

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕНТА**

доктора технических наук, профессора Кужекова Станислава Лукьяновича на диссертацию Страхова Александра Станиславовича «Разработка методов контроля технического состояния обмоток роторов электродвигателей собственных нужд электростанций в пусковом режиме», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

На рассмотрение представлена диссертационная работа, состоящая из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 150 наименований, 4 приложений. Общий объем работы составляет 223 страницы, в тексте содержится 79 рисунков и 36 таблиц.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Одной из важных задач современной электроэнергетики является повышение надежности функционирования системы собственных нужд электростанций. Известно, что одним из способов решения этой задачи является разработка методов технического диагностирования электрооборудования собственных нужд, в частности, высоковольтных асинхронных электродвигателей (АД), которые преимущественно используются в качестве приводов мощных и ответственных механизмов. Отказы подобных двигателей приводят к большому экономическому ущербу для электрических станций, что подробно изложено и подтверждено расчетами в ходе проведенных автором исследований.

В диссертационной работе уделяется внимание проблеме своевременного обнаружения оборванных стержней короткозамкнутой обмотки ротора высоковольтных АД. Значительная доля отказов таких двигателей по причине повреждения обмоток роторов связана с тем, что данные двигатели выполняются с составной обмоткой, поэтому при обрыве стержень такой обмотки может отогнуться и нанести ущерб изоляции обмотки или стали статора.

Известно большое количество российских и зарубежных публикаций, посвящённых методам контроля обрыва стержней роторов АД. При этом наиболее проработанными являются методы контроля в установившихся режимах работы. Однако, указанные методы недостаточно эффективны при контроле обрыва обмоток роторов высоковольтных АД собственных нужд электростанций по следующим причинам, установленным автором диссертации:

- 1) Невозможен контроль АД механизмов с резко переменной нагрузкой.
- 2) Невозможно произвести контроль АД, нагрузка которых близка к холостому ходу, при которой слабо проявляются характерные диагностические признаки.
- 3) Для АД с двойной беличьей клеткой затруднено выявление обрывов стержней пусковой обмотки, так как в установившемся режиме большая часть тока протекает по рабочей обмотке. Однако чаще всего повреждается пусковая обмотка, что может привести к тому, что неисправность не будет своевременно обнаружена.

Следует добавить, что высоковольтные АД механизмов тягодутьевого тракта и топливоприготовления обычно выполняются с большим количеством стержней обмотки ротора. Поэтому с целью выявления обрыва одного стержня требуется использовать методы кон-

троля, обладающие высокой чувствительностью.

В связи с совершенствованием технических средств обработки сигналов в настоящее время наиболее перспективным является проведение контроля обрыва стержней ротора АД в пусковых режимах. Разработка и совершенствование методов контроля в указанных режимах позволяет повысить чувствительность средств диагностики к повреждениям обмотки ротора. Поэтому тема диссертационной работы, целью которой является разработка методов контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска по внешнему магнитному полю (ВМП) и току статора в пусковом режиме, используемых в системе собственных нужд электрических станций, является актуальной для современной электроэнергетики.

### **Общая характеристика работы и её научных положений**

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, представлена краткая характеристика ее разработанности, сформулированы ее цель и задачи, отражены научная новизна, практическая и теоретическая значимость результатов, положения, выносимые на защиту, методология и методы исследований, обоснована степень достоверности полученных результатов, приведены сведения об апробации, внедрении результатов работы и о личном вкладе автора.

*В первой главе* автором на основании аналитического обзора российской и зарубежной литературы, а также на основе анализа статистических данных по повреждаемости высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд выделены основные последствия отказов асинхронных двигателей, а также приведена количественная оценка экономического ущерба для электростанции.

Также в первой главе произведен анализ существующих методов контроля состояния обмоток роторов высоковольтных двигателей, а также существующих методов обработки сигналов и оценки технического состояния. В результате сделан вывод, что задача исследования должна заключаться в разработке методов контроля на основе спектрального анализа сигналов ВМП и тока статора при пуске высоковольтных асинхронных двигателей собственных нужд электростанций.

*Вторая глава* посвящена разработке алгоритма для анализа ВМП и тока статора при пуске асинхронных двигателей. Приведён гармонический состав указанных выше диагностических сигналов при наличии повреждений обмоток роторов, а также при наличии динамического эксцентриситета.

Описан предложенный автором диссертации алгоритм диагностирования, а также необходимые для проведения контроля параметры метода обработки диагностического сигнала. Приведены результаты апробации алгоритма с помощью тестового сигнала. В результате показано, что алгоритм может быть использован с целью обработки диагностических сигналов при пуске высоковольтных АД собственных нужд электростанций.

*Третья глава* посвящена результатам проведенных автором исследований математических моделей высоковольтных АД собственных нужд. Автором разработаны в программном комплексе Ansys математические модели двух высоковольтных двигателей, используемых в

качестве приводов механизмов тягодутьевого тракта на электрических станциях. Произведён анализ спектров сигналов ВМП и тока статора АД в режиме пуска.

Автором выявлены диагностические признаки наличия повреждения обмоток роторов, разработаны методы контроля технического состояния, подтверждено отсутствие влияния динамического эксцентриситета на характерные гармоники спектра. Показана высокая чувствительность разработанного метода и возможность выявления одного оборванного стержня ротора высоковольтных АД.

В главе рассмотрены вопросы помехозащищённости ВМП и подтверждено, что магнитные поля от соседних АД не могут привести к ошибочному заключению о техническом состоянии обмоток роторов асинхронных двигателей.

Кроме того, в этой главе произведены исследования на АД напряжением до 1 кВ при затянувшемся пуске путём включения его на пониженное напряжение. Доказано, что при пониженном напряжении в спектре сигнала также имеются характерные гармоники, используемые при проведении экспериментальных исследований.

**Четвертая глава** содержит результаты проведенных автором экспериментальных исследований, произведенных для доказательства эффективности разработанных методов контроля. Представленные результаты подтверждают сделанные в третьей главе выводы о росте амплитуд характерных гармоник в зависимости от увеличения размеров повреждения обмотки. Представленные результаты сравнения подтвердили корректность разработанных моделей.

Описана разработанная автором методика проведения контроля и результаты её апробации на высоковольтных АД собственных нужд на электростанциях. Описан процесс регистрации сигналов тока статора и радиальной составляющей ВМП на нескольких высоковольтных двигателях механизмов тягодутьевого тракта электростанций. Обработка сигналов показала, что в спектрах сигналов отчетливо проявились характерные гармонические составляющие, что подтвердило возможность проведения контроля по значениям амплитуд указанных составляющих.

**В заключении** автором изложены основные результаты работы.

Рассмотрение диссертационной работы Страхова А.С. позволило сделать вывод, что она является законченной научно-исследовательской работой, все поставленные в диссертации задачи выполнены, полученные результаты изложены полно, ключевые аспекты, связанные с разработкой научно обоснованных методов контроля состояния высоковольтных асинхронных двигателей при их пуске, проработаны на высоком научно-техническом уровне.

В работе выполнены теоретические исследования, математическое моделирование и эксперименты с использованием физической модели, а также испытания непосредственно на АД электростанций, подтвердившие корректность полученных результатов.

**Степень обоснованности и достоверности результатов научных исследований**

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается корректностью применения математических методов, апробированного специализированного программного обеспечения; совпадением теоретических результатов и результатов, полученных с помощью

математических моделей, на экспериментальном стенде, а также в системах собственных электростанций на реальных высоковольтных асинхронных двигателях с тяжелыми длительными пусками.

Полученные результаты не противоречат основным положениям технических наук и согласуются с опубликованными результатами исследований, проведенных другими авторами.

### **Новизна сформулированных научных положений и выводов диссертационной работы**

Научную новизну диссертационной работы по мнению автора 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;*

Диагностические признаки повреждений обмотки ротора АД, указанные в п.1, являются новыми. Автором работы впервые произведен анализ гармонического состава сигналов радиальной составляющей ВМП и тока статора. Математическое моделирование подтвердило положение о возрастании амплитуд характерных гармоник в спектрах сигналов ВМП и тока статора АД при увеличении размеров повреждения обмотки ротора. Достоверность полученных выводов подтверждена совпадением результатов, полученных путём математического моделирования, на экспериментальном стенде и теоретических положений, на которых основываются проведенные исследования.

*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;*

Алгоритм анализа спектров, разработанный в диссертации, является новым и позволяет осуществлять обработку диагностических сигналов, полученных в пусковых режимах АД. Автором рассмотрены условия применения данного алгоритма, выделены необходимые параметры используемого метода обработки сигнала (тип применяемой оконной функции, продолжительность интервалов, на которые разбивается сигнал), а также самого диагностического сигнала (длительность пуска). Достоверность работы алгоритма подтверждена на тестовом сигнале, а также путём обработки сигналов, полученных с помощью математических моделей и на реальных АД электростанций.

*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 ВМП в пусковом режиме;*

Автором разработан новый метод контроля технического состояния АД по ВМП, име-

ющий более высокую чувствительность к наличию неисправностей, чем существующие аналогичные методы контроля. Описана возможность его практической реализации. Эффективность метода подтверждена на математических моделях, на экспериментальном стенде, а также в ходе проведения экспериментов на высоковольтных двигателях собственных нужд электростанций. Подтверждено отсутствие противоречия полученных результатов.

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

Разработан новый метод контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных АД собственных нужд электростанций по току статора, обеспечивающий высокую чувствительность. Предложена реализация данного метода на практике. Эффективность и достоверность метода также подтверждены с помощью математической модели двигателя, а также на экспериментальном стенде и на электростанциях.

#### **Теоретическая значимость результатов работы**

1. Положение о наличии диагностической информации в сигналах радиальной составляющей индукции ВМП и тока статора АД в режиме пуска может быть использовано в теоретических разработках по контролю технического состояния других объектов.
2. Установлено различие в сигналах ВМП и тока статора АД при динамическом эксцентриситете и обрывах стержней обмоток роторов в пусковых режимах.
3. Алгоритм анализа частотно-временных спектров сигналов применительно к ВМП и току статора высоковольтных АД в пусковом режиме работы, основанный на оконном преобразовании Фурье, представляет интерес для дальнейших теоретических разработок в области контроля технического состояния оборудования.

#### **Практическая значимость результатов, полученных в диссертационной работе**

Практическую значимость работы составляют:

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;
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.

#### **Вопросы и замечания по диссертационной работе**

1. В названии диссертации следовало указать, что рассматриваются повреждения короткозамкнутых обмоток роторов АД.

2. Основу литературного обзора составляют работы и методы, опубликованные в зарубежных журналах. Целесообразно было бы уделить внимание и отечественным разработкам в области диагностирования обмоток роторов АД. В частности, известны работы М.Я. Клецеля и его учеников.

3. В первой главе в нескольких строках говорится о частотах спектра сигналов, генерируемых фиктивной обмоткой ротора (ФОР) АД. В последующих главах исследования проведены с использованием указанных сигналов.

Представляется, что необходимо было уделить гораздо большее внимание обоснованию указанной модели. В самом деле, сигналы от ФОР проходят через воздушный зазор АД, сердечник и обмотку статора, а также через мощный стальной корпус (оболочку) электродвигателя. Кроме сигналов от ФОР в диагностическом сигнале присутствуют сигналы от магнитного поля рассеяния статора АД. В результате имеет место не только существенное ослабление сигнала ФОР, но и мешающее влияние ВМП токов статора АД. Применение высокочувствительных датчиков, с одной стороны, позволяет обнаруживать слабый полезный сигнал, но, с другой стороны, усложняет решение задачи помехоустойчивости.

Подобный вопрос освещался в научно-технической печати применительно к диагностированию мощных синхронных турбогенераторов АЭС с помощью датчиков частичных разрядов, устанавливаемых на внешней поверхности оболочек объектов контроля. Отмечалось наличие ошибочных диагнозов о неисправностях турбогенераторов.

Указанное замечание является рекомендацией и не влияет на общую положительную оценку квалификационной работы, выполненной диссертантом.

4. В работе приведены результаты исследований ВМП, полученные с помощью установки с маломощным АД напряжением до 1 кВ. Конструкция корпуса этого двигателя значительно отличается от корпусов высоковольтных АД, в первую очередь, по толщине стали корпуса. Это обстоятельство является существенным для диагностических сигналов ВМП.

5. Не ясно, почему в диссертационной работе из большого количества различных воздействующих факторов и возможных повреждений АД подробно рассматривается лишь влияние динамического эксцентриситета. Почему не рассматривалось влияние других факторов, могут ли они оказывать влияние на гармонический состав диагностического сигнала при пуске АД?

Нет также пояснений о причине отказа от контроля аксиальной и тангенциальной составляющих ВМП ФОР. Автором не обосновано, почему для проведения контроля принято решение использовать радиальную составляющую внешнего магнитного поля.

6. В работе предложено использовать в качестве диагностического признака гармоники спектра тока статора АД. Возможность и целесообразность использования этого признака сомнений не вызывает. Например, в качестве признака несостоявшегося и затянувшегося пусков АД в ряде работ используется низкочастотная составляющая тока статора с переменной частотой.

Возникает вопрос: влияет ли или нет указанная составляющая тока на результаты контроля неисправности обмотки ротора по гармоникам тока статора?

В работе утверждается, что недостатком метода является «необходимость доступа к токовым цепям». Смысл этого выражения не ясен, так как доступ к вторичным цепям трансформаторов тока, включённых в цепи статора АД, при наличии испытательного блока в этих цепях не представляет трудностей.

7. В первой главе диссертации приведена методика расчёта экономического ущерба, обусловленного повреждением обмоток роторов АД. По указанной методике имеются следующие вопросы:

- принято, что АД работает 8760 часов в году. Это нереальное допущение, т.к. возможны плановые и неплановые остановки как АД, так и блока в целом;

- утверждается, что отказ АД системы топливоприготовления вызывает снижение мощности энергоблока на 1 час. В указанной системе имеются бункеры угля и угольной пыли. Кроме того, при отсутствии резервного АД одного часа на замену повреждённого элемента недостаточно.

8. В п.3.2 приведены краткие сведения о компьютерных моделях АД в программном комплексе Ansys. В решаемой автором задаче важно обеспечить адекватность прохождения магнитного поля ФОР и токов статора через оболочку (корпус) двигателя. Однако сведений об этом нет (кроме ссылки на литературу).

9. Поскольку в диссертационной работе большое внимание уделяется проведению экспериментальных исследований, следовало бы указать метрологические характеристики применяемых средств для регистрации, преобразования и обработки сигналов.

10. Отсутствуют публикации, выполненные автором диссертации без соавторов.

11. Имеется небольшое количество неудачных выражений, стилистических неточностей, пропусков слов. Например:

- стр. 21 «...и ущерба статору, соответственно...»;
- стр. 34 «...будут методы в пусковом режиме работы...»;
- жаргонные выражения: «метод прописан». «ловить сигнал ВМП»;
- стр.129 «максимальная разница амплитуда сигнала достигала» и др.

Отмеченные замечания не снижают существенным образом научной значимости и практической ценности диссертации, которая выполнена на актуальную тему, имеет высокий научно-теоретический уровень и прошла апробацию в условиях действующей тепловой электростанции. Следует подчеркнуть следующие достоинства диссертационной работы:

- проведён обстоятельный анализ работ, выполненных зарубежными авторами;
- использованы современные методы обработки сигналов;
- с целью обработки сигналов ВМП и тока статора высоковольтных АД собственных нужд в пусковых режимах разработан алгоритм диагностирования, основанный на базе оконного преобразования Фурье;
- проведены экспериментальные исследования на действующем оборудовании электростанций;
- выполнены комплексные исследования по теме диссертации с использованием компьютерных и физической моделей, а также реальных АД напряжением выше 1 кВ.

## **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении научных степеней**

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы, а именно пункту 5 «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок» и пункту 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» в части области исследования.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития электроэнергетической отрасли. Автореферат диссертации в полной мере передает существо выполненной работы, ее актуальность, научную новизну, положения, выносимые на защиту. Результаты проведенных автором исследований докладывались на международных и региональных конференциях и достаточно полно изложены в 22 публикациях, из которых 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых в международной базе Scopus, и 2 патента РФ на изобретение.

Диссертационная работа Страхова Александра Станиславовича на тему «Разработка методов контроля технического состояния обмоток роторов электродвигателей собственных нужд электростанций в пусковом режиме» соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», в том числе, п.9, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Страхов Александр Станиславович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

### **Официальный оппонент**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электрические станции и  
электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО  
«Южно-Российский государственный политех-  
нический университет (НПИ) имени  
М.И. Платова»  
346428, г. Новочеркасск Ростовской обл., ул.  
Просвещения, д. 132  
Тел. (86352) 255-211. Факс (86352) 255-909 E-  
mail: [kuzhekov@mail.ru](mailto:kuzhekov@mail.ru) Сайт: [http://www.npi-  
tu.ru](http://www.npi-tu.ru)

Кужеков  
Станислав Лукьянович  
« 11 » мая 2022 г.



Кужекова заверяю.  
Член Научного совета ЮРГПУ (НПИ)

Н.Н. Холодкова

11.05.2022 г.