На правах рукописи

МЕЛЬНИКОВА Ольга Сергеевна

ДИАГНОСТИКА ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО СТАТИСТИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАСЛА

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2015

Работа выполнена на кафедре «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Митькин Юрий Алексеевич**

Официальные оппоненты:

Львов Юрий Николаевич - доктор технических наук, ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы», заведующий лабораторией диагностики трансформаторов

Андреев Дмитрий Александрович - кандидат технических наук, ОАО «Зарубежэнергопроект» (г. Иваново), главный технолог отдела электротехнического и систем управления

Ведущая организация:

Чебоксарский политехнический институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

Защита состоится «18» декабря 2015 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

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

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ http://ispu.ru/

Автореферат разослан «___»_____2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.064.01,
доктор технических наук, доцент

Бушуев
Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В эксплуатации находится большое количество силового трансформаторного оборудования, которое во многом определяет надёжность электроснабжения потребителей, поэтому остро стоит проблема поддержания на требуемом уровне технического состояния трансформаторов в эксплуатации и продления срока их службы.

Значительная часть повреждений силовых трансформаторов приходится на их главную изоляцию маслобарьерного типа. Многочисленными исследованиями установлено, что нарушение электрической прочности этой изоляции происходит в результате пробоя первого масляного канала вблизи обмотки высшего напряжения.

В нормативных документах России и зарубежных стран для диагностирования электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов в качестве диагностического параметра предусмотрено применение среднего пробивного напряжения трансформаторного масла, определяемого по результатам его испытаний в стандартном маслопробойнике. Для обеспечения заданного уровня электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов (ГИСТ) различных напряжений нормативные значения среднего пробивного напряжения масла установлены с учётом классов напряжений трансформаторов.

Увеличение мощности трансформатора при заданном номинальном напряжении приводит к увеличению объёма масла в каналах главной изоляции и снижению их электрической прочности, что обусловлено статистическими закономерностями формирования пробоя трансформаторного масла. Такая тенденция сохраняется и при увеличении номинального напряжения трансформатора. При этом степень снижения электрической прочности масла с увеличением его объёма будет возрастать для масел, имеющих повышенный разброс пробивных напряжений.

Вместе с тем в РД 34.45-51.300-97 «Объёмы и нормы испытаний электрооборудования» не предусмотрен диагностический параметр, отражающий влияние разброса пробивного напряжения масла на статистические характеристики электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов с учётом их мощности.

В большинстве стран имеющиеся стандарты, устанавливающие регламент определения пробивного напряжения электроизоляционных жидкостей в маслопробойнике, не предусматривают определение параметров, характеризующих статистический разброс пробивных напряжений. В России и США введены такие параметры: коэффициент вариации среднего пробивного напряжения (Россия) и критерий статистического постоянства (США). В обоих случаях эти параметры установлены без учёта особенностей работы электроизоляционных жидкостей в высоковольтном электрооборудовании. Так, установленное по ГОСТ 6581-75 предельное значение коэффициента вариации среднего пробивного напряжения в разы превышает соответствующий коэффициент вариации, наблюдаемый для технически чистых минеральных масел.

Решение этой проблемы возможно из рассмотрения диагностической модели главной изоляции трансформаторов с применением статистических методов оценки изменения электрической прочности масла в зависимости от его объёма в главной изоляции трансформаторов, который, в свою очередь, зависит от их мощности и класса напряжения.

При этом важно выбрать вид распределения пробивных напряжений масла. Пробой трансформаторного масла формируется в наиболее слабом месте и характеризуется наличием нижнего предела пробивного напряжения, поэтому физическому смыслу формирования пробоя отвечает третий предельный закон распределения крайних членов выборки – трёхпараметрическое распределение Гнеденко-Вейбулла,

содержащее нижний предел случайной величины. Однако его применение для оценки статистических характеристик электрической прочности (СХЭП) масла сдерживается отсутствием эффективного метода определения параметров распределения по результатам испытаний масла на физических моделях и в маслопробойнике (малая выборка).

Актуальным также является совершенствование испытательной ячейки маслопробойника в целях повышения эффективности определения пробивного напряжения масла как диагностического параметра.

С учётом отмеченных проблем, в данной работе исследования направлены на разработку и внедрение алгоритма диагностирования ГИСТ с применением диагностических статистических параметров, учитывающую влияние мощности и класса напряжения трансформаторов.

Объект исследования – масляные каналы главной изоляции силовых трансформаторов.

Предмет исследования – методы и средства определения технического состояния главной изоляции маслонаполненных силовых трансформаторов с учётом влияния их мощности и класса напряжения по диагностическим статистическим характеристикам электрической прочности масла.

Цель работы – разработка методов и средств расчёта диагностических статистических характеристик электрической прочности (СХЭП) масляных каналов трансформаторов и алгоритма 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.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи:**

1. Анализ изменения общего объёма трансформаторного масла во внутренней изоляции действующих силовых трансформаторов в широком диапазоне их номинальных мощностей и напряжений.

2. Разработка диагностической модели главной изоляции силовых трансформаторов для определения диагностических СХЭП трансформаторного масла с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, позволяющей учитывать:

– влияние объёма масла и неоднородности электрического поля;

– влияние мощности и класса напряжения силовых трансформаторов;

– малый объём экспериментальной выборки при определении диагностических статистических параметров по результатам эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике.

3. Создание базы данных пробивных напряжений трансформаторного масла по результатам эксплуатационных испытаний в маслопробойнике для действующих силовых трансформаторов различной мощности. Анализ традиционных и предложенных диагностических статистических характеристик пробивных напряжений в маслопробойнике для созданного массива данных и исследование их корреляционных связей.

4. Выбор статистического критерия изменчивости пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике как диагностического критерия его электрической прочности и разработка на этой основе алгоритма диагностирования главной изоляции трансформаторов.

5. Разработка испытательной ячейки маслопробойника, повышающей эффективность определения статистических характеристик пробивного напряжения трансформаторного масла как диагностических параметров.

6. Диагностирование главной изоляции действующих силовых трансформаторов по разработанному алгоритму с применением статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике на основе его эксплуатационных испытаний.

7. Разработка алгоритмов и программ расчёта на ЭВМ, реализующих предложенную диагностическую модель главной изоляции трансформаторов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.14.02– Электрические станции и электроэнергетические системы. Работа соответствует паспорту специальности: **в части формулы специальности** – «Научная специальность, объединяющая исследования по … эксплуатации электрических станций, электроэнергетических систем, электрических сетей и систем электроснабжения; … проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения … надежного производства электроэнергии, ее транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией … » – в диссертационном исследовании разработаны в рамках диагностической модели главной изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов методы определения диагностических СХЭП масляных каналов главной изоляции и алгоритм её диагностирования, позволяющие оценивать техническое состояние изоляции с учётом изменения объёма масла в каналах в зависимости от мощности и напряжения силовых трансформаторов по результатам эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике в генерирующих и сетевых компаниях электроэнергетики; **в части области исследования** – пункту 5: «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок» соответствуют результаты, полученные при решении задач по пунктам 1, 3, 4, 5, 6; пункту 6: «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» соответствуют результаты, полученные при решении задач по пункту 2; пункту 13: «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» соответствуют результаты, полученные при решении задач по пункту 7.

Научная новизна работы:

1. Разработана диагностическая модель главной изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов, включающая в себя методы, позволяющие определять СХЭП масла как диагностические параметры с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла и учитывающая:

– влияние объёма масла и неоднородности электрического поля;

– влияние мощности и класса напряжения силовых трансформаторов;

– малый объём экспериментальной выборки пи определении диагностических статистических параметров по результатам эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике.

2. Для диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации на основе анализа результатов выполненного вычислительного эксперимента предложен статистический критерий изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $Ки_{и}=U_0/U_н$ и определены условия выбора его предельных значений $Ки_{и,пр}$ с учётом влияния мощности и класса напряжения трансформаторов.

3. Разработан алгоритм диагностирования главной изоляции трансформаторов по статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $Ки_{и}$. С применением этого алгоритма и результатов эксплуатационных испытаний в маслопробойнике для действующих трансформаторов класса 110 кВ мощностью 2,5–125 МВА определены предельные значения коэффициента изменчивости $Ки_{и,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$, которые уменьшаются при увеличении мощности трансформатора.

4. На основе результатов выполненного диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов по предложенному алгоритму и данным эксплуатационных испытаний масла определена степень соответствия изоляции действующих трансформаторов класса 110 кВ различной мощности предъявляемым требованиям по статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике.

5. Разработана новая испытательная ячейка (патент РФ № 2507524, приоритет от 17.07.12), обеспечивающая повышение эффективности определения диагностических статистических характеристик пробивного напряжения масла в маслопробойнике.

Практическую значимость работы представляют:

1. Разработанный метод и программа расчёта на ЭВМ СХЭП масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов как диагностических параметров с учётом влияния их мощности и класса напряжений.

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

3. Полученные предельные значения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике для трансформаторов 110 кВ различной мощности, предназначенные для диагностики главной изоляции трансформаторов.

4. Разработанный алгоритм диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов с применением статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике и учётом влияния их мощности и класса напряжения по результатам эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике.

5. Новая испытательная ячейка, обеспечивающая повышение эффективности определения диагностических статистических характеристик пробивного напряжения масла в маслопробойнике.

Внедрение. 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.

Методы исследования. В работе применены физические, математические и статистические методы исследования статистических характеристик электрической прочности электроизоляционных жидкостей, методы теории вероятностей и математической статистики, вычислительный эксперимент применительно к диагностированию главной изоляции маслонаполненных трансформаторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Диагностическая модель главной изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов, включающая в себя методы, позволяющие определять СХЭП масла как диагностические параметры с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла и учитывающая:

– влияние объёма масла и неоднородности электрического поля;

– влияние мощности и класса напряжения силовых трансформаторов;

– малый объём экспериментальной выборки пи определении диагностических статистических параметров по результатам эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике.

2. Алгоритм диагностирования главной изоляции трансформаторов по предложенному статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $Ки_ц=U_0/U_н$, позволяющий проводить диагностирование главной

изоляции действующих силовых трансформаторов в эксплуатации с учётом влияния их мощности и класса напряжения.

3. Результаты выполненного диагностирования главной изоляции действующих силовых трансформаторов класса 110 кВ различной мощности по предложенному алгоритму и данным эксплуатационных испытаний масла, позволившие определить степень соответствия изоляции исследуемых трансформаторов предъявляемым требованиям по статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике.

4. Устройство и результаты экспериментального испытания новой испытательная ячейка (патент РФ № 2507524, приоритет от 17.07.12), обеспечивающее повышение эффективности определения диагностических статистических характеристик пробивного напряжения масла в маслопробойнике.

Достоверность результатов работы обеспечивается применением известных физических методов исследования свойств жидких диэлектриков, методов математического и статистического определения характеристик электрической прочности электроизоляционных масел как параметров диагностической модели главной изоляции трансформаторов, прошедших широкую проверку, применением результатов эксплуатационных испытаний, экспериментальных данных других авторов и полученных в работе, совпадением расчётных и экспериментальных результатов.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция – 2010» (СПб., 2010 г.); Международных научно-технических конференциях: «XV Бенардосовские чтения» (Иваново, 2009 г.), «XVI Бенардосовские чтения» (Иваново, 2011 г.), «XVII Бенардосовские чтения» (Иваново, 2013 г.), «XVIII Бенардосовские чтения» (Иваново, 2015 г.); Всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении» (Воронежский государственный технический ун-т, 2009 г.); Региональных научно-технических конференциях студентов и аспирантов: «Энергия 2008» (Иваново, 2008 г.), «Энергия 2009» (Иваново, 2009 г.), «Энергия 2010» (Иваново, 2010 г.), «Энергия 2011» (Иваново, 2011 г.), «Энергия 2013» (Иваново, 2013 г.), «Энергия 2014» (Иваново, 2014 г.), «Энергия 2015» (Иваново, 2015 г.), а также на научно-технических семинарах кафедры ВЭТФ ИГЭУ.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 23 печатных работы, из них: 5 – статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК; 1 – патент РФ на изобретение; 11 – в сборниках трудов Международных и Всероссийских конференций; 6 – публикации в других изданиях.

Личный вклад автора состоит в разработке математического описания методов расчёта СХЭП трансформаторного масла с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, разработке программно-алгоритмического обеспечения, проведении вычислительного эксперимента, в создании базы данных по результатам эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике, проведении научных экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, выборе и обосновании статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике и разработке алгоритма диагностирования главной изоляции трансформаторов по этому критерию, разработке и патентовании «Устройства для определения пробивного напряжения жидких диэлектриков», апробации результатов исследования и подготовке публикаций по выполненной работе.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Общий объём работы состав-

ляет 173 страницы, содержит 51 рис., 25 табл. и 7 приложений. Список литературы состоит из 102 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель, задачи и методы исследования, приведены сведения о научной новизне и практической ценности.

В первой главе представлены результаты анализа имеющихся исследований диагностики главной изоляции силовых трансформаторов по СХЭП трансформаторного масла. Выявлены проблемы и направления их решения. Поставлены задачи данного исследования.

Показано, что основной причиной отказов силовых трансформаторов является снижение электрической прочности внутренней изоляции, причём отмечается повышение их удельной повреждаемости с увеличением срока эксплуатации (уже после 12 – 17 лет), класса напряжения и мощности трансформаторов (работы Б.В. Ванина, Ю.Н. Львова, М.Ю. Львова, А.К. Лоханина, Б.А. Алексеева, В.В. Соколова, В.В. Гурина).

К числу наиболее повреждаемых узлов относится главная изоляция, в которой происходит пробой первого масляного канала вблизи обмотки, который и принимается в качестве критерия нарушения её электрической прочности (работы А.В. Панова, Т.И. Морозовой, А.К. Лоханина, Г.С. Кучинского, В.С. Ларина, В.М. Чорноготского). Повреждения изоляции во многом обусловлены обратимыми факторами (увлажнение, загрязнение и др.), поэтому имеются предпосылки для повышения эффективности диагностики главной изоляции и продолжения эксплуатации трансформаторов.

Создание трансформаторов с повышенными значениями мощности и напряжения приводит к возрастанию их габаритов, в том числе и объёма масла в каналах главной изоляции, что обусловливает снижение их электрической прочности в силу статистических закономерностей развития пробоя масла. Косвенный учёт этого объёма масла в существующих методиках осуществляется введением постоянного поправочного коэффициента. Имеются работы по совершенствованию методов учёта объёмов масла при выборе главной изоляции трансформаторов.

Показано, что влияние мощности трансформаторов на СХЭП масла следует учитывать при диагностировании их главной изоляции в эксплуатации. При этом важно иметь методы определения диагностических СХЭП масла с учётом его объёма в изоляционных каналах действующих трансформаторов, а также алгоритмы диагностирования главной изоляции с применением диагностических СХЭП масел, определяемых на основе результатов их испытаний в маслопробойнике.

Выявлено, что при выборе диагностических СХЭП масла следует исходить из условия их соответствия физическому смыслу формирования пробоя в трансформаторном масле. Показано, что этому условию отвечает третий предельный закон распределения крайних членов выборки – трёхпараметрическое распределение Гнеденко-Вейбулла. Однако его применение для оценки СХЭП масла сдерживается отсутствием эффективного метода определения параметров распределения по результатам испытаний масла с малым числом опытов, что имеет место при эксплуатационных испытаниях по 6 пробоям одного образца масла.

Показано, что установленное предельное значение коэффициента вариации среднего пробивного напряжения в 20% (ГОСТ 6581-75) в разы превышает коэффициент вариации для технически чистых минеральных масел, что означает значительное снижение требований к качеству эксплуатационного масла. По стандарту США ASTM D1816-67 статистический критерий определяется с учётом максимального и

минимального значений пробивных напряжений для данной пробы масла, причём и здесь нормативные параметры установлены без учёта влияния мощности трансформаторов. Выявлена также целесообразность совершенствования испытательной ячейки маслопробойника в целях повышения эффективности определения пробивного напряжения масла как диагностического параметра.

Сформулированы цель и задачи данного исследования.

Во второй главе приведены результаты оценки влияния мощности и класса напряжения действующих силовых трансформаторов на общий объём масла в них. Разработаны методы определения диагностических СХЭП трансформаторного масла с учётом его объёма в изоляционных конструкциях с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла.

В результате выполненной для действующих трансформаторов различных типов оценки изменения общего объёма масла в главной изоляции на основе анализа их паспортных данных при изменении номинальных мощностей в диапазоне 10^6–10^9 ВА и номинальных напряжений – 6–1150 кВ выявлено существенное (до 10–12 раз) возрастание общего объёма масла в трансформаторах всех типов с увеличением их мощности и класса напряжения. Это обусловливает снижение электрической прочности масляных каналов в трансформаторах.

Последовательно рассмотрены методы расчёта диагностических СХЭП масла с учетом особенностей для однородных и неоднородных электрических полей.

В случае однородного электрического поля модель большого объёма трансформаторного масла рассматривается в виде параллельно соединённых одинаковых m элементарных объёмов масла. При этом зависимость вероятности пробоя масла от числа параллельно соединённых элементов масла принимает вид (1). С другой стороны в силу статистической природы формирования предпробивной ситуации пробой масла происходит в наиболее слабом месте при всех объёмах масла, поэтому вид распределения пробивной напряжённости должен оставаться неизменным и соответствовать распределению Гнеденко-Вейбулла. При этом нижний предел пробивной напряжённости трансформаторного масла по физическим соображениям остаётся неизменным для заданного масла. Тогда для произвольного объёма масла распределение пробивной напряжённости запишется в виде (2).

$$F(m,E) = 1 - \exp\left[-m \cdot \left(\frac{E - E_н}{E_{0,1} - E_н}\right)^{\alpha}\right], \quad (1) \qquad F(m,E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E - E_н}{E_{0,m} - E_н}\right)^{\alpha_m}\right]. \quad (2)$$

Здесь $E_{0,1}$, $E_{0,m}$ – пробивные напряжённости соответственно единичного и произвольного по объёму масляных каналов, при которых: $F(E_{0,1})=1-e^{-1}$, $F(E_{0,m}) = 1-e^{-1}$; α, α_m – соответственно безразмерные параметры; $E_н$ – нижний предел пробивной напряжённости.

Вид функции F(m,E) для различных значений m представлен на рис.1. Сдвиг функции распределения пробивной напряжённости масла в область меньших значений при увеличении его объёма обусловлен статистической природой формирования пробоя.

По физическим соображениям выражения (1) и (2) совпадают друг с другом. Тогда из сравнения правых частей этих выражений для точек А и В (рис.1) показано, что при изменении объёма масла (параметра m) распределение пробивных напряжённостей трансформаторного масла заданного качества, имеющего вид распределения Гнеденко-Вейбулла, изменяется только параметр $E_{0,m}$, два других параметра ($E_н$ и α) остаются неизменными.

С учетом этого найдены выражения для определения параметра $E_{0,m}$ (3) и пробивной напряженности $E_{p,m}$ масляных промежутков в высоковольтном оборудовании при заданной вероятности их пробоя $P_з$ (4):

$$E_{0,m} = E_н + \frac{E_{0,m} - E_н}{m^{1/\alpha}}; \quad (3) \qquad E_{p,m} = E_н + (E_{0,1} - E_н) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_з)^{1/\alpha}}{m} \right]. \quad (4)$$

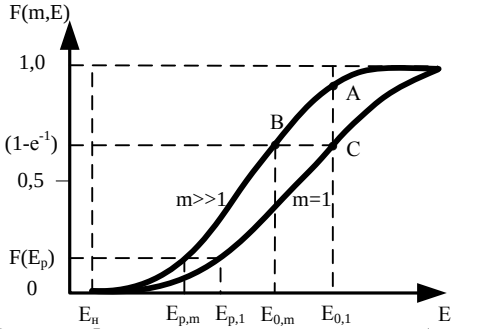

Рис.1. Функции распределения пробивной напряжённости трансформаторного масла при различных его объёмах

Показано, что полученные результаты справедливы при произвольном выборе единичного образца канала масла в пределах обозначенного диапазона его изменения.

Разработаны алгоритм и методика расчёта на ЭВМ диагностических СХЭП масла с применением предложенного метода в электроизоляционных конструкциях с неоднородным электрическим полем. При этом в качестве критерия нарушения электрической прочности масляных промежутков принимается пробой "напряженного объема" масла, расположенного между поверхностями с напряженностями E_{max} и $0{,}9E_{max}$. Выходными расчётными характеристиками являются пробивная напряжённость при напряжённом объёме масла и пробивное напряжение рассматриваемого масляного канала. Для характерных электродных систем цилиндр в цилиндре в соответствии с разработанным алгоритмом получено аналитическое выражение для определения пробивного напряжения масляного канала. Сопоставление результатов расчёта с известными экспериментальными результатами для пробивной напряжённости масла от его объёма для однородного поля и пробивного напряжения от объёма масла в канале для системы коаксиальных цилиндров показало их хорошее соответствие.

В третьей главе представлены разработанный метод расчета диагностических СХЭП масляных каналов главной изоляции трансформаторов с учетом их мощности и класса напряжения, а также результаты выполненного на этой основе вычислительного эксперимента по выявлению диагностических параметров.

В соответствии с предложенной в гл.2 методикой определения диагностических СХЭП трансформаторного масла в безразмерном виде получены выражения для определения диагностических комплексных параметров электрической прочности изоляции: $E_{0,m}/E_{0,1}$ – (5) и $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ – (6).

Для оценки изменения объёма масла в первом канале главной изоляции получено с применением (4) в безразмерном виде выражение (7) для минимальной пробивной напряженности $E_{p,m}$ масляных промежутков в соответствии с распределением Гнеденко–Вейбулла, а также с использованием известных выражений для диаметра стержня магнитопровода и расстояния между обмотками высшего и низшего напряжений трансформатора.

Из выражений (5)–(7) следует, что значения диагностических комплексных параметров электрической прочности масла $E_{0,m}/E_{0,1}$ и $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ определяются

мощностью и классом напряжения трансформатора, а также безразмерными диагностическими параметрами: $E_{0,1}/E_н$, α, $m_к$.

$$\frac{E_{0,m}}{E_{0,1}} = \frac{1+\left(\frac{E_{0,1}}{E_н}-1\right)\cdot\left(m_k\right)^{-1/\alpha}}{\frac{E_{0,1}}{E_н}}; \quad (5) \quad \frac{E_{мк.пр,мин,m}}{E_{мк.пр,мин,1}} = \frac{1+\left(\frac{E_{0,1}}{E_н}-1\right)\cdot\left[\frac{-\ln(1-P_з)}{m_k}\right]^{1/\alpha}}{1+\left(\frac{E_{0,1}}{E_н}-1\right)\cdot\left[-\ln(1-P_з)\right]^{1/\alpha}}. \quad (6)$$

$$m_k = (l_{мк1,ВН}/(l_{мк,Б}\cdot(2\cdot r_{ВН,Б}-l_{мк,Б})))\times(1{,}02\cdot10^{-2}\times$$

$$\times\sqrt[4]{\frac{S_н}{3\cdot U_р}\cdot\left(\frac{k_{из}\cdot U_{расч}/k_{П.Е}}{\left(E_н+(E_{0,1}-E_н)\cdot\left[\frac{-\ln(1-P_з)}{m_k}\right]^{1/\alpha}\right)}+1{,}1\cdot10^{-3}\cdot\sqrt[4]{\frac{S_н}{3}}\right)}+ \quad (7)$$

$$+2\cdot l_{с-НН}+2{,}42\cdot10^{-3}\cdot\sqrt[4]{\frac{S_н}{3}}+\frac{2\cdot k_{из}\cdot U_{расч}/k_{П.Е}}{\left(E_н+(E_{0,1}-E_н)\cdot\left[\frac{-\ln(1-P_з)}{m_k}\right]^{1/\alpha}\right)}-l_{мк1,ВН}),$$

где $m_k=V_{мк1,ВН}/V_{мк,Б}$, $V_{мк1,ВН}$, $V_{мк,Б}$ – соответственно объёмы первого масляного канала изоляции трансформатора и канала базовой модели главной изоляции трансформатора (единичный образец изоляции).

Предложенный метод и разработанный алгоритм расчёта диагностических СХЭП масла в первом канале реализованы в программе MathCad. Выполнены расчёты этих СХЭП масла в первом канале двухобмоточных трёхфазных трансформаторов на 110 кВ при изменении их мощностей в диапазоне 10^5–10^8 ВА.

Анализ полученных результатов показал, что существенное влияние на отношение $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ оказывают мощность трансформатора и отношение $E_{0,1}/E_н$ (рис.2). Наблюдается уменьшение пробивных напряжённостей масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ с возрастанием мощности трансформатора и отношения $E_{0,1}/E_н$, причём влияние $E_{0,1}/E_н$ усиливается для трансформаторов большей мощности.

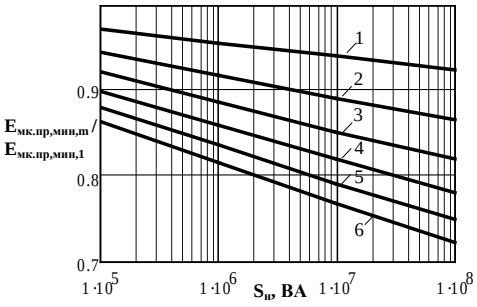

Рис.2. Зависимости относительного значения минимальной пробивной напряжённости масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ от мощности трансформатора для α=2,5 при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_н$:
1, 2, 3, 4, 5, 6 – соответственно для $E_{0,1}/E_н$: 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4

Параметр $E_{0,1}/E_н$, по физической сути представляет собой безразмерный статистический критерий изменчивости электрической прочности исходного

трансформаторного масла $Ки_E=E_{0,1}/E_н$. Область его значений определяется неравенством $Ки_E \geq 1$, при $Ки_E \to 1$ (параметр $E_{0,1}$ приближается к $E_н$) разброс электрической прочности масла стремится к нулю.

Исследование влияния мощности силовых трансформаторов на диагностические СХЭП масла показало, что для оценки технического состояния главной изоляции выбор предельного значения критерия изменчивости электрической прочности исходного трансформаторного масла $Ки_{E,пр}=(E_{0,1}/E_н)_{пр}$ следует производить из условия равенства относительной минимальной пробивной напряжённости $E_{мк.пр.мин,\,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ заданному значению для всего ряда мощностей трансформаторов заданного класса напряжения при α=2,5. В этом случае при выбранном для рассматриваемых условий предельном значении критерия изменчивости $Ки_{E,пр}$ пробивные напряжённости $E_{мк.пр.мин,\,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ при всех других α будут выше заданного значения $E_{мк.пр.мин,\,m}/E_{мк.пр.мин,1}$.

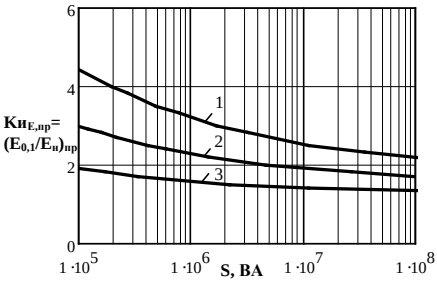

Рис.3. Изменение отношения $E_{0,1}/E_н$ в зависимости от мощности трансформаторов для параметра α=2,5 при заданных постоянных значениях минимальной пробивной напряжённости масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$:
1,2,3 – для $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ соответственно 0,85, 0,9 и 0,95

В соответствии с предложенным методом проведены расчёты, результаты которых представлены на рис.3 в виде зависимости предельных значений статистического критерия изменчивости $Ки_{E,пр}=(E_{0,1}/E_н)_{пр}$ от мощности трансформаторов при заданных постоянных значениях относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$: 0,85, 0,9, 0,95.

Из рис.3 следует, что значения статистического критерия изменчивости $Ки_{E,пр}$ для исходного масла в модели трансформатора уменьшаются с ростом мощности трансформатора, а также с возрастанием допустимой минимальной пробивной напряжённости масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$.

Следовательно, для трансформаторов с большей мощностью значения коэффициента изменчивости $Ки_{E,пр}$ должны быть ниже.

В четвертой главе представлены разработанные метод и технические средства определения диагностических СХЭП эксплуатационного масла при его испытаниях в маслопробойнике.

Определение пробивного напряжения масла в ячейке маслопробойника с эффективной системой его перемешивания. Анализ роли частиц примесей в исходной пробе масла и частиц, образующихся после его пробоя, показал, что в за время выдержки масла 5 мин (ГОСТ 6581-75) после его пробоя из слоя масла удаляются крупные пузырьки газа и науглероженные частицы, однако, в промежутке остаются частицы, снижающие пробивное напряжение масла. Следовательно, важно совершенствовать систему перемешивания масла в испытательной ячейке.

С учетом этого разработана новая испытательная ячейка (рис.4) для маслопробойника (патент на изобретение №2507524), внутри которой горизонтально установлена пропеллерная мешалка, ось которой перпендикулярна оси электродов по линии их симметрии, соединённая с приводом через магнитную полумуфту. Отличительным

признаком предложенной ячейки является формирование затопленной струи, направленной в зазор между электродами параллельно плоскости свободной поверхности жидкого диэлектрика, что исключает образование пузырьков газа и попадание частиц примесей со дна ячейки в промежуток между электродами.

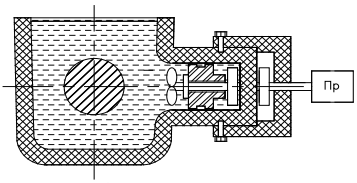

Рис.4. Конструктивное исполнение предложенной испытательной ячейки

При сравнительных испытаниях масла для создания одинаковых условий пробоя масла по этим методикам были разработаны диэлектрическая насадка с пропеллером (ведомая магнитная полумуфта), которая устанавливалась на боковую стенку стандартной ячейки, и блок ведущей магнитной полумуфты с приводом. При испытаниях за основу была принята методика ГОСТ 6581-75, по которой после каждого пробоя масло между электродами перемешивалось при помощи стеклянной палочки. По предложенной методике масло перемешивалось пропеллером.

Результаты испытаний показали, что наблюдается существенное увеличение значений диагностического комплексного параметра $U_0/U_н$ при их перемешивании с применением пропеллера, которое изменяется для исследуемых масел в пределах 1,5–2,2. При этом кратность увеличения параметра $U_0/U_н$ по сравнению с методикой ГОСТ 6581-75 находится в пределах 1,37–1,51. Наблюдается также увеличение коэффициента вариации среднего пробивного напряжения в случае предложенного устройства перемешивания масла по сравнению с традиционной методикой. Однако кратность этого различия значительно меньше – 1,1–1,23. Влияние скорости вращения пропеллера в диапазоне 180 – 310 об/мин с применением предложенного устройства в явном виде не обнаружено.

Полученные результаты можно объяснить тем, что применение предложенной ячейки позволяет более эффективно перемешивать масло в ячейке, обеспечивая тем самым полную смену масла между электродами, что проявляется в снижении нижнего предела пробивного напряжения и возрастании диагностического параметра $U_0/U_н$.

Метод определения диагностических СХЭП трансформаторного масла как параметров трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла для результатов малой экспериментальной выборки применительно к испытаниям масла в маслопробойнике. Для этого случая обосновано применение для оценки параметров распределения метода моментов. При этом по результатам эксперимента определяются моменты, характеризующие заданное распределение: (1) первый начальный момент – математическое ожидание M(U), в качестве которого выступает экспериментально определяемое значение среднего пробивного напряжения $<U_{пр}>$; (2) второй центральный момент – дисперсия пробивного напряжения масла D(U), в качестве которого выступает квадрат экспериментально определяемого значения среднего квадратического отклонение пробивного напряжения масла; (3) третий центральный момент μ_3, в качестве оценки μ_3 выступает экспериментально определяемое значение $\mu_{3,эксп}$. В предельном случае параметры распределения по результатам эксперимента будут определены точно при условии полного совпадения (нулевая погрешность) расчётных и экспериментальных значений для вышеотмеченных моментов распределения.

При определении параметров распределения был проведен специальный анализ связей третьего центрального момента μ_3 с другими параметрами и признаками исследуемого распределения Гнеденко-Вейбулла на основе экспериментальных распределений пробивных напряжений по данным эксплуатационных испытаний в масло-

пробойнике. Показано, что величина и знак μ_3 отражают степень асимметрии распределения и положение моды распределения по отношению к среднему пробивному напряжению. При этом выявлено три характерных случая (рис.5), которые отличаются величиной и знаком коэффициента асимметрии распределения S_k, а также положением моды распределения $U_{м,Sk}$.

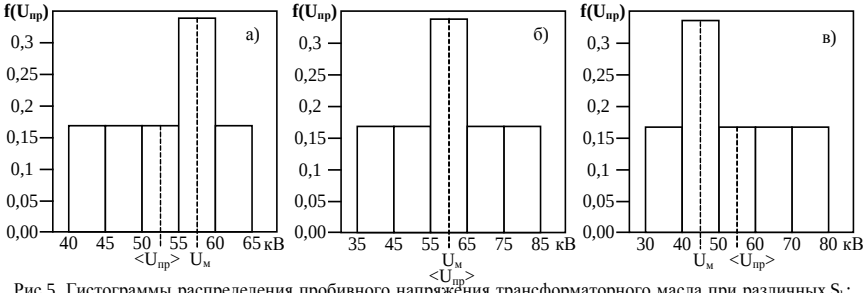

Рис.5. Гистограммы распределения пробивного напряжения трансформаторного масла при различных S_k: а) – $S_k < 0$; б) – $S_k = 0$; в) – $S_k > 0$

На основе анализа полученных результатов обосновано применение в качестве третьего условия для определения параметров распределения равенство теоретического и экспериментального значений для моды распределения. При этом для всех выявленных случаев (рис.5) разработана методика и получены выражения для определения экспериментальной моды распределения.

На этой основе найдены основные уравнения для определения параметров распределения пробивных напряжений:

$$\frac{\alpha}{U_0 - U_н} \cdot \int_{U_н}^{\infty} U \cdot \left(\frac{U - U_н}{U_0 - U_н}\right)^{(\alpha-1)} \times \exp\left[-\left(\frac{U - U_н}{U_0 - U_н}\right)^{\alpha}\right] dU = < U_{пр} > ; \quad (8)$$

$$\frac{\alpha}{U_0 - U_н} \cdot \int_{U_н}^{\infty} (U - < U_{пр} >)^2 \cdot \left(\frac{U - U_н}{U_0 - U_н}\right)^{(\alpha-1)} \times \exp\left[-\left(\frac{U - U_н}{U_0 - U_н}\right)^{\alpha}\right] dU = \sigma^2_{U_{пр}} ; \quad (9)$$

$$U_н + (U_0 - U_н) \cdot (1 - 1/\alpha)^{1/\alpha} = U_{м,S_k} ; \quad (10)$$

$$\begin{cases} U_{м,S_k} = (3 < U_{пр} > + U_0)/4, \quad S_{k,эксп} < 0 ; & (11) \\ U_{м,S_k} = < U_{пр} >, \quad 0 \le S_{k,эксп} \le 0{,}05 ; & (12) \\ U_{м,S_k} = U_{пр,p_{макс}}, \; S_{k,эксп} > 0 . & (13) \end{cases}$$

Здесь $U_{пр,p_{макс}}$ – пробивное напряжение, при котором наблюдается максимальная частость $p_{макс}$.

На основе полученных уравнений разработаны алгоритм и расчетная программа для ЭВМ в среде Borland C++ Builder для определения диагностических параметров распределения Гнеденко-Вейбулла по результатам эксперимента. При этом уравнения (8) и (9) при реализации их в программе преобразованы с применением гамма-функции. Расчетная программа успешно апробирована на большом числе (более 100 проб масла) эксплуатационных данных.

В пятой главе представлены полученные результаты диагностирования главной изоляции действующих силовых трансформаторов по разработанному алгоритму с применением выбранного статистического критерия изменчивости пробивного на-

пряжения масла в маслопробойнике по результатам его эксплуатационных испытаний, а также СХЭП масла и их корреляционные связи.

На основе созданной базы данных пробивных напряжений масла в маслопробойнике по результатам его эксплуатационных испытаний для 74 силовых трансформаторов класса 110 кВ с применением разработанных программ выполнены расчеты традиционных и предложенных СХЭП исследуемых образцов масла. Получены численные значения, эмпирические распределения и математические выражения для корреляционных связей традиционных и предложенных диагностических СХЭП масла.

На основе проведённого анализа изменения статистических характеристик пробивных напряжений эксплуатационного трансформаторного масла в маслопробойнике с применением распределения Гнеденко–Вейбулла и особенностей формирования пробоя масла в модели трансформатора и в маслопробойнике показано, что значение отношения $U_0/U_н$, полученное по результатам испытаний масла в маслопробойнике, близко к отношению параметров $E_{0,1}/E_н$ для исходного масла в модели трансформатора. С учётом этого проведён выбор и обоснование применения диагностических статистических характеристик пробивного напряжения масла в маслопробойнике в виде параметров распределения Гнеденко–Вейбулла U_0 и $U_н$., а также статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике (СКИПН) $Ки_u=U_0/U_н$ как статистического критерия изменчивости его электрической прочности для диагностирования масляных каналов главной изоляции трансформаторов в эксплуатации.

Такой подход открывает возможность определения предельных значений критерия $Ки_{u,пр}$ в соответствии с равенством: $(E_{0,1}/E_н)_{пр}=(U_0/U_н)_{пр}$ ($Ки_{E,пр}=Ки_{u,пр}$), причём выполнение этого условия обусловливает более жёсткие требования к качеству эксплуатационного трансформаторного масла. С учётом этого определены предельные значения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$ для различных мощностей трансформаторов класса напряжения 110 кВ при заданном отношении $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$. Расчётные значения СКИПН масла $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$ имеют тенденцию спада при увеличении мощности трансформаторов и при возрастании допустимой минимальной пробивной напряжённости масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$.

Исследование корреляционных связей статистических характеристик пробивных напряжений эксплуатационных масел также показало, что параметр U_0 по величине близок к среднему пробивному напряжению $<U_{пр}>$ (различие в пределах 3–4 %), поэтому в качестве одного из диагностических параметров следует оставить традиционное среднее пробивное напряжение $<U_{пр}>$, для которого установлены нормативные значения и накоплен большой эксплуатационный опыт.

На основе анализа полученных результатов исследования разработан алгоритм диагностирования главной изоляции трансформаторов с применением статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$, в соответствии с которым масло удовлетворяет предъявляемым требованиям при выполнении следующих условий:

$$Ки_u < Ки_{u,пр}; \quad (14); \quad <U_{пр}> \; > \; <U_{пр}>_{норм}, \quad (15)$$

где $<U_{пр}>_{норм}$ – нормативное значение среднего пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике.

Выполненное диагностирование главной изоляции 34 действующих силовых трансформаторов мощностью 2,5–123 МВА по предложенному статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике и разработанным с его применением алгоритмом диагностирования, а также по традиционному

методу показало, что в случае традиционного метода среднее пробивное напряжение $<U_{пр}>$ масла и его коэффициент вариации $V_{<Uпр>}$ для всех исследуемых образцов удовлетворяют нормативным требованиям. При этом наиболее вероятные значения коэффициента вариации $V_{<Uпр>}$ находятся в диапазоне 4,71–6,33%, а наибольшие его значения наблюдаются с вероятностью 5% в диапазоне (7,95–8,76)%, что значительно меньше его нормативного по ГОСТ 6581-75 значения 20%. Это указывает на завышенный нормативный запас по коэффициенту вариации $V_{<Uпр>}$, в результате чего отсутствует мотивация повышения СХЭП масла в силовых трансформаторах в эксплуатации.

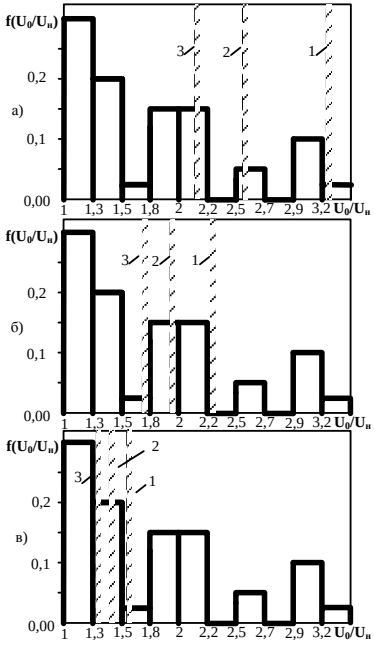

Рис.6. Сопоставление значений статистического критерия изменчивости $Ки_u=U_0/U_н$, наблюдаемых при эксплуатационных испытаниях, с предельными значениями $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр,,}$ которые определены по разработанному методу при заданных уровнях минимальной электрической прочности масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ для различных мощностей трансформаторов:
а), б), в) – значения $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ соответственно 0,85; 0,90; 0,95;
1, 2, 3 – значения $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр.}$ для мощностей трансформаторов соответственно: 10^6, 10^7, 10^8 ВА

Выполненное сопоставление значений статистического критерия изменчивости $Ки_u=U_0/U_н$, наблюдаемых при обработке результатов испытаний эксплуатационного трансформаторного масла в маслопробойнике для действующих трансформаторов, с требованиями к предельным значениям критерия изменчивости $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$, которые определяются по разработанному методу при заданных уровнях минимальной электрической прочности масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ для различных мощностей действующих силовых трансформаторов класса 110 кВ (рис.6) показало, что эксплуатационное масло в этих трансформаторах имеет области критерия изменчивости $Ки_u$, удовлетворяющих условию $Ки_u<Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$, причём с ростом мощности трансформаторов эта область становится более узкой при всех заданных уровнях минимальной электрической прочности масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$. Отмечается, что предельные значения статистического критерия изменчивости $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$ уменьшаются при увеличении мощности трансформатора.

Экспериментальные значения СКИПН масла в маслопробойнике $Ки_u=U_0/U_н$ находятся в пределах 1,0–3,5. Наибольшая вероятность появления этого критерия наблюдается при значениях 1,0–1,5 в диапазоне пробивных напряжений 65–80 кВ. По мере возрастания значения критерия $Ки_u$ вероятность его появления уменьшается.

Анализ результатов сопоставления предельных значений $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$ при различных значениях $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ и экспериментальных значений $Ки_u=U_0/U_н$ для действующих силовых трансформаторов различной мощности (рис.7) показал, что наибольший процент трансформаторов, удовлетворяющих предъявляе-

мым требованиям по критерию статистической изменчивости $Ки_u < Ки_{u,пр}$ имеет место при $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}=0,85$ и составляет 94,1%.

При возрастании значений $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ доля трансформаторов, для которых наблюдается соответствие требованиям по статистическому критерию изменчивости $Ки_u < Ки_{u,пр}$, уменьшается, причём в число этих трансформаторов попадают трансформаторы различных значений мощностей (рис.7).

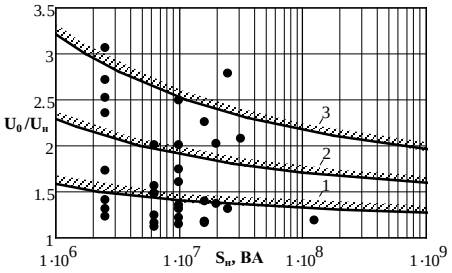

Рис.7. Зависимости статистического критерия изменчивости $Ки_u$ трансформаторного масла от мощности силовых трансформаторов:
1, 2, 3 – предельные значения критерия изменчивости $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$ при $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ соответственно 0,85; 0,90; 0,95;
• – экспериментальные значения $Ки_u=U_0/U_н$

Выявленные образцы силовых трансформаторов, для которых наблюдались завышенные значения статистического критерия изменчивости масла $Ки_u$ ($Ки_u > Ки_{u,пр}$) обусловлены в первую очередь повышенным содержанием крупных частиц и влаги, поэтому масло в таких трансформаторах целесообразно подвергнуть дополнительной очистке.

Анализ полученных результатов показывает, что диагностирование главной изоляции силовых трансформаторов класса напряжения 110 кВ по предложенному алгоритму с применением статистического критерия изменчивости пробивного напряжения эксплуатационного трансформаторного масла в маслопробойнике позволяет в отличие от традиционного метода диагностирования более полно оценивать техническое состояние главной изоляции трансформаторов с учётом их мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе выполнен комплекс исследований, содержащий совокупность научных и методических положений по разработке диагностической модели главной изоляции силовых трансформаторов для определения диагностических СХЭП трансформаторного масла, алгоритма диагностирования изоляции с применением выбранного статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике на основе его эксплуатационных испытаний, которые обеспечивают повышение эффективности диагностирования главной изоляции действующих силовых маслонаполненных электроэнергетических трансформаторов в эксплуатации.

В рамках проведённых исследований получены следующие результаты:

1. Для решения задач диагностики электрической прочности главной изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов разработана диагностическая модель, позволяющая определять диагностические СХЭП трансформаторного масла с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, и учитывающая:

– влияние объёма масла и неоднородности электрического поля;

– влияние мощности и класса напряжения трансформаторов;

– малый объём экспериментальной выборки при определении диагностических статистических параметров по результатам эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике.

2. На основе анализа результатов выполненного вычислительного эксперимента обосновано применение для диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации статистического критерии изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $Ки_u=U_0/U_н$. Определены предельные значения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$, которые уменьшаются при увеличении мощности трансформатора. С применением этого критерия разработан алгоритм диагностирования главной изоляции трансформаторов на основе результатов эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике. Показано, что масло удовлетворяет предъявляемым требованиям при выполнении следующих условий: $Ки_u<Ки_{u,пр}$; $<U_{пр}> > <U_{пр}>_{норм}$.

3. С применением разработанного алгоритма диагностирования и результатов эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике для действующих трансформаторов класса 110 кВ мощностью 2,5–125 МВА показано, что предельные значения критерия изменчивости $Ки_{u,пр}=(U_0/U_н)_{пр}$ уменьшаются при увеличении мощности трансформатора. При этом их большая часть находится в области наблюдаемых при эксплуатационных испытаниях значений критерия изменчивости $Ки_u$, удовлетворяющих условию $Ки_u<Ки_{u,пр}$, причём с ростом мощности трансформаторов эта область становится более узкой.

Наибольший процент трансформаторов, удовлетворяющих предъявляемым требованиям по коэффициенту изменчивости $Ки_u$, имеет место при $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}=0,85$ и составляет 94,1%. При возрастании значений $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ доля трансформаторов, для которых наблюдается соответствие требованиям по коэффициенту изменчивости $Ки_u$, уменьшается.

4. Анализ результатов исследования диагностических статистических характеристик пробивного напряжения эксплуатационного трансформаторного масла в маслопробойнике показал, что:

– значения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $Ки_u=U_0/U_н$ находятся в пределах 1,11–3,40. Наибольшая вероятность появления этого критерия наблюдается при значениях 1,0–1,5 в диапазоне пробивных напряжений 65–80 кВ. По мере возрастания значения критерия $Ки_u$ вероятность его появления уменьшается;

– между диагностическими параметрами U_0 и средним пробивным напряжения $<U_{пр}>$ имеет место линейная корреляция. Различие этих параметров находится в пределах 3–4%;

– наиболее вероятные значения коэффициента вариации масла $V_{<Uпр>}$ находятся в диапазоне 4,71–6,33%, а его наибольшие значения не превышают 9%, что значительно меньше его нормативного по ГОСТ 6581-75 значения 20%.

5. На основе проведённого сопоставления результатов диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов по предложенному и традиционному методам с применением данных эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике для действующих трансформаторов класса 110 кВ и результатов внедрения полученных результатов исследования показана возможность и определены перспективы практического использования разработанных методов и алгоритма диагностирования изоляции с применением статистического критерия изменчивости пробивного напряжения эксплуатационного трансформаторного масла в маслопробойнике для повышения эффективности диагностирования электрической прочности главной изоляции действующих силовых трансформаторов с учётом влияния их мощности и класса напряжения.

6. Разработана и апробирована новая испытательная ячейка (патент РФ № 2507524, приоритет от 17.07.12), повышающая эффективность определения статисти-

ческих характеристик пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике как диагностических параметров;

7. Разработаны и внедрены алгоритмы и программы расчёта на ЭВМ, реализующие предложенные методы расчёта диагностических статистических параметров для диагностирования главной изоляции трансформаторов по результатам эксплуатационных испытаний трансформаторного масла.

8. Разработанная диагностическая модель и алгоритм диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов с применением статистического критерия изменчивости пробивного напряжения эксплуатационного трансформаторного масла в маслопробойнике опираются на базовые принципы выбора и диагностирования главной изоляции, поэтому они могут использоваться для определения предельных значений статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла $Ки_{и,пр}$ и применения предложенного алгоритма диагностирования по аналогии с исследованными трансформаторами класса 110 кВ для диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов других классов напряжения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Митькин Ю.А., **Мельникова О.С.** Определение статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла с учётом его объёма в трансформаторах//Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 2. – С.21–25.

2. Митькин Ю.А., **Мельникова О.С.** Влияние мощности и напряжения трансформаторов на статистические характеристики электрической прочности масляных каналов главной изоляции//Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С.17 – 21.

3. **Мельникова О.С.** Влияние мощности и номинального напряжения действующих силовых трансформаторов на объём масла в главной изоляции//Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С.14–18.

4. Митькин Ю.А., **Мельникова О.С.** Метод определения статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла с применением распределения Гнеденко-Вейбулла по результатам малой экспериментальной выборки//Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 2. – С.18 – 25.

5. **Мельникова О.С.** Выбор и расчёт статистических характеристик электрической прочности масляных каналов главной изоляции трансформаторов для повышения эффективности её диагностики//Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 3. – С.38–44.

Патенты

6. Патент РФ № 2507524. МПК G01R 31/12. Устройство для определения пробивного напряжения жидких диэлектриков/Митькин Ю.А., **Мельникова О.С.**, заявитель и патентообладатель Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – №2012130700/28. заявл. 17.07.2012, Опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5, – 6 с.: ил.

Публикации в других изданиях

7. Степанова Ю.М., **Мельникова О.С.,** Вихарев А.В., Митькин Ю.А., Сидоров С.Г. Составление базы данных по электроизоляционным материалам//Энергия 2008. Электроэнергетика: мат-лы регион.науч.-техн. конф. студ. и асп. – Иваново. – 2008. – Т.3. – С.99–101.

8. Вихарев А.В., Прусаков М.В., **Мельникова О.С.** Оценка изменения статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла по результатам эксплуатационных испытаний//Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез.докл. Междунар. науч.-техн. конф. (XV Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2009. – Т.1. – С.52.

9. Митькин Ю.А., Вихарев А.В., **Мельникова О.С.** Прогнозирование ресурса высоковольтной изоляции маслонаполненного оборудования по результатам эксплуатационного мониторинга//Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез.докл. Междунар. науч.-техн. конф. (XV Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2009. – Т.1. – С.54.

10. **Мельникова О.С.,** Вихарев А.В., Меры повреждаемости силовых высоковольтных маслонаполненных трансформаторов//Энергия 2009. Электроэнергетика: мат-лы регион.науч.-техн. конф. студ. и асп. – Иваново. – 2009. – Т.3. – С154–156.

11. Вихарев А.В., **Мельникова О.С.** Прогнозирование изменения параметров изоляции маслонаполненного оборудования по результатам эксплуатационного мониторинга//Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: труды Всероссийской

конференции: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический ун-т» – Воронеж. – 2009. – С.99-100.

12. **Мельникова О.С.**, Костерин А.В., Митькин Ю.А. Анализ повреждаемости технических подсистем силовых трансформаторов 35-110 кВ//Энергия 2010. Электроэнергетика: мат-лы регион.науч.-техн. конф. студ. и асп. – Иваново, 2010. – Т.3. – С.206–209.

13. Митькин Ю.А., Вихарев А.В., **Мельникова О.С.**, Воробьев В.Ф. Изменение параметров изоляции маслонаполненного оборудования в эксплуатации//Электрическая изоляция – 2010: сборник науч. трудов пятой Междунар. науч.-техн. конф. – СПб.:из-во Политехн. ун-та. – 2010 – С.200 – 201.

14. **Мельникова О.С.** Анализ влияния влагосодержания трансформаторного масла на электрофизические характеристики изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации//Состояние и перспективы развития электротехнологии: сборник науч. трудов Междунар. науч.-техн. конф. (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2011. – Т.1. – С.83–85.

15. **Мельникова О.С.**, Тарутина Л.С., Митькин Ю.А. Особенности влияния технических параметров силовых трансформаторов на электрическую прочность жидкой изоляции//Состояние и перспективы развития электротехнологии: сборник науч. трудов Междунар. науч.-техн. конф. (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2011. – Т.1. – С.86-88.

16. Тарутина Л.С., **Мельникова О.С.,** Митькин Ю.А. Изменение объема масла в действующих трансформаторах в зависимости от их мощности и номинального напряжения//Энергия 2011. Электроэнергетика: мат-лы шестой регион.науч.-техн. конф. студ. и асп. – Иваново. – 2011. – Т.3. – С.176–179.

17. **Мельникова О.С.**, Митькин Ю.А. Оценка роли механических частиц при пробое трансформаторного масла в испытательной ячейке//Состояние и перспективы развития электротехнологии: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2013. – Т.1. – С.70-73.

18. **Мельникова О.С.,** Митькин Ю.А. Поведение частиц, образующихся при пробое трансформаторного масла в ячейке маслопробойника//Состояние и перспективы развития электротехнологии: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2013. – Т.1. – С.73–76.

19. **Мельникова О.С.** Анализ эффективности традиционных методик определения пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике//Состояние и перспективы развития электротехнологии: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2013. – Т.1. – С.76–79.

20. Бубнов И.В., Саблин А.Е. **Мельникова О.С.** Статистические характеристики электрической прочности трансформаторного масла для маслонаполненного оборудования 110 кВ//ЭНЕРГИЯ 2014. Электроэнергетика: девятая Междунар.науч.-техн. конф. студ.асп. и мол.уч. В 7 т.– Иваново. – 2014. – Т.3. Ч.2 – С.189–192.

21. Шуркина А.Ю., **Мельникова О.С.** Изменение **с**татистических характеристик пробивных напряжений трансформаторного масла по результатам эксплуатационных испытаний//ЭНЕРГИЯ 2015. Электроэнергетика: десятая Междунар.науч.-техн. конф. студ.асп. и мол.уч. В 7 т. – Иваново. – 2015. – Т.3. – С.286–287.

22. **Мельникова О.С.**, Гачина В.А. Определение статистических характеристик пробивных напряжений эксплуатационного трансформаторного масла по результатам испытаний в маслопробойнике//Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2015. – Т.1. – С.113–116.

23. **Мельникова О.С.**, Митькин Ю.А. Статистические характеристики пробивных напряжений эксплуатационного трансформаторного масла для силовых трансформаторов различной мощности//Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2015. – Т.1. – С.116–120.

МЕЛЬНИКОВА Ольга Сергеевна

ДИАГНОСТИКА ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО СТАТИСТИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАСЛА

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 13.10.15 Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 114

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.