

В диссертационный совет Д 218.004.03
на базе Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Иркутский государственный
университет путей сообщения»

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Бельского Игоря Олеговича на тему «Разработка методов и средств диагностики асинхронных электродвигателей по параметрам внешнего магнитного поля», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (транспорт)».

Актуальность темы исследования

Асинхронные электродвигатели играют важную роль в современной экономике и широко применяются на транспорте, в машиностроении и многих отраслях промышленности. Обеспечение безотказного функционирования асинхронного привода на всём периоде его работы требует применения современных методов управления его техническим состоянием. Данная задача может быть решена, в первую очередь, благодаря снижению издержек на обслуживание и ремонт.

На данный момент наиболее распространённой является система планово-предупредительных ремонтов, согласно которой периодичность проведения ремонтов, зачастую, не является обоснованной, что с одной стороны приводит к повышению эксплуатационных расходов, а с другой – к увеличению межремонтных периодов и более частому возникновению отказов.

Избежать недостатков данного подхода позволяет организация методов обслуживания по фактическому состоянию. Реализация данных методов требует разработки системы оценки, позволяющей определять не только текущее состояние оборудования, но и обеспечивать обнаружение неисправностей на ранней стадии развития.

Существующие методы диагностики асинхронных электродвигателей способны выявлять признаки наличия неисправностей и не позволяют производить оценку угрозы выхода из строя асинхронных машин при дальнейшей эксплуатации. Организация методов управления техническим состоянием асинхронных электродвигателей ставит перед исследователями задачу поиска новых источников информации об их техническом состоянии, необходимых для повышения точности проведения диагностики и обнаружения дефектов на ранней стадии развития. Поэтому перспективной является разработка методов, основанных на анализе параметров распределения внешнего магнитного поля.

Таким образом, диссертационное исследование Бельского И.О., направленное на повышение эффективности управления техническим состоянием асинхронных электродвигателей на основе изменения параметров внешнего магнитного поля и колебаний угловой скорости вращения ротора, возникающих при развитии дефектов, является актуальным.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В диссертационном исследовании представлено четыре научных положения, которые опираются на результаты аналитических и экспериментальных исследований, взаимосвязаны между собой, поставленными задачами и выводами исследования, раскрывают его цель.

Основные итоги работы основаны на выводах, полученных при проведении теоретических и практических исследований.

1. На основе обзора существующих методов диагностики асинхронных электродвигателей и анализа статистических данных соискателем сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования.

2. Дефекты асинхронных электродвигателей, связанные с несимметрией питающей сети и обрывом стержней беличьей клетки ротора, как показал анализ статистики отказов, являются преобладающими. В этой связи соискатель верно акцентировал внимание на исследовании диагностических признаков именно этих неисправностей.

3. На основе литературного обзора, как Российских, так и зарубежных

источников, соискателем проведён анализ причин и особенностей развития неисправностей, необходимых для выявления их диагностических признаков. Рассмотрены основные источники возникновения внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей и особенности его распространения.

Составлена обобщённая схема управления техническим состоянием объектов, на основе которой рассмотрен механизм обработки диагностической информации, принятия решения и выработки управляющих воздействий.

4. Построены математические модели асинхронного электродвигателя при отсутствии неисправностей и в динамике развития дефектов. Модели построены с некоторыми допущениями, поэтому осуществлено их уточнение при помощи метода конечных элементов. Выявлены диагностические признаки дефектов, получен гармонический состав временного сигнала тока в обмотках статора, изменение момента на валу и скорости вращения ротора.

5. Теоретические исследования влияния дефектов на внешнее магнитное поле позволили разработать, с применением системного подхода, многоканальный модульный прибор диагностики технического состояния асинхронных электродвигателей. Результаты математического и конечно-элементного моделирования получили подтверждение при экспериментальных исследованиях напряжённости внешнего магнитного поля электродвигателей вспомогательных машин электровозов.

Достоверность и новизна научных результатов

Достоверность результатов исследований, теоретических положений и выводов, изложенных в диссертации и опубликованных работах, подтверждается использованием известных методов: системного анализа, математического и конечно-элементного моделирования, спектрального анализа, цифровой обработки и фильтрации сигналов.

Для обнаружения диагностических признаков дефектов разработаны следующие математические модели асинхронных электродвигателей:

- электромеханических характеристик при обрыве стержней ротора;
- модель в дифференциальной форме при обрыве стержней ротора;
- модель силовых взаимодействий при несимметрии фазного тока.

Построена конечно-элементная модель электродвигателя при развитии дефектов обмотки ротора и несимметричного фазного тока. Данная модель позволила уточнить результаты математического моделирования.

Полученные в результате математического и конечно-элементного моделирования диагностические признаки прошли проверку при проведении экспериментальных исследований на лабораторной установке с искусственно созданными дефектами и на электродвигателях вспомогательных машин электровозов. Это позволило провести сопоставительный анализ и дать количественную оценку полученных результатов.

Запись мгновенных значений напряжённости внешнего магнитного поля проводилась с использованием современного высокоскоростного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), что в дальнейшем обеспечило высокую точность при обработке результатов измерения.

Новизна полученных научных результатов подтверждается проведённым литературным обзором и построенной на его основе классификацией существующих методов контроля асинхронных электродвигателей, устройств и принципов регистрации магнитных полей. Это позволило сделать вывод о слабой изученности темы диссертационного исследования и малом количестве разработанных устройств регистрации магнитных полей.

При оценке научной новизны диссертационного исследования, следует отметить комплексный подход при проведении диагностики асинхронных электродвигателей, который заключается в том, что использованы новые каналы диагностической информации - напряжённость внешнего магнитного поля и колебания угловой скорости вращения ротора. Данный подход позволил повысить точность проведения оценки технического состояния асинхронных электродвигателей.

Новым также являются принцип регистрации внешнего магнитного поля, состоящий в выборе числа датчиков (точек регистрации внешнего магнитного поля) зависящего от числа полюсов электродвигателя, который позволил получить мгновенную картину распределения внешнего магнитного поля по окружности статора в каждой фазной обмотке асинхронного электродвигателя, что позволило выявить места расположения дефектов.

Предложенный соискателем подход к принципам регистрации,

обработки и визуализации полученных диагностических данных позволяет повысить точность распознавания дефектов и степени их развития.

Теоретическая и практическая ценность работы

Основные положения диссертационной работы имеют теоретическую и практическую ценность при диагностике асинхронных электродвигателей.

Одним из исследуемых видов неисправностей асинхронных электродвигателей был выбран дефект стержней ротора, наиболее сложно поддающийся диагностике. Поэтому оценка степени развития данного дефекта вызывает особый интерес и представляет, как теоретическую, так и практическую ценность диссертационной работы для задач диагностики технического состояния асинхронных машин.

Разработанные математические и конечно-элементные модели позволили отследить изменение характеристик и процессов, происходящих в асинхронном приводе при развитии неисправностей, выявить их диагностические признаки, что представляет теоретическую значимость диссертационного исследования.

При помощи созданной конечно-элементной модели установлен критический уровень развития дефекта «обрыв стержней ротора», при котором электродвигатель перестаёт работать в номинальном режиме, что представляет практическую значимость диссертационного исследования.

Соискателем предложен способ и изготовлен, на основе системного подхода, многоканальный прибор, позволяющий проводить диагностику развивающихся дефектов асинхронных электродвигателей различной мощности и числом полюсов.

Проведены экспериментальные исследования по диагностике вспомогательных машин электровозов, которые позволили обнаружить дефекты стержней ротора и определить уровень несимметрии подводимого фазного тока. Разработанный способ сбора диагностических данных, при котором напряжённость внешнего магнитного поля регистрируется в каждой фазной обмотке, и методика визуализации диагностических данных позволили локализовать место расположения и степень развития дефектов.

Разработанный многоканальный прибор, методика сбора, обработки и визуализации диагностической информации являются уникальными, что

подтверждается патентом на изобретение – способ диагностики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, патент 2716172 РФ.

Внедрение результатов диссертационного исследования в промышленности позволит повысить эффективность управления техническим состоянием оборудования, сократить эксплуатационные расходы на его ремонт и содержание, увеличить межремонтный период в связи с переходом к обслуживанию по фактическому состоянию. В диссертационном исследовании имеются соответствующий акт с положительной оценкой результатов диагностики асинхронных вспомогательных машин электровозов.

Оценка содержания диссертации, её завершённость

Диссертация Бельского Игоря Олеговича. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача, имеющая важное значение для развития методов диагностики и управления техническим состоянием асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, основных выводов и результатов, списка литературы, включающего 146 наименований, в том числе и 23 на иностранных языках, 3 приложений. Работа изложена на 191 странице, включая 109 рисунков и 12 таблиц.

В первой главе проведён литературный обзор и классификация современных методов диагностики асинхронных электродвигателей. Рассмотрены основные методы обслуживания оборудования, среди которых особое внимание уделено методам обслуживания по фактическому состоянию, как наиболее перспективным. Рассмотрена обобщённая модель управления техническим состоянием асинхронных машин в составе сложных систем.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей асинхронных электродвигателей при развитии распространённых дефектов. Представлены результаты математического моделирования механических и электрических параметров электродвигателя при различной степени развития

дефектов обмотки ротора и несимметрии подводимого фазного тока. Рассмотрена модель, показывающая изменение тангенциальной составляющей электромагнитных сил между ротором и статором при развитии несимметрии.

В третьей главе приведены результаты разработки конечно-элементных моделей, отражающих изменение характеристик асинхронных электродвигателей при развитии дефектов обмотки ротора и несимметрии тока в статорных обмотках.

В четвертой главе представлены результаты разработки и апробирования опытного образца многоканального модульного прибора, позволяющего осуществлять диагностику асинхронных электродвигателей по параметрам внешнего магнитного поля, показан процесс разработки и испытаний дополнительного модуля, который измеряет колебания угловой скорости вращения ротора.

В целом работа производит хорошее впечатление благодаря структуре построения, методическому и экспериментальному уровню, достаточно хорошей проработке поставленных задач исследований. Все выводы и результаты являются обоснованными. Цель диссертационного исследования достигнута, поставленные задачи решены в полной мере.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Содержание работы соответствует теме диссертационного исследования. Материал диссертации изложен грамотно, рисунки, графики и таблицы информативно иллюстрируют результаты исследования и облегчают их понимание. Также стоит отметить качество и единый стиль оформления графической информации по всему тексту диссертационного исследования, что подчёркивает целостность работы.

Соответствие диссертации и автореферата требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям

ГОСТ Р 7.0.11-2011, а также требованиям п. 25 Положения о присуждении учёных степеней (в автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации, показан вклад автора в проведённое исследование, отражена степень новизны и практической значимости результатов исследования).

Автореферат содержит список научных работ, опубликованных соискателем по теме диссертационного исследования. В тексте диссертации имеются ссылки на данные публикации. Оформление списка литературы соответствует требованиям ГОСТ 7.1-2003.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

В автореферате кратко изложено основное содержание диссертации и даётся правильное представление о работе. Общие выводы, представленные в автореферате, отражают основные научные положения и результаты диссертационного исследования.

Замечания к диссертационной работе

1. В работе рассмотрены только четырехполюсные асинхронные электродвигатели, хотя, как отмечено в диссертации, разрабатываемый прибор может осуществлять диагностику асинхронных машин с числом пар полюсов, равным 1, 2 и 3. При построении математических и конечно-элементных моделей, в качестве базы также использовался четырехполюсный асинхронный электродвигатель. Было бы не лишним рассмотреть картину распределения магнитного поля в электродвигателях различной мощности и разным числом полюсов.

2. В работе отсутствует сравнение диагностического сигнала при обрыве стержней ротора с сигналами при других видах дефектов (межвитковые замыкания, эксцентриситет и пр.) для возможности разделения диагностических признаков рассмотренных неисправностей.

3. В работе вскользь упомянуто про разработку и использование лабораторного калибровочного стенда, используемого для настройки датчиков Холла. Не хватает более подробного описания устройства и принципа работы лабораторного стенда и методики проведения калибровки датчиков Холла.

4. Лабораторные эксперименты проводились на АЭД без нагрузки, которая может оказывать влияние на вид напряженности ВМП и круговые диаграммы УСВР.

5. Результаты спектра временных сигналов ВМП АЭД показывают на значительное влияние гармонических составляющих тока на вид спектра временных сигналов напряженности ВМП (см.рис.4.16, 4.17 – лабораторные исследования; рис.4.37 и 4.38, 4.40 и 4.41 – исследования мотор-компрессора №1 и №2 электровоза модели НВА-55 под рабочей нагрузкой). В связи с этим проведение экспериментов желательно проводить при заранее известных показателях качества питающего напряжения.

6. Из параграфа 4.3.1 – Диагностика мотор-компрессора электровоза модели НВА-55 №1, а также параграфа 4.3.2 - Диагностика мотор-компрессора электровоза модели НВА-55 №2, выявлены дефекты такие как «обрыв стержней ротора» и недопустимую несимметрию питающего тока, но АЭД не разобрался и не показана фотография обрыва стержней ротора, а также не измерялись сопротивления обмоток АЭД на предмет межвитковых замыканий в них. Поэтому не понятно: а был ли реально обрыв стержней ротора? А также возникает вопрос: а несимметрия токов возникла из-за несимметрии сопротивления обмоток или из-за несимметрии напряжений в питающей электрической сети? Достоверность результатов диагностики в этом случае значительно снижается.

7. На стр.149 имеется опечатка в предложении «Спектры временных сигналов при несимметрии 0,50 и 100% представлены...». Необходимо.- «... 50 и 100%.....».

8. Отсутствуют ссылки по тексту диссертационной работы на следующие порядковые номера используемых источников: 10, 19, 24, 31, 33, 42, 43, 54, 76, 85, 133, 141, 144.

Заключение

Несмотря на отмеченные замечания диссертация Бельского Игоря Олеговича на тему «Разработка методов и средств диагностики асинхронных электродвигателей по параметрам внешнего магнитного поля» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании приведённых научных исследований изложены новые научные и

технологические решения, направленные на повышение эффективности управления техническим состоянием асинхронных электродвигателей при добавлении новых каналов диагностической информации о параметрах внешнего магнитного поля и колебаний угловой скорости вращения ротора.

Диссертация Бельского И.О. по содержанию, новизне, актуальности темы, практической значимости, полноте решения поставленных задач и форме отвечает требованиям ВАК. Её автор, **Бельский Игорь Олегович**, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (транспорт)».

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры энергетике федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Забайкальский государственный университет»,
почётный работник высшего профессионального образования РФ,
действительный член Российской академии естественных наук,
заслуженный деятель науки и техники Читинской области



Иван Флегонтович Суворов

28.11.2020г.

*Суворов Иван Флегонтович; 672039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, д. 30,
телефон: +7 924 277 66 40; e-mail: ivan.suvorov.1947@mail.ru*

Подпись И.Ф.Суворова заверяю.

Секретарь ученого совета ФГБОУ ВО

«Забайкальский государственный университет»



О.В.Естушок