

На правах рукописи



НОВОСЕЛОВ ЕВГЕНИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ
ДИАГНОСТИКИ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО ВНЕШНЕМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ**

Специальность:

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2018

Работа выполнена на кафедре «Электрические станции, подстанции и диагностика электрооборудования» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» и в федеральном государственном автономном образовательном учреждении дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» Минэнерго России.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Назарычев Александр Николаевич**.

Официальные оппоненты:

Левин Владимир Михайлович – доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Автоматизированные электроэнергетические системы»;

Ведерников Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Электрические станции».

Ведущая организация:

Акционерное общество «Инспекция по контролю технического состояния объектов электроэнергетики» (АО «Техническая инспекция ЕЭС»), г. Москва.

Защита диссертации состоится «1» июня 2018 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Novoselov_E.M._0.pdf

Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «___»_____2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Работа электростанций зависит от надежности системы электроснабжения собственных нужд (СЭСН). Наиболее распространенной причиной отказов СЭСН являются неисправности асинхронных электродвигателей (АД), связанные с тяжелыми условиями и режимами их эксплуатации. Отказы АД СЭСН электростанции могут привести к отключению энергоблока и развитию аварийной ситуации в энергосистеме.

Одним из наиболее повреждаемых узлов АД СЭСН, работающих с тяжелыми условиями пуска (дробилки, дымососы, дутьевые вентиляторы, мельницы и т.д.) является короткозамкнутая обмотка ротора (ОР), причем свыше 80 % повреждений приходится на обрывы стержней. Со временем оборванный стержень может отогнуться (как правило, при пуске) и повредить обмотку статора. Обрывы стержней ОР приводят к снижению пускового момента и увеличению длительности пуска, повышению вибрации и, соответственно, к ускоренному износу других узлов АД, а также к увеличению стоимости восстановительного ремонта. В случае своевременного выявления повреждения короткозамкнутой ОР ремонт может быть проведен силами предприятия, не требуя при этом больших затрат. Таким образом, раннее выявление обрывов стержней ОР АД является актуальной задачей, которая может быть решена с помощью методов функциональной диагностики.

Согласно ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009, ГОСТ ISO 20958-2015 и ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015 для функционального контроля состояния ОР АД рекомендуются методы, основанные на спектральном анализе вибрации, тока статора (MCSA), магнитного поля воздушного зазора или аксиальной составляющей магнитного потока внешнего магнитного поля (ВМП) АД.

В настоящее время основным методом функциональной диагностики АД на электрических станциях является вибродиагностика, но как показывает практика, этот метод отличается низкой чувствительностью к обрыву одного стержня. Методы, основанные на анализе тока статора и магнитного поля воздушного зазора хорошо известны и изучены. Они имеют ряд недостатков, которые препятствуют их внедрению на электростанциях. Методы, основанные на анализе тока статора требуют доступа к цепям питания, а методы, основанные на анализе магнитного поля воздушного зазора, требуют установки внутри АД датчика, который сам может стать причиной повреждения. Методы диагностики, основанные на анализе аксиального магнитного потока ВМП не так хорошо изучены, как предыдущие и не получили заметного распространения. В этих методах магнитный поток измеряется с помощью датчика магнитного потока, представляющего собой кольцевую катушку без сердечника, которая устанавливается с торца двигателя. Способ измерения и обуславливает основные недостатки метода: с торца на многих АД устанавливается вентилятор, что приводит к ослаблению, а в некоторых случаях и к отсутствию регистрируемого сигнала; под каждый габарит АД требуется свой датчик.

Исследованиями радиальной составляющей ВМП, направленным на разработку методов диагностирования узлов АД, в частности ОР, пока уделяется мало внимания, поэтому исследования в данном направлении представляют научный и практический интерес. Успешная разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора

асинхронных электродвигателей по радиальной составляющей внешнего магнитного поля будет способствовать повышению надежности эксплуатации асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций благодаря уменьшению числа внезапных отказов за счет увеличения контролепригодности асинхронных электродвигателей как объекта диагностирования и своевременного выявления обрывов стержней обмотки ротора.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в исследование надежности эксплуатации и вопросы функционального контроля состояния АД внесли многие российские и зарубежные ученые, в том числе: Котеленец Н.Ф., Савельев В.А., Назарычев А.Н., Барков А.В., Рассказчиков А.В., Скоробогатов А.А., Иноземцев Е.К., O'Donnell, P., Tavner P., Penman J., Benbouzid M.E.H., Thomson W.T., Kliman G. B., Elkasabgy N.M. и др.

Активное развитие методов функциональной диагностики узлов АД, в частности ОР, намечилось в начале 80-х годов прошлого века. Савельевым В.А. и Рассказчиковым А.В. одними из первых был предложен способ выявления обрывов стержней ОР по магнитному полю воздушного зазора. Позднее Kliman G. B. предложил усовершенствованный вариант вышеуказанного метода, отличающаяся обработкой и анализом диагностического сигнала. В магнитном поле воздушного зазора были выявлены гармонические составляющие, отражающие состояние ОР АД. Было сделано предположение (Tavner P., Penman J., Kliman G. B.), что эти гармонические составляющие будут присутствовать также в токе статора и в аксиальной составляющей магнитного потока ВМП. Это послужило толчком к развитию очень мощного направления технической диагностики электрических вращающихся машин – Motor Current Signature Analysis (Метод спектрального анализа тока статора). Вклад в развитие данного направления внесли Tavner P., Penman J., Thomson W.T., Kliman G. B., Скоробогатов А.А.. В 1992 году Elkasabgy N.M. был сделан вывод о перспективности диагностирования АД на основе анализа его аксиального магнитного потока. Вклад в развитие методов функциональной диагностики АД на основе анализа аксиального магнитного потока внесли Kliman G. B., Elkasabgy, N.M., Negrea M., KokkoVoitto, Romary R., Fireteanu V..

Исследованиям радиальной составляющей ВМП АД, направленным разработку методов диагностирования ОР АД, уделяется куда меньше внимания. По данной тематике можно выделить работы Romary R. и Fireteanu V., но в целом следует отметить, что данное направление пока плохо изучено. Все основные результаты были получены на математических моделях или в лабораторных условиях, а результаты, полученные в условиях реальной эксплуатации, отсутствуют. Пока плохо изучено влияние на спектр радиальной составляющей ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов, таких как несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, эксцентриситет ротора и т.д. Не раскрыты многие аспекты практического применения радиальной составляющей ВМП для диагностирования АД.

Целью работы является поиск и исследование новых диагностических признаков повреждения короткозамкнутых ОР, разработка метода диагностирования ОР АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП.

В работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Разработка математических моделей, позволяющих исследовать ВМП и магнитное поле воздушного зазора АД.
2. Разработка скалярного анализатора спектра для автоматизированного анализа спектров ВМП и магнитного поля воздушного зазора АД.
3. Разработка экспериментально-лабораторного стенда, позволяющего исследовать ВМП и магнитное поле воздушного зазора АД.
4. Исследовать влияние на спектр радиальной составляющей ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов.
5. Разработка метода, алгоритма и программного обеспечения для функционального диагностирования короткозамкнутой обмотки ротора на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП АД.

Объектом исследования являются АД 6 и 0,4 кВ с короткозамкнутым ротором, используемые в системах собственных нужд электрических станций.

Предметом исследования является динамика изменения гармоник в спектре радиальной составляющей ВМП АД при повреждении ОР и влиянии эксплуатационных факторов.

Методология и методы исследований. Поставленные задачи решались с использованием методов спектрального анализа сигналов, конечных элементов, теории магнитного поля, обработки экспериментальных данных, методов математического и физического моделирования.

Научную новизну работы представляют:

1. Результаты исследования влияния на спектр радиальной составляющей ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов, таких как несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, эксцентриситет ротора.
2. Диагностический параметр обрыва стержней короткозамкнутой ОР – средняя мощность сигнала радиальной составляющей ВМП, состоящего из гармоник фиктивной обмотки ротора на нижних боковых частотах.
3. Метод и алгоритм автоматической коррекции времени записи сигнала, который, по сравнению с традиционным анализом на основе быстрого преобразования Фурье, позволяет сократить время записи сигнала, обеспечивая высокую точность определения амплитуд и частот любых гармонических составляющих спектра.
4. Методика функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП.

Теоретическая значимость работы:

1. Изложены результаты исследования влияния на спектр радиальной составляющей ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов (несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, эксцентриситет ротора).
2. Доказана целесообразность использования в качестве диагностического параметра обрыва стержней ОР АД средней мощности сигнала радиальной составляющей ВМП, состоящего из гармоник фиктивной обмотки ротора на нижних боковых частотах.
3. Изложены основные принципы функционального диагностирования корот-

козамкнутой ОР АД на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП.

Практическую ценность работы представляют:

1. Скалярный анализатор спектра, основанный на алгоритме автокоррекции времени записи сигнала, позволяющий определять скольжение, а также амплитуды и частоты гармоник, генерируемых АД.

2. Программно-аппаратный комплекс для функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП.

3. Экспериментально-лабораторный стенд, позволяющий исследовать работу АД при различных видах повреждений ОР и влиянии эксплуатационных факторов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы». Диссертация соответствует паспорту специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

В части формулы специальности: «... В рамках специальности проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии ...». Результаты исследования позволят повысить надежность производства электроэнергии благодаря уменьшению числа отказов АД собственных нужд электростанций за счет раннего выявления обрывов стержней ОР.

В части области исследования:

п. 5 «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок» соответствуют: диагностический параметр обрыва стержней короткозамкнутой ОР; методика функциональной диагностики короткозамкнутой ОР АД на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП; программно-аппаратный комплекс для функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД.

п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» соответствуют: математические модели для исследования влияния на ВМП АД обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов; экспериментально-лабораторный стенд, для исследования работы АД при повреждениях ОР;

п. 13 «Разработка методов использования для решения задач в электроэнергетике» соответствуют: программно-аппаратный комплекс, алгоритм и компьютерная программа для функционального диагностирования ОР АД; методика определения порогового значения диагностического параметра обрыва стержней ОР АД с помощью математического моделирования на ЭВМ.

Реализация результатов работы. Полученные результаты используются:

1. В микропроцессорном устройстве защиты «Сириус-2-Д» производства ЗАО «РАДИУС Автоматика».

2. На основе экспериментального стенда разработана лабораторная работа «Методы оперативного контроля состояния обмотки ротора асинхронного электродвигателя», которая внедрена в учебный процесс ИГЭУ по курсу «Системы автоматизированного управления и диагностирования в электроэнергетике».

3. На основе разработанных теоретических и практических результатов рабо-

ты на кафедре «Диагностика и управление техническим состоянием энергетического оборудования» ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» Минэнерго России проводятся занятия по повышению квалификации специалистов диагностических служб генерирующих компаний топливно-энергетического комплекса России.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования влияния обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов на спектр радиальной составляющей ВМП АД.

2. Диагностический параметр обрыва стержней ОР АД – средняя мощность сигнала радиальной составляющей ВМП, состоящего из гармоник фиктивной обмотки ротора на нижних боковых частотах.

3. Методика функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП.

4. Метод определения скольжения, а также амплитуд и частот гармоник, генерируемых АД, основанный на алгоритме автокоррекции времени записи сигнала.

Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением результатов работы, полученных на разработанных математических моделях, с данными экспериментов, проведенных на лабораторных физических моделях и в условиях реальной эксплуатации электрических станций.

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на региональных научно-технических конференциях «Энергия» (г. Иваново 2009–2017 гг.); на XV–XIX международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново 2009, 2011, 2013, 2015, 2017 гг.); на научно-практических семинарах «Пожарная безопасность и надежность электроустановок и электрических систем» (г. Иваново 2012–2014 гг.); выставке UPGrid 2012 «Электросетевой комплекс. Инновации. Развитие», (г. Москва, 2012 г.), международном научно-техническом семинаре РАН «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (г. Иркутск, 2013 г.), международном научно-техническом семинаре «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования (г. Санкт-Петербург, 2012–2014 гг.).

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 35 работ, из них 6 в журналах, рекомендованных ВАК, 2 в англоязычных журналах и сборниках, индексируемых в международной базе данных SCOPUS, получено 3 патента РФ на изобретение, 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 114 наименований и 4 приложений. Общий объем работы составляет 234 страницы, в тексте содержится 118 рисунков и 98 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В главе 1 выполнен анализ повреждаемости АД СЭСН электростанций. Рассмотрены известные методы функциональной диагностики ОР АД, проанализированы их достоинства и недостатки. Обоснована целесообразность разработки метода функциональной диагностики ОР на основе анализа радиальной составляющей ВМП АД. Сформулированы и обоснованы задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

В главе 2 с помощью математических моделей (ММ), основанных на методе конечных элементов, было произведено исследование влияния обрывов стержней ОР и эксплуатационных факторов на ВМП АД. Моделирование осуществлялось в программном комплексе Ansys Maxwell, в основе которого лежит численное решение системы дифференциальных уравнений Максвелла в конечной области пространства, с соответствующими граничными условиями, методом конечных элементов:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}; \nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t}; \nabla \cdot D = \rho; \nabla \cdot B = 0; \\ \nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0; D = \varepsilon \cdot E; B = \mu \cdot H; J = \sigma \cdot E, \end{cases} \quad (1)$$

где H – напряженность электрического поля; J – плотность тока; D – электрическая индукция; E – напряженность электрического поля; B – магнитная индукция; ρ – объёмная плотность стороннего электрического заряда; ε – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; σ – удельная проводимость; t – время.

Исходными данными ММ являются напряжение, приложенное к выводам обмотки статора в начальный момент пуска, момент сопротивления на валу ротора, геометрия АД и характеристики конструктивных материалов (корпуса, магнитопроводов статора и ротора, проводников обмоток статора и ротора, вала ротора). В качестве граничного условия было принято, что на расстоянии 1 м от корпуса АД векторный магнитный потенциал равен нулю. Ввиду двухмерной постановки задачи скос пазов ротора не учитывался.

Для моделирования были выбраны два АД: **АД №1** (ЗВР71-2) мощностью 250 Вт и одной парой полюсов и **АД №2** (АИР 71А6) мощностью 370 Вт и тремя парами полюсов. Помимо самих АД, также были смоделированы реальные датчики. В воздушном зазоре каждого АД размещен внутренний индуктивный датчик (ВИД), представляющий собой два витка провода, намотанных на зубец статора. Вблизи корпуса АД размещена точка, имитирующая датчик Холла (ДХ), в которой регистрируется радиальная составляющая индукции ВМП. Обрыв стержня ОР моделировался путем удаления одного стержня из геометрии объекта моделирования. Геометрия модели АД №1 показана на рис. 1.

Из ряда работ известно, что обрыв стержня клетки ротора вне зависимости от полюсности машины приводит к перераспределению тока по стержням. Новое распределение тока можно математически представить в виде суммы первоначального тока (при отсутствии обрыва стержня) и фиктивного (добавочного) тока от оборванного стержня, причем в оборванном стержне фиктивный ток равен и противоположен первоначальному, что обеспечивает равенство нулю тока в оборванном стержне.

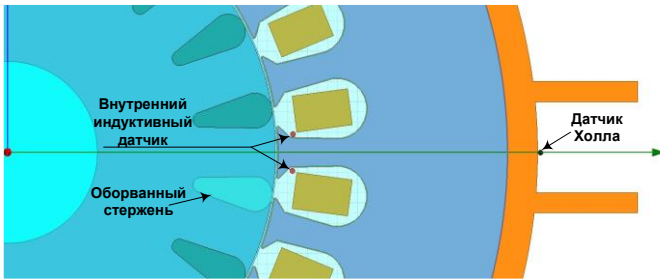


Рис. 1. Геометрия математической модели АД №1

воздушном зазоре машины свое магнитное поле. Частоты гармоник магнитного поля, вызванного фиктивными токами при любом числе оборванных стержней и расположении их по отношению друг к другу, определяются формулой:

$$f_{\text{ФОР}}^{(\nu\pm)} = f_c \cdot \left(\frac{1-s}{p} \cdot \nu \pm s \right), \quad (2)$$

где f_c – частота сети; p – число пар полюсов; ν – порядок гармоники; s – скольжение.

При этом каждому порядку гармоник амплитудного спектра, генерируемого фиктивными токами, принадлежат две гармоники, одна из которых имеет нижнюю боковую частоту $f_{\text{ФОР}}^{(\nu-)}$, а другая – верхнюю боковую частоту $f_{\text{ФОР}}^{(\nu+)}$, значения которых отличаются на величину $\Delta f^{(\nu)} = 2 \cdot f_c \cdot s$.

В целях упрощения принято следующее обозначение гармоник – **ФОР $\nu\pm$** , где **ФОР $\nu-$** обозначает гармонику ФОР ν -ого порядка на нижней боковой частоте $f_{\text{ФОР}}^{(\nu-)}$, а **ФОР $\nu+$** – на верхней боковой частоте $f_{\text{ФОР}}^{(\nu+)}$ соответственно.

Для подтверждения корректности ММ магнитного поля воздушного зазора АД проводился анализ сигналов, полученных с ВИД. Обрыв одного стержня ОР АД №1 привел к появлению в сигнале явно выраженных пиков, чередующихся с частотой скольжения. В сигнале от АД №2, никаких изменений не было обнаружено. Форма полученных сигналов соответствовала данным, представленным в работах других авторов. Анализ спектров сигналов показал, что обрыв стержня ОР влияет на магнитное поле воздушного зазора АД и существенно увеличивает амплитуды гармонических составляющих сигнала. Наибольший рост продемонстрировали гармоники, частоты которых совпадают с частотами гармоник ФОР, определяемыми выражением (2), при этом относительное увеличение амплитуд составляет 10 и более раз.

Было произведено исследование ВМП АД. Для этого использовались виртуальные сигналы радиальной составляющей магнитной индукции, полученной с ДХ, установленного вблизи (0,1 мм) корпуса АД. На рис. 2, а, б представлены спектры сигналов с ДХ АД №1 при исправной ОР (ИОР) и при обрыве одного стержня ОР, соответственно, в сравнении со спектром сигнала с датчика ВИД АД №1 при обрыве одного стержня ОР (рис. 2, в).

Анализ полученных результатов показал, что обрыв стержня ОР существенно

Из сказанного следует, что ОР с поврежденными стержнями можно представить двумя обмотками – одна из которой будет исправной, а другая – фиктивной обмоткой ротора (ФОР). Фиктивные токи наводят в

влияет на спектр ВМП АД, в котором, прослеживаются те же изменения, что и в сигналах с датчиков ВИД. Обрыв стержня ОР привел к существенному увеличению амплитуд гармонических составляющих с частотой, которая совпадает с частотами гармоник ФОР, определяемых выражением (2), что может быть использовано в качестве диагностического признака обрыва стержней ОР АД.

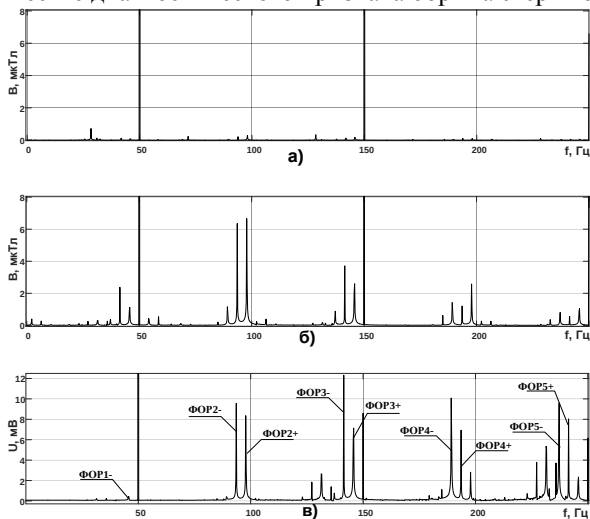


Рис. 2. Спектры сигналов АД №1 при номинальной нагрузке: а – ДХ, ИОР; б – ДХ, обмотка ротора с одним оборванным стержнем; в – датчик ВИД, обмотка ротора с одним оборванным стержнем

С точки зрения обеспечения достоверности результатов диагностирования, полагаться на измерение какой-то одной гармоники нерационально, поэтому целесообразно подобрать такой диагностический параметр обрыва стержней ОР, который учитывал бы амплитуды сразу нескольких гармоник ФОР. В качестве такого диагностического параметра предложен интегральный показатель – средняя мощность сигнала радиальной составляющей ВМП, состоящего из гармоник ФОР на нижних боковых частотах, которая может быть определена по равенству Парсевалю следующим выражением:

$$P_{\text{ФОР}} = \frac{1}{2} \left(\sum_{v=1}^n B_{v-}^2 + \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq p}}^n B_{v+}^2 \right), \quad (3)$$

где B_{v-} , B_{v+} – амплитуды гармоник ФОР v -го порядка на нижней (v -) и верхней (v +) боковых частотах; n – предельный порядок учитываемых гармоник.

Данный параметр позволит оценивать состояние ОР не путём сравнения амплитуды каждой гармонической составляющей с граничными значениями, а путём сравнения значения всего одного параметра с граничным. При этом даже в случае возрастания отдельных гармонических составляющих значение средней мощности сигнала будет определяться совокупностью гармоник, что позволит оценивать состояние АД с более высокой достоверностью. Из анализа литературных источников было установлено, что влияние эксплуатационных факторов на результаты контроля ОР АД практически не исследовалось. Под эксплуатационными факторами понимается отклонение эксплуатационных параметров АД в допустимых, или близких к ним, пределах. В качестве наиболее вероятных эксплуатационных факторов, которые потенциально могут повлиять на результаты контроля ОР АД по ВМП, были выделены: несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки на валу ротора и эксцентриситет ротора. В процессе исследования влияния этих факторов рассмат-

ривались виртуальные сигналы с ДХ АД №1 и №2, при этом отдельно по гармоникам $\Phi OP_{\nu-}$ и $\Phi OP_{\nu+}$ определялись средние мощности $P_{\Phi OP-}$ и $P_{\Phi OP+}$ по выражению:

$$P_{\Phi OP\pm} = \frac{1}{2} \sum_{\substack{\nu=1 \\ \nu \neq p}}^n B_{\nu\pm}^2. \quad (4)$$

При расчете $P_{\Phi OP+}$ исключалась гармоника с частотой, равной частоте сети.

При моделировании несимметрии питающего напряжения рассматривалось отклонение напряжения только в одной из фаз, в двух других напряжение было одинаковым и составляло 220 В. Предельная величина отклонения составляла 10 В.

При моделировании влияния нагрузки на валу ротора рассматривался следующий ряд нагрузок: 15 %, 30 %, 50 %, 80 %, 100 %, 120 % от номинального значения.

В процессе моделировании влияния эксцентриситета ротора на ВМП АД рассматривались следующие варианты: эксцентриситет отсутствует; статический эксцентриситет 10 %, 20 %, 30 %; динамический эксцентриситет 10 %, 20 %, 30 %.

Исследования показали, что несимметрия напряжения и статический эксцентриситет ротора оказывают незначительное влияние на амплитуды гармоник ФОР радиальной составляющей ВМП и не приводят к существенному изменению средней мощности сигнала, поэтому влиянием данных факторов можно пренебречь.

Снижение нагрузки на валу ротора АД приводит к уменьшению амплитуд гармоник ФОР и величины средней мощности. Поэтому, на малонагруженных АД могут быть проблемы с определением обрыва стержней ОР по ВМП, и при проведении процедуры диагностирования необходимо учитывать текущую нагрузку АД.

Динамический эксцентриситет является причиной появления во временном спектре магнитного поля воздушного зазора АД гармоник с частотой:

$$f_{\Omega}^{(\nu\pm)} = f_c \cdot (1 \pm \nu \cdot (1-s)/p) = f_c \pm \nu \cdot f_p, \quad (5)$$

где f_p – частота вращения ротора.

Значения частот гармоник эксцентриситета ротора (ГЭР) совпадают со значениями частот гармоник ФОР, что может повлиять на результат контроля состояния ОР. Правило соответствия гармоник ГЭР и ФОР определяется выражением:

$$\nu_{\Omega} = \nu_{\Phi OP} - p, \quad (6)$$

где ν_{Ω} , $\nu_{\Phi OP}$ – порядок гармоник ГЭР и ФОР соответственно.

Гармоники ФОР и ГЭР с одинаковой частотой имеют различные порядки. Необходимо отметить, что гармоникам $\Phi OP_{\nu-}$ соответствуют гармоники ГЭР более высоких порядков, нежели гармоникам $\Phi OP_{\nu+}$, то есть эксцентриситет ротора сильнее всего влияет на гармоники $\Phi OP_{\nu+}$, так как им соответствуют гармоники ГЭР низких порядков, а чем меньше порядок гармоники, тем больше ее энергия. При этом на АД с ИОР увеличение амплитуд соответствующих гармоник, вызванное динамическим эксцентриситетом, может превышать таковое для АД с оборванным стержнем ОР. Амплитуды гармоник $\Phi OP_{\nu-}$ при этом практически не изменялись, значительно увеличиваясь только в случае обрыва стержней ОР.

Таким образом, с целью обеспечения достоверности результатов диагностирования ОР АД по ВМП в качестве диагностического сигнала наиболее целесообразно

использовать сигнал, состоящий из нижних боковых гармоник ΦOP ($\Phi OP_{\nu-}$), а в качестве диагностического параметра обрыва стержней ОР – среднюю мощность этого сигнала, которую можно определить по выражению:

$$P_{\Phi OP-} = \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^n B_{\nu-}^2. \quad (7)$$

В работе исследовано изменение ВМП при его удалении от корпуса АД. Было произведено ММ АД №2 с одним оборванным стержнем ОР, при этом точка регистрации ВМП последовательно удалялась от корпуса АД на расстояние до 40 см. В каждой точке определялись амплитуды гармоник ΦOP . Полученные результаты показали, что при удалении от корпуса АД амплитуды гармонических составляющих ВМП быстро уменьшаются. Например, при удалении на 10 см от корпуса АД амплитуда гармоники на частоте сети уменьшилась в 50 раз. Чем выше порядок гармоники и, соответственно, ее частота, тем быстрее она затухает, что соответствует известной теории распространения электромагнитного поля. Поэтому, из-за стремительного затухания ВМП даже при близком расположении нескольких АД взаимное влияние их ВМП друг на друга будет крайне незначительным, так как амплитуды информативных гармоник слишком малы.

Глава 3 посвящена разработке скалярного анализатора спектра (далее анализатор спектра) для спектрального анализа ВМП АД.

Как показали результаты ММ, во ВМП АД присутствуют информативные гармонические составляющие, частоты которых зависят от частоты сети, скольжения и числа пар полюсов. Зная эти параметры можно автоматически находить любые гармоники, генерируемые АД. Для получения корректных результатов контроля состояния АД на основе спектрального анализа ВМП требуется с высокой точностью определять амплитуды и частоты нужных гармоник. Для этого необходим соответствующий инструмент – анализатор спектра. Традиционные методы спектрального анализа, основанные на быстром преобразовании Фурье (БПФ) или оконном преобразовании Фурье (ОПФ), не могут обеспечить нужную точность и стабильность результатов, особенно при уменьшении времени регистрации сигналов.

При разработке анализатора использовались виртуальные сигналы, полученные на ММ. Скольжение АД предложено определять по ГЭР первого порядка (5), которые, как показало ММ, присутствуют в ВМП АД. Искомая ГЭР находится путем определения в области поиска частотной составляющей спектра с максимальной амплитудой. Зависимость длины зоны поиска ГЭР $\Delta f_{\text{диап.Э}}$ от числа пар полюсов p АД выглядит следующим образом:

$$\Delta f_{\text{диап.Э}} = f \cdot s_{\text{макс}} / p, \quad (8)$$

где $s_{\text{макс}} = 1, 2 \cdot s_{\text{ном}}$ – максимальное рабочее значение скольжения.

При числе пар полюсов $p > 1$ скольжение определяется по формулам (9, 10) для $ГЭР I_{\pm}$, а итоговое скольжение – как среднее арифметическое этих значений.

$$s_{\mathcal{G}}^{(1-)} = 1 - p + p \cdot f_{\mathcal{G}}^{(1-)} / f_c; \quad (9)$$

$$s_{\mathcal{G}}^{(1+)} = 1 + p - p \cdot f_{\mathcal{G}}^{(1+)} / f_c. \quad (10)$$

При $p=1$ скольжение определяется только по выражению (10).

Для обеспечения высокой точности определения скольжения при использовании спектрального анализа, основанного на БПФ, по данному способу необходима длительная запись сигнала (для высоковольтных АД СЭСН – порядка нескольких минут), что не приемлемо в условиях работы электростанций. Поэтому, для точного определения параметров гармоник спектра ВМП АД и минимизации времени записи сигнала разработан метод и алгоритм автоматической коррекции времени записи сигнала (АВЗС). Принцип работы алгоритма АВЗС основан на оценке величины эффекта растекания спектра. Увеличение погрешности определения частоты приводит к усилению эффекта растекания спектра и наоборот, чем меньше погрешность, тем слабее эффект растекания. Выявлено, что период изменения величины погрешности определения частоты (эффекта растекания спектра) равен периоду сигнала.

Для минимизации величины погрешности для каждой искомой гармоники осуществляется подбор оптимального времени записи сигнала по выражению:

$$T_{зан.i} = T_{зан} - i \cdot 1 / F_d, \quad (11)$$

где $T_{зан.i}$ – время записи сигнала после i -го шага уменьшения времени с исходного значения $T_{зан}$; F_d – частота дискретизации.

При этом на каждом шаге уменьшения времени записи сигнала производится оценка величины растекания спектра. В качестве критерия оценки растекания спектра выбран параметр V , определяемый по формуле:

$$V = (A_N - A_{N-1}) \cdot (A_N - A_{N+1}), \quad (12)$$

где A_N – максимальная амплитуда; A_{N-1} , A_{N+1} – амплитуды гармоник расположенных слева и справа от гармоники с максимальной амплитудой.

Эффект растекания спектра (и соответственно величина погрешности) минимален при максимальном значении параметра V . Максимальная погрешность Δf_m определения частоты f при использовании алгоритма АВЗС определяется как:

$$\Delta f_m = \frac{f_i}{2 \cdot (F_d \cdot T_{зан} - i + 1)}. \quad (13)$$

Максимальная погрешность определения частоты Δf_m при использовании алгоритма АВЗС зависит не только от времени записи сигнала, но и от частоты дискретизации. Так как современные АЦП могут работать при частоте в сотни кГц, то уменьшать погрешность определения частоты следует за счет увеличения частоты дискретизации, а не за счет увеличения времени записи сигнала. Время записи сигнала следует выбирать исходя из соображений минимально допустимого разрешения по частоте, при этом практически для любых АД СЭСН электростанций, время записи не будет превышать 10 с.

Предложен критерий достоверности определения скольжения по ГЭР с применением алгоритма АВЗС.

$$\left| s_{\mathcal{G},uzm}^{1+} - s_{\mathcal{G},uzm}^{1-} \right| \leq \frac{p(\Delta f_c \cdot 2 + \Delta f_{\mathcal{G}}^{1+} + \Delta f_{\mathcal{G}}^{1-})}{(f_{c,m} - \Delta f_c)}. \quad (14)$$

В левой части (14) рассчитывается разница между скольжениями, измеренными по частотам ГЭР 1-го порядка в ходе контроля, а в правой – максимально допусти-

мая разница между этими скольжениями. Значения погрешностей определения частот рассчитываются по (13), а точное значение частоты сети при достаточно больших величинах произведения частоты дискретизации F_d и времени записи сигнала $T_{\text{зап}}$ (порядка 1000 и более) и при малой величине допустимого отклонения частоты сети от номинального в нормальном режиме ($\pm 0,05$ Гц) принимается равным 50 Гц.

Критерий (14) предлагается также использовать для оценки качества регистрируемого сигнала. Смысл заключается в том, что если скольжение по ГЭР будет определено с допустимой погрешностью, то сигнал пригоден к использованию, в противном случае необходимо повторить регистрацию сигнала.

На основе полученных результатов был разработан анализатор спектра, структурная схема которого показана на рис. 3.

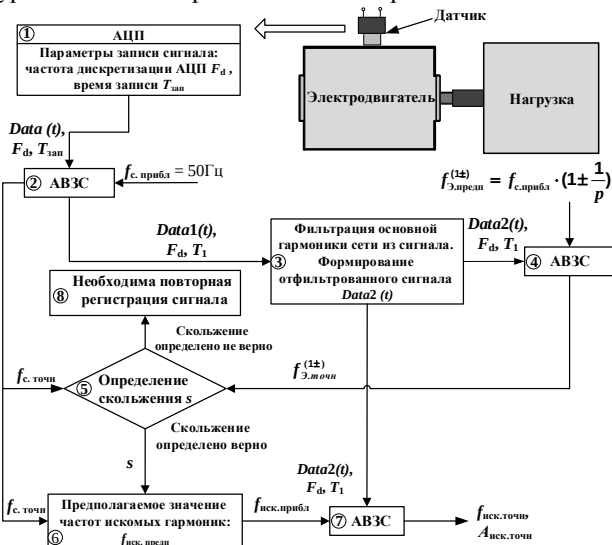


Рис. 3. Структурная схема анализатора спектра на базе АВЗС

которое показало, что он обеспечивает более высокую точность определения амплитуд и частот гармонических составляющих спектра сигнала по сравнению с традиционными методами, а также более высокую стабильность результатов, которая сохраняется даже при уменьшении времени регистрации сигнала.

Глава 4 посвящена экспериментальному подтверждению результатов, полученных на основе математического моделирования.

Экспериментальные исследования проводились как в лабораторных условиях, так и в условиях реальной эксплуатации на Ивановской ТЭЦ-2 (ИвТЭЦ-2) и в котельной ИГЭУ. Было разработано 2 экспериментальных стенда. Стенд №1 построен на базе АД №1 (ЗВР71-2), а стенд №2, представленный на рис. 4, на основе АД №2 (АИР 71А6).

Для оценки проявления радиальной составляющей ВМП на фоне шума была произведена регистрация сигналов при пуске АД (рис. 5). Под шумом в данном случае понимается сигнал, обусловленный магнитными полями от внешних источни-

Благодаря использованию АВЗС и фильтрации мощных гармоник, которые не несут информацию о повреждении узлов АД, разработанный анализатор позволяет автоматически производить обработку сигнала и с достаточной точностью определять частоты и амплитуды любой гармонической составляющей сигнала при времени записи порядка 1–3 сек. Произведено сравнение результатов работы разработанного анализатора спектра с БПФ и ОПФ,

ков, а также собственным шумом измерительной системы.

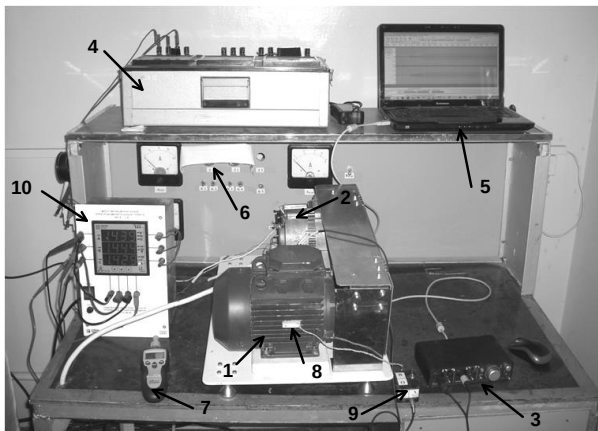


Рис. 4. Экспериментальный стенд №2: 1 – АД №2; 2 – генератор; 3 – АЦП; 4 – измерительный комплект К-505; 5 – ноутбук; 6 – блок нагрузки; 7 – тахометр; 8 – ДХ; 9 – блок питания ДХ; 10 – многофункциональный измерительный прибор

ными сигналами. Для проверки корректности моделирования ВМП был произведен сравнительный анализ виртуальных и реальных сигналов с ДХ.

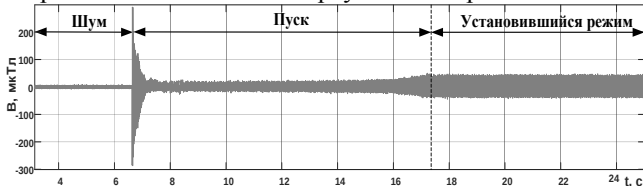


Рис. 5. Форма сигнала с ДХ при пуске двигателя (6 кВ)
ДАМСО-15-12-8 дымососа ИвтЭЦ-2

ММ АД №1 и №2 с динамическим эксцентриситетом ротора 10 %. При моделировании учитывалась реальная нагрузка на валу ротора АД №1 и №2 и величина напряжения питающей сети. Результаты исследования показали, что обрыв стержня ОР существенно влияет на спектр ВМП АД. В целом прослеживаются те же изменения, что и в сигналах с датчиков ВИД. Обрыв стержня ОР приводит к существенному увеличению амплитуд гармонических составляющих с частотой, которая совпадает с частотами гармоник ФОР, определяемых выражением (2). Таким образом, был доказан факт существования гармоник ФОР в радиальной составляющей ВМП АД. Наибольший рост имели гармоники $FOR_{\nu-}$. Амплитуды некоторых гармоник при обрыве стержня ОР возросли более чем в 10 раз. Амплитуды гармоник $FOR_{\nu+}$ при обрыве стержня ОР увеличивались не столь значительно. Полученные экспериментальные результаты подтверждают сделанный в главе 2 вывод, о том, что для определения состояния ОР наиболее целесообразно использовать гармоники $FOR_{\nu-}$. На всех АД при обрыве стержня ОР диагностический параметр – средняя мощность сигнала, состоящего из

Результаты анализа полученных сигналов показывают, что при пуске АД радиальная составляющая ВМП отчетливо проявляется на фоне шума. Уровень сигнала, зафиксированный после пуска АД, многократно превышает величину сигнала при отключенном двигателе. Проведена экспериментальная проверка разработанного анализатора спектра на реальных сигналах с датчиков ВИД и с ДХ, которая показала, что разработанный анализатор спектра корректно работает с реальными сигналами.

Реальные сигналы с ДХ были получены на стендах №1 и №2. Сначала измерения производились при исправной ОР, а затем при одном оборванном стержне. В качестве виртуальных сигналов использовались сигналы, полученные на

гармоник ΦOPv - (7), возрастала более чем в 30 раз.

Алгоритм диагностирования ОР АД по ВМП показан на рис. 6. На корпусе АД регистрируется радиальная составляющая индукции ВМП (рис. 6, блок 1). Регистрация сигнала производится в одной точке – на противоположной от клеммной коробки стороне корпуса АД в области середины длины сердечника статора. Точка, в которой производится измерения, должна быть заранее отмечена.

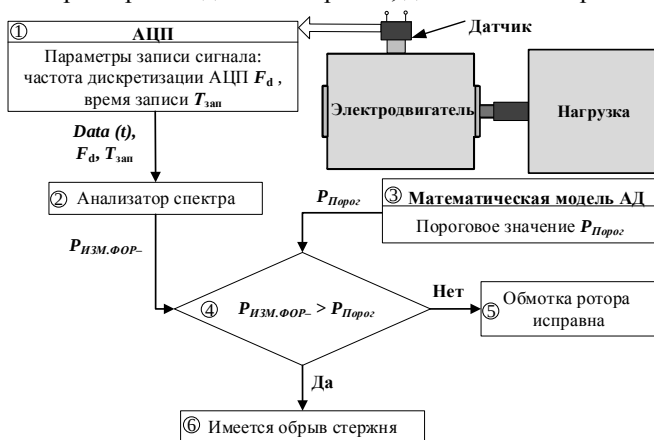


Рис. 6. Структурная схема алгоритма диагностирования ОР АД

чением $P_{Порог}$ (рис. 6, блок 4). Если измеренное значение больше порогового, то в ОР АД имеется оборванный стержень (рис. 6, блоки 5, 6).

$$P_{ИЗМ.ФОР-} \geq P_{Порог} \quad (15)$$

При регулярном проведении процедуры диагностирования и накоплении статистики граничные значения диагностических параметров должны уточняться.

Результаты исследований показали, что ММ ВМП АД с оборванным стержнем ОР дают приемлемую точность. Поэтому, если данные измерений по конкретному АД отсутствуют и пороговые значения диагностического параметра $P_{Порог}$ заранее неизвестны, то их можно определить с помощью ММ (рис. 6, блок 3). Суть данного подхода заключается в том, что по ММ АД с оборванным стержнем ОР определяется средняя мощность сигнала, состоящего из гармоник ΦOPv . Пороговое значение при этом будет определяться по выражению:

$$P_{Порог} = 0,7 \cdot P_{ПОР} \quad (16)$$

Предложенная методика диагностирования ОР по ВМП была опробована на ИВТЭЦ-2 на АД типа ДАМСО 15-12-8. Полученные результаты показали, что ОР всех АД исправны.

Измерения, выполненные на АД 6 кВ дымососов ИВТЭЦ-2 и АД 0,4 кВ сетевых насосов котельной, не выявило заметного влияния магнитных полей соседних АД друг на друга. Исследования изменений ВМП при его удалении от корпуса АД также показали, что результаты совпадают с результатами, полученными с помощью ММ в главе 2. Быстрое затухание ВМП при его удалении от АД свидетельствует,

что даже при близком расположения АД их взаимное влияние ВМП друг на друга будет крайне незначительным, т.к. амплитуды информативных гармоник будут слишком малы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что проблема обрыва стержней ОР характерна для АД, работающих с тяжелыми условиями пуска, и наиболее актуальна для пылеугольных блоков электрических станций. Показано, что перспективным направлением разработки методов диагностирования ОР АД, представляющим научный и практический интерес, являются исследования изменения радиальной составляющей ВМП.

2. Исследования, выполненные с помощью ММ, основанных на методе конечных элементов, и разработанного экспериментально-лабораторного стенда, выявили наличие влияния обрыва стержней ОР и эксплуатационных факторов (несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, статический и динамический эксцентриситет ротора) на спектр радиальной составляющей ВМП АД.

3. Доказано, что в радиальной составляющей ВМП АД содержатся гармоники с частотой, зависящей от скольжения, которые могут быть использованы для диагностирования ОР.

4. Выявлен и обоснован диагностический параметр обрыва стержней ОР АД – средняя мощность сигнала радиальной составляющей ВМП, состоящего из гармоник фиктивной ОР на нижних боковых частотах. Данный параметр не подвержен влиянию несимметрии питающего напряжения и эксцентриситета ротора, что позволяет повысить достоверность диагностирования и использовать его в условиях реальной эксплуатации на работающих АД.

5. Проведенные экспериментальные исследования показали, что ММ, основанные на методе конечных элементов, позволяют получить достоверные результаты при моделировании радиальной составляющей ВМП АД с оборванным стержнем ОР и могут быть использованы на практике для определения пороговых значений диагностического параметра обрыва стержней ОР.

6. Разработан скалярный анализатор спектра на основе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала, который дает возможность с высокой точностью и при небольшом времени записи сигнала определять скольжение, а также амплитуды и частоты гармоник, генерируемых АД.

7. Разработана методика функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП, позволяющая повысить надежность эксплуатации АД собственных нужд электростанций за счет своевременного выявления обрыва стержней ОР.

8. Разработан программно-аппаратный комплекс для функционального диагностирования короткозамкнутой ОР АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП, позволяющий автоматизировать процедуру диагностирования и повысить контролепригодность АД.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по перечню ВАК

1. Назарычев, А.Н. Диагностика обрывов стержней обмотки ротора электродвигателя на основе анализа тока статора / А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, **Е.М. Новоселов** // Дефектоскопия. – 2011. – № 3. – С. 74–82.
2. Назарычев, А.Н. Экспериментальное исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя для контроля обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора / А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, **Е.М. Новоселов** // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 1. – С. 10–15.
3. Назарычев, А.Н. Разработка метода автокоррекции времени записи при спектральном анализе сигналов / А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 5. – С. 29–36.
4. Мочалов, С.Б. Экспериментальное доказательство оптимизации процесса спектрального анализа сигнала с применением алгоритма автокоррекции времени записи / С.Б. Мочалов, **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, А.А. Скоробогатов // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 1. – С. 40–44.
5. Назарычев, А.Н. Оценка достоверности определения скольжения асинхронных электродвигателей по гармоникам эксцентриситета ротора / А.Н. Назарычев, А.С. Страхов, **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, А.А. Скоробогатов // Вестник ИГЭУ – 2015. – № 3. – С. 44–51.
6. Назарычев, А.Н. Анализатор спектра на основе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала / А.Н. Назарычев, **Е.М. Новоселов**, А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов, Н.В. Коровкин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017 – Т. 23. – № 4. – С. 98–109.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS

7. Nazarychev, A.N. Diagnostics of Breaks of Rotor Winding Bars in Electric Motors Based on Stator Current Analysis (*Диагностика обрывов стержней обмотки ротора электродвигателя на основе анализа тока статора*) / A.N. Nazarychev, A.A. Skorobogatov, **E.M. Novoselov** // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – Vol. 47. – №. 3. – pp. 209–215.
8. Nazarychev, A. Experimental research of the asynchronous motor external magnetic field for short-circuited rotor winding broken bars monitoring (*Экспериментальное исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя для выявления обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора*) / A. Nazarychev, A. Tadzhibaev, A. Skorobogatov, **E. Novoselov** // Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA. – 2015. – pp. 299–302.

Патенты на изобретение

9. Способ определения скольжения ротора асинхронного электродвигателя: пат. № 2441249 Рос. Федерация: МПК G01R31/34 / А.Ф. Скоробогатов, Н.А. Морозов, А.Н. Назарычев, Д.С. Балин, **Е.М. Новоселов**, А.А. Скоробогатов. – № 2010126816/28, заявл. 30.06.2010, опубл. 27.01.2012, бюл. № 3.
10. Способ определения скольжения ротора асинхронного электродвигателя по току статора: пат. № 2559162 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34 / А.А. Скоробогатов, А.С. Страхов, **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, А.Н. Назарычев. – № 2014109236/28, заявл. 11.03.2014, опубл. 10.08.2015, бюл. № 22.
11. Способ определения скольжения ротора асинхронного электродвигателя: пат. № 2624986 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34. / А.С. Страхов, А.Н. Назарычев, **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, А.А. Скоробогатов. – № 2016128118, заявл. 11.07.2016, опубл. 11.07.2017, бюл. № 20.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

12. Condition of the rotor winding (CRW) (*Состояние обмотки ротора*): свидетельство о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2012613805 / А.А. Скоробогатов, **Е.М. Новоселов**. – заявка № 2012611402, заявл. 28.02.2012, зарег. 23.04.2012.
13. MFDC: свидетельство о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2013613448 / **Е.М. Новоселов**, А.А. Скоробогатов, С.Н. Литвинов. – заявка № 2013611371, заявл. 18.02.2013, зарег. 05.04.2013.
14. Slip Finder (*Определение скольжения*): свидетельство о гос. регистр. программы для ЭВМ

Прочие публикации по теме диссертации

15. Назарычев, А.Н. Разработка методов функционального контроля асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций по внешнему магнитному полю / А.Н. Назарычев, **Е.М. Новоселов**, А.А. Скоробогатов // Энергоэксперт. – 2013. – №4. – С. 68–71.

16. Жуков, П.В. Исследование влияния повреждений обмотки ротора на спектр внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя // П.В. Жуков, **Е.М. Новоселов**, А.А. Скоробогатов / Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия-2010». – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2010. – Т.3. – С.174–176.

17. Литвинов, С.Н. Анализ методов функционального контроля состояния асинхронных электродвигателей / С.Н. Литвинов, **Е.М. Новоселов**, А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов, А.Н. Назарычев // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 44. Обеспечение пожарной безопасности методами технической диагностики энергетических установок: сб. докл. – СПб: ПЭИПК, 2014. – С. 36–45.

18. **Новоселов, Е.М.** Использование внешнего магнитного поля для оценки состояния обмотки ротора / **Е.М. Новоселов**, Р.А. Шеенков, А.Н. Назарычев // Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия-2011». – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2011. – Т. 3. – С. 156–158.

19. Назарычев, А.Н. Анализ применения гармоник динамического эксцентриситета ротора для контроля скольжения электродвигателя // А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, **Е.М. Новоселов**, Н.В. Глотова / Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 260–266.

20. **Новоселов, Е.М.** Повышение надежности эксплуатации асинхронных электродвигателей на основе функциональных методов контроля / **Е.М. Новоселов** // Пожарная безопасность и надежность электроустановок и электрических систем. Сб. материалов межвузовского науч.-практ. семинара студентов, курсантов, слушателей. – Иваново, 2012. – С. 66–70.

21. **Новоселов, Е.М.** Разработка функциональных методов контроля асинхронных электродвигателей / **Е.М. Новоселов**, А.Н. Назарычев // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 39: Пожарная безопасность и надежность электроустановок и электрических систем: сб. докл. – СПб: ПЭИПК., 2012. – С. 66–70.

22. Шиков, А.В. Обзор современных функциональных методов контроля состояния асинхронных электродвигателей / А.В. Шиков, **Е.М. Новоселов**, А.А. Скоробогатов // Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия-2012». – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2012. – Т. 3. – С. 3–7.

23. Ильичев, А.Ю. Разработка метода измерения скольжения по гармоникам внешнего магнитного поля / А.Ю. Ильичев, **Е.М. Новоселов**, А.А. Скоробогатов // Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия-2012». – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2012. – Т.3. – С.17–21.

24. Назарычев, А.Н. Диагностика короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя на основе экспериментального исследования внешнего магнитного поля / А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, **Е.М. Новоселов** // Энергоэксперт. – 2014. – № 6 (47) – С. 52–55.

25. **Новоселов, Е.М.** Разработка метода определения частот гармонических составляющих сигнала на основе автокоррекции времени записи сигнала // **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов / Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2013. – Т. 1. – С. 232–235.

26. **Новоселов, Е.М.** Анализ практической эффективности применения алгоритма автокоррекции времени записи сигнала при определении скольжения электродвигателя // **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов / Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2013. – Т. 1. – С. 235–237.

27. Назарычев, А.Н. Обеспечение эксплуатационной надежности асинхронных электродвигателей с помощью методов функциональной диагностики // А.Н. Назарычев, **Е.М. Новоселов**, А.А. Скоробогатов / Материалы международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики»: Вып. 64. Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы / Отв. Ред. Н.И. Воропай. – ИСЭМ СО РАН, 2014. – С. 546–552.

28. Страхов, А.С. Анализ возможности применения программного комплекса Ansys в целях контроля состояния обмотки ротора асинхронного двигателя / А.С. Страхов, **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, А.А. Скоробогатов // Радиоэлектроника. Электротехника и энергетика: тез. докл. XXIII Международной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (2-3 марта 2017г., Москва). В 3-х т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 29.

29. Страхов, А.С. Критерий правильного определения скольжения асинхронного электродвигателя по внешнему магнитному полю / А.С. Страхов, **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, А.А. Скоробогатов // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2015. – Т. 1. – С. 254–257.

30. Назарычев, А.Н. Экспериментальное исследование радиальной составляющей внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей / А.Н. Назарычев, А.С. Страхов, **Е.М. Новоселов**, А.А. Скоробогатов // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 48. Контроль технического состояния оборудования объектов электроэнергетики: сб. докл. – СПб: ПЭИПК, 2017. – С. 144–150.

31. Назарычев, А.Н. Обнаружение повреждения обмотки ротора асинхронного электродвигателя с помощью моделирования методом конечных элементов / А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, **Е.М. Новоселов**, А.С. Страхов, Д.А. Полкошников // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 48. Контроль технического состояния оборудования объектов электроэнергетики: сб. докл. – СПб: ПЭИПК, 2017. – С. 151–161.

32. Страхов, А.С. Разработка анализатора спектра для исследования сигналов от электродвигателей / А.С. Страхов, **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, Н.Н. Коновалов, А.А. Скоробогатов // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XIX Бенардосовские чтения). – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2017. – Т. 1. – С. 126–130.

33. Страхов, А.С. Использование средней мощности внешнего магнитного поля в качестве диагностического параметра повреждения обмотки ротора электродвигателя / А.С. Страхов, **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, Н.Н. Коновалов, А.А. Скоробогатов // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XIX Бенардосовские чтения). – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2017. – Т. 1. – С. 103–107.

34. Страхов, А.С. Разработка анализатора спектра для функционального контроля состояния асинхронных двигателей / А.С. Страхов, **Е.М. Новоселов**, Н.Н. Коновалов, А.А. Скоробогатов // Двенадцатая международная науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017»: мат. конф.. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2017. – Т. 3. – С. 265–267.

35. **Новоселов, Е.М.** К вопросу существования внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей / **Е.М. Новоселов**, С.Н. Литвинов, А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов // Двенадцатая международная науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017»: мат. конф.. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2017. – Т. 3. – С. 267–269.

Новоселов Евгений Михайлович

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО ВНЕШНЕМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 27.03.2018 г. Формат 60х84^{1/16}. Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ №19
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГУУ