

## **Отзыв**

официального оппонента Львова Юрия Николаевича на диссертацию МЕЛЬНИКОВОЙ Ольги Сергеевны «Диагностика главной изоляции силовых маслонаполненных электроэнергетических трансформаторов по статистическому критерию электрической прочности масла», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа О.С. Мельниковой посвящена разработке методов и средств расчёта диагностических характеристик электрической прочности масляных каналов силовых трансформаторов и алгоритмов диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов с учётом влияния их мощности и класса напряжения по выбранному статистическому критерию электрической прочности масла на основе его эксплуатационных испытаний.

Актуальность данной работы определяется необходимостью обеспечить высокую надёжность работы силовых трансформаторов, эксплуатируемых на электростанциях и в электрических сетях, значительное количество которых отработало установленный стандартом ГОСТ 11677-85 «Трансформаторы силовые. Общие технические условия» срок службы 25 лет.

Испытание трансформаторного масла на пробой является испытанием сложного, многофункционального объекта. Как показано в рассматриваемой диссертационной работе, пробивное напряжение трансформаторного масла подвержено большому разбросу. Сам разброс как функция числа пробоев не обнаруживает однозначной закономерности. Влияние на разброс оказывает целый ряд факторов: объём масла и неоднородность электрического поля; мощность и класс напряжения силовых трансформаторов; качество трансформаторного масла; малый объём экспериментальной выборки при определении диагностических статистических параметров по результатам эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике.

При пробоях в одной и той же пробе масла меняются условия пробоя: при первом пробое сам пробойник соприкасается с атмосферой, при последующих пробоях образуются газы, сажа. Поэтому каждый пробой статистически неоднороден с последующими пробоями, и сама процедура испытаний вносит погрешность. Математическая идеализация этого объекта очень сложна и не достигла надёжной реализации. Здесь следует подчеркнуть, что по этой причине значения предельных показателей состояния оборудования как отечественных, так и зарубежных, как правило, не имеют достаточного научно-технического обоснования и устанавливаются в целом ряде случаев методом экспертных оценок.

Следует также отметить возможные существенные разбросы пробивного напряжения масла между минимальными и максимальными значениями в условиях эксплуатации в зависимости от температуры. При нагреве трансформатора в его баке имеет место переход влаги из твёрдой изоляции в масло. При охлаждении масла трансформатора происходит обратный переход влаги из масла в твёрдую изоляцию. Растворимость воды в трансформаторном масле весьма мала. При нагреве

растворимость воды в масле увеличивается. При охлаждении масла в нём появляется избыток влаги. При малейшем изменении влажности жидкого диэлектрика и наличии в нём примесей резко уменьшается электрическая прочность.

Поэтому чрезвычайно важен развитый в диссертации тезис о том, что пробой масла формируется в наиболее слабом месте, так называемом “напряжённом объёме масла”, на который воздействует максимальная напряжённость электрического поля, и характеризуется наличием нижнего предела пробивного напряжения, что отвечает, как показано в диссертации, третьему предельному закону крайних членов выборки – трёхпараметрическому распределению Гнеденко-Вейбулла, содержащему низший предел случайной величины. Минимальная пробивная напряжённость масла является основной характеристикой, по которой производится выбор главной изоляции силовых трансформаторов.

В РД 34.45-51.300-97 «Объём и нормы испытаний электрооборудования» определяется среднее значение пробивного напряжения масла по 6 пробам в стандартном пробойнике. В указанном РД отсутствуют показатели, отражающие влияние разброса на статистические характеристики состояния главной изоляции силовых трансформаторов. Разработанная О.С.Мельниковой диагностическая модель главной изоляции с применением статистического критерия изменчивости пробивного напряжения эксплуатационного трансформаторного масла в маслопробойнике позволяет в отличие от традиционного метода диагностирования согласно РД 34.45-51.300-97 более полно учитывать состояние главной изоляции.

Как следует из приведённых выше рассуждений, совершенствование методов диагностирования на основе испытаний масла в маслопробойнике требует существенного уточнения существующей в настоящее время физической модели процесса. Значительным достоинством представленной диссертационной работы является разработка диагностической модели, позволяющей определять статистические характеристики электрической прочности масла и обеспечить повышение эффективности диагностирования главной изоляции действующих силовых маслонаполненных трансформаторов на основе применения трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла. Предложенный в диссертации новый подход позволяет учитывать влияние объёма масла и неоднородности электрического поля, мощности и класса напряжения силовых трансформаторов, малый объём экспериментальной выборки при определении статистических характеристик по результатам эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике.

С учётом изложенного считаю, что тема диссертации является актуальной.

### **Оценка содержания диссертации**

Диссертация О.С. Мельниковой общим объёмом 173 страницы содержит введение, 5 глав, заключение, список литературы из 102 наименований, 51 рисунок, 25 таблиц и 7 приложений.

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены цель, задачи, методы исследования и соответствие диссертации паспорту научной специальности, приведено аннотированное содержание полученных результатов.

**В первой главе** на основе проведённого анализа отечественной и иностранной литературы по исследуемой проблеме показано, что в большинстве стран имеющиеся стандарты не предусматривают определение показателей, характеризующих статистический разброс пробивных напряжений. Такие параметры введены в стандарты России и США. Однако их нормативные значения установлены без учёта работы электроизоляционных жидкостей в высоковольтном оборудовании, в частности, в силовых трансформаторах. В главе 1 сформулирована постановка задачи, включающая комплекс исследований для диагностирования главной изоляции действующих силовых трансформаторов с применением статистических критериев изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике на основе его эксплуатационных испытаний, а также разработку испытательной ячейки маслопробойника, повышающей эффективность определения статистических характеристик пробивного напряжения масла.

**Во второй главе** представлены полученные аналитические выражения для определения пробивной напряжённости масляного канала с применением распределения Гнеденко-Вейбулла применительно к однородным электрическим полям для различных объемов масла. На этой основе для неоднородных электрических полей разработан алгоритм расчёта пробивных напряжений с учётом определяющего влияния “напряжённого объёма масла” в промежутке на его пробой. Выполнено сопоставление результатов расчёта и эксперимента диагностических статистических показателей пробивных напряжений для случаев однородных и неоднородных электрических полей. Отмечается хорошее совпадение результатов расчёта и эксперимента в широком диапазоне изменений объёма масла.

**В третьей главе** разработан метод расчёта диагностических статистических характеристик электрической прочности (СХЭП) масла в первом канале главной изоляции трансформаторов с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, учитывающий влияние мощности и класса напряжения трансформаторов. По этому методу разработан алгоритм расчёта диагностических СХЭП масла в первом канале изоляции в программе MathCad. Результаты выполненного вычислительного эксперимента показали, что в большей степени отражает влияние мощности трансформатора на изменение СХЭП масляных каналов статистический критерий изменчивости электрической прочности исходного масла, представляющий собой отношение параметров распределения Гнеденко-Вейбулла; определена область значений этого критерия, получены зависимости предельных значений данного критерия от мощности трансформаторов.

**В четвертой главе** проведён анализ распределения твёрдых частиц по размерам в эксплуатационном масле и времени осаждения частиц примесей после пробоя масла, показано, что важно совершенствовать систему перемешивания масла в измерительной ячейке после его пробоя. Получен патент на устройство для определения пробивного напряжения жидких диэлектриков, исключающее образование пузырьков газа и попадание частиц примеси со дна ячейки в промежуток между электродами. Проведённые автором сравнительные испытания масла по традиционному и предложенному методам показали эффективность предложенного подхода. Разработан метод определения диагностических СХЭП трансформаторного

масла как параметров распределения Гнеденко-Вейбулла с применением метода моментов для результатов малой выборки. Разработаны алгоритм и расчетная программа в среде Borland C++ Builder для определения диагностических СХЭП трансформаторного масла по предложенному и традиционному методам.

**В пятой главе** приведены данные расчётов СХЭП 40 образцов масла традиционным и предложенным в диссертации методами для силовых трансформаторов 110 кВ энергетических систем Ярославского, Вологодского, Санкт – Петербургского и Ивановского регионов. Согласно полученным в эксплуатации данным значения коэффициента вариации не превышают 9%, что значительно меньше нормируемого по ГОСТ 6581-75 20%, т.е. допускаются значительно большие границы снижения качества масла в условиях эксплуатации. Показано, что в качестве статистической оценки электрической прочности масла в каналах главной изоляции может служить статистический критерий изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике, представляющий собой отношение параметра распределения Гнеденко-Вейбулла, близкого по величине к среднему пробивному напряжению, к параметру, отражающему нижний предел пробивного напряжения. Этот коэффициент больше 1, наибольшая вероятность его значений лежит в диапазоне 1-1,5. Определены предельные значения этого критерия для различных мощностей трансформаторов. Разработан алгоритм диагностирования главной изоляции трансформаторов, в котором в качестве основных диагностических параметров представлены среднее пробивное напряжение масла, для которого в РД 34.45-51.300-97 «Объём и нормы испытаний электрооборудования» установлены нормативные значения, и статистический критерий изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике. По полученным в эксплуатации данным для 34 силовых трансформаторов показано, что большая часть наблюдаемых при эксплуатационных испытаниях значений критерия изменчивости пробивного напряжения масла находится в области, удовлетворяющей условию выполнения предъявляемых требований к маслу, причём с ростом мощности трансформаторов эта область становится более узкой.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы по работе.

**В приложениях** представлены информационные материалы к главам диссертации и акты о внедрении результатов работы.

**Диссертация имеет завершённый вид**, написана хорошим языком и аккуратно оформлена. Содержание 23 опубликованных печатных работ (5 статей по перечню изданий ВАК, 1 патент, 11 статей в сборниках трудов конференций и 6 публикаций в других изданиях) полностью отражает основные результаты и выводы диссертации.

Автореферат достаточно полно и точно отражает содержание диссертации.

#### **Научная новизна работы подтверждается тем, что:**

1. В работе раскрыт новый подход к решению проблемы повышения надёжности работы главной изоляции силовых трансформаторов с применением статистических диагностических параметров трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, учитывающий влияние объёма масла, мощности и класса напряжения силовых трансформаторов;

2. Разработана теоретическая модель диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов с применением статистического критерия изменчивости пробивного напряжения трансформаторного масла на основе трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, учитывающая влияние объёма масла и неоднородности электрического поля; мощности и класса напряжения трансформаторов; малый объём экспериментальной выборки при определении СХЭП масла по результатам его эксплуатационных испытаний;

3. Разработан алгоритм диагностирования главной изоляции трансформаторов по статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике. Определены предельные значения этого критерия для трансформаторов различной мощности и основные статистические диагностические параметры трансформаторного масла;

4. Разработана и апробирована новая испытательная ячейка, повышающая эффективность определения статистических характеристик пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике.

5. Выполнено сопоставление результатов диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов по традиционному методу согласно РД 34.45-51.300-97 «Объём и нормы испытаний электрооборудования» и предложенному в диссертации методу с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла.

#### **Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

1. Доказана возможность повышения эффективности диагностирования электрической прочности масляных каналов главной изоляции трансформаторов по статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике по результатам его эксплуатационных испытаний;

2. Используются существующие базовые физические и математические методы исследования пробоя электроизоляционных жидкостей, статистические модели и методы диагностики внутренней трансформаторной изоляции, методы теории вероятностей и математической статистики, вычислительный эксперимент;

3. Изложены методы выбора диагностических СХЭП масла, отражающих влияние мощности трансформатора, и результаты анализа эффективности применения разработанного алгоритма диагностирования главной изоляции трансформаторов по предложенному статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике;

4. Проведена модернизация существующей модели определения параметров распределения пробивного напряжения в маслопробойнике с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, позволяющая определять все параметры за счёт снятия ограничений, имеющихся в существующих моделях.

#### **Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечивается тем, что:**

1. Постановка задач исследования и выбор методов их решения проведены на основе анализа передового опыта по совершенствованию методов диагностики главной изоляции трансформаторов по статистическим характеристикам пробивных напряжений эксплуатационного трансформаторного масла;

2. Диагностическая модель построена на известных электрофизических подходах, математических и статистических моделях процессов пробоя масляных каналов изоляции трансформаторов, прошедших широкую проверку;

3. Установлено количественное совпадение результатов расчётов диагностических СХЭП масла с применением разработанных методов с опубликованными в независимых источниках и полученными в работе экспериментальными данными.

### **Значение результатов исследования для практики**

Для диагностирования главной изоляции трансформаторов могут быть использованы следующие разработки автора:

1. Метод и программа расчёта на ЭВМ диагностических СХЭП масляных каналов главной изоляции трансформаторов с учётом влияния их мощности и класса напряжений;

2. Метод и программа расчёта на ЭВМ диагностических статистических характеристик пробивных напряжений трансформаторного масла в маслопробойнике с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла;

3. Предельные значения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике для трансформаторов 110 кВ различной мощности;

4. Алгоритм диагностирования главной изоляции трансформаторов с применением статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике по результатам его эксплуатационных испытаний;

5. Новая испытательная ячейка, повышающая эффективность определения диагностических характеристик пробивного напряжения масла в маслопробойнике.

Научные и практические результаты работы внедрены в Главном управлении ОАО «ТГК-2» по Ярославской области, в Филиале «Ивановские ПГУ» ОАО «Интер РАО–Электрогенерация», в учебный процесс ИГЭУ.

### **Замечания по диссертации**

1. В дальнейшем целесообразно учесть разброс пробивных напряжений масла силовых маслонаполненных трансформаторов в зависимости от температуры в условиях эксплуатации;

2. В диссертации следовало бы более подробно отметить особенности применения предложенных методов для диагностирования главной изоляции трансформаторов различных классов напряжения;

3. Из полученных в диссертации результатов вытекает важность проведения в дальнейшем исследований по уточнению регламента проведения испытания трансформаторного масла в маслопробойнике;

4. В диссертации следовало бы более чётко выделить диапазон размеров примесных частиц, существенно снижающих пробивное напряжение трансформаторного масла в маслопробойнике.

Отмеченные замечания не изменяют положительной оценки данной диссертационной работы.

### Заключение по диссертации

Диссертация Мельниковой Ольги Сергеевны «Диагностика главной изоляции силовых маслонаполненных электроэнергетических трансформаторов по статистическому критерию электрической прочности масла» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся научно обоснованные разработки более совершенных диагностических методов и технических средств, обеспечивающих повышение эффективности диагностирования главной изоляции действующих силовых трансформаторов, являющихся наиболее распространённым и дорогостоящим элементом электроэнергетических систем.

Диссертация соответствует формуле и области исследования паспорта специальности 05.14.02—«Электрические станции и электроэнергетические системы» по п. 5: «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок», п. 6: «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике», п. 13: «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Диссертация удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Мельникова Ольга Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 —«Электрические станции и электроэнергетические системы».

#### Официальный оппонент

Доктор технических наук,  
заведующий лабораторией диагностики трансформаторов  
ОАО «Научно-технический центр  
Федеральной сетевой компании  
Единой энергетической системы»  
(ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»)  
115201, г. Москва, Каширское шоссе, 22, корп. 3  
Тел. (495)1133172, факс (495)1136900  
e-mail: timashova\_lv@ntc-power.ru

Юрий Николаевич  
Львов



Подпись Ю. Н. Львова заверяю:  
Научный руководитель ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»,  
д.т.н., профессор



Ю.Г. Шакарян

17.11.2015г.

