

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Степанова Павла Ивановича «Разработка методики и средств контроля технического состояния электромеханического оборудования на основе комплексного анализа тока и вибрации (на железнодорожном транспорте)», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки)

Актуальность работы.

Одной из главных требований к железнодорожному транспорту является обеспечение безопасности и надежности машин при минимальных экономических затратах. Решение данных задач требует развития методов, средств контроля и диагностики для оперативного определения отказов исполнительных систем управления железнодорожного транспорта. Необходимо совершенствовать методы контроля технического состояния оборудования с учетом современных подходов проектирования систем управления – это применение средств интеллектуального управления. Актуальность поставленной задачи обуславливает также постоянным повышением рабочих скоростей и нагрузок современных машин (скоростных электропоездов, тяговых электровозов).

В железнодорожном оборудовании широко используется электропривод, построенный на основе асинхронных электродвигателей, обладающих простотой и надежностью, а также улучшенными эксплуатационными показателями.

Особенностью электроприводов железнодорожного транспорта является сочетание механической и электрической частями, которые имеют разную физическую природу. Поэтому для оценки технического состояния такого оборудования целесообразно применять комплексные средства контроля.

В настоящее время широко используются методы неразрушающего контроля и диагностирования механической части электропривода на основе вибрационных и акустических параметров. Ведутся разработки методов

электрического контроля двигателей на основе анализа электрических параметров потребляемого тока и напряжения, для механической части используются частотные и вибрационные методы контроля.

Основной недостаток существующих методов раздельного контроля механических и электромеханических узлов заключается в том, что не учитывается взаимосвязь и взаимообусловленность механических и электрических явлений в совокупном их проявлении для работающего привода. Таким образом, на данный момент не существует нормативной базы для диагностирования сложных технических систем, состоящих из элементов различной физической природы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 184 наименования, 4 приложения. Основной текст диссертации изложен на 215 страницах машинописного текста, в том числе, имеется 89 рисунков и 34 таблицы.

Основные положения диссертационной работе рассмотрены в следующей последовательности. Во–первых проведен обзор существующих методов контроля технического состояния электромеханических систем, в частности, методы неразрушающего контроля. Проанализирована особенность контроля технического состояния оборудования железнодорожного транспорта. Рассмотрена особенность контроля технического состояния электромеханического оборудования, имеющего различную физическую основу. На основе проведенного анализа сформирована цель исследования. Предложена методика комплексного контроля технического состояния электромеханического оборудования систем железнодорожного транспорта, включающая вибрационные методы и вейвлет–преобразования. Проведена разработка средств контроля технического состояния, включающая выбор оборудования и организацию сбора данных. Разработано программное обеспечение, позволяющее принимать решение и выдавать информацию по коррекции технических параметров систем управления. Используя предложенную методику диагностики, проведены экспериментальные исследова-

ния, подтвердившие достоверность предложенной методики диагностики приводных систем железнодорожного транспорта. В заключении приведены основные выводы, обобщение полученных результатов и возможность их практического использования.

Введение включает обоснование актуальности работы, изложены основные проблемы, определена цель, состоящая в повышении эффективности контроля технического состояния и оценки ресурса работы электромеханического оборудования на основе создания методики комплексного автоматизированного контроля, разработки алгоритмов и программного обеспечения для анализа диагностической информации.

Первая глава работы включает анализ и выбор направления работы. В данной главе рассмотрены и проанализированы работы, посвященные современному состоянию вопроса в области диагностирования оборудования. Проведен анализ существующих методов, методик и моделей неразрушающего контроля оборудования. Произведен анализ аналогов, получивших наибольшее применение.

На основе исследований отечественных ученых в главе дан обзор существующих методов контроля и диагностики технического состояния электромеханического оборудования. Рассмотрены также стандарты для проведения вибрационного контроля. Выделено, что в области неразрушающего контроля и диагностирования прослеживаются недостатки, состоящие в том, что контроль технического состояния только по одному виду диагностических параметров (зачастую по вибрации оборудования) без учета взаимодействия электрических и механических элементов оборудования. В тоже время отмечается необходимость повышения эффективности контроля технического состояния и исключению ошибок при идентификации за счет введения интегральной (комплексной) оценки технического состояния.

Сделан вывод о том, что диагностика, состоящая в анализе вибраций, как наиболее распространенного вида контроля узлов, в ряде случаев может быть недостаточно. Это относится к контролю технического состояния элек-

тромеханического оборудования железнодорожного транспорта, где требуется комплексное использование механических и электрических параметров.

В качестве замечания следует отметить отсутствие анализа зарубежных работ, связанных с диагностикой оборудования железнодорожного транспорта.

Вторая глава посвящена разработке методики комплексного контроля технического состояния электромеханического оборудования. Проведен анализ существующих методов электрического и вибрационного контроля, а также признаков проявления дефектов основных узлов электромеханического оборудования. Рассмотрен объект контроля ООО «Уральские локомотивы», включающий узлы электровозов 2ЭС10 с асинхронным тяговым двигателем, колесными парами и редукторами.

В результате обработки статистических данных неисправностей и узлов, в которых они возникали, сделан вывод, что наибольшее количество отказов электровозов имеют элементы подвески тягового двигателя, колесные пары и тяговый зубчатый редуктор.

Важной особенностью проведенных испытаний следует отметить взаимосвязь частотных характеристик анализируемых сигналов электрического тока двигателя, частотных параметров шумов, вибрационного сигнала неисправностей узлов электромеханического оборудования и скоростей с конструкторскими параметрами: предельный износ бандажей колесных пар, износ резиновых уплотнений зубчатых редукторов, и как следствие, отсутствие и недостаток смазки.

Несмотря на перечисленные причины неисправностей механической природы, большая их часть имеет прямое отношение к электроприводу. Анализ всей картины возникающих неисправностей электровозов 2ЭС10 показал, что следует вводить контроль состояния механических узлов, т.к. данные элементы связаны с электродвигателем единым энергетическим потоком (электрическая и механическая энергии).

Важной частью изложенного материала во второй главе является методика контроля технического состояния, основанная на комплексе методов цифровой обработки сигналов:

1. Диагностические признаки вейвлет-анализа – среднеквадратические (СКЗ) и максимальные значения (ПИК) коэффициентов вейвлет-преобразования, а также общего уровня;
2. Вейвлет-анализ виброускорения и виброскорости;
3. Оценка изменения диагностических признаков по сравнению с установленными пороговыми значениями;
4. Выявление соответствия полученных диагностических признаков с текущим состоянием оборудования (исправное или неисправное с одновременным указанием на возникшую неисправность, используя блок принятия решений).

Методика комплексного контроля включает разработку: информационно-измерительной системы, диагностическую модель объекта контроля, систему принятия решений, построенную на основе нейронной сети. Автоматом разработан алгоритм, отражающий последовательность работы информационно-измерительной системы.

В качестве недостатка изложенного материала в данной главе следует отнести отсутствие детальной проработки некоторых поставленных задач, которые следует считать как постановку для дальнейших исследований. Это, в частности, относится к построению нейронных сетей на основе вейвлетов в задачах исследования интеллектуальных систем.

Третья глава посвящена разработке средств контроля технического состояния электромеханического оборудования. Включает выбор оборудования и организацию сбора данных. В данной главе проведен выбор аппаратных средств для сбора данных. Разработана структура информационно-измерительной системы. В разрабатываемой системе используются вибропреобразователь и датчики тока. Разработано программное обеспечение для информационно-измерительной системы.

Разработанная информационно-измерительная система включает

набор высокопроизводительных аппаратных средств, которые имеют возможность для проведения контроля технического состояния электромеханических систем изменять конфигурацию под новый объект контроля. Это достигается путем использования универсальных устройств с возможностью программирования их под нужные задачи.

Для того чтобы адаптировать оборудование National Instruments для задач контроля технического состояния выбрано шасси и контроллер PXI, который укомплектован необходимыми модулями для сбора данных. Используя традиционную модель технического нейрона, составлена нейронная сеть, которая после ее обучения выполняет функцию принятия решения для диагностической системы.

В четвертой главе изложены результаты экспериментального исследования методики и средств контроля технического состояния. Рассматривается типовое электромеханическое оборудование с последующей применимостью к реальному электровозу. Исследования проводились на специальном лабораторном стенде. Исходя из анализа статистических данных по распространению дефектов и неисправностей на электровозах, выпускаемых ООО «Уральские локомотивы», были выявлены и воспроизведены в лабораторных условиях типовые неисправности – это уменьшение пятна контакта зубчатой передачи, расцентровка зубчатой передачи, изменение условий контакта в зоне зацепления, дисбаланс ротора, ослабление крепления и отсутствие смазки. Все экспериментальные исследования проводились в режиме нормальных условий работы и при возникновении имитируемого дефекта.

Для проведения многоуровневого дискретного вейвлет–анализа выбраны параметры вейвлет– преобразования: длина сигнала, число уровней разложения, количество выборок, время реализации, период и максимальная частота сигнала. Для обеспечения необходимой информативности диагностических параметров рассчитаны значимые частоты лабораторного стенда. В главе проведен вейвлет–анализ электрического тока статора асинхронного двигателя, виброускорения и виброскорости.

В результате вейвлет–преобразования тока для исправного привода и с ослаблением крепления (к фундаменту) были получены процентные превышения коэффициентов вейвлет–преобразования тока. Вейвлет–анализ тока при данном дефекте выявил отражение неисправности оборудования в сигнале тока приводного двигателя.

При анализе виброскорости ивиброускорения обнаружены более значительные превышения коэффициентов виброскорости ивиброускорения по сравнению с результатами измерений исправного привода. В ходе работы установлено, что появление неисправности приводит к изменению вибrosигнала, а также к скачкам тока двигателя.

На основе зависимости соответствий коэффициентов вейвлет–разложения текущему состоянию рассматриваемого электромеханического оборудования разработаны таблицы функций неисправностей.

Показано, что изменение шумовой составляющей обучающей выборки влияет на итоговую достоверность решений сети, при развитии дефекта зубчатой передачи в условиях отсутствия смазки выявлена связь между электрическими и механическими параметрами, выраженная в виде линейной корреляционной функции.

Для прогнозирования остаточного ресурса работы оборудования были проведены эксперименты, связанные с работой зубчатой передачи (червячный редуктор) в условиях отсутствия смазки. В результате экспериментальных исследований получены значения диагностических признаков виброускорения и тока, графики изменения наиболее чувствительных коэффициентов виброускорения и тока в процессе работы привода.

В результате проведенного исследования было установлено, что предложенная модель и алгоритм адекватно отражают потерю ресурса в полном соответствии с реальным техническим состоянием редуктора. Приведенные данные лабораторных испытаний при использовании методики комплексного контроля позволяют повысить эффективность оценки остаточного ресурса работы электромеханических узлов приводов.

В пятой главе показано практическое применение методики комплексного контроля колесно-моторных блоков, в существующей системе ремонта в сервисных центрах электровозов 2ЭС10. Основным направлением работы следует выделить внедрение контроля и управление техническим состоянием электромеханических систем перед ремонтным воздействием и выделение конкретных узлов для разборки. Экспериментально подтверждена возможность применения разработанной методики и средств контроля электровозов на стендах испытаний колесно-моторных блоков 2ЭС10.

По результатам проведенной работы автором составлен отчет по экспериментальным исследованиям колесно-моторных блоков электровозов 2ЭС10 ООО «Уральские Локомотивы». Результаты работы включены в перспективный план создания, испытания и внедрения системы комплексной диагностики электровозов 2ЭС10. Получена также положительная оценка от производителей нефтесервисного оборудования (ООО «НПО «Центротех», ГК «Росатом»), что подтверждается Актами об использовании результатов диссертационной работы.

На основе анализа содержания диссертационной работы следует сформулировать, что

Научная новизна диссертационной работы включает

1. Разработку методики комплексного автоматизированного контроля технического состояния узлов электромеханического оборудования, включающая совместный анализ механических и электрических параметров.
2. Разработку алгоритмического и программного обеспечения на основе дискретного вейвлет-преобразования для диагностики параметров приводного электродвигателя, виброскорости ивиброускорения механических узлов колесно-моторного привода транспортных систем.
3. Установление связи видом дефекта и неисправностей колесно-моторного привода транспортных систем с функциональными характеристиками вейвлет-преобразования и идентификация технического состояния и

неисправностей колесно-моторных приводов транспортных систем, используя основное свойство интеллектуальных систем управления – принятие решений.

Практическая значимость работы

заключается в том, что разработана и апробирована методика комплексного автоматизированного контроля технического состояния электромеханического оборудования, которая при ее практической реализации обеспечит повышение эффективности данного контроля. Это позволит перейти от планового обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, приведет к увеличению безопасности техногенных объектов, а также к расширению автоматизации систем контроля.

В автореферате достоверно изложены и приведены результаты исследования, рассмотренные в основном тексте диссертации.

По основным материалам диссертационной работы опубликовано 21 работа, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 3 статьи в зарубежных изданиях, индексированных в базе данных Scopus, и 13 в других научных изданиях.

В качестве замечаний по рассматриваемой диссертации следует отметить следующее

1. В работе отсутствует анализ зарубежных работ по диагностике железнодорожного транспорта.
2. Отсутствует детальная проработка вопросов построения нейронных сетей на основе вейвлетов применительно к решению задачах построения интеллектуальных систем, которые следует считать как постановку для дальнейших исследований.

Заключение

В целом отмеченные замечания и недостатки не снижают научной значимости работы и носят рекомендательный характер. Диссертация является законченным исследованием, имеет научную и практическую значимость. По своему содержанию работа соответствует специальности 05.11.13

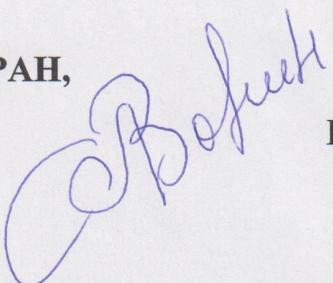
– Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки)

Основные положения диссертации достаточно полно отражены в публикациях автора. Автореферат достоверно отражает содержание диссертации. Работа написана понятным научно-техническим языком. Изложение материала ясное и четкое.

Считаю, что диссертация Степанова Павла Ивановича удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатской диссертации, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки)

Официальный оппонент

**Главный научный сотрудник ИМАШ РАН,
доктор технических наук, профессор**


В.Л.Афонин

Подпись Афонина В.Л. удостоверяю

Заместитель директора по кадрам ИМАШ РАН


Э.Н. Петюков

09.11.2020

