

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.437.02, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЮЖНО-
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 02.07.2025 г. №28

О присуждении Еремеевой Виктории Александровне, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Алгоритмы обработки информации для оценки технического состояния асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ ТП» по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» принята к защите 21 апреля 2025 г. (протокол заседания № 28/п) диссертационным советом 24.2.437.02, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 454080, г. Челябинск, проспект В.И. Ленина, д. 76, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Еремеева Виктория Александровна, 27 мая 1997 года рождения, в 2019 году с отличием окончила ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (бакалавриат), в 2021 году Еремеева Виктория Александровна с отличием окончила ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 12.04.01 «Приборостроение» (магистратура). В период подготовки диссертации с 2021 года по настоящее время Еремеева В.А. проходит обучение в очной аспирантуре ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника».

С 2021 года по настоящее время Еремеева В.А. работает инженером-исследователем в научно-исследовательской лаборатории технической самодиагностики и самоконтроля приборов и систем ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре информационно-измерительной техники 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)».

Официальные оппоненты:

Петушков Михаил Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроники и микроэлектроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,

Лукьянов Анатолий Валерианович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»,
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, в своем положительном отзыве, подписанном Костылевым Алексеем Васильевичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», указала, 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.

Соискатель имеет 20 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 10 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 7 работ. По результатам работы получен 1 патент на изобретение.

В диссертацию включены результаты, полученные автором лично. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных

соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимыми работами по теме диссертации являются:

1. Еремеева, В.А. Диагностика межвитковых замыканий в статоре асинхронного двигателя методом матричных пучков / В.А. Еремеева // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2025. – №5. – С. 1–10. DOI: 10.25791/pribor.5.2025.1579 (ВАК).

2. 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> (ВАК).

3. 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.).

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: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109454> (Scopus) (5 с. из 20 с.).

5. 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.).

6. 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.).

7. 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.).

8. 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. Ибрияева; ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»; Патентный отдел. – № 2023103816; заявл. 20.02.2023; опубл. 14.07.2023, Бюл. № 20. – 9 с.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Ведущей организации ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург). Отзыв положительный, из замечаний отмечено: 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 неисправное состояние 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.

2. Официального оппонента, доктора технических наук, доцента, профессора кафедры электроники и микроэлектроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск) Петушкова Михаила Юрьевича. Отзыв положительный, из замечаний отмечено: 1) Работа называется «... исполнительных механизмов», а первая глава посвящена двигателям мощных промышленных механизмов. Возможно ли, сравнивать двигатели мощных промышленных механизмов и маломощные исполнительные. 2) На стр. 16 есть ссылка на источник под номером 29, а на самом деле цитируется закон Монтзингера (немецкий инженер, который в 1930 году на основании своих опытов и опытов других авторов предложил «правило восьми градусов» для определения срока службы изоляции класса А (бумага, пряжа, шёлк)). Затем он трансформировался в правило 10 градусов. 3) Параграф 1.5. носит название Причины появления сломанных стержней в роторе АД, а кто их ломал, тем более что третья глава носит название «Диагностика обрыва стержня» 4) Для использования теоремы Каруша-Куна-Таккера (стр.35) необходимы 4 условия. А они выполняются? 5) На стр.36 «частоту дискретизации рекомендуется выбирать из диапазона от 100 до 5000 Гц». Стр. 40, стр.57 «Частота дискретизации сигналов выбрана равной 50 кГц». А как быть с теоремой Котельникова. 6) Судя по табл. 3.3 можно ли определить количество стержней, вышедших из строя. 7) Чем отличается преобразование Гильберта-Хуанга от преобразования Фурье и от вейвлет-преобразования и чем оно привлекательно.

3. Официального оппонента, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры «Физика, механика и приборостроение» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» (г. Иркутск) Лукьянова Анатолия Валериановича. Отзыв положительный, из замечаний отмечено: 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 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).

4. Кандидата технических наук, доцента, заведующего кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (г. Ульяновск) Доманова Виктора Ивановича. Отзыв на автореферат положительный, из замечаний отмечено: 1) В таблице №2 приведены результаты тестирования подшипников. В случае неисправности этот элемент заменяется целиком. В связи с этим очевидна избыточность информации о неисправности. 2) В автореферате не показано, с помощью каких датчиков реализуется схема диагностики в АСУ ТП. 3) Не затронуты вопросы, связанные с объектом управления.

5. Кандидата сельскохозяйственных наук, доцента, заведующего кафедрой электропривода и автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет» (г. Благовещенск) Ижевского Андрея Станиславовича. Отзыв на автореферат положительный, из замечаний отмечено: 1) На странице 10 во второй главе соискатель для исследования влияния межвиткового замыкания в обмотке статора на сигналы тока и напряжения асинхронного двигателя, на экспериментальном стенде использует двухполюсный асинхронный двигатель Marathon Electric D391 мощностью 0,25 кВт, а в третьей главе проводит анализ влияния обрыва стержня ротора на спектр тока на четырехполюсном асинхронном двигателе (страница 15) W22 WEG мощностью 0,74 кВт. Для достоверности исследований характеристик по второй и третьей главе, нужно выбрать один тип двигателя или провести исследования по двум типам двигателей. 2) Согласно актуальности темы исследования, для сокращения финансовых потерь, от непредвиденных отказов подшипников у асинхронных двигателей, необходима диагностика подшипников в процессе работы на технологическом оборудовании, а соискатель в четвертой главе приводит исследования повреждений подшипников на валу стендовой установки как представлено на рисунке 7, а не у асинхронного двигателя.

6. Доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой автоматизированного электропривода и робототехники ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк) Мещерякова Виктора Николаевича. Отзыв на автореферат положительный, из замечаний отмечено: 1) Целесообразно было рассмотреть для диагностики асинхронного двигателя метод вибродиагностики в сравнении с другими методами.

7. Доктора технических наук, доцента, директора Образовательного центра цифровых технологий ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (г. Санкт-Петербург) Жуковского Юрия Леонидовича и кандидата технических наук, ассистента Образовательного

центра цифровых технологий ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (г. Санкт-Петербург) Булдыско Александры Дмитриевны. Отзыв на автореферат положительный, из замечаний отмечено: 1) В теоретической значимости работы автором указано, что впервые к сигналам виброускорения применено преобразование Гильберта-Хуанга. Необходимо раскрыть и дать пояснения данному тезису, поскольку работ с применением ННТ для диагностики состояния подшипников качения существует большое количество. 2) На странице 8 текста автореферата в описании сингулярного разложения в содержании матрицы S указано разделение сингулярных чисел только на соответствующие основной гармонике питания и шумовые компоненты. Почему не рассматриваются другие осцилляторные компоненты, лежащие в пределах M чисел? 3) Из текста автореферата и поставленных задач остается неясным, за счет чего производится оценка технического состояния асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ ТП. Согласно ГОСТ 20911-89, выполненная работа отвечает только одной из задач технического диагностирования – поиска места и определения причин (наличия) неисправности. 4) Из текста автореферата неясно, в каких программных комплексах и средах производились вычисления предложенных алгоритмов.

8. Кандидата технических наук, доцента, заведующего кафедрой «Автоматизированный электропривод и электротехника» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (г. Санкт-Петербург) Благодарного Николая Семеновича и кандидата технических наук, старшего преподавателя кафедры «Автоматизированный электропривод и электротехника» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (г. Санкт-Петербург) Кундюкова Олега Анатольевича. Отзыв на автореферат положительный, из замечаний отмечено: 1) На спектре демодулированного сигнала тока АД с обрывом стержня (рисунок 4) автореферата отсутствуют значения токов и напряжений на осях. 2) С чем связано то, что виброускорение, измеренное с вращающегося вала АД, является более чувствительным к ранним неисправностям подшипников по сравнению с сигналами, полученных от акселерометров на корпусе АД? 3) Проверялись ли работоспособность разработанных алгоритмов и диагностических критериев экспериментально на двигателях мощностью более 1 кВт?

9. Кандидата технических наук, доцента, заведующего кафедрой электротехники, электропривода и промышленной электроники ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (г. Новокузнецк) Кубарева Василия Анатольевича. Отзыв на автореферат положительный, из замечаний отмечено: 1) Из автореферата не ясно, проводилась ли оценка достоверности результатов исследований и полученных математических моделей на данных с промышленного оборудования, находящегося в работе. 2) В автореферате указано, что проверка алгоритма обнаружения обрыва стержней ротора АД выполнена на данных четырёхполюсного АД W22 WEG (0,74 кВт, 60 Гц). Возможно ли применение данного алгоритма к промышленным двигателям

с номинальной частотой 50Гц с мощностями выше 10 кВт.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что ими осуществлялись исследования по тематике диссертации и получены весомые научные результаты в рассматриваемой предметной области, что подтверждается публикациями в научных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны: новый алгоритм обработки сигналов асинхронного двигателя (АД) для обнаружения межвитковых замыканий в статоре на основе диагностического признака в виде разности фазовых задержек между сигналами тока и напряжения, позволяющий оценить состояние АД при различных уровнях нагрузки и частоте питания, включая нестационарный режим работы; новый 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, обеспечивающий оценку состояния АД при разных уровнях нагрузки; новый алгоритм обработки сигналов виброускорений, измеренных с вращающегося вала АД, для обнаружения неисправностей подшипников на основе анализа локальных изменений амплитуды виброускорения в диапазонах собственных частот подшипника с использованием преобразования сигналов в изображения спектра Гилберта и их классификации с помощью свёрточной нейронной сети;

предложены: диагностический критерий обнаружения межвитковых замыканий в статоре АД, определяемый на основе выборок диагностических признаков для исправного и неисправного состояний с применением метода опорных векторов; диагностический критерий обнаружения обрывов стержней в роторе АД, определяемый на основе выборок диагностических признаков для исправного и неисправного состояний с применением метода опорных векторов; метод демодуляции сигналов тока для обнаружения обрывов стержней ротора, заключающийся в фильтрации сигналов в диапазоне 5-ой и 7-ой гармоник частоты питания, их возведении в квадрат и последующем суммировании; диагностический критерий обнаружения неисправностей подшипников на основе вероятностной оценки принадлежности изображений спектра Гилберта к определённому классу дефектов с использованием свёрточной нейронной сети;

доказана: работоспособность предложенных алгоритмов и диагностических критериев в ходе математического моделирования и экспериментальных исследований.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана: корректность разработанных алгоритмов обработки сигналов и диагностических критериев для обнаружения дефектов в асинхронных двигателях (АД), включая: алгоритм выявления межвитковых замыканий в статоре АД на основе функции классификации, сформированной методом опорных векторов по диагностическим признакам в виде суммы взаимных разностей фазовых задержек основных гармоник токов и напряжений; алгоритм

обнаружения обрыва стержней ротора АД с использованием классификационной функции, полученной методом опорных векторов на основе амплитуд гармоник дефекта, извлечённых из демодулированных сигналов тока; алгоритм диагностики неисправностей подшипников качения по сигналам виброускорения с преобразованием Гилберта-Хуанга и классификацией изображений спектра свёрточной нейронной сетью;

использованы: основные положения системного анализа, теории электромагнитного поля и механических колебаний; методы спектрального анализа сигналов, теории распознавания образов и классификации; элементы теории планирования эксперимента;

изложены: принципы формирования диагностических признаков для межвитковых замыканий, обрывов стержней ротора и дефектов подшипников; преимущества применения преобразования Гилберта-Хуанга и свёрточных нейронных сетей для обработки вибросигналов вращающегося вала;

раскрыты: методика применения векторного метода матричных пучков к сигналам тока и напряжения АД для извлечения параметров гармоник, связанных с состоянием АД; методика обучения метода опорных векторов на новых диагностических признаках; алгоритм преобразования виброускорений в изображения спектра для последующей классификации;

изучено: влияние параметров работы АД, таких как нагрузка и частота питания, на работоспособность алгоритмов диагностики, подтверждённое экспериментально с вероятностью правильного обнаружения межвитковых замыканий в статоре 95%, обнаружения обрывов стержней в роторе 98%, дефектов подшипников 98%;

проведена: адаптация векторного метода матричных пучков к сигналам АД для выявления диагностических признаков дефекта; экспериментальная верификация методов, доказавшая их применимость для мониторинга состояния АД.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены: алгоритмы обработки информации для выявления наиболее распространенных дефектов АД;

создан: программно-аппаратного комплекс, в котором реализованы разработанные алгоритмы обнаружения неисправностей АД исполнительных механизмов АСУ ТП.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория, служащая основой для разработки методов обработки информации, предложенная в диссертационной работе, базируется на корректном применении системного анализа, теории механических колебаний, теории электромагнитного поля, цифровой обработки сигналов, вычислительной математики, элементов теории планирования эксперимента;

установлено подтверждение разработанных автором научных положений, выводов и рекомендаций результатами математического моделирования и экспериментального исследования, а также непротиворечивость полученных в диссертации результатов ранее

выполненными и опубликованными другими авторами научными исследованиями по рассматриваемой тематике;

для экспериментальных работ результаты получены на сертифицированном оборудовании, показана воспроизводимость экспериментальных результатов исследования в различных условиях, а также совпадение с теорией;

идея базируется на обобщении передового опыта, анализе и применении новых подходов к обработке информации для оценки технического состояния АД;

использованы апробированные методики компьютерного моделирования асинхронного электродвигателя для верификации разработанных алгоритмов обработки информации, а также лабораторные установки с апробированными методами симуляции дефектов для экспериментальной верификации разработанных алгоритмов обнаружения дефектов АД.

Личный вклад соискателя состоит в:

проведении анализа степени проработанности проблемы оценки технического состояния АД исполнительных механизмов, разработке алгоритмов обработки информации АД для оценки его технического состояния, их реализации в программно-аппаратном комплексе, проведении вычислительных и натурных экспериментов, апробации результатов исследования на конференциях различного уровня, а также в подготовке публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты были высказаны следующие замечания и заданы вопросы: 1) Применимы ли разработанные методы диагностики к нестационарным режимам работы двигателя, когда он функционирует в системе управления с возможными биениями и широким диапазоном частотного спектра, в частности для выявления неисправностей двигателя и подшипников? 2) Для асинхронного двигателя, питаемого от частотного преобразователя, параметр частоты питания имеет важное значение, поскольку она изменяется в широком диапазоне. Каким образом данный фактор учитывается в разработанных алгоритмах? 3) На представленной схеме для системы активно-индуктивной нагрузки показан фазовый сдвиг, который зависит от частоты питания. Учитывалась ли зависимость фазового сдвига от частоты питающего напряжения в проведенном анализе? Был ли учтен в анализе фактор быстрого изменения частоты питания, характерный для различных алгоритмов управления? 4) Каково минимально необходимое время обработки сигналов для реализации метода матричных пучков? 5) Структура и алгоритмы управления частотных преобразователей могут существенно различаться. В случае скалярного управления изменение напряжения и частоты происходит практически квазистационарно. Векторное управление, включая датчиковые и бездатчиковые варианты, обеспечивает более высокое быстродействие. Особенно следует отметить технологию прямого управления моментом, которая позволяет изменять момент в течение нескольких миллисекунд. Учитывая широкое распространение таких алгоритмов управления, как это учитывается в предлагаемом подходе? 6) Возникает вопрос относительно практической реализации разработанных алгоритмов. На текущий момент они реализованы в

виде компьютерной программы или интегрированы с аппаратным обеспечением? Существует ли возможность их внедрения в промышленный контроллер для работы в составе частотного преобразователя? Насколько реализуема такая интеграция на практике?

Соискатель Еремеева В.А. ответила на высказанные замечания и заданные вопросы: 1) Разработанные методы могут быть применены к нестационарным режимам работы двигателя благодаря использованию векторного метода матричных пучков, обеспечивающего анализ нестационарных сигналов. Данный подход продемонстрировал эффективность при диагностике подшипников в условиях переменной частоты вращения, что подтверждено соответствующей публикацией. 2) Учет данного фактора обеспечивается применением метода опорных векторов, обученного на ограниченной выборке данных, соответствующей дискретным значениям частоты питания. Несмотря на ограниченность обучающей выборки, метод формирует непрерывную разделяющую гиперплоскость в признаковом пространстве. Экспериментальные исследования межвитковых замыканий подтвердили эффективность данного подхода: алгоритм успешно идентифицирует дефекты даже при частотах питания, отсутствовавших в обучающей выборке. 3) Экспериментальные исследования подтвердили зависимость предлагаемого диагностического признака от частоты питающего напряжения. Данная зависимость учитывалась при формировании обучающей выборки. 4) Метод требует минимального времени обработки сигналов - порядка 1 секунды. Конкретная длительность вычислений зависит от количества анализируемых сигналов и их длины. 5) В рамках диссертационного исследования были проведены испытания методов при работе с частотным преобразователем в скалярном режиме управления. Экспериментально подтверждено, что предложенные алгоритмы сохраняют работоспособность при изменении частоты питания двигателя. Векторный метод матричных пучков дал существенный выигрыш по времени обработки сигналов двигателя при скалярном управлении. На основании сути данного метода аналогично будет получен выигрыш по времени при векторном управлении. 6) На данный момент алгоритмы реализованы в виде компьютерной программы. В настоящее время ведется разработка портативной системы сбора и обработки данных для применения на предприятиях ПАО «Мечел». Основная задача – создание мобильного решения для диагностики электродвигателей.

Диссертационный совет пришел к заключению, что рассматриваемая диссертация является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям п. 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, Еремеева Виктория Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

На заседании 2 июля 2025 года диссертационный совет принял решение за разработку алгоритмов обработки информации для оценки технического состояния асинхронного электродвигателя исполнительных механизмов АСУ

ТП, имеющей существенное значение для развития методов технической диагностики промышленного оборудования, присудить Еремеевой Виктории Александровне ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – 0 человек, проголосовали: за – 16, против – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета 24.2.437.02,
доктор технических наук, профессор


Логиновский Олег Витальевич

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.437.02,
доктор технических наук, доцент


Голлай Александр Владимирович

02.07.2025 г.