ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Новоселова Евгения Михайловича** «Разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций по внешнему магнитному полю», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»

1. Структура и объем диссертации

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 114 наименований, и четырёх приложений. Диссертация изложена на 234 страницах машинописного текста, содержит 118 рисунков и 98 таблиц.

2. Актуальность темы диссертации

Современные тенденции в развитии отечественного электроэнергетического комплекса характеризуются повышенными требованиями в отношении обеспечения надежности функционирования систем электроснабжения энергообъектов и их отдельных элементов. Одним из эффективных средств повышения надежности и работоспособности является функциональная диагностика электрооборудования, использующая в качестве признаков возникающих неисправностей параметры физических процессов, протекающих в рабочих режимах без отключения от сети. Функциональная диагностика отдельных видов электрооборудования направлена на надежное выявление дефекта на ранней стадии развития, снижение вероятности внезапного отказа по причине пропуска дефекта, сокращения времени простоев и затрат на восстановительные ремонты. Разработка методов функциональной диагностики сопряжена с решением комплекса научно-технических задач, среди которых важное место отводится выбору информативного и удобного для измерения признака дефекта, определению порогового значения признака с проверкой его чувствительности к изменению важных эксплуатационных факторов, созданию методического, программно-алгоритмического и аппаратного обеспечения.

Повреждения асинхронных двигателей (АД), работающих с тяжелыми условиями пуска при неудовлетворительном обслуживании в системах собственных нужд электростанций, зачастую связаны с обрывами стержней короткозамкнутой обмотки ротора. Обрывы стержней обмотки ротора приводят к снижению пускового момента, увеличению длительности пуска, повышению вибрации и ускоренному износу узлов АД. Таким образом, раннее выявление подобных дефектов АД позволяет упростить ремонты, сократить временные и финансовые ресурсы на их проведение, и, как следствие, повысить надежность и эффективность эксплуатации

энергообъекта. Большинство известных и применяемых методов функционального контроля обмотки ротора АД, использующих спектральный анализ сигналов механических и/или электромагнитных полей, наряду с достоинствами имеют существенные ограничения в практическом применении. Перспективным малоизученным направлением повышения эффективности функциональной диагностики обмотки ротора АД за счет преодоления существующих ограничений признается исследование радиальной составляющей внешнего магнитного поля (ВМП).

Все вышеизложенные положения подчеркивают высокую актуальность выполненных в диссертационной работе научных исследований.

3. Оценка содержания диссертации.

Во введении обоснована актуальность выполненных в диссертации исследований, направленных на разработку метода функционального диагностирования короткозамкнутых обмоток роторов АД собственных нужд электростанций на основе спектрального анализа радиальной составляющей ВМП, а также системы его программно-аппаратного обеспечения. Сформулированы цель и задачи научных исследований, научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность полученных результатов, рассмотрено соответствие диссертации паспорту научной специальности, указаны положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ аварийности АД собственных нужд электростанций, выявлены причины и последствия отказов АД СЭСН, в том числе с обрывами стержней обмотки ротора. Отмечено отсутствие актуальной статистики по отказам АД отечественного производства. Приводятся примеры технологических нарушений в СЭСН электростанций с участием АД ответственных механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта, из которых очевидны катастрофические последствия обрыва стержней обмотки ротора и стоимость восстановительных ремонтов. Проведение опроса специалистов энергоремонтных предприятий позволило обобщить проблемы, связанные с эксплуатацией как старых, так и новых АД в СЭСН электростанций и обосновать актуальность функциональной диагностики с ранним обнаружением опасных дефектов короткозамкнутой обмотки ротора.

Выполнен аналитический обзор методов функциональной диагностики состояния обмотки ротора АД с выделением методов на основе параметров внутреннего и внешнего магнитного поля, спектрального анализа тока статора, анализа вибраций, измерения скольжения, рассмотрены достоинства и недостатки каждого из них в сравнении друг с другом. Результаты обзора использованы для выбора и обоснования задач дальнейших исследований.

Вторая глава посвящена математическому моделированию ВМП АД. Целью исследований является изучение влияния неисправностей обмотки ротора АД и

некоторых эксплуатационных факторов на параметры виртуальных измерений (результатов компьютерного моделирования с применением программного комплекса Ansys Maxwell), формирование, обработка и анализ формы диагностического сигнала. Компьютерное моделирование и решение пространственных уравнений с помощью метода конечных элементов выполнялось для двух типов двигателей, на базе которых в диссертации созданы экспериментальные стенды и выполнена проверка корректности результатов моделирования. Моделирование самих АД и реальных датчиков (внутренний индукционный датчик, датчик Холла) позволили представить обмотку ротора с оборванным стержнем, как суперпозицию двух обмоток, одна из которых является исправной, а вторая – фиктивной (ФОР). Именно в ФОР по оборванным стержням протекают фиктивные токи, которые затем замыкаются по исправным стержням и индуцируют информативные гармонические составляющие ВМП. В ходе исследования результаты компьютерного моделирования сопоставлялись с известными экспериментальными данными из открытых источников информации, что подтверждало их корректность. Так были выявлены информативные гармоники ВМП, вызванные токами ФОР, определены их составляющие на нижней и верхней боковой частоте. Замечено, что обрыв стержня обмотки ротора в 10 и более раз увеличивает амплитуды этих составляющих, что позволяет использовать это свойство в качестве диагностического признака обрыва стержней обмотки ротора АД. Для повышения достоверности оценки состояния АД предложен интегральный показатель – средняя мощность сигнала индукции ВМП, который учитывает амплитуды сразу нескольких гармоник. Кроме того выполнена оценка вклада высших составляющих гармонического сигнала в его среднюю мощность. Исследовано влияние на амплитуды радиальной составляющей ВМП таких эксплуатационных факторов как несимметрия питающего напряжения, изменение механической нагрузки на валу АД, статический и динамический эксцентриситет ротора АД с точки зрения целесообразности их дальнейшего учета, а также вопросы помехозащищенности информативного сигнала.

Третья глава посвящена разработке специализированного анализатора спектра ВМП АД, который имел бы ряд важных преимуществ, отличающих его от существующих. Выполнена постановка задач исследования и определены основные требования к разрабатываемому инструментарию: высокая точность определения амплитуд и частот любых гармонических составляющих сигнала; малое время записи сигнала; совмещение функций измерения скольжения ротора АД и частоты сети. Разработан способ определения скольжения АД по ВМП с использованием гармоник эксцентриситета ротора. Обосновано его практическое преимущество в сравнении с альтернативным способом, которое заключается в большей помехозащищенности сигнала из-за узкой частотной полосы гармоник. На основе исследования влияния времени записи сигнала на точность определения частоты

разработан метод и алгоритм автокоррекции времени записи сигнала, по которому время записи сигнала подбирается таким образом, чтобы частота искомой гармоники имела минимально возможную погрешность в момент измерения. Это позволило уменьшить эффект растекания спектра сигнала и предложить практический критерий выбора шага уменьшения времени записи сигнала, который использован в предложенном алгоритме автокоррекции. Предложенный алгоритм и методика оценки достоверности определения скольжения АД по гармоникам эксцентриситета ротора легли в основу разработанного анализатора спектра, корректность и стабильность результатов работы которого проверялась с помощью виртуального сигнала, полученного в ходе компьютерного моделирования во 2 главе.

В четвертой главе сформулированы и решены задачи экспериментальной проверки и обоснования теоретических положений, выполненных ранее исследований: экспериментальное доказательство существования во ВМП АД гармонических составляющих, частоты которых зависят от величины скольжения; проверка корректности работы анализатора спектра; проверка результатов компьютерного моделирования, разработка методики функциональной диагностики обмотки ротора АД по ВМП, оценка помехозащищенности ВМП АД как источника диагностического сигнала. С этой целью разработаны два экспериментальных лабораторных стенда с возможностью тестирования однотипных АД одной серии, на которых выполнены испытания в рабочих режимах с изменением параметров нагрузки и питающего напряжения. Также в главе обобщены результаты исследований, выполненных в СЭСН энергообъектов в условиях реальной эксплуатации. Это позволило обосновать практическую эффективность применения алгоритма автокоррекции времени записи сигнала и критерия оценки качества его регистрации. Приведена аппаратно-программная реализация методики функционального диагностирования обмотки ротора АД.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе. Показано, что решены поставленные задачи, позволяющие достичь цели проведённого исследования.

Приложения содержат данные для компьютерного моделирования АД, рабочие параметры тестовых АД, результаты проверки корректности моделирования магнитного поля в воздушном зазоре АД, патенты, свидетельства и акты внедрения результатов научных исследований.

4. Соответствие диссертации и автореферата паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»

Материалы диссертации и автореферата соответствуют пунктам 5, 6 и 13 области исследования паспорта научной специальности 05.14.02 по техническим наукам.

5. Соответствие содержания автореферата основным положениям

диссертации

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

6. Методы исследования

При выполнении исследований в диссертационной работе применялись методы математического и физического моделирования процессов, методы спектрального анализа сигналов, методы теории конечных элементов, теории магнитного поля, методы обработки экспериментальных данных.

7. Степень обоснованности и достоверности полученных научных положений

Обоснованность полученных научных положений обусловлена актуальностью направления исследования, применением теоретических и экспериментальных методов исследования в рассматриваемой области, и подтверждена обсуждением результатов на национальных и международных научно-технических конференциях и семинарах.

Достоверность разработанного метода функционального диагностирования обмотки ротора АД по ВМП, а также метода и алгоритма автоматической коррекции времени записи гармонического сигнала радиальной составляющей ВМП подтверждена результатами математического и физического моделирования с применением лабораторных установок, экспериментальными исследованиями в условиях реальной эксплуатации, а также патентами на изобретение, свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ и актами внедрения разработок.

Степень достоверности и обоснованности высокая.

8. Уровень новизны научных положений, выводов и рекомендаций

Впервые предложен диагностический параметр обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД – средняя мощность сигнала радиальной составляющей ВМП, состоящего из гармоник фиктивной обмотки ротора на нижних боковых частотах.

К научной новизне также относятся следующие результаты:

1. Результаты исследования влияния на спектр радиальной составляющей ВМП обрывов стержней обмотки ротора и эксплуатационных факторов, таких как несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, эксцентриситет ротора.

2. Метод и алгоритм автокоррекции времени записи сигнала, позволяющий в сравнении с традиционным анализом на основе быстрого преобразования Фурье сократить время записи сигнала при высокой точности определения амплитуд и частот любых гармонических составляющих спектра.

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

9. Ценность для науки и практики результатов исследований

Научная значимость результатов диссертации заключается в разработке методики функциональной диагностики короткозамкнутой обмотки ротора АД СЭСН электростанций на основе применения эффективного диагностического параметра – средней мощности сигнала радиальной составляющей ВМП, а также разработанных метода и алгоритма автоматической коррекции времени записи гармонического спектра сигнала ВМП.

Реализация разработанных научных положений в виде скалярного анализатора гармонического спектра сигнала, специализированного программно-аппаратного комплекса поддержки функциональной диагностики оборванных стержней короткозамкнутых обмоток ротора АД, а также их внедрение в практику реальной эксплуатации АД СЭСН электростанций позволяет обеспечить надежность электрооборудования, снижение суммарных эксплуатационных затрат за счет раннего и достоверного выявления дефектов и своевременного их устранения, что является значимым практическим результатом.

10. Отличие выполненных исследований от других работ

Диссертационную работу Новоселова Е.М. отличает от других работ, выполненных в области надежности и функциональной диагностики АД собственных нужд электростанций, методически целостный подход к обоснованию корректности разработанных методов, моделей, алгоритмов и технических средств, эффективности их практического применения в условиях реальной эксплуатации, для чего потребовалась разработка специального методического обеспечения:

- разработана и исследована компьютерная модель виртуального тестового спектрального сигнала радиальной составляющей ВМП исправной и поврежденной короткозамкнутой обмотки ротора АД;
- разработан способ определения скольжения АД по ВМП, предложен практический критерий оценки достоверности определения скольжения с использованием гармоник эксцентриситета ротора;
- разработаны метод и алгоритм автоматической коррекции времени записи сигнала радиальной составляющей ВМП АД, выполнена оценка методической погрешности и анализ практической эффективности применения алгоритма автокоррекции времени записи сигнала, оценка его помехозащищенности;
- разработан и протестирован анализатор спектра на основе алгоритма автоматической коррекции времени записи сигнала;
- разработана и экспериментально исследована методика функционального диагностирования короткозамкнутой обмотки ротора АД СЭСН электростанции по ВМП, реализованная в виде программно-аппаратного комплекса и экспериментально-лабораторного стенда.

12. Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

По теме диссертации опубликована 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.

13. Соответствие полученных результатов поставленной цели и задачам

Полученные результаты соответствуют поставленной цели диссертации. Сформулированные в диссертации научные задачи решены.

14. Замечания

1. Компьютерное моделирование ВМП АД позволило выявить свойство увеличения в 10 и более раз амплитуд отдельных гармоник ФОР при обрыве стержней. Это свойство использует автор при выборе информативного диагностического признака дефекта. В тоже время результаты сторонних исследований (ссылка [5] в списке источников) указывают на зависимость величин амплитуд конкретных гармоник ФОР от числа и места расположения оборванных стержней в обмотке ротора, что содержит дополнительно полезную диагностическую информацию, которую автор не использует. В результате выбранный интегральный признак – средняя мощность сигнала индукции ВМП, ограничен функцией индикатора дефекта и не претендует на выявление количества и места расположения оборванных стержней.

2. Опыты по исследованию влияния на ВМП АД эксплуатационных факторов в части несимметрии питающего напряжения выполнялись при отклонении напряжения фазы “А” на ±10В, что является не убедительным с точки зрения заданных предельно-допустимых значений (±4%) для коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности.

3. Предлагаемый алгоритм автокоррекции времени записи сигнала – многошаговый итерационный процесс, связанный с уменьшением времени записи сигнала и требующий на каждом шаге выполнения критериальной оценки ($V(i)$ = max) величины растекания спектра, что увеличивает количество операций и усложняет алгоритм. Не смотря на достаточную оригинальность разработанного алгоритма, к нему могут быть адресованы некоторые замечания:

- логическая функция (блок 6) в структурной схеме, рис.3.8 не может быть осуществима без задания начального приближения $V(0)$;
- в случае нескольких искомых гармоник спектра придется многократно запускать алгоритм, каждый раз задавая новые исходные данные;
- отсутствуют рекомендации относительно выбора наилучшего значения частоты дискретизации АЦП.

4. Утверждение о том, что в установившемся режиме АД скольжение ротора даже при поврежденной обмотке не может превышать удвоенного значения номинального скольжения машины (выражение 3.44 на стр.116) противоречит действительности для режимов работы на пониженном напряжении сети или в области, близкой к пределу по устойчивости. Поэтому для принятия условия 3.44 в

качестве критерия для оценки достоверности определения скольжения, строго говоря, необходим дополнительный контроль рабочего напряжения сети. Без этой отстройки нельзя гарантировать высокое качество зарегистрированного сигнала.

5. Целевые режимные параметры АД (ток, частота вращения, амплитуды гармонии ВМП на частоте сети) требуют настройки программно-аппаратного комплекса CRW по предварительно проведенным измерениям для определения $P_{порог}$ в зависимости от нагрузки АД. Кроме того, математическое моделирование АД с исправной обмоткой ротора и последующим сравнительным анализом отличий целевых режимных параметров виртуального и реального АД требуют 100%-й уверенности в исправности обмотки ротора реального АД. Указанные положения ограничивают практическое применение разработанной методики в качестве методики функциональной диагностики обмотки ротора АД.

15. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении учёных степеней»

Диссертационная работа Новоселова Е.М. отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» № 842 от 24 сентября 2013 г. (ред. от 21.04.2016)

По п.9. Диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором самостоятельно исследований изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение надежности и эффективности функционирования асинхронных двигателей собственных нужд электростанций.

По п.10. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации имеются сведения о практической полезности результатов и рекомендации по использованию научных выводов.

По п.11-13. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, из списка рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Количество публикаций автора в этих изданиях составляет 6 статей.

По п.14. Диссертация отвечает требованию указания ссылок на заимствованные материалы или отдельные результаты.

16. Заключение

Приведенные замечания не снижают актуальности и значимости научно-квалификационной работы Е.М. Новоселова. В ней на основании выполненных автором самостоятельно исследований изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение надежности и эффективности функционирования АД в системах собственных нужд

электростанций. Диссертация написана хорошим языком, прошла широкую апробацию на международных и всероссийских конференциях и семинарах, автореферат и публикации полностью раскрывают ее содержание.

С учётом вышеизложенного считаю, что представленная работа «Разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций по внешнему магнитному полю» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы», а ее автор Евгений Михайлович Новоселов заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент,
Левин Владимир Михайлович
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Автоматизированных электроэнергетических систем»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»,
630073, г. Новосибирск, пр-кт. К. Маркса, 20,
тел. 8 (383) 346-13-34; e-mail: levin@corp.nstu.ru

Подпись Левина Владимира Михайловича заверяю
начальник ОК НГТУ ...алова Ольга Константиновна)

18.04.2018 г.