

На правах рукописи



СТРАХОВ Александр Станиславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК РОТОРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ**

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Скоробогатов Андрей Александрович**.

Официальные оппоненты:

Кужиков Станислав Лукьянович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», профессор кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы»;

Вуколов Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника».

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-технический центр Россети Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (АО «НТЦ Россети ФСК ЕЭС»), г. Москва.

Защита диссертации состоится « 25 » июня 2022 г. в 9-00 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 и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен: http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Strahov_A.S..pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01



Ледуховский
Григорий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время приводом большей части механизмов собственных нужд электрических станций являются асинхронные двигатели. Одной из причин их отказов являются обрывы стержней короткозамкнутых обмоток роторов, составляющие в среднем 5-10% от общего числа отказов. На электростанциях многие асинхронные двигатели работают с тяжелыми условиями пуска (длительностью не менее 3 с). К ним относятся высоковольтные двигатели, которые являются приводами тягодутьевых механизмов, а также механизмов топливоприготовления на пылеугольных станциях. Количество отказов, связанное с обрывом стержней, двигателей, работающих с тяжелыми условиями пуска, может достигать 30 % от общего числа отказов.

Обрывы стержней обмотки ротора высоковольтного асинхронного двигателя собственных нужд могут привести к серьезному ущербу для электростанции, что сказывается на безотказности и экономичности ее работы. Во-первых, при работе с оборванными стержнями возрастают магнитные и электрические потери двигателя. Поэтому длительная эксплуатация высоковольтных асинхронных двигателей с оборванными стержнями может привести к значительному экономическому ущербу, так как в настоящее время электростанции сами оплачивают расходы электроэнергии и мощности на собственные нужды. Во-вторых, при работе оборванные стержни составной обмотки ротора могут отогнуться и повредить изоляцию лобовой части обмотки статора или сталь статора. Это приводит к необходимости дорогостоящего ремонта самого двигателя, стоимость которого может превышать 1 млн. руб. В ряде случаев может потребоваться и его замена. Наконец, повреждение обмотки статора отогнутым стержнем приводит к незапланированному останову ответственных механизмов (дымососов и дутьевых вентиляторов), а, следовательно, к снижению мощности котла или даже к полному его отключению. Величина годового ущерба по этой причине может составлять несколько сотен тысяч рублей. Поэтому проблема своевременного выявления обрывов стержней обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей представляет существенный интерес для персонала электрических станций.

В настоящее время существует большое количество способов, которые с достаточной точностью определяют наличие оборванных стержней асинхронных двигателей в установившихся режимах на базе спектрального анализа сигналов тока статора, внешнего и внутреннего магнитного полей, сигналов вибрации и т.д. При этом анализ условий работы высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми длительными пусками, применяемых в системе собственных нужд электрических станций, показывает, что наиболее целесообразно проводить контроль наличия оборванных стержней в режиме пуска, а не в установившемся режиме.

В ряде источников уделяется внимание методам контроля технического состояния обмоток роторов в пусковых режимах, однако они в настоящее время не нашли практического применения или имеют ряд существенных недостатков. Кроме того, в существующих работах не уделяется внимание исследованию пускового сигнала внешнего магнитного поля, которое является одним из самых перспективных диагностических сигналов для контроля технического состояния узлов асинхронных двигателей. Поэтому разработка методов контроля технического состояния обмоток роторов

высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми длительными пусками, применяемых в системе собственных нужд электростанций, в режиме пуска является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в область контроля технического состояния обмоток роторов при эксплуатации асинхронных двигателей внесли многие исследователи в Российской Федерации и за рубежом: Вейнреб К., Сивокобыленко В.Ф., Волохов С.А., Добродеев П.Н., Савельев В.А., Назарычев А.Н., Рассказчиков А.В., Новоселов Е.М., Брюханов Г.А., Князев С.А., Сидельников Л.Г., Андреева О.А., Tavner P., Thomson W.T., Kliman G. B., Elkasabgy N.M., Fireteanu V., Culbert I., Donnell P. O., Romary R., Guedidi S., Kokko V., Negrea M.N. и др.

Метод выявления оборванных стержней на основе спектрального анализа тока статора в настоящее время является одним из самых распространенных и перспективных. В англоязычной литературе этот метод называется “Motor Current Signature Analysis” (сокращенно MCSA). В настоящее время этот метод подробно прописан в двух стандартах: ГОСТ ISO 20958-2015 и ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015. Также большое количество авторов занимается разработкой и совершенствованием подобных методов, например, Вейнреб К., Сафин Н.Р., Бурцев А.Г., Никиян Н.Г., Шевчук В.А., Thomson W. T., Gilmore R. J., Culbert I., Panadero R.P., Guedidi S., Fireteanu V., Tavner P., Lane M., Turk N., Thakur A., Kalaskar C. S. и др.

Возможность контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей по внешнему магнитному полю впервые в своих работах показали Kliman G. B., Elkasabgy N.M. и др. в 80-х годах. Однако в последующие годы авторами как российских, так и зарубежных работ исследованию внешнего магнитного поля асинхронного двигателя уделяется очень малое внимание. В России одними из первых его исследовали Волохов С.А. и Добродеев П.Н. В настоящее время интерес к исследованию внешнего магнитного поля вновь возрастает, что во многом связано с совершенствованием программных комплексов, позволяющих производить полные расчеты асинхронных двигателей (например, Ansys). В качестве авторов, занимающихся исследованием внешнего магнитного поля двигателей в установившемся режиме работы с применением подобных математических моделей, можно выделить Лукьянова А.В., Новоселова Е.М., Fireteanu V., Romary R., Pusca R. и др.

Исследованию же возможности контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей при пуске не уделяется должного внимания. Одними из первых большой вклад в развитие таких методов контроля двигателя по току статора внесли Брюханов Г.А. и Князев С.А. Рядом авторов были произведены исследования изменения механических характеристик двигателей при наличии неисправностей на математических моделях (Fiser R., Ferkolj S., Mini V. P, Ushakumari S.). Однако в настоящее время интерес к исследованию пусковых режимов вновь возрос из-за совершенствования методов обработки сигналов. В связи с этим ряд авторов занимается исследованием спектров сигналов пускового тока статора (Сарваров А.С., Купцов В.В., Gritli Y., Pineda-Sanchez M., Puche-Panadero R. и др.), однако большинство подобных работ находятся в разработке или имеют ряд существенных недостатков.

Целью работы является разработка методов контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми условиями

пуска, применяемых в системе собственных нужд электрических станций, по внешнему магнитному полю и току статора в пусковом режиме.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Статистический анализ повреждений обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей механизмов тягодутьевого тракта и топливоприготовления электростанций, а также статистический анализ неплановых простоев блоков, вызванных отказом указанных выше двигателей.

2. Анализ существующих методов контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей в процессе эксплуатации и оценка возможности их применения для высоковольтных двигателей собственных нужд электростанций;

3. Разработка алгоритма для анализа частотно-временных спектров сигналов высоковольтных асинхронных двигателей электростанций при пуске на базе оконного преобразования Фурье и его апробация на тестовом сигнале, близком к пусковым сигналам высоковольтных асинхронных двигателей с длительным пуском;

4. Определение присутствующих во внешнем магнитном поле и токе статора при пуске диагностических признаков и параметров повреждения обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций за счет разработки в программном комплексе Ansys на основе метода конечных элементов моделей данных двигателей и исследования на основе разработанных моделей влияния обрывов стержней обмоток роторов на частотно-временные спектры сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля;

5. Разработка методики контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми условиями пуска на основе спектрального анализа пусковых сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и проверка работоспособности предлагаемой методики на экспериментальном стенде на низковольтном асинхронном двигателе при подаче пониженного напряжения для искусственного затягивания пуска и в ходе натурных экспериментов на реальных высоковольтных асинхронных двигателях механизмов тягодутьевого тракта и топливоприготовления системы собственных нужд электростанций.

Объектом исследования являются высоковольтные асинхронные двигатели механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта системы собственных нужд электрических станций.

Предметом исследования является контроль технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта системы собственных нужд электростанции в режиме пуска по внешнему магнитному полю и току статора.

Методология и методы исследований. Поставленные задачи решались с использованием методов спектрального анализа нестационарных сигналов, теории магнитного поля, обработки экспериментальных данных, методов математического и физического моделирования. Основные результаты получены на основе вычислительных экспериментов с использованием возможностей математических пакетов Matlab и Ansys, физических экспериментов на низковольтном электродвигателе с исправной и поврежденной обмоток роторов, а также при проведении натурных экспериментов на

реальных высоковольтных асинхронных двигателях системы собственных нужд электростанций.

Научную новизну работы представляют:

1. Новые диагностические признаки наличия оборванных стержней короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми длительными пусками, применяемых в системе топливоприготовления и тягодутьевого тракта электростанций, заключающиеся в резком возрастании амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора в спектрах тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля в пусковом режиме;

2. Разработанный алгоритм для анализа частотно-временных спектров высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций с тяжелыми длительными пусками в пусковом режиме работы на основе оконного преобразования Фурье с обоснованием условий и требований для возможности его применения;

3. Метод контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций с тяжелыми длительными пусками, основанный на оценке амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора первых порядков на верхних и нижних боковых частотах в сигнале радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля в пусковом режиме;

4. Метод контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций с тяжелыми длительными пусками, основанный на оценке амплитуды гармоники от фиктивной обмотки ротора на нижней боковой частоте порядка, совпадающего с числом пар полюсов, в сигнале тока статора при пуске.

Теоретическая значимость работы:

1. Показано, что сигналы радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора в режиме пуска несут диагностическую информацию, которая может быть использована в целях контроля технического состояния высоковольтных асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций с тяжелыми длительными пусками;

2. Исследовано влияние динамического эксцентриситета и обрывов стержней обмоток роторов на гармонический состав радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора высоковольтных асинхронных двигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта при пуске;

3. Доказана актуальность проводимых исследований путем оценки экономического ущерба электрической станции, который возникает вследствие обрывов стержней обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта.

Практическая значимость результатов:

1. Повышение достоверности контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта электростанций по радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и току статора при пуске за счет: исключения влияния динамического эксцентриситета и поведения нагрузки на результаты контроля; определения

пороговых значений диагностических параметров на основе модельного анализа; повышения чувствительности к обрыву одного стержня обмотки ротора;

2. Уменьшение числа незапланированных остановов или снижений мощности электростанций за счет раннего выявления обрывов стержней обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей системы собственных нужд с тяжелыми длительными пусками;

3. Снижение экономических затрат электростанций на ремонты высоковольтных асинхронных двигателей системы собственных нужд с тяжелыми длительными пусками за счет раннего выявления обрывов стержней их обмоток роторов.

Работа 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 уменьшить число незапланированных остановов или снижений мощности электростанций, снизить потребляемую мощность и электрическую энергию собственными нуждами электрических станций, а также уменьшить затраты на ремонты за счет раннего выявления обрывов стержней обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми длительными пусками.

В части области исследования:

Пункту 5: «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок» соответствуют: методы контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми длительными пусками, применяемых в системе собственных нужд электростанций при пуске по радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и току статора, диагностические признаки наличия оборванных стержней короткозамкнутых обмоток роторов данного вида асинхронных двигателей, методика контроля технического состояния короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми длительными пусками по току статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля.

Пункту 13: «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» соответствуют: алгоритм проведения обработки сигналов в пусковом режиме в программном комплексе Matlab для анализа частотно-временных спектров высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми длительными пусками с обоснованием условий и требований для возможности его применения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Диагностический признак обрывов стержней короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми длительными пусками, заключающийся в возрастании амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора первых порядков в сигнале радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля в пусковом режиме;

2. Диагностический признак обрывов стержней короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми длительными пусками, заключающийся в возрастании амплитуды гармоники от фиктивной обмотки ротора порядка, совпадающего с числом пар полюсов, на нижней боковой частоте в сигнале тока статора в пусковом режиме;

3. Методы контроля технического состояния короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми длительными пусками, основанные на анализе частотно-временных спектров радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора в пусковом режиме;

4. Методика проведения контроля технического состояния короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми длительными пусками, основанные на спектральном анализе радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора при пуске и определении пороговых значений на основе модельного анализа;

5. Алгоритм в программном комплексе Matlab, предназначенный для обработки пусковых сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля с обоснованием условий его применимости;

6. Результаты сравнения чувствительностей разработанных и существующих методов при обрыве одного стержня обмотки ротора на математической модели высоковольтного асинхронного двигателя собственных нужд.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректностью применения математических методов, апробированного специализированного программного обеспечения; совпадением теоретических результатов, результатов, полученных на математических моделях и результатов, полученных на экспериментальном стенде и реальных высоковольтных асинхронных двигателях собственных нужд электростанций с тяжелыми длительными пусками. Полученные результаты не противоречат основным положениям технических наук и согласуются с опубликованными результатами исследований, проведенных другими авторами.

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Энергия» (г. Иваново, 2016 – 2021 гг.); на I региональной научно-технической конференции «Социум. Наука. Образование» (г. Иваново, 2016 г.); на XX и XXI международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (г. Иваново, 2019, 2021 гг.).

Внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертационной работы внедрены на ТЭЦ-2 г. Иваново, а также в учебный процесс и применяются при проведении лабораторных работ на кафедре электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования в Ивановском государственном энергетическом университете имени В.И. Ленина.

Личное участие автора в получении результатов работы заключается в следующем: в постановке задач исследования; в анализе последствий повреждения обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд для электрической станции, включая их экономическую оценку; в анализе существующих ме-

тодов контроля технического состояния короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных электродвигателей; в разработке алгоритма для анализа пусковых сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля асинхронных двигателей с длительными пусками на основе оконного преобразования Фурье; в описании гармонического состава сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля в процессе пуска высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электрических станций; в выявлении диагностических признаков и параметров обрывов стержней обмотки ротора в спектрах пусковых сигналов тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля; в проведении измерений, сборе, обработке и анализе экспериментальных данных на математических моделях, экспериментальном стенде и в ходе натурального эксперимента; в разработке методов и методики проведения контроля технического состояния обмотки ротора асинхронного электродвигателя по радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и току статора при пуске; в подготовке публикаций по результатам исследований.

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 22 работы, из них 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых в международной базе Scopus, и 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 150 наименований и 4 приложений. Общий объем работы составляет 223 страницы, в тексте содержится 124 рисунка и 42 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены особенности работы высоковольтных асинхронных двигателей (АД) собственных нужд (СН) электрических станций с тяжелыми условиями пуска, произведен анализ повреждаемости их обмоток роторов (ОР) и последствий отказов по причине обрывов стержней ОР, а также рассмотрены достоинства и недостатки существующих методов их выявления.

Проведенный анализ данных, представленных в российских и зарубежных литературных источниках, показывает, что, доля отказов высоковольтных АД СН электрических станций с тяжелыми условиями пуска, связанных с повреждениями короткозамкнутой ОР, может достигать 20-30% из-за особенностей их режима работы. При этом отказы из-за обрывов стержней ОР может привести к существенному экономическому ущербу вследствие необходимости дорогостоящего ремонта или замены АД; потери вырабатываемой мощности и энергии электростанцией при отказах двигателей ответственных механизмов (дымососов и дутьевых вентиляторов); увеличения потребляемой АД мощности и электроэнергии при работе с оборванными стержнями. Значимость последствий отказов подтверждена путем оценки экономического ущерба для электростанций, произведенного на основе статистических данных с двух ГРЭС, работающих на угле, и математического моделирования высоковольтного АД СН (результаты представлены в диссертационной работе).

Произведенный анализ существующих методов контроля показал, что в российских и зарубежных публикациях основное внимание уделяется методам выявления оборванных стержней на основе спектрального анализа в установившемся режиме работы. При этом данные методы малоэффективны для контроля технического состояния ОР высоковольтных АД СН электростанций с тяжелыми условиями пуска, из-за особенностей типов и режимов работы. Контроль в пусковом режиме работы имеет ряд существенных преимуществ, а именно: 1) возможность оценивать техническое состояние АД, работающих в режимах с изменяющейся нагрузкой (например, двигателей дробилок); 2) возможность производить контроль технического состояния ОР АД, работающих с нагрузкой значительно меньшей номинальной; 3) возможность выявления обрывов стержней пусковой обмотки для АД с двумя ОР; 4) высокая чувствительность к обрыву одного стержня, что особенно актуально для высоковольтных АД, так как многие из них имеют большое количество стержней в ОР (более 80).

Поэтому было принято решение о необходимости разработки методов контроля на основе спектрального анализа сигналов радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля (далее называемой ВМП) и тока статора при пуске высоковольтных АД СН. Также в первой главе формулируются основные задачи исследования, и обосновывается выбор методов исследований для решения поставленных задач.

Вторая глава посвящена разработке алгоритма для анализа пусковых сигналов высоковольтных АД СН электростанций в целях определения повреждения ОР. Первоначально произведен анализ изменения гармонического состава сигналов ВМП и тока статора при пуске. Известно, что при наличии обрывов стержней в сигналах появляются гармонически от фиктивной обмотки ротора (ФОР). Поскольку в процессе пуска существенно изменяется величина скольжения АД, то общее выражение для определения частот гармоник от ФОР в любой момент времени t может быть записано в виде:

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

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

Известно, что в спектре сигнала ВМП должны отчетливо проявляться только гармоники от ФОР нескольких первых порядков (обычно первых пяти порядков). В спектре тока статора для контроля может быть использована только гармоническая составляющая порядка, совпадающего с числом пар полюсов, на нижней боковой частоте ($v = p$, знак « \leftarrow » перед $s(t)$ в выражении (1)). Значение частоты этой гармоники в процессе пуска можно оценить по выражению:

$$f_{\text{ФОР}}^{(p-)}(t) = \left| f_c \cdot (1 - 2 \cdot s(t)) \right|. \quad (2)$$

В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены расчетные значения частот гармоник от ФОР, которые должны проявляться в спектрах ВМП и тока статора АД соответственно, при изменении скольжения. Видно, что при возникновении обрывов стержней в спектре будут проявляться две группы гармонических составляющих. Гармоники на верхних боковых частотах (ФОР $v+$) изменяются при пуске линейно, начиная с частоты 50 Гц. Особенностью нижних боковых частот (ФОР $v-$) является отражение от оси при достижении некоторого скольжения (в дальнейшем будем называть эти гармоники отраженными).

В ходе анализа влияния эксплуатационных факторов на возможность проведения контроля было выявлено, что только гармоники динамического эксцентриситета (ДЭ) могут привести к изменению амплитуд гармоник от ФОР в сигнале ВМП, так как частоты этих гармоник совпадают. Поэтому сделано заключение о необходимости исследования влияния ДЭ на амплитуды гармоник от ФОР в сигнале ВМП.

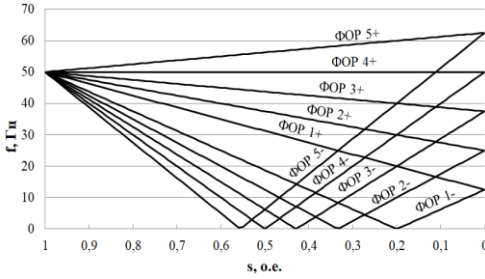


Рис. 1. Изменение частот гармоник от ФОР с высокими амплитудами в сигнале ВМП для АД с 4 парами полюсов в процессе пуска

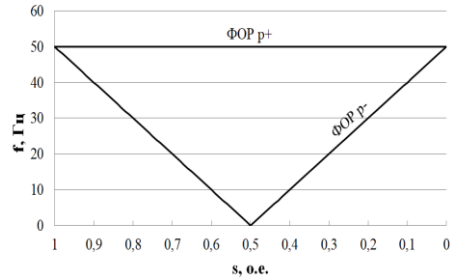


Рис. 2. Изменение частот гармоник от ФОР с высокими амплитудами в сигнале тока статора АД в процессе пуска

Для возможности проведения анализа спектра был разработан алгоритм в программном комплексе Matlab. Для анализа используется метод оконного преобразования Фурье (ОПФ), позволяющий получать частотно-временной спектр (ЧВС) анализируемого сигнала. В ходе проведенных исследований были выведены следующие соотношения, показывающие необходимые значения минимального времени пуска АД (выражения (2) и (4)) для возможности проведения контроля, и продолжительности интервалов, на которые разделяется пусковой сигнал (выражения (3) и (5)), где выражения (2) и (3) справедливы для сигнала ВМП, а (4) и (5) – для тока статора:

$$T_{n \min} > \frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{\max})^2 \cdot (p + v_{\max} + 1)}{5 \cdot f_c \cdot p}; \quad (2)$$

$$\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{\max})}{2.25 \cdot f_c} < \Delta T < \frac{2.25 \cdot p}{(p + v_{\max}) \cdot (p + v_{\max} + 1)} \cdot T_n; \quad (3)$$

$$T_{n \min} > \frac{9 \cdot \Delta F}{f_c}; \quad (4)$$

$$\frac{3 \cdot \Delta F}{f_c} < \Delta T < \frac{T_n}{3}, \quad (5)$$

где ΔF – относительная ширина главного лепестка используемого окна по сравнению с шириной главного лепестка прямоугольного окна ($\Delta F = 5$ для окна Флэттоп, $\Delta F = 4$ для окна Блэкмана-Наталла и т.д.); v_{\max} – порядок предельно учитываемой гармоники; ΔT – продолжительность интервалов, на которые разбивается пусковой сигнал, с; T_n – время пуска АД, с; $T_{n \min}$ – минимальное время пуска АД, необходимое для возможности проведения контроля, с.

Подстановка необходимых исходных данных в выражения (2) и (4) показывает, что контроль технического состояния ОР при пуске по ВМП для сохранения возможности выявления хотя бы гармоник от ФОР первых 3 порядков может быть проведен лишь для АД, длительность пуска которых составляет 3-5 сек в зависимости от числа пар полюсов АД, а при контроле по пусковому току статора – не менее 0,9 сек независимо от числа пар полюсов. Таким образом, метод может применяться для высоковольтных АД СН с тяжелыми условиями пуска.

Последовательность операций алгоритма: 1) ввод исходных данных, а именно параметров АД, момента начала и окончания пуска, частоты дискретизации АЦП, применяемой оконной функции и желаемого порядка предельно учитываемой гармоники; 2) проверка достаточности длительности пуска АД по выражениям (2) или (4). В случае невыполнения этих условий сообщается о невозможном проведении контроля для данного типа АД; 3) определение необходимой продолжительности интервалов, на которые разделяется сигнал, из соотношений (3) или (5); 4) построение ЧВС сигнала с помощью ОПФ; 5) определение в спектре амплитуд гармоник от ФОР первых порядков (до порядка предельно учитываемой гармоники включительно) в сигнале ВМП и гармоники от ФОР р- в сигнале тока статора с учетом длительности интервалов, на которые разделяется пусковой сигнал, и типа оконной функции.

Разработанный алгоритм для обработки пусковых сигналов высоковольтных АД СН электростанций был опробован на искусственном сигнале, созданным в программном комплексе Matlab, близком к сигналу ВМП реального АД с 3 парами полюсов с фиксированными амплитудами гармоник. Сравнение полученных с помощью алгоритма и реальных амплитуд гармоник от ФОР показало, что погрешность определения амплитуд не превышает 10%.

В третьей главе производится исследование влияния обрыва стержня ОР и ДЭ на ЧВС ВМП и тока статора на математических моделях высоковольтных АД СН с тяжелыми условиями пуска двух типов – ДАМСО-15-12-8 и ДАЗО2-17-44-8/10У1, применяемых на электрических станциях в качестве приводов механизмов тягодутьевого тракта. Длительность пуска указанных агрегатов СН составляет более 10 секунд, что позволяет производить их обработку с помощью разработанного алгоритма. Для моделирования использован программный комплекс Ansys, в котором возможно производить как расчет рабочих характеристик машин, так и расчет электромагнитного поля в зазоре и на корпусе АД на основе метода конечных элементов. Корректность разработанных моделей подтверждена путем сравнения полученных параметров АД с данными из технической документации, предоставленной электростанциями. Для каждого АД были выполнены модели в 3 состояниях:

- 1) при исправном состоянии обмотки ротора без ДЭ;
- 2) при исправном состоянии обмотки ротора при наличии ДЭ, составляющего 20% от величины воздушного зазора АД;
- 3) при наличии 1 оборванного стержня ОР без ДЭ.

Спектры ВМП и тока статора на примере модели АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 представлены на рис. 3-8. Справа на цветовой шкале указаны амплитуды гармоник в спектре соответствующего цвета в мкТл. Также были определены и расчетные значения частот гармоник от ФОР в течение пуска АД для сигналов ВМП и тока статора.

Показано, что значения частот искомым гармоник в спектре с достаточной точностью соответствуют их расчетным значениям во всех рассмотренных случаях.

Анализ полученных спектров показал, что при наличии оборванного стержня ОР в ЧВС сигналов ВМП и тока статора амплитуды характерных для данного вида сигнала гармоник от ФОР возрастают на несколько порядков по сравнению с исправным АД. При наличии ДЭ амплитуды характерных гармоник в сигнале ВМП высоки лишь в установившемся режиме работы, в то время как в пусковом режиме их амплитуды незначительны. Аналогичные результаты были получены и на модели двигателя ДАМСО-15-12-8.

На математической модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 было показано, что чувствительность разработанных методов контроля технического состояния ОР значительно выше, чем у существующих, что подтверждает их высокую эффективность при выявлении обрывов стержней короткозамкнутой ОР высоковольтных АД с длительным пуском. Подтвержден вывод о низкой эффективности существующих методов контроля в установившемся режиме работы при низкой загрузке АД.

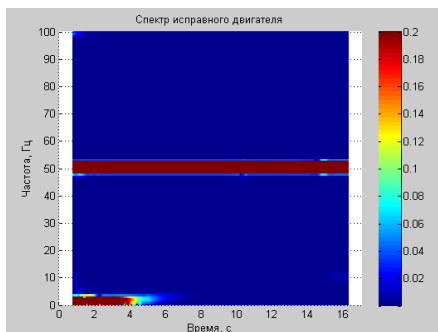


Рис. 3. ЧВС сигнала ВМП на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с исправной ОР

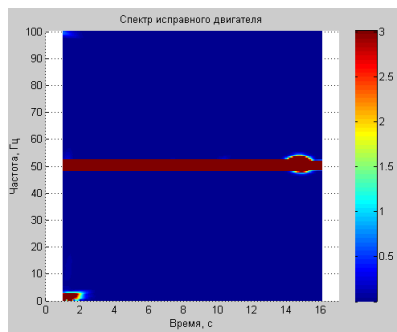


Рис. 4. ЧВС сигнала тока статора на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с исправной ОР

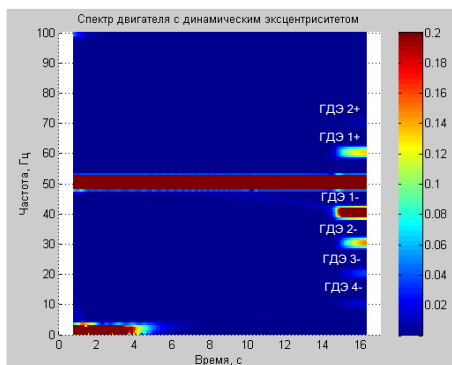


Рис. 5. ЧВС сигнала ВМП на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с ДЭ (20% от величины воздушного зазора)

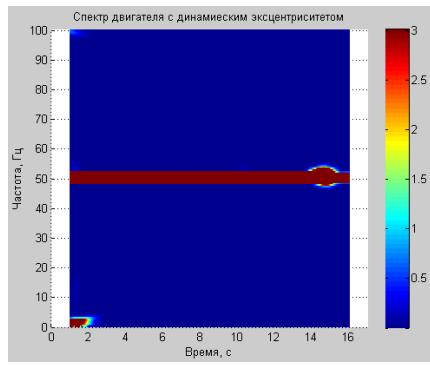


Рис. 6. ЧВС сигнала тока статора на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с ДЭ (20% от величины воздушного зазора)

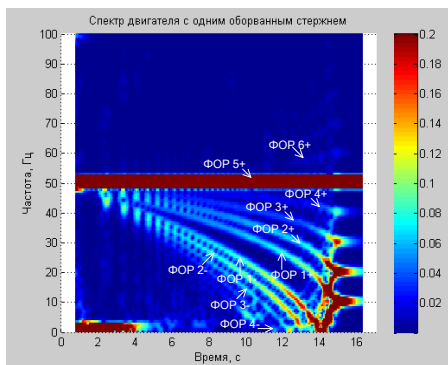


Рис. 7. ЧВС сигнала ВМП на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с одним оборванным стержнем ОР

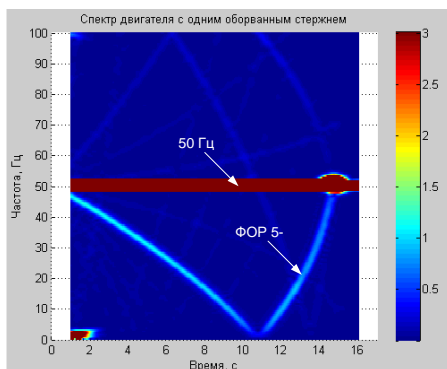


Рис. 8. ЧВС сигнала тока статора на математической модели ДАЗО-17-44-8/10У1 с одним оборванным стержнем ОР

Также в третьей главе произведены исследования на модели низковольтного АД малой мощности типа АИР71А6 для проверки возможности проведения экспериментов на АД данного типа. Как было указано ранее, разработанные методы не подходят для контроля технического состояния ОР АД такого типа, так как время их пуска даже с подключенным механизмом составляет менее секунды. Поэтому проанализирована возможность искусственного затягивания времени пуска путем подачи пониженного напряжения. В ходе исследования показано, что уменьшение питающего напряжения до 50 В и ниже позволяет достигнуть времени пуска, составляющего 4 секунды и более. Анализ полученных спектров тока статора и ВМП позволил сделать вывод о том, что, как и для высоковольтных АД СН, при наличии оборванного стержня ОР амплитуды характерных гармоник от ФОР значительно возрастают. Однако в этом случае гармоники ДЭ первых порядков имеют также высокие амплитуды и в процессе пуска, поэтому при проведении исследований на экспериментальном стенде необходимо учитывать возможность возрастания амплитуд гармоник от ФОР на верхних боковых частотах под влиянием ДЭ без обрыва стержней ОР.

В четвертой главе описаны проведенные эксперименты на реальных низковольтном и высоковольтных АД. Первоначально были проведены исследования на экспериментальном стенде. В качестве объекта исследования выступает АД типа АИР 71А6. Для регистрации сигнала ВМП использован наружный индуктивный датчик (НИД). Для регистрации тока статора использован измерительный токовый шунт типа 75ШИП1-5-0.5. В качестве АЦП выступала звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2. Обработка зарегистрированного сигнала осуществлялась на персональном компьютере в программном комплексе Matlab с помощью разработанного алгоритма на основе ОПФ. Пуск АД осуществлялся при установке двух роторов, один из которых находился в исправном состоянии, а во втором высверлен один из стержней ОР. Регистрация осуществлялась при подаче на двигатель пониженного напряжения с помощью регулировочного трехфазного автотрансформатора для увеличения времени пуска данного двигателя. Эксперименты были проведены при подаче напряжения

около 30 В, поскольку время пуска при таком напряжении максимально. Полученные ЧВС для ротора с исправной обмоткой и с одним оборванным стержнем представлены на рис. 9-12.

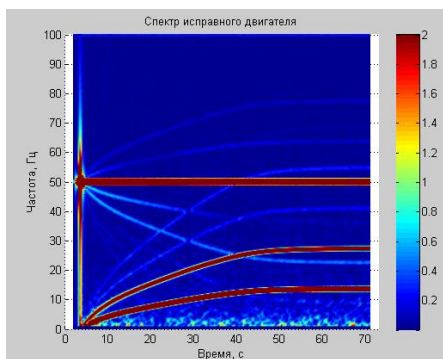


Рис. 9. ЧВС ВМП АД с исправной ОР на экспериментальном стенде, зарегистрированной с помощью НИД

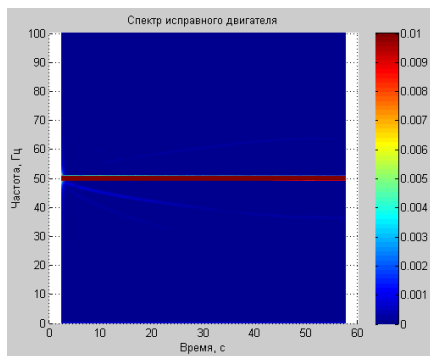


Рис. 10. ЧВС тока статора АД с исправной ОР на экспериментальном стенде

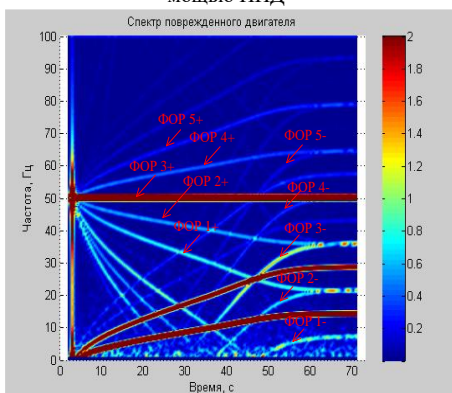


Рис. 11. ЧВС ВМП АД с одним оборванным стержнем на экспериментальном стенде, зарегистрированной с помощью НИД

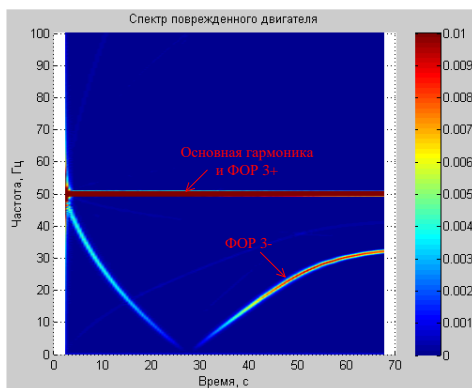


Рис. 12. ЧВС тока статора АД с одним оборванным стержнем на экспериментальном стенде

Анализ полученных спектров позволяет сделать следующие выводы. Видно, что при наличии оборванного стержня даже на пониженном напряжении амплитуда гармоники от ФОР p , характеризующей наличие обрыва стержня в сигнале тока статора, значительно увеличилась, что подтверждает эффективность разработанного метода по току статора. В спектре ВМП при исправной ОР проявляется несколько гармоник с высокими амплитудами, однако их появление может быть обусловлено ДЭ и влиянием подключенного механизма. При этом лишь при обрыве стержня отчетливо проявляются отраженные гармоники от ФОР первых порядков. Таким образом, исследо-

вания на экспериментальном стенде подтверждают возможность использования разработанных методов для контроля технического состояния ОР высоковольтных АД системы СН с тяжелыми условиями пуска.

По результатам проведенных исследований была создана методика проведения контроля на основе модельного анализа и разработанного алгоритма обработки сигналов тока статора и ВМП. Блок-схема методики представлена на рис. 13.

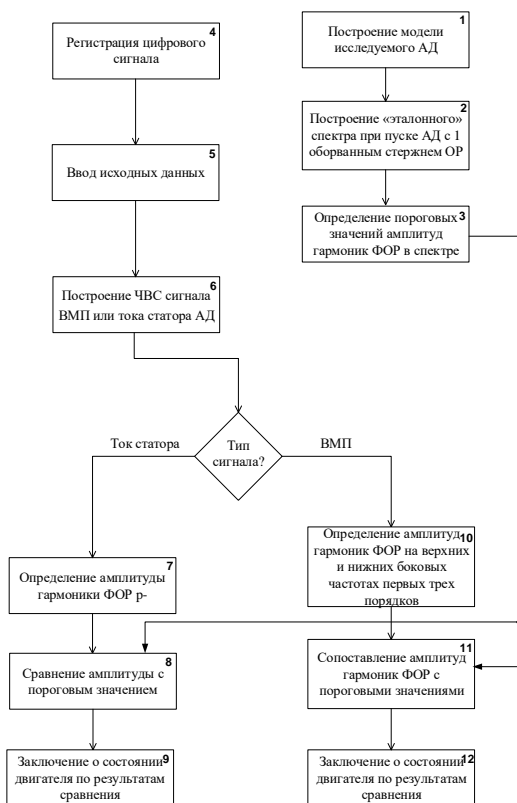


Рис. 13. Блок-схема разработанной методики контроля технического состояния ОР высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска СН по току статора и ВМП

В этом алгоритме в качестве модели выступает модель высоковольтного АД СН с одним оборванным стержнем, а под «эталонным» спектром – спектр на модели АД с одним оборванным стержнем. Пороговые значения амплитуд гармоник от ФОР определяются как 50% от значений амплитуд в «эталонном» спектре (значение 50% принято на основании сопоставления спектров ВМП и тока статора на реальном АД на экспериментальном стенде и его математической модели). Заключение о наличии повреждения ОР высоковольтного АД СН электростанции делается на основании сопоставления амплитуды характерных гармоник от ФОР с их пороговыми значениями.

Для проверки работоспособности разработанной методики были зарегистрированы пусковые сигналы на различных высоковольтных АД на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 г. Иваново, обладающих достаточно длительными пусками. Целью проведения натурного экспери-

мента является доказательство того, что во всех рассмотренных спектрах возможно выявление гармоник от ФОР, характеризующих наличие неисправности. Для всех АД, на которых были зарегистрированы сигналы тока статора и ВМП, удалось обнаружить указанные гармоники и оценить их амплитуды, что подтверждает возможность контроля технического состояния их ОР с использованием разработанных методов и методики контроля при пуске. Сопоставление амплитуд гармоник от ФОР с

пороговыми значениями показало, что у рассматриваемых высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска амплитуды гармоник от ФОР были в несколько раз ниже пороговых значений, что подтверждает отсутствие обрывов стержней их ОР.

В заключении изложены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано влияние отказов высоковольтных асинхронных двигателей, являющихся приводами механизмов собственных нужд, на работу как самой системы собственных нужд, так и электростанции в целом. Показано, что внезапные отказы высоковольтных асинхронных двигателей ряда механизмов собственных нужд могут послужить причиной существенного экономического ущерба, который может достигать нескольких сотен тысяч рублей в год. Выделены три основные составляющие экономического ущерба, связанные с потерями электрической энергии и мощности в системе собственных нужд электростанций при работе асинхронных двигателей с оборванными стержнями обмоток роторов; с полным или частичным снижением вырабатываемой мощности и энергии блоком электростанции; с необходимостью дорогостоящего ремонта или замены высоковольтных асинхронных двигателей при их отказах;

2. Отмечены основные особенности работы высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд по сравнению с двигателями, применяемыми в других областях. Показано, что разработанные в настоящее время методы контроля технического состояния обмоток роторов малоэффективны для высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с тяжелыми условиями пуска. При этом перспективными и малоизученными направлениями, с помощью которых удобно производить контроль таких двигателей, является выявление обрывов стержней обмоток роторов с помощью методов спектрального анализа радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля и тока статора при его пуске;

3. Исследовано изменение частот гармоник от фиктивной обмотки ротора в сигналах тока статора и радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля в процессе пуска асинхронных двигателей. Разработан алгоритм на базе оконного преобразования Фурье, позволяющий производить обработку нестационарных сигналов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд с длительным пуском. Определены необходимые параметры применяемых оконных функций и самого сигнала. На искусственно созданном сигнале произведена проверка корректности разработанного алгоритма. Показано, что погрешность определения амплитуд гармоник не превышает 10 %;

4. На разработанных в программном комплексе Ansys математических моделях высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций были выделены диагностические признаки повреждения обмоток роторов, заключающиеся в возрастании амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора первых порядков в сигнале радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля при пуске и возрастании амплитуды гармоники от фиктивной обмотки ротора порядка, совпадающего с числом пар полюсов, на нижней боковой частоте в сигнале тока статора при

пуске. На основании проведенных исследований разработаны методы контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций при пуске по току статора и внешнему магнитному полю. Сравнение разработанных методов по току статора и внешнему магнитному полю с существующими методами контроля в процессе эксплуатации асинхронных двигателей показало значительно более высокую достоверность контроля для первых за счет: исключения влияния ДЭ и поведения нагрузки на результаты контроля; повышения чувствительности к обрыву одного стержня ОР. Соотношение амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора на математической модели поврежденного и исправного высоковольтного асинхронного двигателя системы собственных нужд при пуске составило 118,28 по току статора, по радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля – не менее 189,8 для всех гармонических составляющих.

5. Разработана методика проведения контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций с длительным пуском в процессе эксплуатации по внешнему магнитному полю и току статора. Определены критерии перехода асинхронных двигателей собственных нужд из исправного состояния в неисправное на базе оценки амплитуд гармонических составляющих от фиктивной обмотки ротора в сигналах радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля или тока статора и сравнения их с пороговыми значениями, определенными путем математического моделирования асинхронного двигателя с одним оборванным стержнем обмотки ротора. Доказана возможность применения разработанной методики на экспериментальном стенде на низковольтном асинхронном двигателе при подаче пониженного напряжения для искусственного затягивания пуска, а также на реальных высоковольтных асинхронных двигателях собственных нужд с длительным пуском на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 города Иваново.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по перечню ВАК

1. Новоселов, Е.М. Оценка возможности использования радиальной составляющей внешнего магнитного поля в целях диагностики асинхронных электродвигателей / Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.А. Скоробогатов, **А.С. Страхов**, И.Н. Сульниенков // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2018. – Вып. 3. – С. 38–46.
2. Новоселов, Е.М. Экспериментально-аналитическое определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя / Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.А. Скоробогатов, **А.С. Страхов**, И.Н. Сульниенков // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2018. – Вып. 4. – С. 44–53.
3. Савельев, В.А. Метод контроля состояния обмоток роторов высоковольтных электродвигателей собственных нужд электростанций при пуске / В.А. Савельев, **А.С. Страхов**, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, А.А. Скоробогатов // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2019. – Вып. 4. – С. 31–44.
4. Назарычев, А.Н. Оценка последствий отказа асинхронных электродвигателей вследствие обрывов стержней короткозамкнутых обмоток роторов / А.Н. Назарычев, **А.С. Страхов**, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, А.Н. Морозов, А.А. Скоробогатов // Электричество. – 2021. – № 9. – С. 12–20.

Публикации в изданиях, переводные версии которых индексируются в международной базе SCOPUS

5. Назарычев, А.Н. Экспериментальное определение диагностических признаков повреждения обмоток роторов высоковольтных двигателей электростанций в режиме пуска / А.Н. Назарычев,

Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, **А.С. Страхов**, А.А. Скоробогатов, А.А. Пугачев // Дефектоскопия. – 2020. – № 5. – С. 3–11.

Переводная версия:

Nazarychev, A.N. Experimental Determination of Diagnostic Signs of Damage to the Rotor Windings of High-Voltage Power Plant Motors in Startup Mode / A.N. Nazarychev, A.A. Pugachev, E.M. Novoselov, D.A. Polkoshnikov, **A.S. Strakhov**, A.A. Skorobogatov // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2020, Т. 56, № 5, pp. 408–416.

6. Назарычев, А.Н. Метод контроля состояния обмоток роторов асинхронных электродвигателей при пуске по току статора / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, **А.С. Страхов**, А.А. Скоробогатов // Дефектоскопия. – 2020. – № 8. – С. 49–55.

Переводная версия:

Nazarychev, A.N. A Method for Monitoring the Condition of Rotor Windings in Induction Motors During Startup Based on Stator Current / A.N. Nazarychev, E.M. Novoselov, D.A. Polkoshnikov, **A.S. Strakhov**, A.A. Skorobogatov // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2020, Т. 56, № 8, pp. 661–667.

Патенты на изобретение

7. Способ выявления оборванных стержней в короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного электродвигателя: пат. № 2687881 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34 / **А.С. Страхов**, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, Д.С. Корнилов, Н.К. Швецов, А.А. Скоробогатов. – № 2018121860, заявл. 13.06.2018, опубл. 16.05.2019, бюл. № 14.

8. Способ выявления оборванных стержней в короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного электродвигателя: пат. № 2724988 Рос. Федерация: МПК G01R 31/34 / **А.С. Страхов**, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, А.Н. Назарычев, Н.С. Чумаков, А.А. Скоробогатов. – Заявка № 2019121731, заявл. 09.07.2019, опубл. 29.06.2020, бюл. № 19.

Прочие публикации по теме диссертации

9. **Strakhov, A.S.** The Development of Health Monitoring Techniques of the Induction Motors in Russia and Abroad / **A.S. Strakhov**, А.А. Skorobogatov, А.А. Prokhorova // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – С. 225-227.

10. **Strakhov A.S.** The Modern Trends of the Health Monitoring Techniques of Induction Motors / **A.S. Strakhov**, А.А. Skorobogatov, А.А. Prokhorova // СОЦИУМ. НАУКА. ОБРАЗОВАНИЕ: Материалы I Региональной молодежной научно-практической конференции [Электронный ресурс] / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – С. 35-37.

11. **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 // Радиотехника. Электротехника и энергетика: тез. докл. XXIII Международной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (2-3 марта 2017 г., Москва). В 3-х т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 29.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. **Страхов, А.С.** Использование внешнего магнитного поля для контроля состояния обмотки ротора при пуске / **А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, И.Е. Веселова, А.А. Скоробогатов** // Материалы тринадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2018», Т. 3. – Иваново, 2018. – С. 140–141.

16. **Страхов А.С.** Экспериментальное доказательство существования признаков повреждения электродвигателя с длительным пуском во внешнем магнитном поле / **А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, А.Н. Морозов, А.А. Скоробогатов** // Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения). – Т. 1. – Иваново, 2019 – С. 94-97.

17. **Страхов, А.С.** Сравнение тангенциальной и радиальной составляющих внешнего магнитного поля как диагностических сигналов повреждения обмотки ротора электродвигателя / **А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, Н.С. Чумаков** // Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения). – Т. 1. – Иваново, 2019. – С. 81-85.

18. Корнилов, Д.С. Математическая модель высоковольтного асинхронного двигателя собственных нужд электростанций в программном комплексе Ansys / Д.С. Корнилов, **А.С. Страхов, Н.С. Чумаков, Е.М. Новоселов, А.А. Скоробогатов** // Материалы четырнадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2019», Т. 3. – Иваново, 2019. – С. 99.

19. **Страхов, А.С.** Исследование сигналов внутреннего магнитного поля асинхронных электродвигателей в пусковом режиме / **А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов** // Материалы четырнадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2019», Т. 3. – Иваново, 2019. – С. 96.

20. Морозов, А.Н. Анализ экономического ущерба электростанции вследствие повреждений обмоток роторов высоковольтных электродвигателей собственных нужд / А.Н. Морозов, **А.С. Страхов, Н.С. Чумаков, А.А. Скоробогатов** // Материалы пятнадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2020», Т. 3. – Иваново, 2020. – С. 109.

21. **Страхов, А.С.** Практическое применение методов определения повреждения в обмотке ротора электродвигателя по внешнему магнитному полю и току статора / **А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, М.А. Захаров, А.Б. Колобов, А.А. Скоробогатов** // Материалы Международной (XXI Всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения). – Т. 1. – Иваново, 2021 – С. 75-78.

22. **Страхов, А.С.** Анализ потерь в высоковольтных электродвигателях собственных нужд электростанций при повреждении обмоток роторов / **А.С. Страхов, А.Н. Морозов, Д.А. Полкошников, А.А. Скоробогатов** // Материалы Международной (XXI Всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения). – Т. 1. – Иваново, 2021 – С. 107-110.

Страхов Александр Станиславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК РОТОРОВ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ**

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 14.04.2022 г. Формат 60x84¹/₁₆. Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 13
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ