сигналов тока должна быть выбрана с учётом полосы полезного сигнала и минимизации эффекта наложения спектров...». Но, кроме этой констатации, здесь снова полностью отсутствуют рекомендации по выбору частоты дискретизации. «Далее частота дискретизации сигнала уменьшается с помощью децимации...». Снова возникает вопрос – до какого уровня уменьшается? Отсутствует оценка зависимости эффективности предложенного алгоритма от частоты дискретизации при ее уменьшении?

8) К рис. 3.4: Амплитуды и частоты в спектре демодулированного сигнала тока должны зависеть не только от количества стержней ротора с дефектом, но и от их взаимного расположения («номеров» стержней по окружности ротора). Например, как соотносятся спектры для двух поврежденных стержней, когда они оба рядом и когда они на противоположных сторонах ротора. Этот вопрос в диссертации никак не отражен.

Заключение

Ведущая организация считает, что диссертационная работа Еремеевой Виктории Александровны «Алгоритмы обработки информации для оценки технического состояния асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ ТП» представляет собой законченную научно-квалифицированную работу, выполненную на актуальную тему. Все положения в диссертации научно обоснованы, выводы и рекомендации соответствуют поставленной цели и задачам. Диссертация написана логичным языком, хорошо оформлена. Основные материалы и результаты диссертации опубликованы и апробированы.

Работа удовлетворяет п.п. 9-14 требований, предъявляемых к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата наук согласно «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842), Еремеева Виктория Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Диссертационная работа и отзыв обсуждены и одобрены на заседании кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», протокол №12 от 15 мая 2025 г.

Заведующий кафедрой
«Электропривод и автоматизация
промышленных установок»
УралЭНИН
ФГАОУ ВО «УрФУ»
к.т.н., доцент



Костылев
Алексей Васильевич

Кандидатская диссертация Костылева А.В. защищена по специальности 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы

Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Почтовый адрес: 620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Тел. 8-800-100-50-44

e-mail: contact@urfu.ru

Официальный сайт: <https://urfu.ru>