

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию Александрова Николая Михайловича «Совершенствование метода диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

### Актуальность темы

Надёжная работа силового трансформатора обеспечивает бесперебойное снабжение электроэнергией потребителей. Для обеспечения надёжности трансформатора важно выявлять изменения геометрии обмоток, вызванные, например, электродинамическими силами при бросках тока в обмотках из-за коротких замыканий в сети. Своевременное определение данного типа дефектов позволит вывести трансформатор в ремонт в рабочем порядке, не допуская развития системной аварии. Представленные в диссертации методы и средства диагностики предназначены для выявления дефектов обмоток силовых трансформаторов на ранней стадии их развития. Поэтому **актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и четырёх приложений. Работа изложена на 142 страницах, включая 71 рисунок и 14 таблиц. Список использованной литературы включает 105 наименований.

**Во введении** раскрывается актуальность темы, сформулированы цель, научная новизна, практическая значимость работы и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены причины и виды деформаций обмоток силовых трансформаторов под действием электродинамических сил. Рассмотрены основные методы оценки технического состояния обмоток. Отмечено, что оценка состояния обмоток методом анализа частотного отклика является наиболее чувствительным к изменениям геометрических размеров обмотки. Приведен обзор подходов к анализу результатов диагностирования обмоток методом частотного отклика. Доказано, что в настоящий момент нет универсального подхода к интерпретации результатов. Таким образом, установлена актуальность совершенствования метода диагностики состояния обмоток посредством измерения частотных характеристик, а также разработки метода интерпретации результатов диагностики.

**Во второй главе** рассмотрена теория диагностического моделирования трансформаторного оборудования, разработаны модели механических деформаций обмоток, приведены уточненные формулы расчета электродинамических сил, а также разработана модель обмотки силового трансформатора с целью исследования зависимости изменения частотной характеристики при деформации обмотки.

**В третьей главе** рассмотрены методы диагностики механического состояния обмоток трансформаторов. Проведён анализ требований к диагностическому оборудованию, предназначенному для оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Автором разработано и запатентовано устройство, которое позволяет автоматизировать процесс регистрации частотных характеристик силовых

трансформаторов. Приведены частотные характеристики различных трансформаторов и шунтирующих реакторов, полученные разработанным устройством.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования частотных характеристик обмоток силовых трансформаторов, которые проходили испытания на электродинамическую стойкость. Исследование частотных характеристик проводилось с целью выявления закономерностей и установления взаимосвязей между типом и степенью деформаций обмотки и изменением её частотных характеристик. В итоге выявлены диагностические признаки потери радиальной устойчивости обмоток силовых трансформаторов.

**В заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы, отражающие содержание работы.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты», а именно пункту 5: Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов.

#### **Научная новизна**

В работе получены следующие научные результаты:

1. Разработан метод моделирования механических деформаций обмоток силовых трансформаторов, учитывающий тип и форму деформации.
2. На основе математического моделирования магнитных и электродинамических процессов определены максимальные механические нагрузки в режиме КЗ.
3. Разработаны диагностические модели для оценки состояния силовых трансформаторов.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

Теоретическая значимость работы состоит в том, что автору удалось в процессе исследования решить сложную задачу моделирования электромагнитных процессов в обмотке. Современное развитие программного обеспечения и вычислительных мощностей предоставляет такую возможность, но реально решенных связанных задач в электромеханике пока немного. В работе показана методология решения этой проблемы.

Практическую значимость имеют следующие достижения.

1. Предложенный метод моделирования деформаций обмотки и алгоритмы расчета электродинамических сил позволяют повышают точность расчетов на электродинамическую стойкость обмоток.
2. Разработанное устройство для диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов позволяет получать достоверные частотные характеристики в автоматическом режиме с расчетом численных показателей (коэффициента корреляции (КК) и модуля суммы логарифмической ошибки (ASLE)).

3. Модернизированные автором диагностические модели обмоток силовых трансформаторов позволяют определять их фактическое состояние и назначать сроки плановых ремонтов.

Прикладное значение рассматриваемой работы подтверждено актами внедрения разработок автора, представленными в Приложении диссертации.

#### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в конструкторских бюро и на предприятиях, занимающихся разработкой, проектированием и изготовлением силовых трансформаторов и реакторов, а также в учебном процессе вузов технических специальностей.

#### **Достоверность результатов работы**

Достоверность научных результатов, приведенных в диссертации, подтверждается корректным использованием методов математического моделирования, теоретических положений электротехники, электромеханики, а также результатами компьютерного моделирования электромагнитных переходных процессов и сравнением их с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

#### **Апробация диссертации и публикаций**

Основные материалы работы и её результаты достаточно полно отражены в 26 публикациях автора, из которых 1 работа индексирована в наукометрической базе Scopus, 4 статьи в журналах из перечня ВАК. Диссертация прошла апробацию на многих научно-технических конференциях, симпозиумах, совещаниях различного статуса, на которых были представлены доклады автора.

**Автореферат и публикации автора** отражают основное содержание диссертации и соответствуют требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования РФ. Автореферат и диссертация написаны в строго логической последовательности, математические выводы понятны и физически обоснованы. При использовании в тексте диссертации результатов других авторов сделаны соответствующие ссылки.

Результаты диссертационных исследований достаточно полно отражены в опубликованных работах.

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

1 Расчёты электродинамической стойкости проводились ранее и проводятся поныне в ВИТ и ВЭИ. В определённой степени эти расчёты доказали свою состоятельность опытом эксплуатации силовых трансформаторов. Наверное, п. 9.3.2.4 ГОСТ Р 52719-2007 допускает приемку в части стойкости при коротких замыканиях по расчётам электродинамической стойкости для трансформаторов мощностью более 40 МВА, учитывая сложность и дороговизну их испытаний.

2 В работе отсутствует обсуждение важных диагностических признаков частотных откликов обмоток силовых трансформаторов, установленных Д. А. Матвеевым, В.С. Лариным и др., изложенных например, на сессии СИГРЭ 2018 в докладе А2-209

«Application of natural frequencies deviations patterns and high-frequency white-box transformer models for FRA interpretation»

3 Усилия прессовки обмоток резко снижаются в холодном состоянии трансформатора. Известны аварии при включении трансформаторов (Экибастузская ГРЭС) и шунтирующих реакторов (МЭС Урала) из «замороженного» состояния. Автору следовало бы отразить этот факт и в требованиях к испытаниям и в расчётах.

4 В гл. 3 описывается разработка аппаратуры для измерения диагностирования механического состояния обмоток методом SFRA. При этом никак не обсуждаются возможности уже широко используемых диагностами приборов FRAX (Megger), FRANEO (Omicron), а также приборов ВЭИ. Наверное, было бы правильно сравнить собственную разработку с известными аналогами.

5 «Основное допущение, принятое при моделировании электромагнитных процессов – работа трансформатора от сети бесконечной мощности» (стр. 61). Считаю, что указанное допущение ведёт к большим перестраховкам в части электродинамической стойкости. Реальные токи к.з. всегда меньше расчётных из-за влияния потерь в генераторах и в сети.

6 Изменение ёмкостных параметров может происходить не только из-за деформации обмотки, но и за счёт увлажнения изоляции (п 2.5).

7 В начале п.2.5 говорится о том, что в схеме замещения должна учитываться и взаимная индуктивность, но как она рассчитывается не указано.

8 В тексте присутствует много ошибок, особенно в падежных окончаниях. Например, см. пояснения к рис.1.9 на стр. 28. Зависимость фазы названа графиком по частоте! Есть и не очень точные (по-видимому, жаргонные) определения, например, «дисковое пространство», «основная обмотка».

9 В библиографическом списке имеются источники, не упомянутые в тексте диссертации.

10 Перечисление прочих видов диагностики трансформаторного оборудования выполнено в телеграфном стиле (стр. 47 -48)

Указанные замечания, хотя и отражаются на качестве изложения, однако не меняют общего положительного мнения о данной работе.

### **Заключение по диссертации**

Диссертационная работа на тему: «Совершенствование метода диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов» является законченной научно квалификационной работой, в которой решена поставленная задача.

Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты».

Работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (п. 28), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Александров Николай Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент, профессор, доктор технических наук (05.14.12 – Техника высоких напряжений), профессор кафедры «Техники и электрофизики высоких напряжений» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (ФГАОУ ВО «НГТУ»)

Овсянников Александр Георгиевич

Служебный адрес: 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, кафедра «Техники и электрофизики высоких напряжений».

Телефон: +7 (383) 3461179.

E-mail: [oag@nspb.ru](mailto:oag@nspb.ru)



Подпись Овсянникова А.Г. заверяю:

