

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина"

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор Ю.А. Митькин

Иваново 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ МАСЛОПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАСЛА	14
1.1. Анализ повреждаемости внутренней изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации	14
1.2. Оценка эффективности имеющихся методов и средств диагностики главной изоляции по статистическим характеристикам электрической прочности трансформаторного масла.....	18
1.3. Постановка задачи исследования	29
ГЛАВА 2. СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С УЧЁТОМ ЕГО ОБЪЁМА	33
2.1. Изменение общего объёма масла в действующих силовых трансформаторах в зависимости от их номинальных мощностей и напряжений.....	33
2.2. Определение диагностических характеристик электрической прочности масла с учётом его объёма с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла.....	40
2.3. Расчёт диагностических статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла с учётом его объёма в характерных изоляционных конструкциях по результатам эксперимента	50
2.4. Выводы по главе 2	57

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАСЛЯНЫХ КАНАЛОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ИХ МОЩНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ.....	59
3.1. Разработка метода расчёта диагностических статистических характеристик электрической прочности масла в первом канале трансформаторов.....	59
3.2. Изменение диагностических статистических характеристик электрической прочности масла в первом канале трансформаторов.....	68
3.3. Выводы по главе 3	78
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ЕГО ИСПЫТАНИЯХ В МАСЛОПРОБОЙНИКЕ.....	80
4.1. Повышение эффективности определения пробивного напряжения трансформаторного масла как диагностического параметра в испытательной ячейке маслопробойника.....	80
4.2. Применение трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла для определения диагностических параметров пробивных напряжений трансформаторного масла в маслопробойнике	99
4.3. Выводы по главе 4	115
ГЛАВА 5. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО СТАТИСТИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАСЛА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ В МАСЛОПРОБОЙНИКЕ	118

5.1. Определение статистических характеристик пробивных напряжений масла и их корреляционных связей по результатам его эксплуатационных испытаний.....	118
5.2. Выбор и обоснование применения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике как критерия изменчивости его электрической прочности и разработка алгоритма диагностирования главной изоляции трансформаторов.....	128
5.3. Диагностирование главной изоляции трансформаторов по статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике по результатам его эксплуатационных испытаний	134
5.4. Выводы по главе 5	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	164
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	166
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	167
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	168
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	169
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	170
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	172

ВВЕДЕНИЕ

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 маслонеполненных 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 при 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 $K_{и_0} = U_0/U_n$ и определены условия выбора его предельных значений $K_{и_0,пр}$ с учётом влияния мощности и класса напряжения трансформаторов.

3. Разработан алгоритм диагностирования главной изоляции трансформаторов по статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $K_{и_0}$. 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 $K_{и_0,пр} = (U_0/U_n)_{пр}$, 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 при 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 $K_{и_ч} = U_0/U_n$, 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 испытательной ячейки (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 составляет 173 страницы, содержит 51 рис., 25 табл. и 7 приложений. Список литературы состоит из 102 наименований.

ГЛАВА 1

ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАСЛА

1.1. Анализ повреждаемости внутренней изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации

Надежность работы электрических сетей, электростанций и энергосистем во многом определяется техническим состоянием силовых трансформаторов, входящих в состав основного оборудования. В эксплуатации важно не допустить возникновения дефектов в узлах трансформаторов, которые со временем могут перейти в повреждение оборудования. Возможные повреждения трансформаторов обуславливают как ухудшение электроснабжения потребителей, так и крупные аварии [1, 2, 3, 4].

Проводятся исследования [5, 6, 7, 8] для создания методов испытаний и оценки технического состояния электрооборудования, в том числе и с применением современных компьютерных технологий [9, 10], направленных на повышение эффективности эксплуатации силового высоковольтного оборудования.

В работах [11, 12, 13, 14] показано, что основной причиной отказов маслонаполненного оборудования является снижение электрической прочности внутренней изоляции. При ограниченных возможностях замены оборудования актуальным становится вопрос о разработке новых методов по поддержанию эксплуатационной надёжности силовых трансформаторов [9, 15, 16, 17, 18].

При решении этих задач важно проанализировать основные проблемы, возникающие при эксплуатации внутренней изоляции трансформаторов.

Анализ эксплуатационных данных по повреждаемости силовых трансформаторов [10] показал, что наблюдается повышение их удельной повреждаемости с увеличением срока эксплуатации (табл. 1.1).

Из табл. 1.1 также следует, что отмечается возрастание повреждаемости трансформаторов с ростом класса напряжения, причём эта тенденция сохраняется при всех временах их эксплуатации.

Таблица 1.1

**Повреждаемость трансформаторов в зависимости от срока эксплуатации
и наибольшего напряжения [10]**

Срок эксплуатации, годы	Повреждаемость (%) при наибольшем напряжении:	
	100 – 300 кВ	300 – 700 кВ
0 – 5	1,7	1,9
> 5 – 10	1,9	2,5
> 10 – 20	2,2	3,2

Изменение качества изоляции и трансформаторного масла в процессе эксплуатации силовых трансформаторов подтверждается также и результатами ряда исследователей [19, 20, 21, 22, 23].

В эксплуатации наблюдается также изменение ежегодной повреждаемости силовых трансформаторов в зависимости от их мощности [24] (табл. 1.2).

Таблица 1.2

**Повреждаемость силовых трансформаторов на 100 единиц для различных номинальных
напряжений и мощностей по состоянию в 1995 г. [24]**

Номинальное напряжение трансформаторов, кВ	Номинальная мощность, МВА	
	10-80	более 80
110-150	0.77	3.11
220	1.08	2.47
400-500		7.8

Из табл. 1.2 следует, что повреждаемость силовых трансформаторов напряжением 110-150 кВ и 220 кВ существенно возрастает с увеличением их номинальной мощности. В [24] также отмечается возрастание повреждаемости мощных трансформаторов класса напряжения 400-500 кВ.

К числу наиболее повреждаемых узлов трансформаторов относится главная

изоляция, на которую приходится 12 – 13% повреждений [11, 13, 25, 26, 27]. Нарушение электрической прочности маслобарьерной главной изоляции (рис.1.1) происходит в результате пробоя (перекрытия) первого масляного канала вблизи обмотки высшего напряжения [28, 29, 30]. Это обусловлено тем, что в маслобарьерной изоляции наибольшая напряжённость электрического поля наблюдается в масляном канале, так как его диэлектрическая проницаемость меньше, чем для твёрдой изоляции (электротехнические картон и бумага) [31, 32, 33]. Кроме того, электрическая прочность трансформаторного масла существенно меньше твёрдой изоляции [34, 35].

Пробой масляного канала представляет собой частичный разряд (ЧР) интенсивностью порядка 10^{-8} Кл и более. Такая интенсивность ЧР приводит к необратимым повреждениям твердой изоляции в виде черных ветвистых побегов [28, 36, 37]. В силу этого в качестве критерия нарушения электрической прочности принимается пробой масляного канала [28, 38].

В аналитической статье [13] отмечается, что увеличение повреждаемости трансформаторного оборудования наблюдается уже после 12 – 17 лет эксплуатации, причём повреждения главной изоляции обусловлены обратимыми факторами: увлажнением, загрязнением и образованием продуктов старения масла. На этой основе делается вывод, что имеются предпосылки для продолжения эксплуатации около 85% парка трансформаторов, по меньшей мере, до 40 лет.

Таким образом, приведённые выше данные о повреждаемости внутренней изоляции силовых трансформаторов свидетельствуют о том, что повреждения главной изоляции происходит как в период нормативного срока эксплуатации трансформатора, так и за его пределами.

Такое положение обусловлено тем, что имеются определённые недоработки при создании изоляционных конструкций при проектировании, а также при эксплуатации трансформаторов.

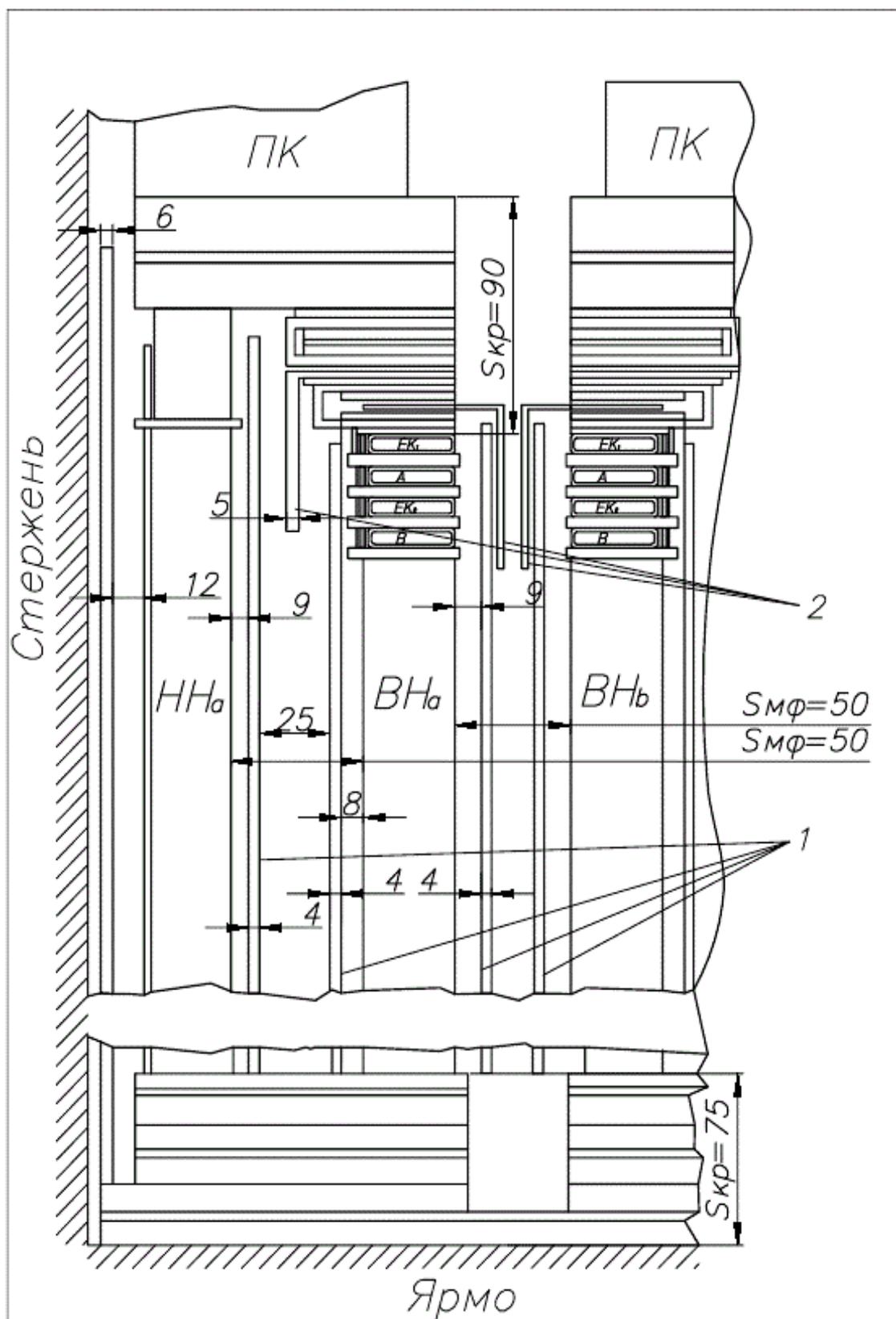


Рис. 1.1. Главная изоляция двухобмоточного трансформатора 110 кВ с вводом на краю обмотки: $НН_a$, $ВН_a$ – обмотки низшего и высшего напряжения фазы А; $ВН_b$ – обмотка высшего напряжения фазы В; ПК – заземленное прессующее кольцо; $ЕК_1$ и $ЕК_2$ – емкостные кольца; А и В – катушки входной зоны; 1 – барьеры из электрокартона; 2 – угловые шайбы

Аналогичный вывод сделан в [13, с.13], где отмечается, что концепция функциональной диагностики «...требует понимания конструкции оборудования и информацию о предшествующих режимах».

В этих условиях важно исследовать состояние вопроса о повышении эффективности диагностики главной изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации по электрической прочности с учётом влияния их мощности и класса напряжения.

1.2. Оценка эффективности имеющихся методов и средств диагностики главной изоляции по статистическим характеристикам электрической прочности трансформаторного масла

Статистические характеристики электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов как диагностические параметры. СИГРЭ предложило модель диагностики [13], основанную на представлениях [34] о влиянии воды, примесей и продуктов старения масла на снижение его электрической прочности. При этом одним из основных методов оценки влияния этих факторов на снижение электрической прочности масла называется метод определения пробивного напряжения масла в маслопробойнике.

Кроме примесей на электрическую прочность масла оказывают влияние и конструкционные факторы. Экспериментальными исследованиями электрической прочности масляных каналов изоляции на моделях изоляции трансформаторов, число которых выбирается не менее 10 для каждого участка изоляции [29, 30, 39], получены зависимости средней пробивной и минимальной пробивной напряженности при вероятности пробоя 0,05 от ширины первого масляного канала при различных электрических воздействиях [40]. На рис. 1.2 по данным [40, с.447] представлено изменение этих пробивных напряжённостей при одноминутном воздействии напряжения промышленной частоты. При этом

наблюдается уменьшение пробивной напряжённости с увеличением ширины канала масла. Эту зависимость предложено аппроксимировать эмпирическими формулами [41, 42, 43, 44]:

$$E_{\text{мк,пр}} = A/l_{\text{мк}}^n, \quad (1.1)$$

$$E_{\text{мк,пр}} = B + C/l_{\text{мк}}^{0.5}, \quad (1.2)$$

где A , B , C , n – эмпирические коэффициенты, определяемые из эксперимента на моделях узлов главной изоляции трансформаторов для различных видов воздействующих электрических напряжений; $l_{\text{мк}}$ – ширина масляного канала.

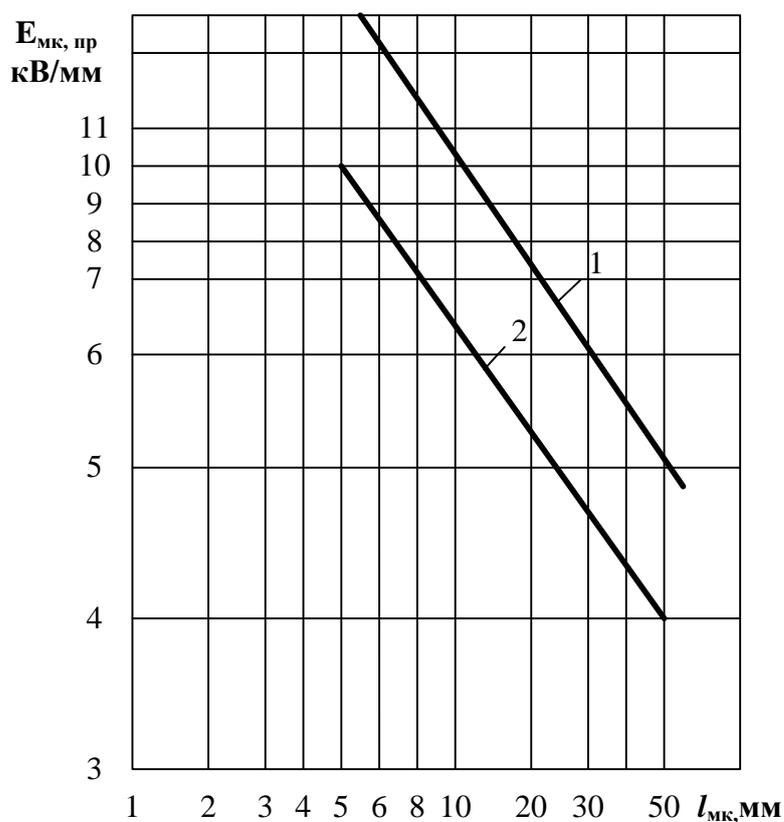


Рис. 1.2. Зависимости средней пробивной (1) и минимальной пробивной при вероятности пробоя 0,05 (2) напряжённостей электрического поля от ширины масляного канала

В узком диапазоне изменения ширины канала эти формулы дают близкие результаты. Однако они не позволяют определять нижний предел пробивной напряжённости масла.

Вместе с тем пробивная напряжённость масла зависит не только от расстояния между электродами, но и от их площади [45, 46, 47].

Всё это указывает на то, что в качестве обобщённого влияющего фактора выступает объём масла, увеличение которого приводит к уменьшению электрической прочности на 28% при напряжении 50Гц и на 39% при импульсах 1/50 мкс. Наибольшее процентное снижение прочности масла отмечается для масел, содержащих повышенное количество примесей [40, 45]. Наличие частиц примесей обуславливает статистический характер формирования пробоя масла [48, 49, 50]. Следовательно, снижение пробивной прочности с увеличением объёма масла определяется статистическими закономерностями развития пробоя масла.

На этой основе в работе [47] дано обоснование зависимости электрической прочности от объёма масла с применением теории экстремальных значений [51], которую называют теорией «слабых мест». В этой модели крупное изоляционное тело представляется в виде m одинаковых элементарных объёмов.

С учётом этого вероятность пробоя большого объёма масла при воздействии напряжения U найдётся по формуле [40, с.159]:

$$F(m, U) = 1 - [1 - F(1, U)]^m, \quad (1.3)$$

где $F(1, U)$ – вероятность пробоя единичного объёма.

Тогда с увеличением объёма масла возрастает вероятность попадания элемента с низкой электрической прочностью, что обуславливает снижение прочности масла заданного объёма.

В настоящее время создаются маслonaполненные силовые трансформаторы [29, 30, 51, 52, 53] с улучшенными технико-экономическими показателями и повышенными номинальными значениями мощности и напряжения. Увеличение мощности трансформатора при заданном номинальном напряжении влечет за собой увеличение диаметра стержня магнитопровода, что приводит к возрастанию габаритов электроизоляционной конструкции внутри бака трансформатора [53, 54]. Такая тенденция сохраняется и при увеличении номинального напряжения трансформатора [39, 55]. В свою очередь это обуславливает увеличение объёма трансформаторного масла в каналах главной изоляции [41, 56].

Косвенный учёт объёма масла на его электрическую прочность в существующих методиках выбора главной изоляции трансформаторов осуществляется введением постоянного поправочного коэффициента [28].

Необходимость учёта влияния объёма масла на его электрическую прочность обсуждается при анализе эффективности действующих отечественных [55, 57] и зарубежных методик выбора главной изоляции трансформаторов [55, 56].

Обсуждаемая проблема приобретает важное значение для трансформаторов, находящихся в эксплуатации [58, 59]. Актуальность этого вопроса подтверждается и тем, что в нормативных документах по эксплуатации силовых трансформаторов [60] не предусмотрены диагностические параметры, отражающие влияние мощности трансформаторов на электрическую прочность масла.

Таким образом, возрастание мощности трансформатора приводит к увеличению объёма масла в каналах главной изоляции, что обуславливает снижение их электрической прочности. Эту закономерность следует учитывать при выборе эксплуатационных нормативных статистических характеристик трансформаторного масла для диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации. Этот эффект необходимо учитывать и при анализе характеристик главной изоляции при возрастании номинальных напряжений трансформаторов.

Оценка традиционного диагностирования главной изоляции по результатам контроля электрической прочности трансформаторного масла в эксплуатации. В нормативных документах России [60] и зарубежных стран [61] 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.

При этом учтено, что с ростом номинального напряжения повышаются требования к изоляции электрооборудования [25, 62, 63, 64]. Это обусловлено

тем, что при переходе на более высокие ступени номинального напряжения в значительной мере возрастают габариты, масса и стоимость трансформаторов. Для эффективного решения этих вопросов на практике уменьшают изоляционные расстояния, что приводит к повышению рабочих напряжённостей электрического поля. Для обеспечения заданного уровня электрической прочности изоляции трансформатора её качество соответственно повышается.

С учётом этого в нормативном документе [60] пробивные напряжения трансформаторного масла в стандартном маслопробойнике установлены с учётом класса номинального напряжения (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Пробивные напряжения эксплуатационного трансформаторного масла для электрооборудования различных классов напряжения, кВ [60]

Категория электрооборудования	Масло после заливки в электрооборудование
до 15 кВ включительно	20
до 35 кВ включительно	25
от 60 до 150 кВ включительно	35
от 220 до 500 кВ включительно	45
750 кВ	55

Вместе с тем в [60] 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 [61, 65] имеющиеся стандарты, устанавливающие регламент определения пробивного напряжения электроизоляционных жидкостей в маслопробойнике, не предусматривают определение параметров, характеризующих статистический разброс пробивных напряжений. В России [66] и США [67] 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.

При определении статистических характеристик пробивных напряжений трансформаторного масла в маслопробойнике по ГОСТ 6581-75 предельное значение коэффициента вариации среднего пробивного напряжения по этому стандарту установлено 20%. Однако в этом случае коэффициент вариации пробивного напряжения от его среднего значения при числе пробоев в опыте $n = 6$ [66] составляет 48,99%, что существенно больше соответствующих значений коэффициента вариации пробивного напряжения от его среднего значения для технически чистых минеральных масел, которые достигают 10 – 15% [34, с.306; 40, с.153].

Здесь следует учесть, что повышенный разброс пробивных напряжений трансформаторного масла обуславливает возрастание вероятности пробоя масляных каналов главной изоляции трансформаторов при меньших значениях воздействующего напряжения.

Такое положение фактически означает значительное снижение требований к качеству эксплуатационного трансформаторного масла и не стимулирует эксплуатационный персонал к повышению его качества.

В зарубежной практике интерес представляет стандарт США [67], по которому в качестве статистической характеристики масла предусмотрено определение значения разности между максимальным U_{\max} и минимальным U_{\min} пробивными напряжениями для данной пробы масла, умноженной на три. Полученный результат должен быть меньше минимального пробивного напряжения. То есть, должно соблюдаться условие:

$$3 \cdot (U_{\max} - U_{\min}) < U_{\min} \quad (1.4)$$

Таким образом, нормативными документами ГОСТ 6581-75 и стандартом ASTM D1816-67 (1971, США) [67] не предусматриваются нормативные СХЭП масла, учитывающие влияние мощности силовых трансформаторов.

Вместе с тем эти вопросы приобретают всё большее значение при эксплуатации современных силовых трансформаторов, в которых изготовители трансформаторов стремятся изоляционные конструкции выбирать с учётом

статистической природы формирования пробоя в трансформаторном масле [55, 56].

Особенности определения статистических характеристик электрической прочности масла как диагностических параметров. Здесь важным является обоснованный выбор функции распределения пробивных напряжений единичного образца $F(1,U)$. В некоторых случаях [68, с.572] для аппроксимации зависимости $F(1,U)$ принимается интегральная функция нормального закона распределения случайной величины. Однако при увеличении m зависимость $F(m,U)$ сдвигается в область наименьших значений, а при больших величинах m смещается в область отрицательных значений пробивных напряжений, что противоречит физическому смыслу [69]. В других работах [47, 70, с.147; 71] показано, что тот же недостаток проявляется и в случае применения первого закона распределения крайних членов выборки – двойного показательного закона [72, 73].

Одновременно с этим в работах [74, 75, 76] успешно применяется при пересчёте пробивных напряжений с малых образцов на большие третий предельный закон распределения крайних членов выборки [72], который ограничен слева. Это обусловлено тем, что пробой возникает в наиболее слабом месте, где формируются более лёгкие условия для его развития [77, 78]. Следовательно, пробивные напряжения (или пробивные напряжённости электрического поля) отражают распределение крайних членов выборки. Кроме того, пробивное напряжение имеет ограничение слева – нижний предел пробивного напряжения [70, 79, 80]. Всё это указывает на то, что физическому смыслу формирования пробоя в трансформаторном масле отвечает третий предельный закон распределения крайних членов выборки [72].

В прикладных работах, в том числе и при определении электрической прочности трансформаторного масла [58, 81, 82], это распределение известно как распределение Гнеденко-Вейбулла [72, с.335]:

$$F(U) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^\alpha \right], \quad (1.5)$$

где U_0 – равно величине пробивного напряжения, при котором $F(U_0) = 1 - e^{-1}$; U_n – нижний предел пробивного напряжения; α – безразмерный параметр.

Для определения СХЭП различных объёмов масла важно знать методы пересчёта результатов испытаний с исходного (единичного) объёма на произвольный объём масла с учётом применения распределения Гнеденко-Вейбулла. В таком направлении получены результаты для случая двухпараметрического закона распределения [81, с.446 – 447], для которого нижний предел пробивного напряжения принимался равным нулю. Однако такой подход противоречит физическому смыслу.

В связи с этим имеется необходимость в разработке метода пересчёта результатов испытаний с заданного объёма на произвольный объём масла при применении трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла.

В свою очередь для успешного применения этого метода при решении прикладных задач важно знать приемлемые методы определения трёх параметров распределения Гнеденко-Вейбулла по результатам экспериментальных данных для единичного объёма масла.

Наличие трёх параметров распределения обуславливает трудности их определения по результатам эксперимента, поэтому в некоторых случаях принимаются упрощения, например, параметр U_n принимается равным нулю [81], а U_0 приближённо определяется по экспериментальной функции распределения.

При более полном анализе этого вопроса необходимо выделить отдельно случаи большой [83, с.292] ($n > 30-40$) и малой [84, с.124] ($n \sim 10$) экспериментальных выборок.

В случае большой выборки параметры распределения трёхпараметрического распределения успешно находятся компьютерными методами с применением метода наименьших квадратов [58].

Сложнее обстоит дело при малой выборке экспериментальных данных, когда применение метода наименьших квадратов не даёт приемлемых результатов [85].

В другом случае [82] принимаются допущения о принадлежности экспериментальных значений наименьшего пробивного напряжения и 50-процентного пробивного напряжения теоретической функции распределения, а степень близости теоретической функции распределения экспериментальным данным оценивается с применением метода наименьших квадратов. Однако такая методика не позволяет производить расчёты при различных сочетаниях параметров распределений, которые наблюдаются в исследованиях на моделях и при эксплуатационных испытаниях трансформаторного масла.

С учётом этого возникает необходимость в разработке более совершенного метода определения параметров трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, свободного от вышеотмеченных допущений и недостатков, и применения его в целях определения СХЭП эксплуатационных трансформаторных масел как диагностических параметров.

Проблемы выбора статистического критерия электрической прочности масла как обобщённого диагностического параметра. Оценивая состояние диагностирования главной изоляции по статистическим характеристикам трансформаторного масла, можно отметить, что в настоящее время отсутствует статистический критерий электрической прочности (СКЭП) масла, учитывающий влияние на статистические характеристики электрической прочности масляных каналов главной изоляции трансформаторов их мощности и класса напряжения.

Решение данной проблемы возможно на основе системного подхода, включающего в себя создание диагностической модели главной изоляции, позволяющей определять СХЭП масла и их изменение в зависимости от мощности и класса напряжения силовых трансформаторов. Важно провести анализ полученных при этом СХЭП и оценить наиболее информативные из них, в том числе и безразмерные комплексы, включающие эти статистические характеристики, и на этой основе обосновать выбор СКЭП масла. При этом нужно учесть, что, как отмечалось выше, определение СХЭП проб масла из трансформаторов определяются по результатам испытаний масла в стандартном маслопробойнике.

Для проверки корректности выбранных решений важно изучить данные по пробивным напряжениям трансформаторного масла на основе результатов эксплуатационных испытаний в маслопробойнике. При этом необходимо создать базы данных по пробивным напряжениям трансформаторного масла на основе результатов эксплуатационных испытаний в маслопробойнике для действующих силовых трансформаторов различной мощности. Здесь следует отметить, что в специальной научно-технической литературе мало уделяется внимания анализу результатов статистических характеристик пробивных напряжений эксплуатационных трансформаторных масел в маслопробойнике. В силу этого важно провести такой анализ и на этой основе выявить величины и диапазоны изменения статистических характеристик пробивных напряжений эксплуатационных трансформаторных масел в маслопробойнике и выявить корреляционные связи предлагаемых и традиционных характеристик.

В конечном итоге необходимо разработать методику диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов и провести её проверку с применением результатов эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике для серии трансформаторов различной мощности.

Анализ имеющихся средств диагностирования электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации. В качестве средства диагностирования главной изоляции трансформаторов в нашей стране в эксплуатации применяется стандартный маслопробойник в соответствии с ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81) [66]. Маслопробойник представляет собой внешнее средство диагностирования, так как он выполнен конструктивно отдельно от объекта (трансформатора). Однако физические процессы при формировании пробоя в масле в маслопробойнике происходят аналогично пробоям в масляных каналах главной изоляции трансформаторов. Пробивные напряжения в маслопробойнике отражают влияние различных примесей в масле.

В силу важности этого метода диагностирования электрической прочности главной изоляции трансформаторов различные страны разработали

государственные стандарты по определению пробивного напряжения масла в маслопробойнике [61, 65, 66, 67].

Отбор пробы масла осуществляется в соответствии со стандартом из действующего оборудования. Испытание проводится с помощью специально оборудованных аппаратов и стандартной измерительной ячейки с объемом масла 0,4 литра, по 6 пробам одного образца масла.

По результатам испытаний одной пробы проводится обработка результатов по следующим характеристикам: среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\langle U_{пр} \rangle$, коэффициент вариации среднего пробивного напряжения.

Если коэффициент вариации не превышает 20 %, а среднее значение пробивного напряжения превышает среднее нормированное значение пробивного напряжения для данного вида оборудования [60], качество трансформаторного масла следует считать удовлетворительным.

В целом стандарты [61, 65, 66, 67] отличаются друг от друга по конструкции испытательной ячейки, регламенту определения пробивного напряжения в маслопробойнике и принятым оценкам статистических характеристик пробивного напряжения. Это указывает на то, что отсутствует достаточное обоснование при выборе этих основополагающих параметров и регламентов, что снижает эффективность диагностирования электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации.

Особенно большие расхождения наблюдаются при выборе способов перемешивания масла в ячейке.

На актуальность совершенствования нормативных документов отмечается в решении XVI Международной конференции «Силовые и распределительные трансформаторы и реакторы. Системы диагностики» [86]: «Актуальна разработка новых и адаптация к новым условиям существующих национальных стандартов по высоковольтному электротехническому оборудованию с учётом требований системной надёжности».

На необходимость «... расширить номенклатуру контролируемых характеристик трансформаторного масла ...» указывается в [87].

Обсуждаются вопросы по выработке рекомендаций для нормативных СХЭП масла в трансформаторах с учётом вероятностной природы его пробоя [88]. Эти вопросы здесь также рассматриваются без учёта влияния мощности трансформаторов.

С учётом этого важно провести специальное исследование по выявлению направлений совершенствования измерительной ячейки для маслопробойника в целях повышения эффективности определения пробивного напряжения масла в маслопробойнике как диагностического параметра.

1.3. Постановка задачи исследования

Анализ особенностей режимов работы главной изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов, условий её эксплуатации и диагностирования по статистическим характеристикам электрической прочности масла показал, что 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.

При этом в [60] 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. Введёны такие параметры в России и США, причём их нормативные значения установлены без учёта особенностей работы электроизоляционных жидкостей в высоковольтном электрооборудовании.

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.

На основе проведённого выше анализа поставлена **цель работы**, заключающаяся в разработке методов и средств расчёта статистических характеристик электрической прочности масляных каналов трансформаторов и методики 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 масла в маслопробойнике 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.

ГЛАВА 2

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С УЧЁТОМ ЕГО ОБЪЁМА

2.1. Изменение общего объёма масла в действующих силовых трансформаторах в зависимости от их номинальных мощностей и напряжений

В данной главе в соответствии с поставленной задачей (глава 1) по разработке диагностической модели главной изоляции силовых трансформаторов с применением статистических методов расчёта контролируемых диагностических параметров разработан метод расчёта СХЭП масла с учётом трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, позволяющий учитывать влияние объёма масла и неоднородности электрического поля.

Вначале выполнено исследование изменение общего объёма масла в действующих трансформаторах и автотрансформаторах различных типов в зависимости от их номинальных напряжений и мощностей [89].

На основе анализа нормативной базы данных [90] определены мощности трансформаторов, на которые они разрабатываются, а также классификация трансформаторов по габаритам с учётом их мощности и номинального напряжения (табл. 2.1). Из табл. 2.1 следует, что имеет место широкий диапазон изменения мощности трансформаторов, в том числе и для одного заданного класса напряжения.

Для действующих трансформаторов оценка изменения общих объёмов масла в главной изоляции произведена на основе анализа паспортных данных этих аппаратов в широком диапазоне изменения их технических параметров [91]:

диапазон изменения номинальных мощностей 1000 – 1000000 кВА, номинальных напряжений – 6 – 1150 кВ.

Таблица 2.1

Классификация силовых трансформаторов по габаритам

Габарит трансформатора	Мощность, кВА	Напряжение, кВ
I-1 I-2	До 20 25...100	До 10
II-1 II-2	160...250 400...1000	До 10
III-1 III-2 III-3	До 1000 1600...2500 4000...6300	Более 10 до 35
IV-1, IV-2	10000...32000 Более 32000	До 35
V-1 V-2	До 16000 25000...32000	110
VI-1 VI-2 VI-3	40000...63000 До 63000 До 63000	110 150 220...330
VII-1 VII-2	80000...200000 80000...200000	110 150
VIII-1 VIII-2	Более 200000 Независимо от мощности	220...330 Более 330

Полученная база данных включает в себя массу трансформаторного масла в каждом силовом трансформаторе. На основе этого с учётом плотности трансформаторного масла найден объём масла в каждом трансформаторе. В качестве иллюстрации в табл. 2.2 представлено изменение объёма трансформаторного масла для различных типов трансформаторов на номинальное напряжение 110 кВ.

Из табл. 2.2 следует, что с возрастанием мощности трансформаторов различных типов наблюдается увеличение общего объёма масла в этих трансформаторах.

Эта тенденция отчётливо проявляется на представленных ниже (рис. 2.1 ÷ 2.7) зависимостях общего объёма масла от мощности трансформаторов при различных заданных номинальных напряжениях для трансформаторов (рис. 2.1 ÷ 2.5) и автотрансформаторов (рис. 2.6 ÷ 2.7).

**Изменение общего объёма масла для различных мощностей трансформаторов на
напряжение 110 кВ**

Тип	V_M, M^3
ТМН-2500/110 У1	5,56
ТМ-6300/110 У1	4,33
ТМН-6300/110 У1	10
ТМТН-6300/110	17,1
ТДН-10000/110	13,1
ТДТН-16000/110	23,33
ТДТН-16000/110	13,97
ТДН-16000/110 У1	17,89
ТРДНФ-16000/25000/110 У1	18,89
ТДТН-25000/110	26,22
ТРДНС-25000/110 У1	18,56
ТДН-25000/110 У1	18,56
ТДЦН-25000/110 У1	18,89
ТДТН-40000/110	30,78
ТРДНС-40000/110 У1	21,33
ТДН-40000/110 У1	21,22
ТДТНЖ-40000/110 У1	25,89
ТДТНЖУ-40000/110 У1	25,89
ТРДНФ-40000/63000/110 У1	20,67
ТДТН-63000/110	41,1
ТДН-63000/110 У1	26,89
ТРДНМ-63000/100000/110У1	23,78
ТРДЦНМ-63000/100000/110 У1	26,94
ТДЦТН-80000/110	31,11
ТДТН-80000/110	42,44
ТРДН-80000/110	22,22
ТДН-80000/110 У1	26,67
ТРДЦН-80000/110 У1	26,22
ТРДЦН-125000/110	33,33

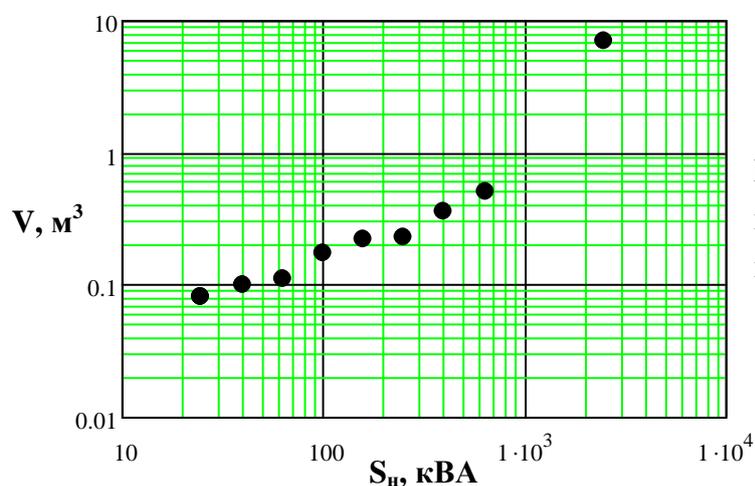


Рис. 2.1. Зависимость объёма масла в трансформаторе от его мощности при номинальном напряжении 6 кВ

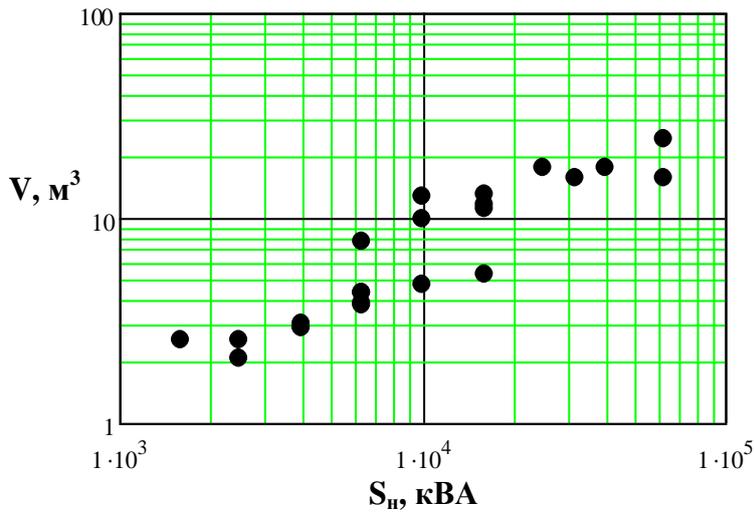


Рис. 2.2. Зависимость объёма масла в трансформаторе от его мощности при номинальном напряжении 35 кВ

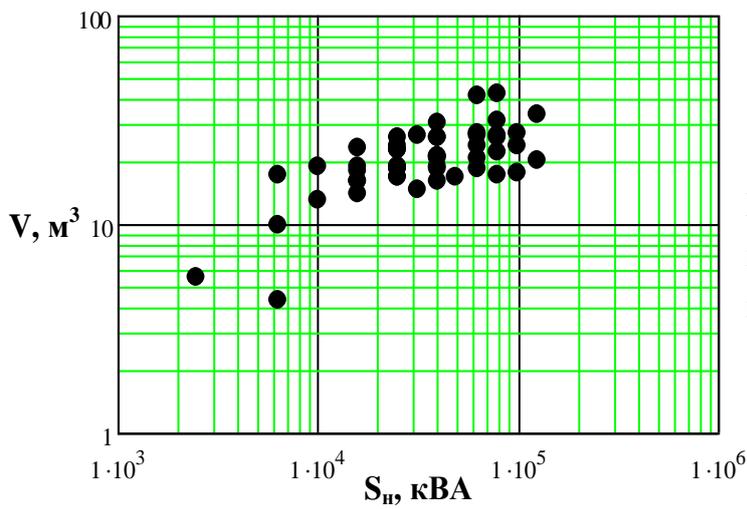


Рис. 2.3. Зависимость объёма масла в трансформаторе от его мощности при номинальном напряжении 110 кВ

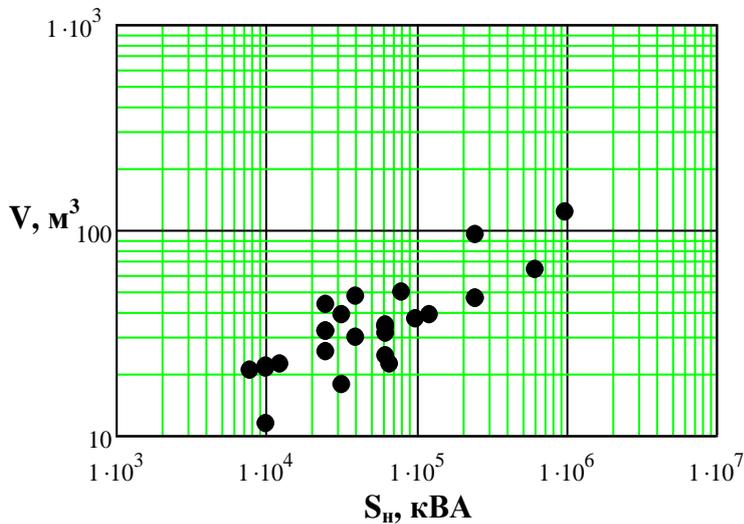


Рис. 2.4. Зависимость объёма масла в трансформаторе от его мощности при номинальном напряжении 220 кВ

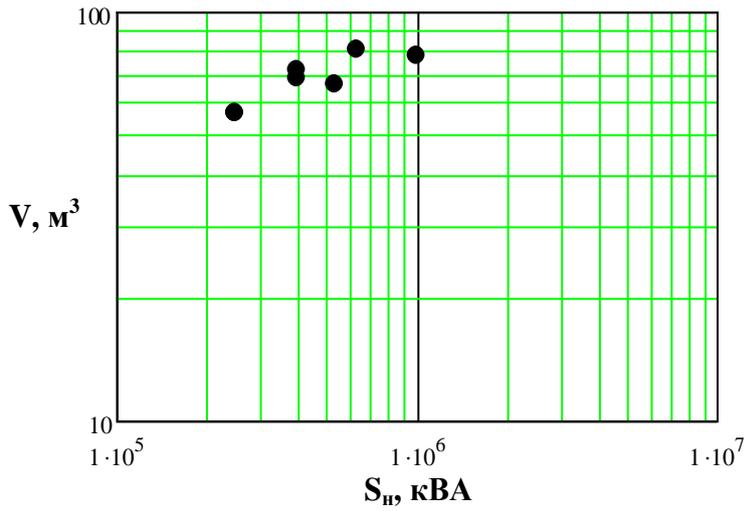


Рис. 2.5. Зависимость объёма масла в трансформаторе от его мощности при номинальном напряжении 500 кВ

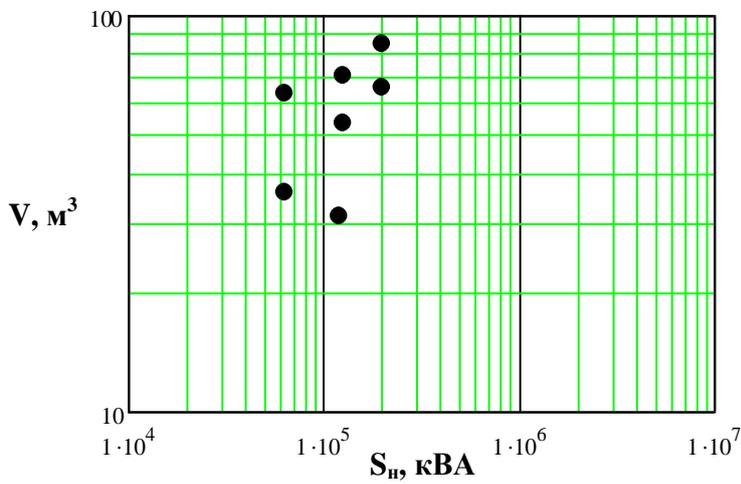


Рис. 2.6. Зависимость объёма масла в автотрансформаторе от его мощности при номинальном напряжении 220 кВ

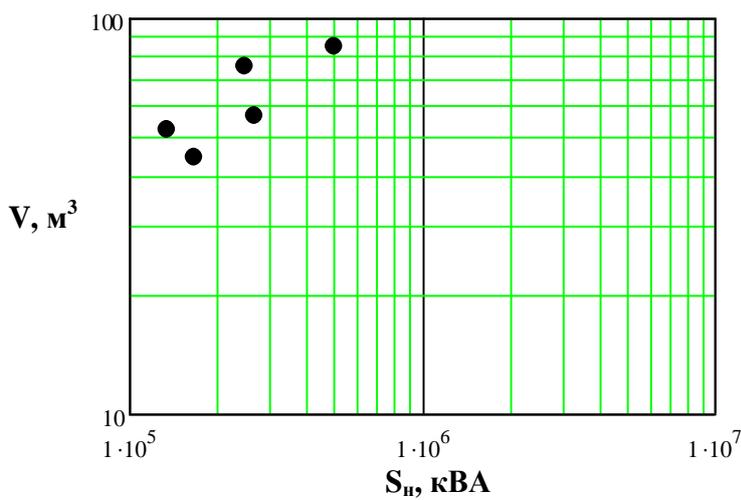


Рис. 2.7. Зависимость объёма масла в автотрансформаторе от его мощности при номинальном напряжении 500 кВ

Аналогично наблюдается возрастание общего объёма масла от напряжения трансформаторов при заданной их мощности (рис. 2.8÷2.11).

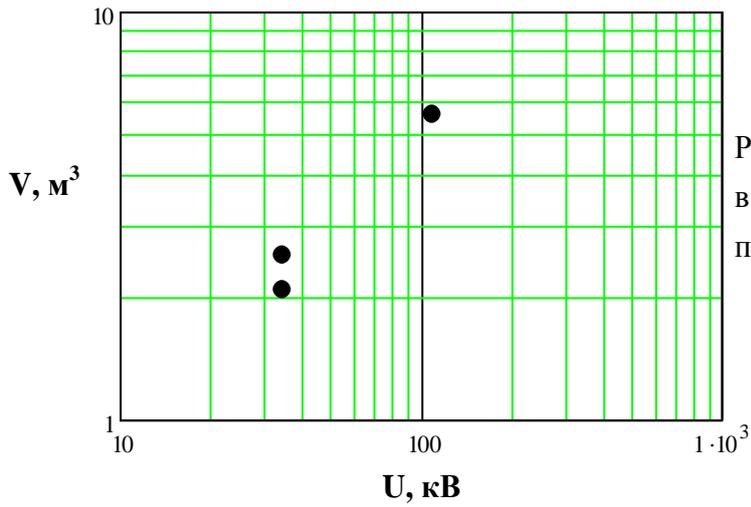


Рис. 2.8. Зависимость объёма масла в трансформаторе от его напряжения при заданной мощности 2500 кВА

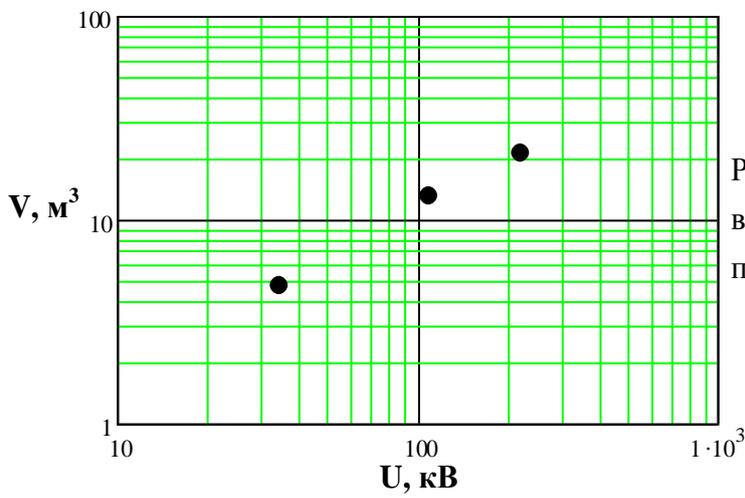


Рис. 2.9. Зависимость объёма масла в трансформаторе от его напряжения при заданной мощности 10000 кВА

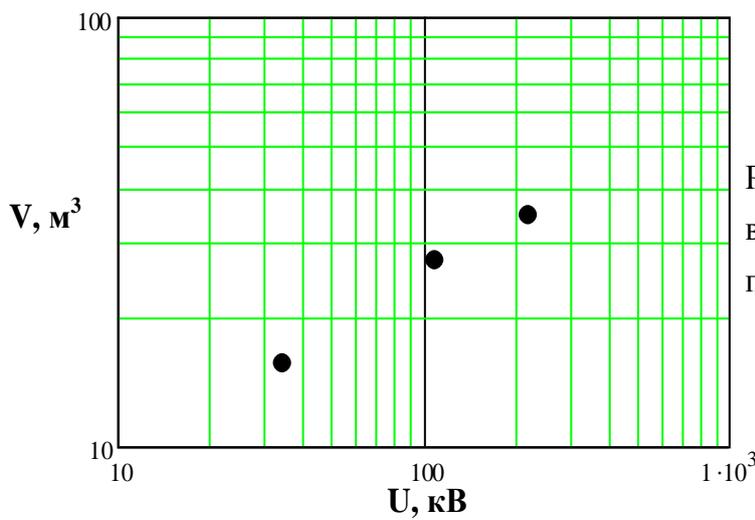


Рис. 2.10. Зависимость объёма масла в трансформаторе от его напряжения при заданной мощности 63000 кВА

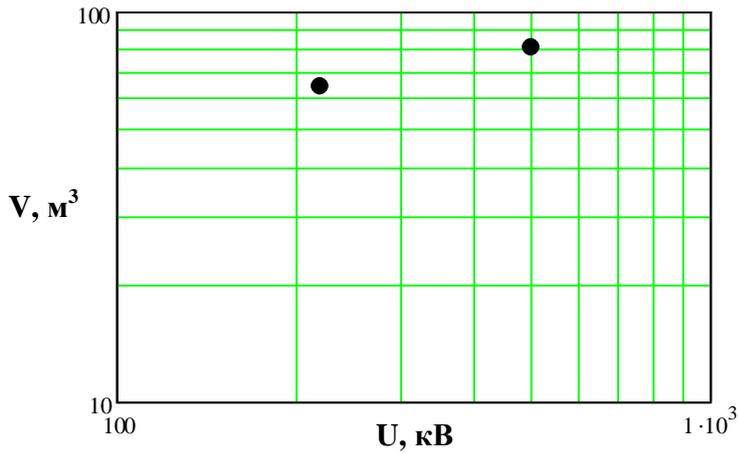


Рис. 2.11. Зависимость объема масла в трансформаторе от его напряжения при заданной мощности 630000 кВА

Анализ результатов выполненных расчётов и построенных графиков позволил сделать выводы о том, что с увеличением мощности трансформатора в пределах исследуемых диапазонов при заданном напряжении возрастает общий объём масла в трансформаторе. Кратность этого изменения объёма масла в трансформаторах представлена в табл. 2.3. При заданной мощности трансформатора значения кратности возрастания объёма масла с увеличением класса напряжения приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.3

Изменение кратности общего объёма масла с ростом мощности трансформаторов

Класс напряжения, кВ	Кратность возрастания объёма масла
35	11,6
110	9,8
220	10,7
500	1,4

Таблица 2.4

Изменение кратности общего объёма масла с ростом класса напряжения трансформаторов

Мощность трансформаторов, кВА	Кратность возрастания объёма масла
63000	2,6
80000	2,9
125000	3,5

Приведённые результаты исследования показывают существенное возрастание общего объёма трансформаторного масла в действующих силовых трансформаторах с увеличением их мощности. Так, при классах напряжения 35 –

220 кВ при возрастании мощности трансформаторов кратность увеличения общего объёма масла в них достигает 10 – 12 (табл. 2.3).

Возрастание кратности увеличения общего объёма масла с увеличением класса напряжения действующих трансформаторов при заданной их мощности достигает 2,6 – 3,5 (табл. 2.4).

Это обуславливает, как отмечалось в главе 1, снижение электрической прочности масляных каналов в трансформаторах.

С учётом этого важно разработать метод расчёта СХЭП масла, учитывающий его объём.

2.2. Определение диагностических характеристик электрической прочности масла с учётом его объёма с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла

Методы расчёта характеристик электрической прочности масла имеют свои особенности для электрических полей с различной степенью неоднородности. В силу этого последовательно рассмотрены методы расчёта СХЭП масла для однородных и неоднородных электрических полей.

Однородные электрические поля. Модель большого объёма трансформаторного масла рассматривается в виде параллельно соединённых одинаковых m элементарных (единичных) объёмов масла. При этом распределение электрической прочности единичного объёма представляется в виде трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла (1.5), которое было рассмотрено в главе 1. Тогда зависимость вероятности пробоя масла от числа параллельно соединённых элементов масла (от объёма масла) в соответствии с (1.3) принимает вид:

$$F(m,E) = 1 - \exp \left[-m \cdot \left(\frac{E - E_H}{E_{0,1} - E_H} \right)^\alpha \right], \quad (2.1)$$

где $E_{0,1}$ – величина пробивной напряжённости единичного масляного канала, при которой $F(E_{0,1})=1-e^{-1}$; E_H – нижний предел пробивной напряжённости; α – безразмерный параметр.

Вид функции $F(m,E)$ для различных значений m представлен на рис.2.1.

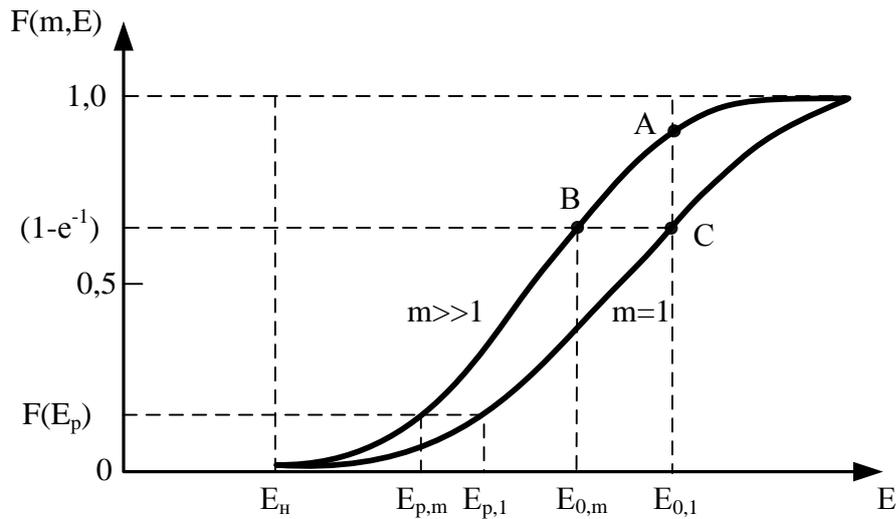


Рис. 2.12. Функции распределения пробивной напряжённости трансформаторного масла при различных его объёмах

Сдвиг функции распределения пробивной напряжённости масла в область меньших значений при увеличении его объёма (рис. 2.12) обусловлен статистической природой формирования пробоя. При возрастании объёма масла увеличивается количество примесей, участвующих в формировании предпробивной ситуации, что приводит к возрастанию вероятности возникновения пробоя и соответственно к уменьшению пробивной напряжённости масла.

Здесь важно учесть, что пробой формируется 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 качества масла.

Тогда для произвольного объёма масла распределение пробивной напряжённости запишется в виде:

$$F(m, E) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E - E_H}{E_{0,m} - E_H} \right)^{\alpha_m} \right], \quad (2.2)$$

где $E_{0,m}$ – пробивная напряжённость масляного канала, при которой $F(E_{0,m}) = 1 - e^{-1}$; α_m – безразмерный параметр для заданного значения m .

Далее важно установить изменение других СХЭП масла ($E_{0,m}$ и α_m) при изменении его объёма.

При этом учитывается, что по физическим соображениям выражения (2.1) и (2.2) совпадают друг с другом. Тогда из сравнения правых частей выражений (2.1) и (2.2) для точки А (рис.2.12) при $E = E_{0,1}$ имеем:

$$1 - \exp(-m) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E_{0,1} - E_H}{E_{0,m} - E_H} \right)^{\alpha_m} \right]. \quad (2.3)$$

Отсюда получаем:

$$m = \left(\frac{E_{0,1} - E_H}{E_{0,m} - E_H} \right)^{\alpha_m}. \quad (2.4)$$

Аналогично для точки В (рис.2.12) при $E = E_{0,m}$ с учётом выражений (2.1) и (2.2) записывается равенство в виде:

$$1 - \exp \left[- m \left(\frac{E_{0,m} - E_H}{E_{0,1} - E_H} \right)^{\alpha_1} \right] = 1 - \exp(-1). \quad (2.5)$$

В результате из (2.5) имеем:

$$m = \left(\frac{E_{0,1} - E_H}{E_{0,m} - E_H} \right)^{\alpha_1}. \quad (2.6)$$

С учётом выражений (2.4) и (2.6) записывается тождество:

$$\left(\frac{E_{0,1} - E_n}{E_{0,m} - E_n} \right)^{\alpha_m} = \left(\frac{E_{0,1} - E_n}{E_{0,m} - E_n} \right)^{\alpha_1}. \quad (2.7)$$

Отсюда следует, что данное выражение (2.7) будет тождеством при $\alpha_m = \alpha_1$.

Таким образом, 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_n и α) остаются неизменными.

Тогда выражение (2.2) для распределения пробивной напряжённости при произвольном объёме масла примет вид:

$$F(m, E) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E - E_n}{E_{0,m} - E_n} \right)^{\alpha} \right]. \quad (2.8)$$

В свою очередь вместо выражений (2.4) и (2.6) для m запишется общее выражение:

$$m = \left(\frac{E_{0,1} - E_n}{E_{0,m} - E_n} \right)^{\alpha}. \quad (2.9)$$

Из (2.9) найдётся выражение для определения параметра $E_{0,m}$:

$$E_{0,m} = E_n + \frac{E_{0,1} - E_n}{m^{1/\alpha}}. \quad (2.10)$$

Полученное выражение (2.10) в отличие от эмпирических формул (1.1) и (1.2) отражает физический смысл влияния объёма трансформаторного масла и его качества на пробивную напряжённость. Кроме того, по сравнению с рассмотренными выше методиками, предложенный метод позволяет оценить нижний предел пробивной напряжённости масла.

При расчётах электрической прочности масляных промежутков в высоковольтном маслонаполненном оборудовании важно знать изменение пробивной напряженности E_p при заданной вероятности пробоя P_3 в зависимости от объёма масла.

В этом случае выражение (2.1) примет вид:

$$F(m, E_p) = P_3 = 1 - \exp \left[-m \left(\frac{E_{p,m} - E_n}{E_{0,1} - E_n} \right)^\alpha \right]. \quad (2.11)$$

В результате преобразований из (2.11) находится выражение для определения пробивной напряженности $E_{p,m}$:

$$E_{p,m} = E_n + (E_{0,1} - E_n) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)^{1/\alpha}}{m} \right]. \quad (2.12)$$

Заметим, что если в выражении (2.12) принять $P_3 = 1 - e^{-1}$, то формула (2.12) переходит в выражение (2.10), определяющего пробивную напряженность $E_{0,m}$.

Определение характеристик электрической прочности трансформаторного масла с различным объёмом по результатам его испытаний для заданного образца. В реальных условиях заданный первичный объем масла может занимать некоторое промежуточное положение в исследуемом диапазоне изменения объема масла. Поэтому важно разработать методику расчета пробивной напряженности трансформаторного масла при объемах, отклоняющихся от заданного объема масла в меньшую или большую стороны. Наличие такой методики позволит более эффективно проводить расчет характеристик электрической прочности трансформаторного масла для неоднородных электрических полей.

Общий метод расчета рассматривается вначале применительно к однородному полю, а случай неоднородных полей будет рассмотрен отдельно.

С этой целью далее рассматривается зависимость пробивной напряженности E_0 от объема масла в однородном поле (рис. 2.13).

На этой зависимости выделяются три характерные точки: А, В, С.

В соответствии с полученными результатами, распределение пробивной напряженности трансформаторного масла описывается распределением Гнеденко-Вейбулла, причем при изменении объема масла происходит изменение только параметра E_0 , поэтому этот параметр и принимается в качестве пробивной напряженности трансформаторного масла при различных его объемах с заданными исходными характеристиками.

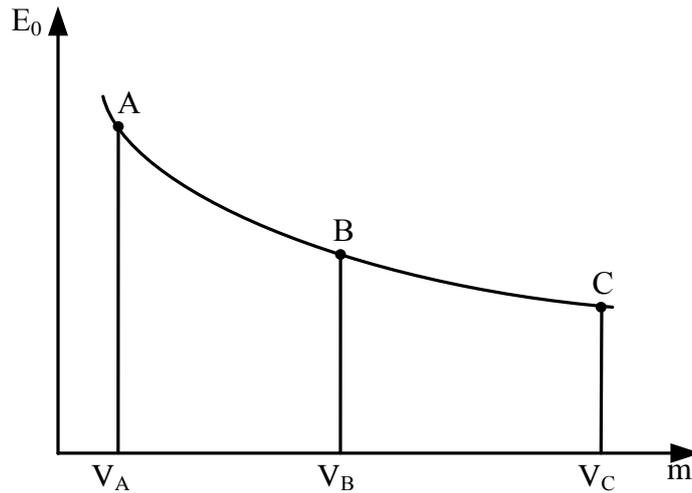


Рис. 2.13 Зависимость пробивной напряженности трансформаторного масла от его объема в однородном поле

Далее рассмотрим два варианта расчета, при которых заданный первичный объем масла составляет V_A и V_B для заданного качества исходного трансформаторного масла.

Тогда для первого случая $V_1=V_A$ в соответствии с результатами эксперимента имеем параметры распределения: $E_{0,A}$; E_H ; α . С учетом (2.10) выражение для пробивной напряженности во всем диапазоне объемов $[V_A-V_C]$ запишется так:

$$E_{0,i} = E_H + \frac{E_{0,A} - E_H}{\left(\frac{V_i}{V_A}\right)^{1/\alpha}}, \quad E_{0,C} \leq E_{0,i} \leq E_{0,A}. \quad (2.13)$$

С учетом (2.13) запишутся выражения для пробивных напряженностей, соответствующих точкам В и С:

$$E_{0,B} = E_H + \frac{E_{0,A} - E_H}{\left(\frac{V_B}{V_A}\right)^{1/\alpha}}. \quad (2.14)$$

$$E_{0,C} = E_H + \frac{E_{0,A} - E_H}{\left(\frac{V_C}{V_A}\right)^{1/\alpha}}. \quad (2.15)$$

Аналогично для второго случая, когда $V_1=V_B$, то по результатам эксперимента получаются параметры распределения: $E_{0,B}$; E_n ; α .

Тогда для точки С запишется выражение для пробивной напряженности в виде:

$$E_{0,C} = E_n + \frac{E_{0,B} - E_n}{\left(\frac{V_C}{V_B}\right)^{1/\alpha}}. \quad (2.16)$$

Так как в обоих рассматриваемых случаях качество исходного масла сохраняется постоянным, тогда пробивная напряженность масла $E_{0,C}$, определяемая по (2.15) и (2.16), должна быть одинаковой. Тогда можно приравнять выражения (2.15) и (2.16). В результате этого имеем:

$$\frac{E_{0,A} - E_n}{\left(\frac{V_C}{V_A}\right)^{1/\alpha}} = \frac{E_{0,B} - E_n}{\left(\frac{V_C}{V_B}\right)^{1/\alpha}}. \quad (2.17)$$

Отсюда найдется выражение для определения пробивной напряженности в точке А, то есть:

$$E_{0,A} = E_n + \frac{E_{0,B} - E_n}{\left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{1/\alpha}}. \quad (2.18)$$

Для проверки правильности полученного выражения (2.18) данная формула подставляется соответственно в (2.14) и (2.15). При положительном результате должно получиться в обоих случаях тождество.

Подстановка (2.18) в (2.14) дает:

$$E_{0,B} = E_n + \frac{E_n + \left(\frac{V_B}{V_A}\right)^{1/\alpha} (E_{0,B} - E_n) - E_n}{\left(\frac{V_B}{V_A}\right)^{1/\alpha}}. \quad (2.19)$$

Из выражения (2.19) следует, что после преобразований в правой части остается только параметр $E_{0,B}$, то есть выражение (2.19) есть тождество.

Аналогично при подстановке (2.18) в (2.15):

$$E_{0,C} = E_n + \frac{E_n + \left(\frac{V_B}{V_A}\right)^{1/\alpha} \cdot (E_{0,B} - E_n) - E_n}{\left(\frac{V_C}{V_A}\right)^{1/\alpha}} . \quad (2.20)$$

После преобразований выражение (2.20) принимает вид:

$$E_{0,C} = E_n + \frac{E_{0,B} - E_n}{\left(\frac{V_C}{V_B}\right)^{1/\alpha}} . \quad (2.21)$$

Полученное выражение (2.21) полностью совпадает с (2.16), то есть и в этом случае имеет место тождественное совпадение результатов.

Тогда в соответствии с полученными результатами для более общего случая, когда заданный первичный объем V_{Π} находится в промежутке интервала изменения объема масла $[V_{\min}, V_{\max}]$, расчет пробивной напряженности трансформаторного масла для различных объемов масла при неизменном качестве исходного масла с параметрами распределения $E_{0,\Pi}$, E_n , α следует производить по одной формуле:

$$E_{0,V_i} = E_n + \frac{E_{0,\Pi} - E_n}{\left(\frac{V_i}{V_{\Pi}}\right)^{1/\alpha}} . \quad (2.22)$$

Особенность состоит только в том, что при расчёте по (2.22) в случае $V_i > V_{\Pi}$ при увеличении объёма масла напряжённость E_{0,V_i} будет уменьшаться, а случае $V_i < V_{\Pi}$ при уменьшении объёма масла напряжённость E_{0,V_i} будет возрастать.

Таким образом, полученное выражения (2.22) позволяет рассчитать пробивную напряженность трансформаторного масла в однородном поле при различных его объемах на основе результатов эксперимента для первичного объема масла.

Расчёт характеристик электрической прочности трансформаторного масла с применением статистического метода в неоднородных электрических полях. В отличие от однородных электрических полей, когда возникновение критических частичных разрядов вблизи электродов переходит в сквозной пробой

всего промежутка, в неоднородных полях имеет место более сложный механизм развития разрядного канала.

Принято разделять неоднородные поля по коэффициенту неоднородности электрического поля k_n на два вида [81, с.156]: слабо неоднородные ($k_n \leq 4$) и резко неоднородные $k_n \geq 4$. При этом

$$k_n = \frac{E_{\max}}{E_{\text{cp}}}, \quad (2.23)$$

где E_{\max} , E_{cp} -максимальная и средняя напряженность электрического поля соответственно, причем

$$E_{\text{cp}} = \frac{U}{l}, \quad (2.24)$$

где, U - воздействующее напряжение, l – расстояние между электродами.

В слабо неоднородных полях после возникновения критических частичных разрядов происходит постепенное развитие разрядного канала до противоположного электрода, то есть происходит формированию сквозного разрядного канала, как и в случае однородного поля.

В случае резко неоднородных электрических полей возникновение критических частичных разрядов приводит к постепенному электрическому старению (термическому разложению) масла под действием этих частичных разрядов и последующему развитию сквозного пробоя масляного канала.

С учетом этого в качестве критерия нарушения электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов, как отмечалось в главе 1, принимается [28, 38] пробой первого масляного канала вблизи обмотки, так как его пробой может привести к необратимому повреждению поверхности барьера, а также появлению продуктов разложения трансформаторного масла (углеродосодержащие твердые частицы, пузырьки газа и др.).

Следовательно, можно считать, что нарушение комбинированной маслосодержащей изоляции и чисто масляных промежутков в неоднородных электрических полях происходит с момента возникновения критических

частичных разрядов (пробоев) вблизи электродов с наибольшей кривизной, где имеет место наибольшая напряженность электрического поля.

В работе [92] также показано, что формирование критических разрядов происходит в объеме масла, прилегающем к электроду с максимальной напряженностью, поэтому предложено оценивать этот объем как объем, расположенный между поверхностями с напряженностями E_{\max} и $0,9E_{\max}$, получивший название "напряженный объем" масла.

В результате в качестве критерия нарушения электрической прочности масляных промежутков в неоднородных электрических полях можно принять пробой "напряженного объема" масла, на который воздействует максимальная напряженность электрического поля, то есть пробой формируется фактически в однородном поле с напряженностью E_{\max} .

Алгоритм расчета СХЭП трансформаторного масла в неоднородных полях в рассматриваемом случае можно представить в виде, представленном на рис.2.14. Алгоритм предусматривает следующую последовательность действий:

1. В соответствии с техническим заданием принимаются характеристики электрической прочности исходного трансформаторного масла, включающие в себя параметры распределения пробивной напряженности масла $E_{0,П}$, $E_{н}$, α , определенные по результатам эксперимента в однородном поле при заданном (первичном) объеме масла $V_{П}$.

2. Производится расчет электрического поля заданной электроизоляционной конструкции вблизи электрода с наибольшей кривизной и определяются поверхности равных напряженностей поля при значениях E_{\max} и $0,9E_{\max}$.

3. Определяется объем масла, расположенный между поверхностями с напряженностями E_{\max} и $0,9E_{\max}$ – напряженный объем масла $V_{Н0}$.

4. Рассчитывается пробивная напряженность трансформаторного масла $E_{0,Н}$ при напряженном объеме масла $V_{Н0}$ по выражению (2.22):

$$E_{0,Н} = E_{н} + \frac{E_{0,П} - E_{н}}{\left(\frac{V_{Н0}}{V_{П}}\right)^{1/\alpha}}. \quad (2.25)$$

5. По полученному значению пробивной напряженности $E_{0,Н}$ рассчитывается пробивное напряжение масляного канала по условию $E_{\max} = E_{0,Н}$.

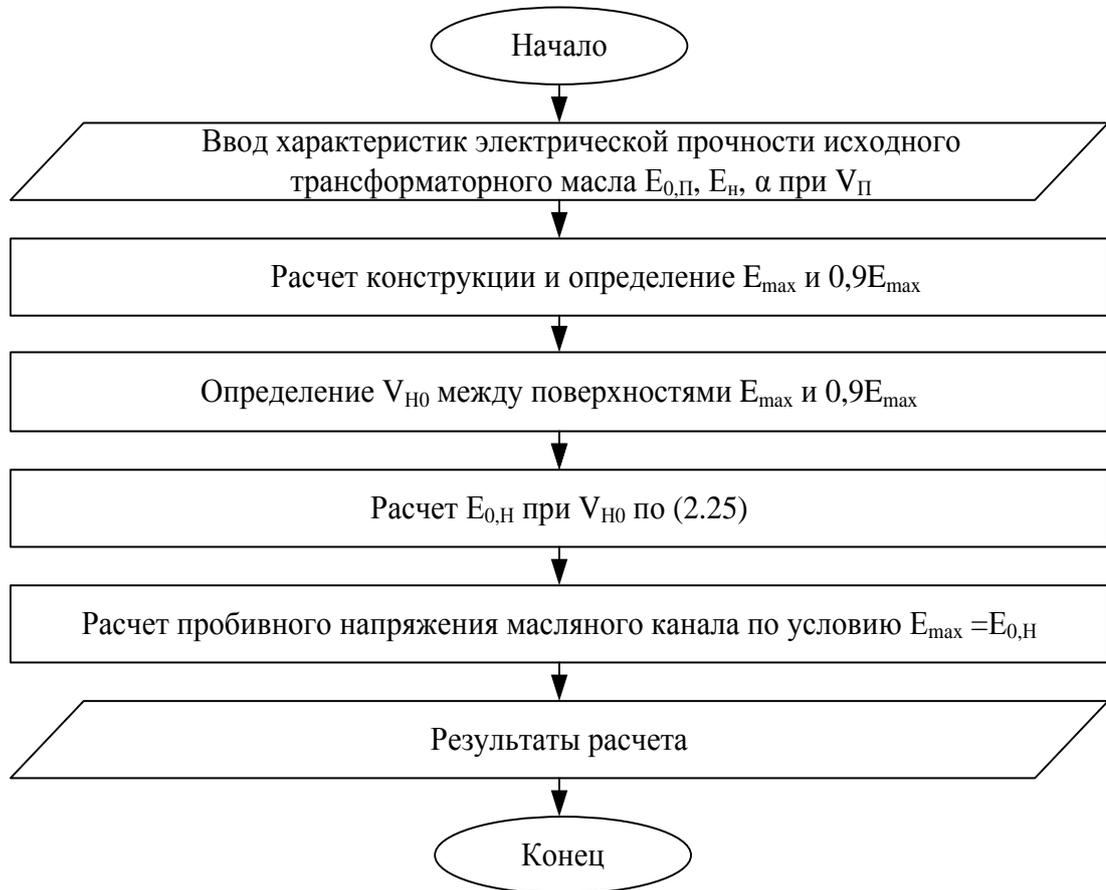


Рис. 2.14. Алгоритм расчета СХЭП трансформаторного масла в неоднородных полях

2.3. Расчёт диагностических статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла с учётом его объёма в характерных изоляционных конструкциях по результатам эксперимента

Однородные электрические поля. Далее приводится сопоставление результатов расчёта по предложенной методике с экспериментальными данными

при различных объёмах трансформаторного масла. С учётом того, что в литературе имеются сведения для различных по качеству трансформаторных масел, сопоставление расчётных и экспериментальных результатов целесообразно провести с применением относительных значений электрической прочности масла. В качестве базисной величины удобно принять объём масла для единичного образца ($m=1$), а в качестве основной характеристики принять параметр $E_{0,1}$. Тогда выражение (2.10) в относительных единицах примет вид:

$$\frac{E_{0,m}}{E_{0,1}} = \frac{E_n}{E_{0,1}} + \frac{1}{m^{1/\alpha}} \cdot \left(1 - \frac{E_n}{E_{0,1}} \right) \quad (2.26)$$

На рис. 2.15 представлена расчётная по (2.26) зависимость пробивной напряжённости трансформаторного масла от его объёма, а также экспериментальные данные по [34], для которых: $(E_n/E_{0,1})=0,68$, $\alpha=2,2$. Отмечается хорошее совпадение расчётных и экспериментальных результатов.

На рис. 2.16 представлена расчётная по (2.10) зависимость пробивной напряжённости трансформаторного масла от его объёма, а также экспериментальные данные по [34, с. 295], для которых: $E_n = 27,1$ кВ/см, $E_{0,n} = 95$ кВ/см, $\alpha=3,3$. Отличительные признаки этого случая от предыдущего состоят в том, что кратность изменения объёма масла существенно больше, а в качестве первичного образца принят объём масла V_n , находящийся внутри диапазона его изменения $V_{\min} \leq V_n \leq V_{\max}$.

Из рис. 2.16 следует, что предложенный метод расчёта позволяет производить расчёты пробивной напряжённости трансформаторного масла в широком диапазоне изменения его объёма и при различном исходном объёме первичного образца масла.

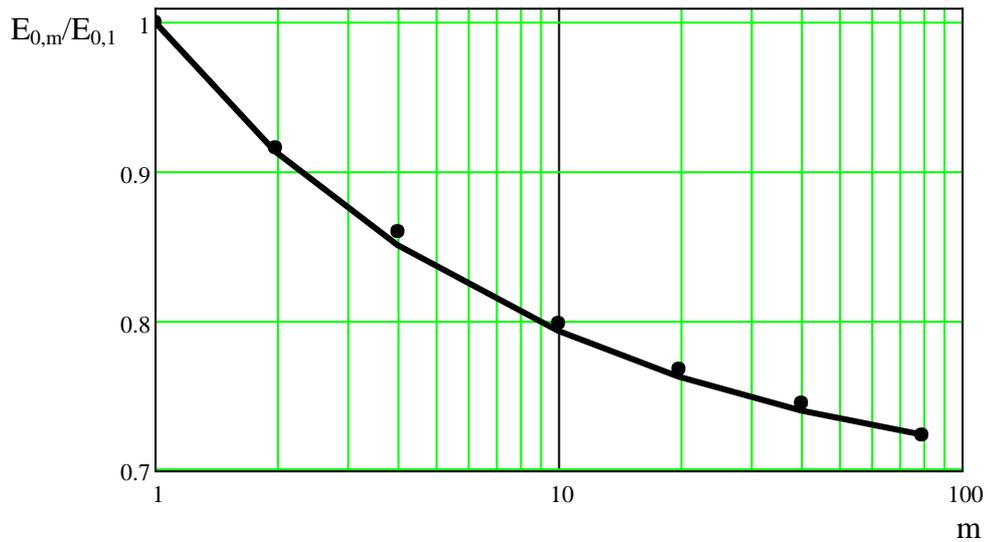


Рис. 2.15. Зависимость пробивной напряжённости трансформаторного масла от его объёма ($m = V_m/V_1$) при напряжении промышленной частоты:

- – эксперимент по [34], $V_1 = 5 \cdot 10^2 \text{ см}^3$; — – расчёт по (2.26)

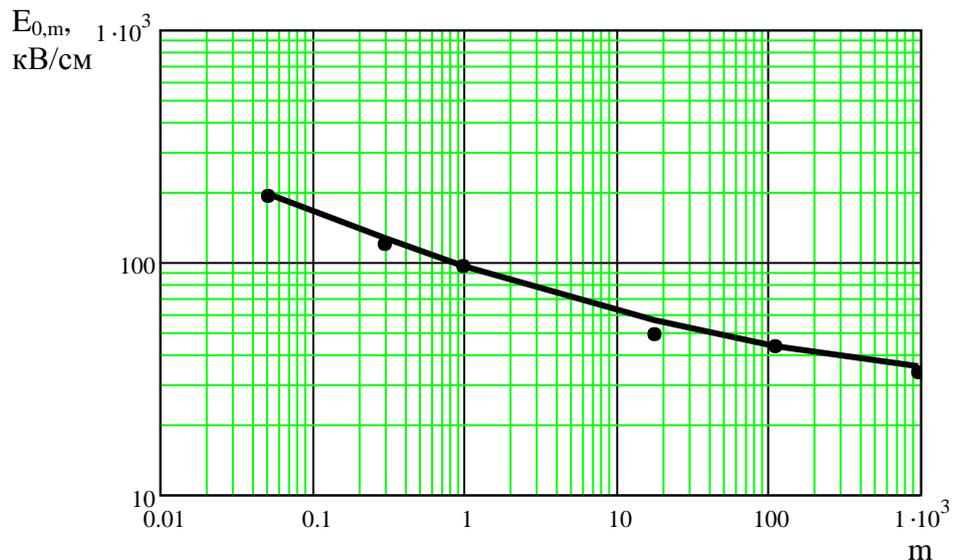


Рис. 2.16. Зависимость пробивной напряжённости трансформаторного масла от его объёма ($m = V_m/V_{\Pi}$) при постоянном напряжении:

- – эксперимент по [34, с. 295], $V_{\Pi} = 0,08 \text{ см}^3$; — – расчёт по (2.10)

Неоднородные электрические поля. Во многих случаях расчет СХЭП трансформаторного масла применительно к реальным электроизоляционным конструкциям проводится с применением численных методов. Вместе с тем

имеются случаи, когда возможно решение данной задачи аналитическими методами. Это имеет место для некоторых видов слабо неоднородных полей.

Примером такого вида электрических полей может служить система электродов цилиндр в цилиндре (коаксиальные цилиндры), которая достаточно близко отражает реальные изоляционные промежутки в трансформаторах (отводы от обмоток), а также в масляных высоковольтных вводах. С учетом этого сопоставление результатов расчета и эксперимента проводится на примере коаксиальных цилиндров, промежутков между которыми заполнен трансформаторным маслом.

В соответствии с разработанным в §2.2 алгоритмом расчет начинается с построения модели системы коаксиальных цилиндров, сечение которых представляет собой семейство окружностей, представленный на рис. 2.17.

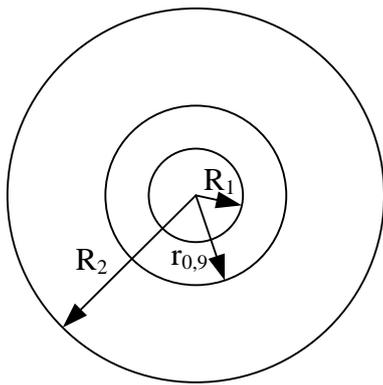


Рис. 2.17. Модель системы коаксиальных цилиндров

Для определения напряжённого объема масла предварительно запишем выражение для напряженности электрического поля применительно к системе коаксиальных цилиндров [93, с.77]:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (2.27)$$

Здесь r – текущий радиус.

Так как максимальная напряженность наблюдается на поверхности внутреннего цилиндра при $r=R_1$, то ее величина находится так:

$$E_{\text{макс}} = \frac{U}{R_1 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (2.28)$$

Коэффициент неоднородности электрического поля для коаксиальных цилиндров в соответствии с (2.23) и с учётом (2.28) определится так:

$$k_H = [(R_2/R_1) - 1]/\ln(R_2/R_1). \quad (2.29)$$

С учётом (2.28) определяется напряженность электрического поля, которая составляет $0,9E_{\max}$, то есть

$$E_{0,9} = \frac{0,9 \cdot U}{R_1 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (2.30)$$

С другой стороны с учетом (2.27), выражение для $E_{0,9}$, когда $r=r_{0,9}$, можно записать в виде:

$$E_{0,9} = \frac{U}{r_{0,9} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (2.31)$$

Приравняв выражения (2.30) и (2.31), после преобразований получим:

$$r_{0,9} = \frac{R_1}{0,9}. \quad (2.32)$$

Тогда, зная радиус внутреннего цилиндра R_1 , на поверхности которого наблюдается максимальная напряженность поля E_{\max} , и радиус $r_{0,9}$, при котором напряженность электрического поля составляет $0,9E_{\max}$, можно определить величину напряженного объема:

$$V_H = \pi l (r_{0,9}^2 - R_1^2), \quad (2.33)$$

где, l - длина цилиндра.

С учетом (2.32) выражение (2.33) преобразуется к виду:

$$V_H = 0,235\pi/R_1^2. \quad (2.34)$$

Зависимость электрической прочности трансформаторного масла в однородном поле определяется с учетом распределения Гнеденко-Вейбулла по выражению (2.10). При этом в качестве единичного образца выбирается система цилиндров с радиусом внутреннего цилиндра $R_{1,1}$, при котором $V_H=V_{H,1}$ ($m=1$, $E_{0,m}=E_{0,1}$).

Тогда в рассматриваемом случае выражение для m с учетом (2.34) примет вид:

$$m = \frac{V_{H,m}}{V_{H,1}} = \left(\frac{R_{1,m}}{R_{1,1}} \right)^2. \quad (2.35)$$

С учетом (2.35) выражение (2.10) примет вид

$$E_{0,m} = E_n + (E_{0,1} - E_n) \cdot \left(\frac{R_{1,m}}{R_{1,1}} \right)^{\frac{2}{\alpha}}. \quad (2.36)$$

Параметры распределения для единичного образца $E_{0,1}$, E_n и α задаются для исходного трансформаторного масла.

Далее необходимо найти выражение для пробивного напряжения коаксиальных цилиндров $U_{пр,m}$. В случае пробоя промежутка при напряженности $E_{0,m}$ пробивное напряжение для коаксиальных цилиндров можно получить с применением выражения (2.28), которое в рассматриваемом случае примет вид:

$$E_{0,m} = \frac{U_{пр,m}}{R_{1,m} \cdot \ln \frac{R_2}{R_{1,m}}}. \quad (2.37)$$

Приравнявая выражения (2.36) и (2.37), после преобразований находится выражение для определения $U_{пр,m}$:

$$U_{пр,m} = \left(E_n + (E_{0,1} - E_n) \cdot \left(\frac{R_{1,m}}{R_{1,1}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \right) \cdot R_{1,m} \cdot \ln \frac{R_2}{R_{1,m}}. \quad (2.38)$$

Для удобства анализа влияния качества трансформаторного масла на пробивное напряжение коаксиальных цилиндров представим эту зависимость в безразмерном виде:

$$U_{пр,m}^* = \frac{U_{пр,m}}{U_{пр,1}}. \quad (2.39)$$

Выражение для $U_{пр,1}$ найдется аналогично определению $U_{пр,m}$ с применением выражения (2.37):

$$U_{пр,1} = E_{0,1} \cdot R_{1,1} \cdot \ln \frac{R_2}{R_{1,1}}. \quad (2.40)$$

С учетом (2.38) и (2.40) выражение (2.39) примет вид:

$$U_{\text{пр,м}}^* = \left(1 + \frac{\frac{E_{0,1}}{E_H} - 1}{\left(\frac{R_{1,m}}{R_{1,1}} \right)^{\frac{2}{\alpha}}} \right) \cdot \left(1 - \frac{\ln \frac{R_{1,m}}{R_{1,1}}}{\ln \frac{R_2}{R_{1,1}}} \right) \frac{R_{1,m}}{R_{1,1}} \cdot \left(\frac{E_{0,1}}{E_H} \right)^{-1}. \quad (2.41)$$

Сопоставление результатов расчёта с экспериментом проводится с применением экспериментальных данных по пробивным напряжениям трансформаторного масла в системе коаксиальных цилиндров [34, с. 301]. При этом зависимость пробивного напряжения масла при воздействии напряжения промышленной частоты от радиуса внутреннего цилиндра R_1 при $R_2 = \text{const}$ ($R_2=100$ мм) представлена в табл. 2.5. Здесь также представлены отношения радиусов R_2/R_1 и значения коэффициентов неоднородности электрического поля k_H .

Таблица 2.5

Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла в системе коаксиальных цилиндров от радиуса внутреннего цилиндра по [34, с. 301]

R_1 , мм	25	30	40	50	60	70	75
$U_{\text{пр, кВэфф}}$	107,4	105	91,8	74,6	57,4	40,4	32,8
R_2/R_1	4	3,33	2,5	2	1,66	1,43	1,33
k_H	2,2	1,9	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1

В качестве первичного образца принят вариант электродов с внутренним радиусом 30 мм, при котором коэффициент неоднородности меньше 2, что означает наличие слабо неоднородных полей при $R_1 \geq 30$ мм.

На рис. 2.18 представлены расчётные по (2.41), а также экспериментальные данные для относительных пробивных напряжений. При этом параметры распределения для первичного образца составляют: $(E_{0,1}/E_H)=4,7$ $\alpha=2,2$.

Из представленных на рис. 2.18 результатах следует, что данные, рассчитанные по (2.41) в соответствии с предложенным методом, совпадают с результатами эксперимента.

Таким образом, предложенный метод расчёта СХЭП трансформаторного масла с учётом изменения его объёма может применяться и в случае неоднородных электрических полей.

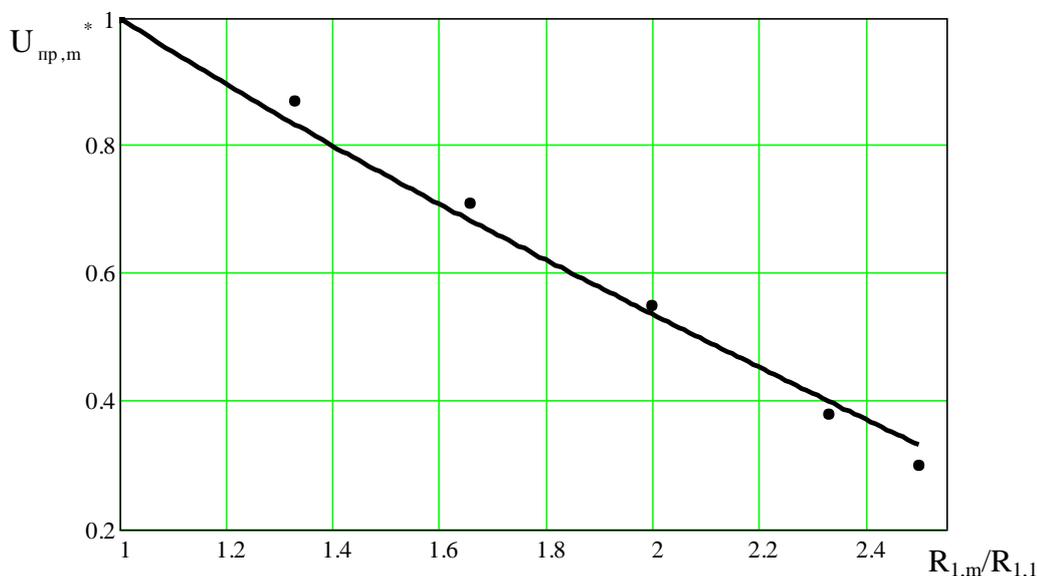


Рис. 2.18. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от отношения радиусов внутренних цилиндрических электродов $R_{1,м}/R_{1,1}$ при: $R_2 = 100$ мм, $R_{1,1} = 30$ мм:

- – эксперимент по [34, с. 301], — – расчёт по (2.41)

2.4. Выводы по главе 2

1. На основе анализа технических параметров действующих силовых трансформаторов и автотрансформаторов в широком диапазоне их изменения выявлено существенное возрастание общего объёма трансформаторного масла в трансформаторах с увеличением их мощности. Для классов напряжения 35 – 220 кВ при возрастании мощности трансформаторов кратность увеличения общего объёма масла в них достигает 10 – 12, а при увеличении класса напряжения трансформаторов при заданной их мощности эта кратность достигает 2,6 – 3,5.

2. Разработан метод расчёта диагностических СХЭП трансформаторного масла с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла,

позволяющий учитывать влияние объёма масла и неоднородности электрического поля.

3. Получены аналитические выражения для определения пробивной напряжённости масляного канала применительно к однородным электрическим полям для различных объемов масла, когда заданный первичный объем V_{Π} находится в промежутке интервала изменения объема масла $[V_{\text{мин}}, V_{\text{макс}}]$.

4. Предложенный метод расчёта диагностических СХЭП трансформаторного масла применён для расчёта статистических характеристик пробивных напряжений для неоднородных электрических полей с применением напряжённого объёма жидкого диэлектрика, определяющего нарушение электрической прочности масляного канала.

Для этого случая составлен алгоритм расчета диагностических статистических параметров пробивных напряжений трансформаторного масла в неоднородных электрических полях с применением распределения Гнеденко-Вейбулла.

5. Выполненное сопоставление результатов расчета и эксперимента диагностических статистических параметров пробивных напряжений для случаев однородного и неоднородных полей для характерной изоляционной конструкции в виде коаксиальных цилиндров показало их хорошее соответствие в широком диапазоне изменений объёма масла.

ГЛАВА 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАСЛЯНЫХ КАНАЛОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ИХ МОЩНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ

3.1. Разработка метода расчёта диагностических статистических характеристик электрической прочности масла в первом канале трансформаторов

Оценка изменения объёма масла в первом масляном канале в зависимости от мощности и напряжения трансформаторов. Влияние объёма масляного канала, как отмечалось в главах 1 и 2, обусловлено статистической природой формирования пробоя и проявляется в уменьшении его электрической прочности с ростом объёма масла [68].

В свою очередь объём масла в каналах определяется мощностью и напряжением трансформаторов [53], поэтому важно произвести оценку степени влияния номинальных параметров трансформаторов на объёмы масляных каналов. При этом следует учесть, что мощность трансформатора определяет диаметр магнитного стержня, а номинальное напряжение – расстояние между обмотками.

Для исследований в качестве модельного объекта выбраны двухобмоточные трёхфазные силовые трансформаторы с номинальным напряжением 110 кВ (рис. 3.1), для которых удаётся сохранять принцип подобия конструкций обмоток для широкого диапазона мощностей трансформаторов [53]. Кроме того, число трансформаторов данного класса напряжения в электрических сетях достаточно велико. При этом рассматривается плоская магнитная система стержневого типа

со стержнями, имеющими сечение в форме симметричной ступенчатой фигуры, вписанной в окружность, и с концентрическим расположением обмоток.

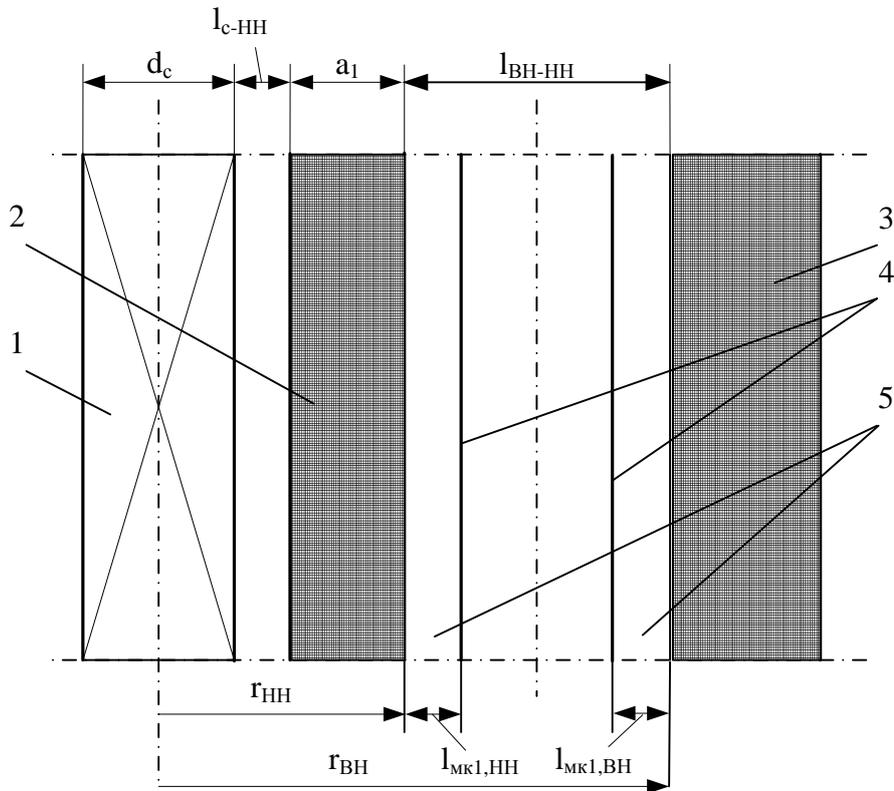


Рис. 3.1. Схема внутренней изоляции двухобмоточного силового трансформатора 110 кВ: 1 – стержень магнитопровода; 2 – обмотка низшего напряжения; 3 – обмотка высшего напряжения; 4 – барьеры из электрокартона; 5 – масляные каналы вблизи обмоток

В соответствии с имеющейся обобщённой теорией проектирования силовых трансформаторов [53] выражение для определения диаметра стержня магнитопровода имеет вид:

$$d_c = 2 \cdot r_c = 2,85 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p}{f \cdot U_p \cdot B_c^2 \cdot k_c^2}}, \quad (3.1)$$

где S' – мощность трансформатора на один стержень, $S' = S_n/3$; β – соотношение длины окружности канала между обмотками (средней длины витка двух обмоток) и высоты обмотки; a_p – приведённая ширина канала рассеяния; k_p – коэффициент приведения идеализированного поля рассеяния к реальному; f – частота сети; U_p – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания (в относительных

единицах); B_c – максимальная магнитная индукция в стержне; k_c – коэффициент заполнения активной сталью площади круга, описанного около сечения стержня.

На основе накопленного опыта проектирования силовых трансформаторов при определении их основных размеров [53] можно принять осреднённые значения параметров: коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному полю $k_p=0,95$, индукцию в стержне $B_c=1,6$ Тл, частоту сети $f=50$ Гц, коэффициент заполнения сечения стержня сталью $k_c=0,9$, коэффициент $\beta=1,8$. Приведённая ширина канала рассеяния оценивается по выражению:

$$a_p = l_{\text{ВН-НН}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{S'}, \quad (3.2)$$

где $l_{\text{ВН-НН}}$ – расстояние между обмотками высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений.

С учётом (3.2) и выбранных выше значений исходных параметров выражение (3.1) запишется так:

$$d_c = 1,02 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot (l_{\text{ВН-НН}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{S'})}{U_p}} \quad (3.3)$$

Для определения d_c по (3.3) далее следует произвести определение расстояния между обмотками $l_{\text{ВН-НН}}$. При этом принимается, что в рассматриваемом ряду трансформаторов различных мощностей соотношения между отдельными размерами трансформаторов сохраняются постоянными, то есть магнитные системы и обмотки трансформаторов данного ряда представляют собой геометрически подобные фигуры.

Тогда при определении расстояния $l_{\text{ВН-НН}}$ можно ограничиться оценочным расчётом [28], по которому расстояние между обмотками (в зоне середины обмотки) может быть определено так:

$$l_{\text{ВН-НН}} = \frac{k_{\text{из}} \cdot U_{\text{расч}}}{E_{\text{доп.МК}}}, \quad (3.4)$$

где $U_{\text{расч}}$ – расчётное напряжение, воздействующее на главную изоляцию; $k_{\text{из}} = 1,1-1,2$ – коэффициент, учитывающий увеличение напряжённости электрического поля в масляном канале из-за наличия барьеров и цилиндричности конструкции

главной изоляции; $E_{\text{доп.мк}}$ – расчётная допустимая напряжённость в масляном канале при соответствующем испытательном напряжении.

Выполненная по [28] оценка напряжения $U_{\text{расч}}$ с учётом нормативных испытательных напряжений показала, что в качестве расчётного напряжения в (3.4) следует принять испытательное одноминутное напряжение промышленной частоты $U_{50\text{Гц},1\text{мин}}$, которое для рассматриваемых трансформаторов 110 кВ составляет 200 кВ.

При определении допустимой напряжённости электрического поля [28] принимается соотношение:

$$E_{\text{доп.мк}} = k_{\text{П.Е}} \cdot E_{\text{мк.пр.мин}}, \quad (3.5)$$

где $E_{\text{мк.пр.мин}}$ – минимальная пробивная напряжённость, определяемая при заданной вероятности пробоя P_3 ; $k_{\text{П.Е}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий небольшое количество опытов, использованное для получения этой зависимости; меньшие по сравнению с реальным трансформатором размеры модельного образца; возможные отклонения в размерах элементов изоляции. Значение этого коэффициента при традиционных расчётах принимается равным $k_{\text{П.Е}} = 0,85$.

С учётом (3.5) выражение (3.4) примет вид:

$$I_{\text{ВН-НН}} = \frac{k_{\text{из}} \cdot U_{\text{расч}}}{k_{\text{П.Е}} \cdot E_{\text{мк.пр.мин}}}. \quad (3.6)$$

Тогда выражение (3.3) для определения диаметра стержня магнитопровода с учётом (3.6) запишется так:

$$d_c = 1,02 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{\text{н}}}{3 \cdot U_{\text{р}}} \cdot \frac{k_{\text{из}} \cdot U_{\text{расч}}}{k_{\text{П.Е}} \cdot E_{\text{мк.пр.мин}}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{\text{н}}}{3}}}. \quad (3.7)$$

Из полученного выражения (3.7) следует, что диаметр стержня магнитопровода в первую очередь определяется мощностью и напряжением трансформатора.

С учётом обозначений на рис.3.1 объёмы масла в первых от обмоток каналах на единицу их высоты определяются так:

$$V_{\text{мк1,НН}} = \pi \cdot (2 \cdot r_{\text{НН}} \cdot l_{\text{мк1,НН}} + l_{\text{мк1,НН}}^2); \quad (3.8)$$

$$V_{\text{мк1,ВН}} = \pi \cdot (2 \cdot r_{\text{ВН}} \cdot l_{\text{мк1,ВН}} - l_{\text{мк1,ВН}}^2). \quad (3.9)$$

На основе выражений (3.8) и (3.9) оценим соотношение объёмов в каналах. При этом учтём, что для силовых трансформаторов имеют место соотношения:

$$\frac{l_{\text{мк1,ВН}}}{2 \cdot r_{\text{ВН}}} \ll 1 \quad \text{и} \quad \frac{l_{\text{мк1,НН}}}{2 \cdot r_{\text{НН}}} \ll 1, \quad \text{а каналы } l_{\text{мк1,ВН}} \text{ и } l_{\text{мк1,НН}} \text{ близки друг к другу. Тогда}$$

имеем:

$$\frac{V_{\text{мк1,ВН}}}{V_{\text{мк1,НН}}} \approx 1 + \frac{l_{\text{ВН-НН}}}{r_{\text{НН}}}. \quad (3.10)$$

Из (3.10) следует, что $V_{\text{мк1,ВН}} > V_{\text{мк1,НН}}$ причём соотношение этих объёмов определяется мощностью (параметр $r_{\text{НН}}$) и номинальным напряжением (параметр $l_{\text{ВН-НН}}$).

Необходимые для определения объёмов масла в напряжённых масляных каналах радиусы поверхностей, ограничивающих первые масляные каналы между обмотками и ближайшими к ним барьерами, найдутся в соответствии с рис.3.1:

$$r_{\text{НН}} = \frac{d_c}{2} + l_{\text{с-НН}} + a_1; \quad (3.11)$$

$$r_{\text{ВН}} = r_{\text{НН}} + l_{\text{ВН-НН}}. \quad (3.12)$$

Тогда выражение (3.12) с учётом (3.11) примет вид:

$$r_{\text{ВН}} = \frac{d_c}{2} + l_{\text{с-НН}} + a_1 + l_{\text{ВН-НН}}. \quad (3.13)$$

Здесь толщина изоляции обмотки НН от стержня $l_{\text{с-НН}}$ выбирается по её испытательному напряжению [53]. В трансформаторах на напряжение 110 кВ по соображениям электродинамической стойкости и технологическим требованиям это расстояние составляет 18 мм, причём на стержень устанавливается бумажно-бакелитовый цилиндр, а масляный канал изоляционный цилиндр – обмотка НН при этом составляет 12 мм.

Радиальный размер обмотки НН (толщина обмотки) a_1 для модельного ряда трёхфазных трансформаторов 110 кВ может быть определён по формуле [53]:

$$a_1 = 1,21 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3}}. \quad (3.14)$$

Выше отмечалось, что наибольший объём первого масляного канала имеет место вблизи обмотки ВН, поэтому последующие результаты исследования представлены для этого случая.

С учётом найденных выражений для определения параметров d_c – (3.7), a_1 – (3.14), $l_{ВН-НН}$ – (3.6) выражение (3.13) примет вид:

$$r_{ВН} = 0,51 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_n}{3 \cdot U_p} \cdot \left(\frac{k_{из} \cdot U_{расч}}{k_{П.Е} \cdot E_{мк.пр.мин}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_n}{3}} \right)} + l_{с-НН} + 1,21 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_n}{3}} + \frac{k_{из} \cdot U_{расч}}{k_{П.Е} \cdot E_{мк.пр.мин}}. \quad (3.15)$$

В соответствии с предложенной в гл. 2 методикой определения СХЭП трансформаторного масла минимальная пробивная электрическая напряжённость масла найдётся с учётом (2.12) так:

$$E_{мк.пр.мин} = E_n + (E_{0,1} - E_n) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha}. \quad (3.16)$$

Здесь P_3 – заданная вероятность пробоя масла (рис. 2.12). В настоящее время при проектировании [28] принимается $P_3=0,05$. Параметр m_k отражает увеличение объёма масла в каналах трансформаторов по сравнению с единичным (исходным) каналом.

Тогда с учётом (3.16) выражение (3.6) примет вид:

$$l_{ВН-НН} = \frac{k_{из} \cdot U_{расч}}{k_{П.Е}} \cdot \left(E_n + (E_{0,1} - E_n) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha} \right)^{-1}. \quad (3.17)$$

Из (3.17) следует, что изоляционное расстояние между обмотками $l_{ВН-НН}$ зависит не только от величины расчётного воздействующего напряжения $U_{расч}$, но и от качества исходного масла, определяемое статистическими параметрами распределения пробивной напряжённости: E_n , $E_{0,1}$, α .

С учётом (3.17) выражение (3.15) примет вид:

$$r_{BH} = 0,51 \cdot 10^{-2} \cdot$$

$$\cdot \sqrt[4]{\frac{S_H}{3 \cdot U_p} \cdot \left(\frac{k_{из} \cdot U_{расч} / k_{П.Е}}{\left(E_H + (E_{0,1} - E_H) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha} \right)} + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_H}{3}} \right)} +$$

$$+ 1_{c-HH} + 1,21 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_H}{3}} + \frac{U_{расч} \cdot k_{из}}{k_{П.Е}} \cdot \frac{k_{из} \cdot U_{расч} / k_{П.Е}}{\left(E_H + (E_{0,1} - E_H) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha} \right)}. \quad (3.18)$$

Тогда с учётом (3.18) выражение для определения объема масла в первом масляном канале (3.9) примет вид:

$$V_{мк.1,ВН} = \pi \cdot l_{мк.1,ВН} \cdot (1,02 \cdot 10^{-2} \cdot$$

$$\cdot \sqrt[4]{\frac{S_H}{3 \cdot U_p} \cdot \left(\frac{k_{из} \cdot U_{расч} / k_{П.Е}}{\left(E_H + (E_{0,1} - E_H) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha} \right)} + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_H}{3}} \right)} +$$

$$+ 2 \cdot 1_{c-HH} + 2,42 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_H}{3}} + \frac{2 \cdot k_{из} \cdot U_{расч} / k_{П.Е}}{\left(E_H + (E_{0,1} - E_H) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha} \right)} - l_{мк.1,ВН}). \quad (3.19)$$

Из (3.19) следует, что для заданного класса напряжения трансформатора объём масла в первом масляном канале в первую очередь зависит от мощности трансформатора, номинального напряжения, а также от статистических параметров распределения пробивной напряжённости исходного масла: E_H , $E_{0,1}$, α .

Выражение (3.19) содержит неизвестный параметр

$$m_k = \frac{V_{мк.1,ВН}}{V_{мк,Б}}, \quad (3.20)$$

где $V_{мк,Б}$ – объём масляного канала базовой модели главной изоляции трансформатора (единичный образец изоляции).

В качестве базовой модели главной изоляции трансформатора целесообразно выбрать модель, которая применялась для исследования характеристик электрической прочности трансформаторной изоляции рядом стран, включая и нашу страну [39]. Тогда объём масляного канала базовой модели главной изоляции трансформатора на единицу его высоты определится так:

$$V_{\text{мк,б}} = \pi \cdot l_{\text{мк,б}} \cdot (2 \cdot r_{\text{вн,б}} - l_{\text{мк,б}}), \quad (3.21)$$

где $l_{\text{мк,б}}$, $r_{\text{вн,б}}$ – соответственно ширина масляного канала и радиус обмотки высокого потенциала базовой модели.

Для определения параметра m_k выражение (3.19) записывается в безразмерном виде с учётом (3.20) и (3.21) так:

$$m_k = (l_{\text{мк1,вн}} / (l_{\text{мк,б}} \cdot (2 \cdot r_{\text{вн,б}} - l_{\text{мк,б}}))) \times (1,02 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_H}{3 \cdot U_p}} \cdot \left(\frac{k_{\text{из}} \cdot U_{\text{расч}} / k_{\text{п.е}}}{E_H + (E_{0,1} - E_H) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_H}{3}} \right) + 2 \cdot l_{\text{с-нн}} + 2,42 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_H}{3}} + \frac{2 \cdot k_{\text{из}} \cdot U_{\text{расч}} / k_{\text{п.е}}}{E_H + (E_{0,1} - E_H) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha}} - l_{\text{мк1,вн}}). \quad (3.22)$$

Для расчёта СХЭП масляных каналов вначале определяется численным методом параметр m_k из выражения (3.22).

Далее рассчитываются СХЭП трансформаторного масла в каналах изоляции трансформатора. При этом в целях выявления характерных параметров электрической прочности изоляции выражения (2.10) и (3.16) представлены в безразмерном виде:

$$\frac{E_{0,m}}{E_{0,1}} = \frac{1 + \left(\frac{E_{0,1}}{E_H} - 1 \right) \cdot (m_k)^{-1/\alpha}}{\frac{E_{0,1}}{E_H}}; \quad (3.23)$$

$$\frac{E_{\text{мк.пр.мин,м}}}{E_{\text{мк.пр.мин,1}}} = \frac{1 + \left(\frac{E_{0,1}}{E_n} - 1 \right) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha}}{1 + \left(\frac{E_{0,1}}{E_n} - 1 \right) \cdot [-\ln(1 - P_3)]^{1/\alpha}}. \quad (3.24)$$

Из выражений (3.23) и (3.24) следует, что значения относительных характеристик электрической прочности масла $E_{0,м}/E_{0,1}$ и $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ определяются безразмерными параметрами: $E_{0,1}/E_n$, α , m_k . Здесь параметры $E_{0,1}/E_n$ и α отражают качество исходного трансформаторного масла, а параметр m_k – объём масляного канала для заданных номинальных значений мощности и напряжения трансформаторов.

Алгоритм расчёта статистических характеристик электрической прочности масла в первом канале трансформаторов. Для применения предложенного метода расчёта этих статистических характеристик масла необходимо знать параметры распределения электрической прочности трансформаторного масла для канала базовой модели E_n , $E_{0,1}$, α . Они определяются по результатам экспериментов для таких моделей [10]. Однако в настоящее время такие данные отсутствуют, поэтому при исследованиях важно рассмотреть широкий спектр возможных значений параметров распределения E_n , $E_{0,1}$, α , в том числе с учётом их изменения в эксплуатации.

На основе этого для расчёта СХЭП масла в первом канале трансформаторов разработан следующий алгоритм.

1). Задаются параметры распределения электрической прочности базового канала E_n , $E_{0,1}$, α с учётом широкого охвата различных случаев, возникающих при выборе изоляции и в условиях эксплуатации трансформаторов.

2). Задаётся текущее значение мощности трансформатора с учётом её изменения в заданном классе номинального напряжения.

3). С применением выражения (3.22) численным методом находится параметр m_k .

4). С учётом выражений (3.23) и (3.24) находятся относительные значения параметров $E_{0,м}/E_{0,1}$ и $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$.

5). С применением выражения (3.17) определяется расстояние между обмотками высшего и низшего напряжений $I_{ВН-НН}$.

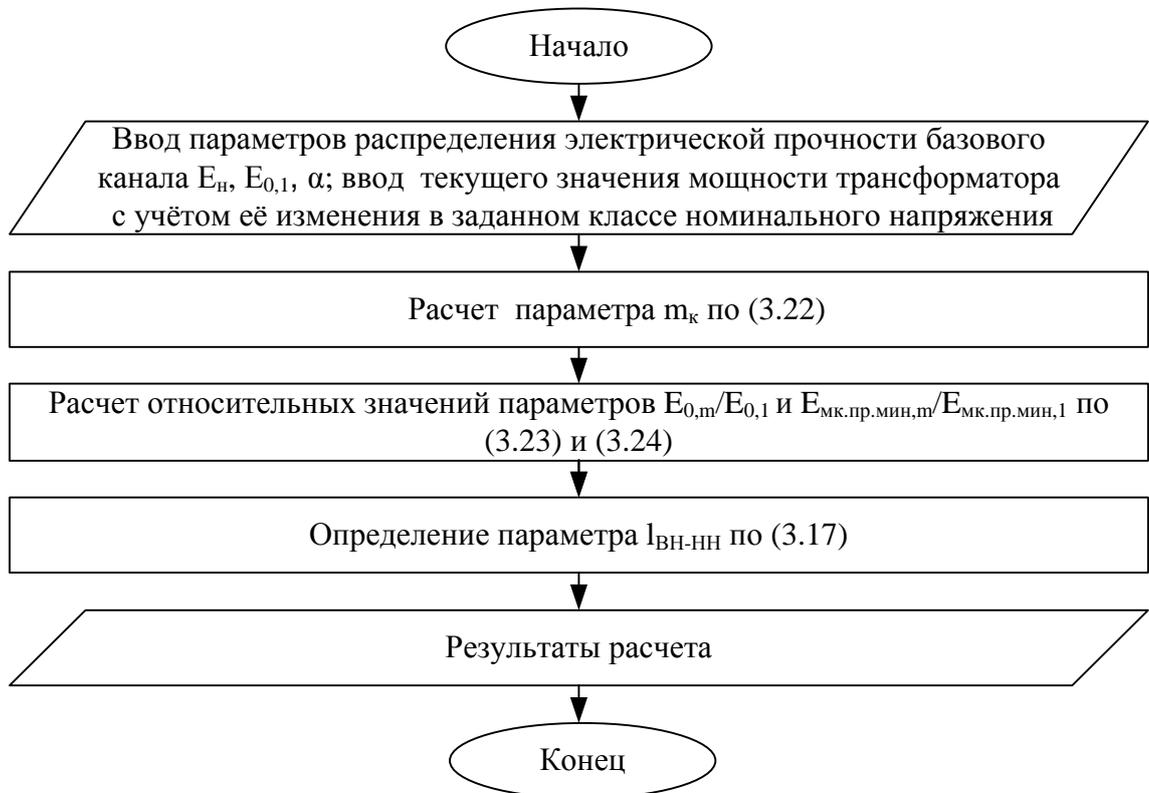


Рис. 3.2. Алгоритм расчета СХЭП масла в первом канале трансформаторов

Предложенный метод и разработанный алгоритм расчёта СХЭП масла в первом канале трансформаторов реализованы в программе **MathCad** [94, 95].

3.2. Изменение диагностических статистических характеристик электрической прочности масла в первом канале трансформаторов

В соответствии с предложенным методом выполнены расчёты СХЭП масла в первом канале трансформаторов для двухобмоточных трёхфазных трансформаторов на 110 кВ при изменении их мощностей в диапазоне $10^5 - 10^8$ ВА.

При расчётах приняты следующие исходные условия: $P_3 = 0,05$, $K_{ПЭ} = 1$, так как в расчётной модели учитываются СХЭП масла, $K_{из} = 1,1$, $U_p = 0,2$ (в соответствии с техническими параметрами силовых трансформаторов [53]), $r_{ВН,Б} = 0,0625$ м, $l_{мк,Б} = 8 \cdot 10^{-3}$ м [39], $l_{мк1,ВН} = 8 \cdot 10^{-3}$ м, $U_{расч} = 200$ кВ $= 2 \cdot 10^5$ В, $l_{с-нн} = 18 \cdot 10^{-3}$ м [53], $E_{0,1} = 10,1 \cdot 10^6$ В/м [39]. Значения мощности трансформатора, ВА: $10^5 - 10^8$.

Расчёты проводились при различных значениях параметров распределения $E_{0,1}/E_n$ и α . Результаты расчёта представлены на рис. 3.3 – 3.12.

На рис.3.3 представлено изменение относительного объёма масла в первом масляном канале m_k от мощности трансформаторов. Из рис. 3.3 следует, что с увеличением мощности трансформатора объём масла в первом канале возрастает, причём эта зависимость имеет фактически одинаковый вид в исследуемом диапазоне параметра α при соответствующем изменении мощности трансформатора от 10^5 до 10^8 ВА.

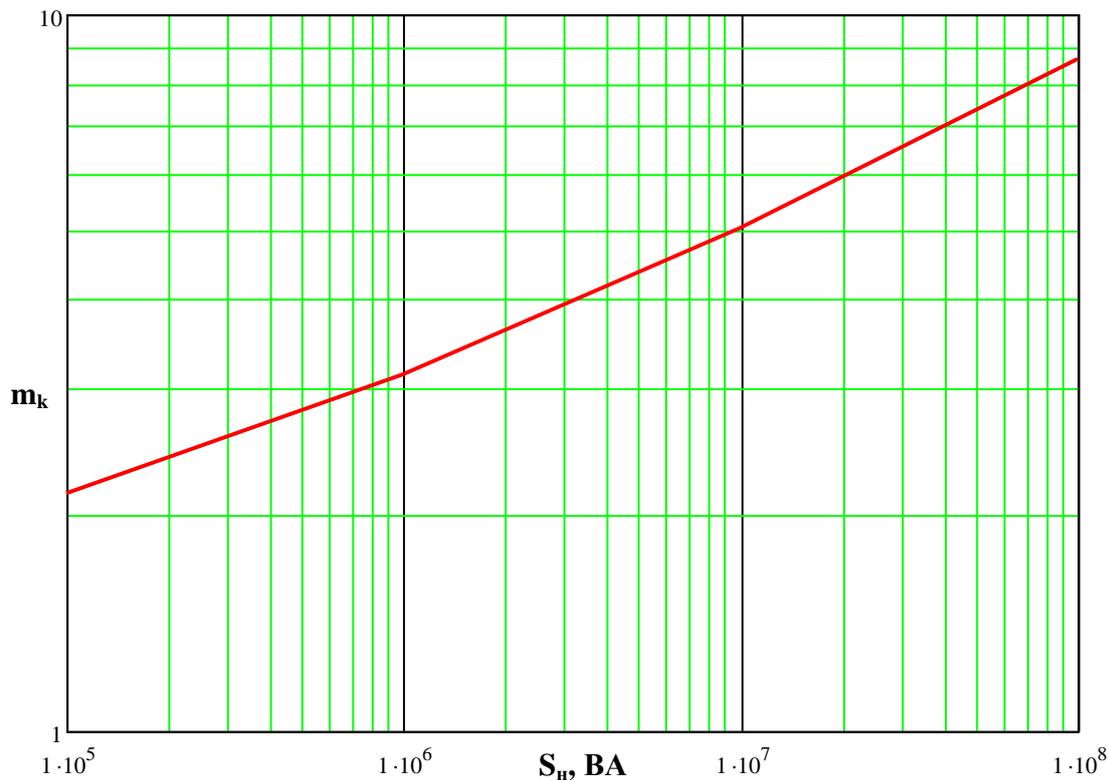


Рис. 3.3. Зависимость изменения относительного объёма масла в первом масляном канале m_k от номинальной мощности трансформатора на напряжение 110 кВ ($E_{0,1}/E_n = 2,5$)

На рис.3.4 и 3.5 представлено изменение значений относительной пробивной напряжённости масла в первом канале $E_{0,m}/E_{0,1}$ от параметра распределения α для мощностей трансформатора S_n соответственно 10^6 ВА и 10^8 ВА при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_n$.

Из рис. 3.4 и 3.5 следует, что для различных мощностей трансформаторов наблюдается возрастание относительной пробивной напряжённости масла в первом канале $E_{0,m}/E_{0,1}$ при увеличении параметра α , причём более чётко эти зависимости проявляются при больших значениях отношения $E_{0,1}/E_n$. Заметный излом в этих зависимостях наблюдается при $\alpha=2,5$. С ростом мощности трансформаторов значения $E_{0,m}/E_{0,1}$ уменьшаются при всех значениях α .

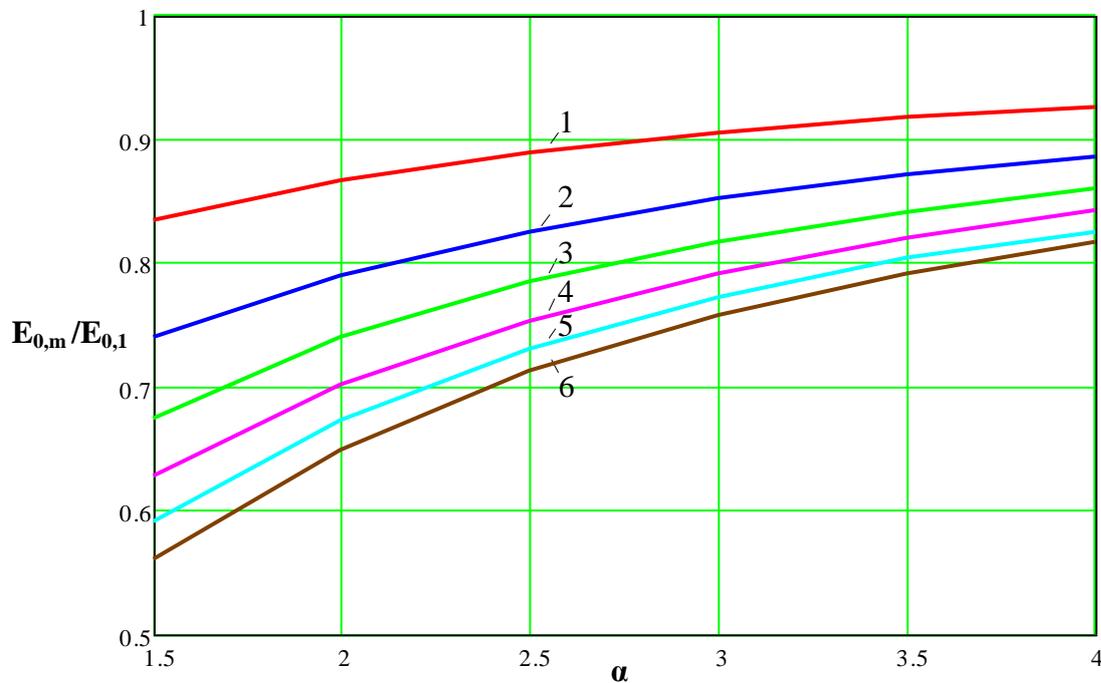


Рис. 3.4. Зависимости относительной пробивной напряжённости масла $E_{0,m}/E_{0,1}$ от параметра распределения α для мощности $S_n=10^6$ ВА при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_n$:

1, 2, 3, 4, 5, 6 – соответственно для $E_{0,1}/E_n$: 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4

На рис. 3.6 и 3.7 представлены зависимости относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1}$ от параметра распределения α соответственно для мощностей трансформаторов 10^6 и 10^8 ВА при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_n$. Отмечается, что изменение α в исследуемом диапазоне оказывает заметное (до 5%) влияние на минимальную электрическую

прочность масла, причём при больших мощностях это влияние проявляется более чётко. Во всех зависимостях наблюдается минимум значений пробивной напряжённости $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ вблизи значений $\alpha=2,5$.

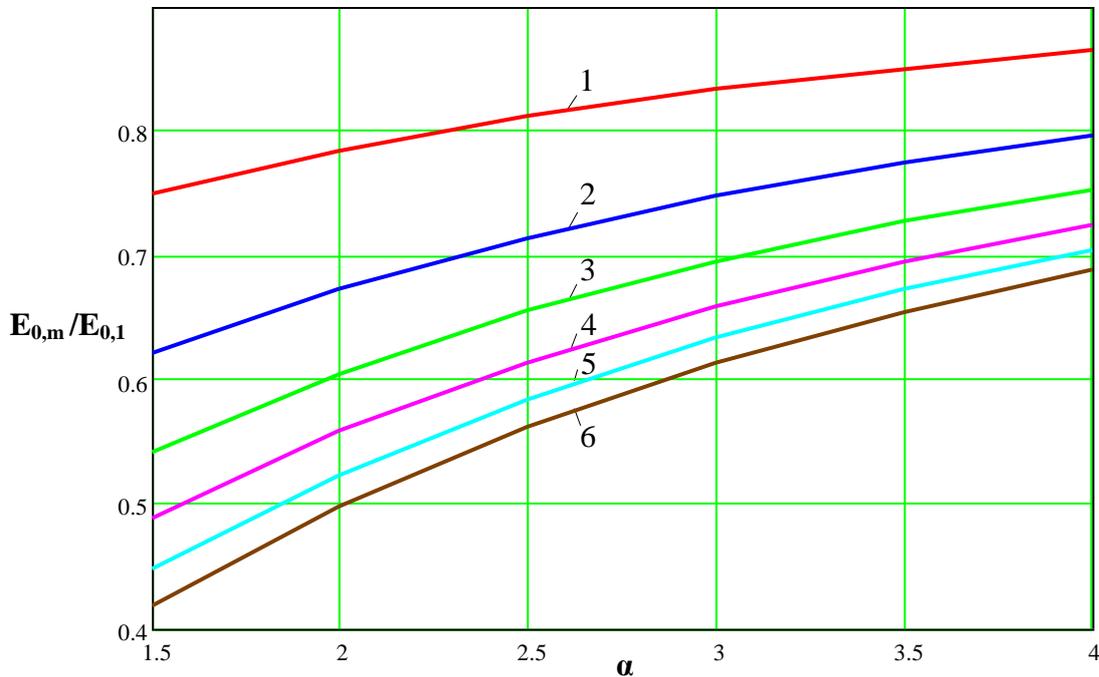


Рис. 3.5. Зависимости относительной пробивной напряжённости масла $E_{0,м}/E_{0,1}$ от параметра распределения α для мощности $S_n=10^8$ ВА при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_n$: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – соответственно для $E_{0,1}/E_n$: 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4

С учётом того, что минимальная пробивная напряжённость масла, как отмечалось выше, является основной характеристикой, по которой производится выбор главной изоляции силовых трансформаторов, следует в качестве расчётного параметра выбрать $\alpha=2,5$, при котором значение $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ будет минимальным.

На рис. 3.8 представлены зависимости относительной пробивной напряжённости масла $E_{0,м}/E_{0,1}$ от отношения $E_{0,1}/E_n$ при $\alpha=2,5$ для мощностей трансформаторов 10^6 и 10^8 ВА. Отмечается, что при увеличении отношения $E_{0,1}/E_n$ от 1,5 до 4 происходит уменьшение пробивных напряжённостей масла $E_{0,м}/E_{0,1}$ в 1,36 и 1,44 раза, причём степень снижения пробивных напряжённостей наблюдается выше при большей мощности трансформатора.

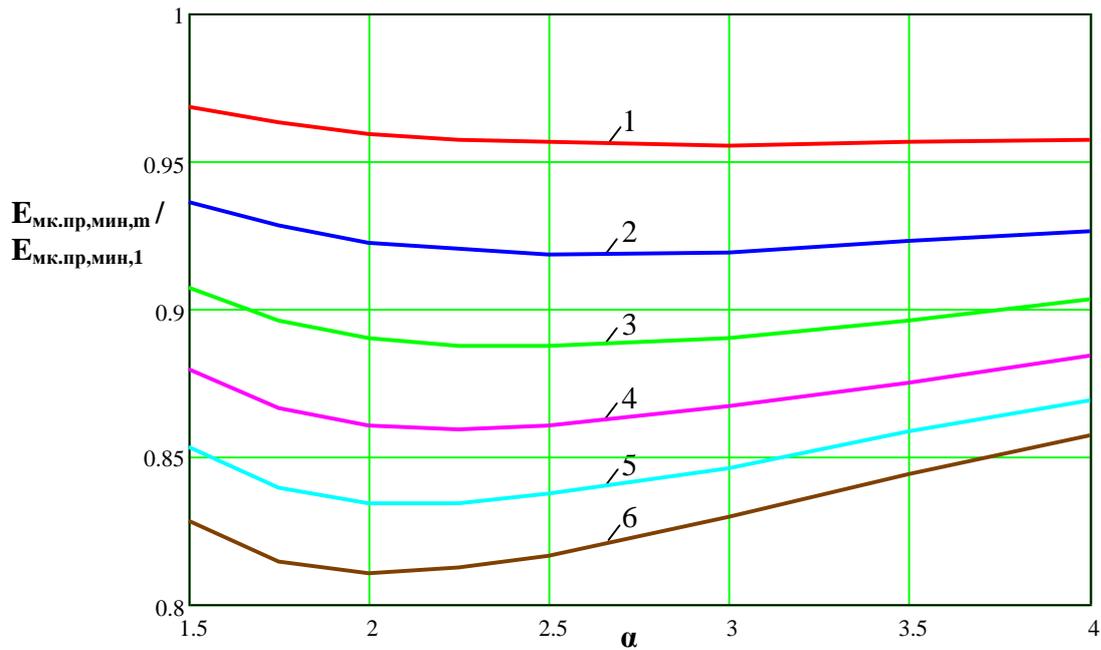


Рис. 3.6. Зависимости относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ от параметра распределения α для мощности $S_n=10^6$ ВА при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_n$:

1, 2, 3, 4, 5, 6 – соответственно для $E_{0,1}/E_n$: 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4

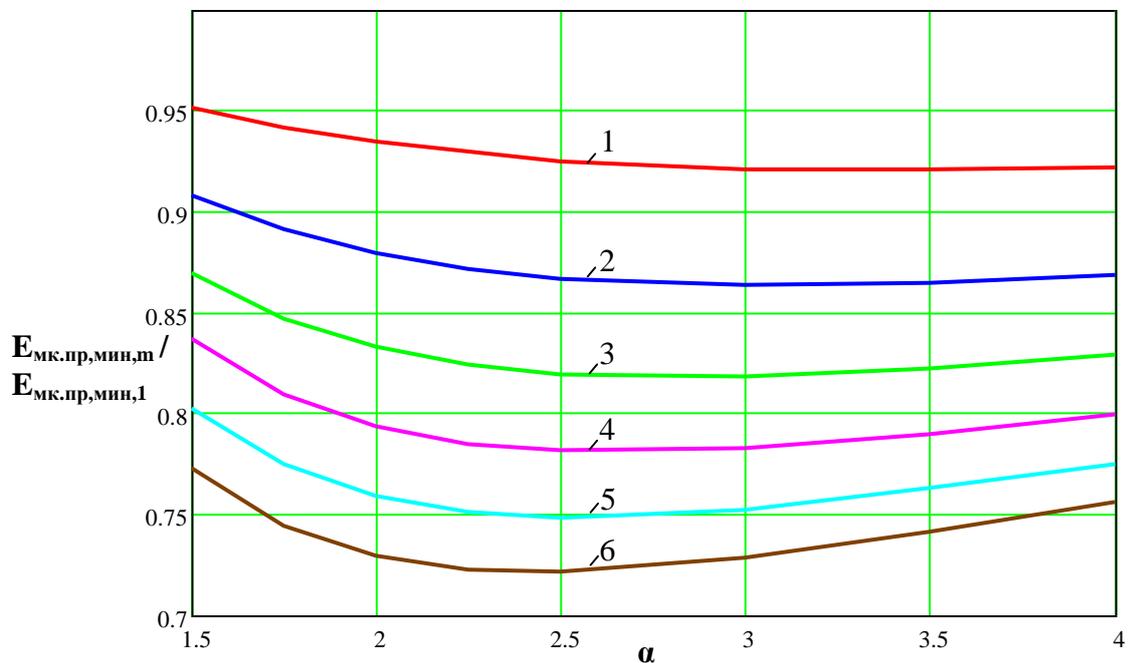


Рис. 3.7. Зависимости относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ от параметра распределения α для мощности $S_n=10^8$ ВА при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_n$:

1, 2, 3, 4, 5, 6 – соответственно для $E_{0,1}/E_n$: 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4

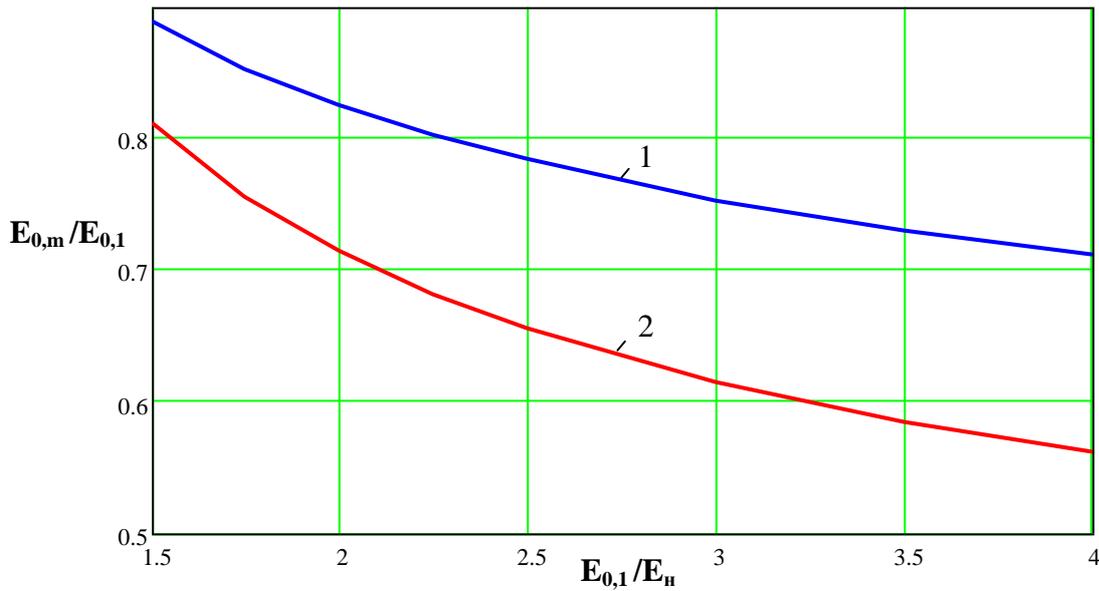


Рис. 3.8. Зависимости относительной пробивной напряжённости масла $E_{0,m}/E_{0,1}$ от отношения $E_{0,1}/E_H$ для параметра $\alpha=2,5$ при различных значениях мощности трансформаторов: 1,2 – соответственно для мощности трансформаторов 10^6 и 10^8 ВА

На рис. 3.9 приведены зависимости относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ от отношения $E_{0,1}/E_H$ для параметра $\alpha=2,5$ при значениях мощности трансформаторов 10^6 и 10^8 ВА. Здесь также отмечается, что при изменении отношения $E_{0,1}/E_H$ от 1,5 до 4 наблюдается уменьшение пробивных напряжённостей масла $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ в 1,17 и 1,28 раза. При этом степень этого уменьшения пробивных напряжённостей наблюдается выше для трансформаторов большей мощности.

Полученные результаты указывают на то, что существенное влияние на СХЭП масла оказывает безразмерный параметр $E_{0,1}/E_H$, который по физической сути представляет собой безразмерный статистический критерий изменчивости электрической прочности исходного трансформаторного масла $K_{иЕ}=E_{0,1}/E_H$.

Область значений этого коэффициента определяется неравенством $K_{иЕ} \geq 1$, причём при $K_{иЕ} \rightarrow 1$ (параметр $E_{0,1}$ приближается к E_H) разброс электрической прочности масла стремится к нулю.

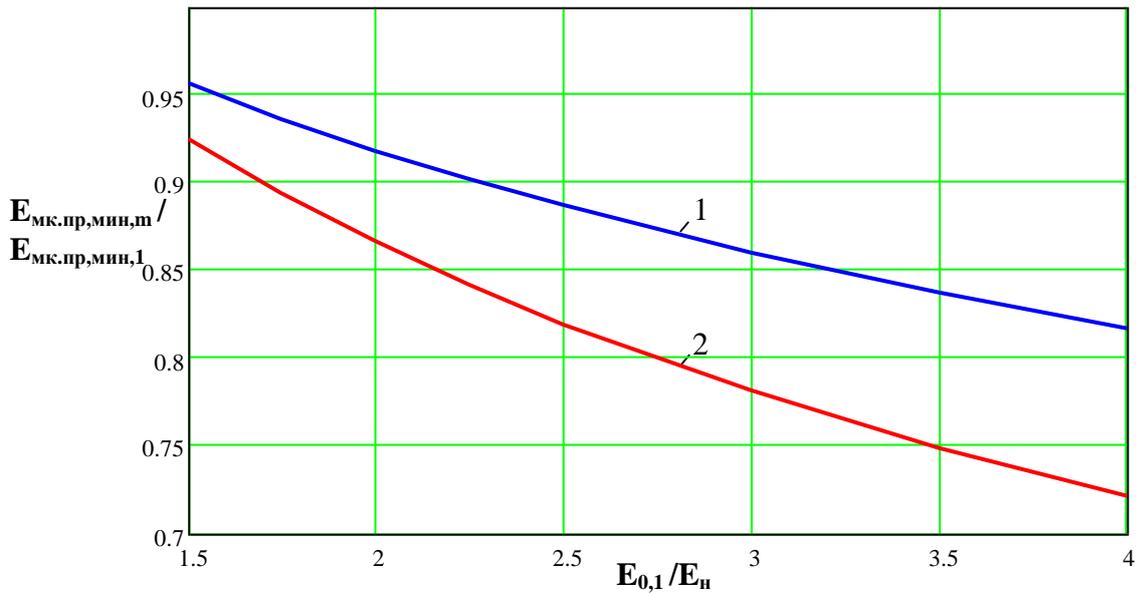


Рис. 3.9. Зависимости относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ от отношения $E_{0,1}/E_n$ для параметра $\alpha = 2,5$ при различных значениях мощности трансформаторов:

1,2 – соответственно для мощности трансформаторов 10^6 и 10^8 ВА

На рис. 3.10 представлено изменение относительной пробивной напряжённости масла $E_{0,м}/E_{0,1}$ от мощности трансформатора для заданного $\alpha=2,5$ при различных значениях коэффициента $K_{иЕ}=E_{0,1}/E_n$

Отмечается, что электрическая прочность первого масляного канала $E_{0,м}/E_{0,1}$ уменьшается с увеличением мощности трансформатора. При возрастании мощности от 10^5 до 10^8 ВА наибольший спад пробивной напряжённости масла $E_{0,м}/E_{0,1}$ достигает 23%. При этом для заданной мощности трансформатора по мере увеличения статистического критерия изменчивости $K_{иЕ}$ происходит уменьшение $E_{0,м}/E_{0,1}$.

На рис. 3.11 представлены зависимости относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ от мощности трансформатора при различных значениях статистического критерия изменчивости $K_{иЕ}$. При этом отмечается уменьшение $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ с ростом мощности трансформатора, причём уменьшение пробивной напряжённости в исследуемом диапазоне S_n происходит на 16%.

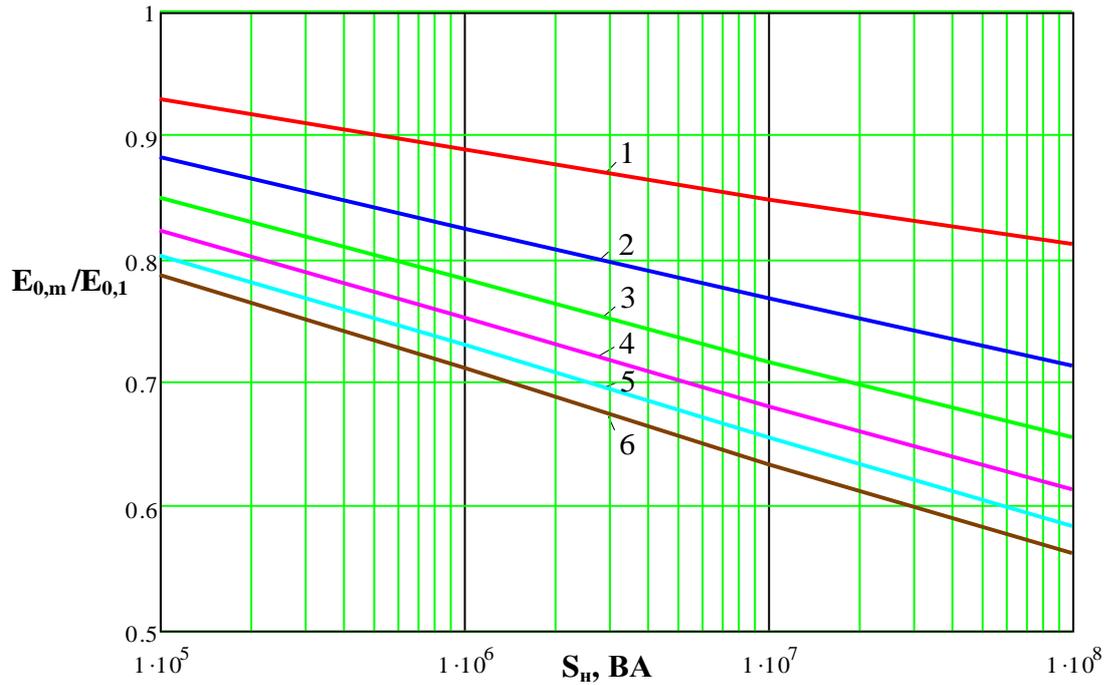


Рис. 3.10. Зависимости относительной пробивной напряжённости масла $E_{0,m}/E_{0,1}$ от мощности трансформатора для $\alpha=2,5$ при различных значениях коэффициента $K_{иЕ} = E_{0,1}/E_{н}$:
1,2,3,4,5,6 – соответственно для $E_{0,1}/E_{н}$: 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4

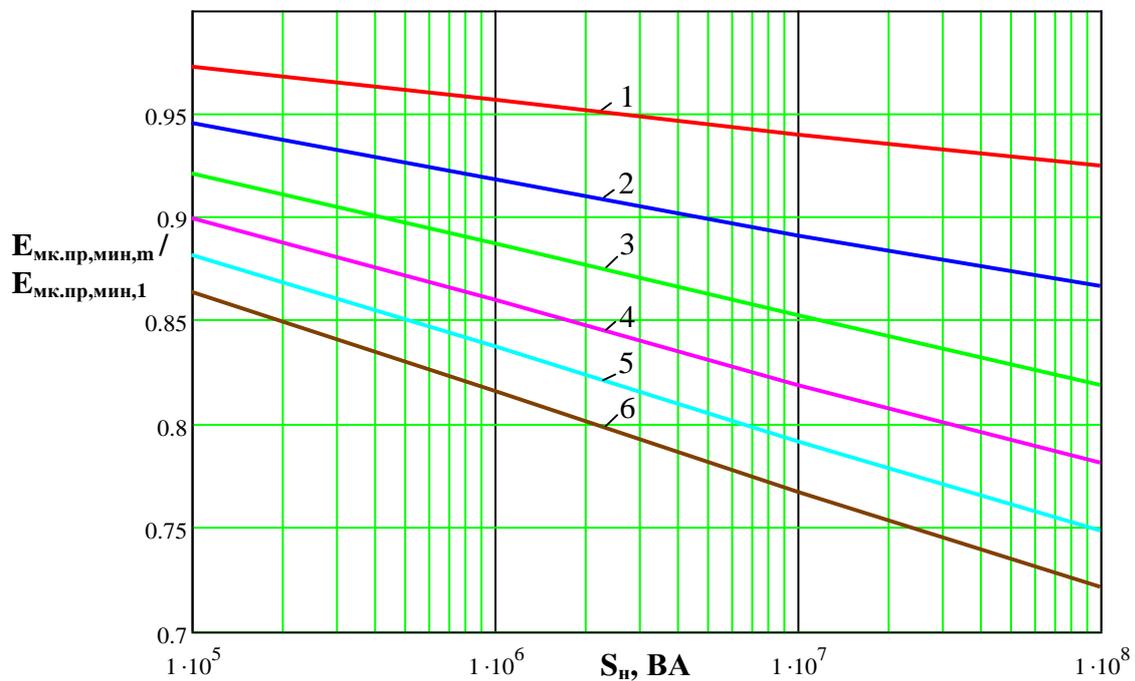


Рис. 3.11. Зависимости относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{мк.пр.мин,п}/E_{мк.пр.мин,1}$ от мощности трансформатора для $\alpha=2,5$ при различных значениях коэффициента $K_{иЕ} = E_{0,1}/E_{н}$:
1, 2, 3, 4, 5, 6 – соответственно для $E_{0,1}/E_{н}$: 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4

Одновременно с этим наблюдается существенное уменьшение $E_{\text{мк.пр.мин,п}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ при увеличении статистического критерия изменчивости $K_{иЕ}$.

Таким образом, основным комплексным параметром, определяющим изменение пробивной напряжённости масла, как было отмечено выше, служит её статистический критерий изменчивости $K_{иЕ} = E_{0,1}/E_{н}$, который может рассматриваться как обобщённый статистический параметр, характеризующий электрическую прочность масла.

Тогда решение задачи о выявлении роли мощности трансформатора на характеристики электрической прочности масла сводится к следующему. Исходным моментом здесь является обеспечение равенства относительной минимальной пробивной напряжённости $E_{\text{мк.пр.мин,п}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ заданному значению для всего ряда мощностей трансформаторов при заданном классе напряжения.

Для выполнения этого условия, как следует из полученных в этом параграфе результатов, при заданных мощности и напряжении трансформатора выбор предельного значения статистического критерия изменчивости электрической прочности исходного трансформаторного масла $K_{иЕ,пр}=(E_{0,1}/E_{н})_{пр}$ следует производить из условия равенства относительной минимальной пробивной напряжённости $E_{\text{мк.пр.мин,п}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ заданному значению для всего ряда мощностей трансформаторов заданного класса напряжения при $\alpha = 2,5$. В этом случае при выбранном для рассматриваемых условий предельном значении коэффициента $K_{иЕ,пр}$ пробивные напряжённости $E_{\text{мк.пр.мин,п}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ при всех других α будут выше заданного значения $E_{\text{мк.пр.мин,п}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$.

Тогда для других заданных номинальных мощностей и напряжений трансформаторов предельные значения статистического критерия изменчивости электрической прочности исходного трансформаторного масла $K_{иЕ,пр}=(E_{0,1}/E_{н})_{пр}$ найдутся аналогичным образом.

В соответствии с предложенным методом проведены необходимые расчёты, результаты которых представлены на рис. 3.12 в виде зависимости предельных значений статистического критерия изменчивости $K_{иЕ,пр}=(E_{0,1}/E_{н})_{пр}$ от мощности трансформаторов класса 110 кВ для параметра $\alpha=2,5$ при заданных постоянных

значениях относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$: 0,85, 0,9, 0,95.

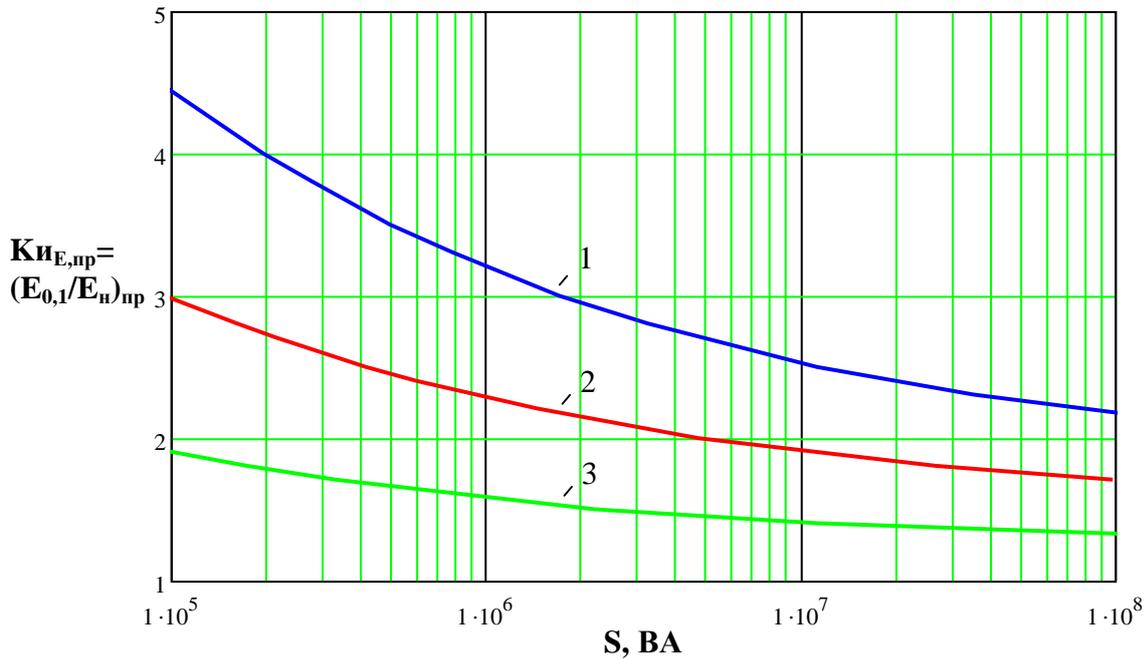


Рис. 3.12. Изменение предельного значения статистического критерия изменчивости $K_{iE,пр} = (E_{0,1}/E_n)_{пр}$ в зависимости от мощности трансформаторов для параметра $\alpha=2,5$ при заданных постоянных значениях минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$:

1, 2, 3 – для $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ соответственно 0,85, 0,9, 0,95

Из рис. 3.12 следует, что предельные значения статистического критерия изменчивости $K_{iE,пр}$ для исходного масла в модели трансформатора уменьшаются с ростом мощности трансформатора, а также с возрастанием допустимой минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$.

Следовательно, для трансформаторов заданного класса напряжения с ростом их мощности предельные значения статистического критерия изменчивости $K_{iE,пр}$ соответственно должны быть ниже.

Полученные результаты имеют важное значение при выборе диагностического критерия оценки технического состояния главной изоляции силовых трансформаторов с учётом их мощности и класса напряжения по

статистическим характеристикам электрической прочности трансформаторного масла, которые определяются в эксплуатации в стандартном маслопробойнике.

Эти вопросы далее рассматриваются в главах 4 и 5.

3.3 Выводы по главе 3

1. Разработан метод расчёта диагностических СХЭП масла в первом канале главной изоляции трансформаторов с применением трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, учитывающий влияние мощности и класса напряжения трансформаторов, а также статистические параметры пробивной напряжённости исходного трансформаторного масла.

Предложенный метод и разработанный алгоритм расчёта диагностических СХЭП масла в первом канале изоляции трансформаторов реализованы в программе MathCad.

2. Результаты выполненного вычислительного эксперимента показали, что в наибольшей степени отражает влияние мощности трансформатора на изменение СХЭП трансформаторного масла в каналах трансформатора статистический критерий изменчивости электрической прочности исходного трансформаторного масла $K_{иЕ} = E_{0,1}/E_n$.

Область значений этого коэффициента определяется неравенством $K_{иЕ} \geq 1$, причём при $K_{иЕ} \rightarrow 1$ разброс электрической прочности масла стремится к нулю.

3. Показано, что для обеспечения условия, при котором заданная минимальная электрическая прочность первого масляного канала изоляции трансформаторов $E_{мк.пр.мин}$ сохраняется неизменной для всего ряда мощностей трансформаторов заданного класса напряжения, выбор предельного значения статистического критерия изменчивости электрической прочности масла $K_{иЕ,пр} = (E_{0,1}/E_n)_{пр}$ следует производить при значении параметра $\alpha = 2,5$, при котором значение $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1}$ будет минимальным.

4. Показано, что СХЭП первого масляного канала $E_{0,m}/E_{0,1}$ и $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1}$ при возрастании мощности от 10^5 до 10^8 ВА уменьшаются соответственно на 23% и 16%. При этом для заданной мощности трансформатора по мере увеличения значения критерия $K_{иE}=E_{0,1}/E_n$ происходит уменьшение $E_{0,m}/E_{0,1}$ и $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1}$.

5. На основе выполненного вычислительного эксперимента в соответствии с предложенным методом получены зависимости предельных значений статистического критерия изменчивости электрической прочности масла $K_{иE,пр}=(E_{0,1}/E_n)_{пр}$ для исходного масла в модели трансформатора от мощности трансформаторов при заданных постоянных значениях относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1}$: 0,85, 0,9, 0,95.

При этом показано, что значения критерия $K_{иE,пр}=(E_{0,1}/E_n)_{пр}$ для исходного масла в модели трансформатора уменьшаются с ростом мощности трансформатора, а также с возрастанием допустимой минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1}$. Это указывает на то, что для трансформаторов с большей мощностью качество масла должно быть выше, а значения коэффициента $K_{иE,пр}$ соответственно должны быть ниже.

6. Получено аналитическое выражение для определения объёма масла в первом масляном канале, учитывающее влияние номинальных значений мощности и напряжений трансформаторов и статистических параметров пробивной напряжённости исходного масла.

ГЛАВА 4

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ЕГО ИСПЫТАНИЯХ В МАСЛОПРОБОЙНИКЕ

4.1. Повышение эффективности определения пробивного напряжения трансформаторного масла как диагностического параметра в испытательной ячейке маслопробойника

Оценка роли частиц примесей при пробое масла в маслопробойнике.

Существует несколько методик, относящихся к определению пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике. Основные из них: ГОСТ 6581-75 (Россия) [66], ASTM D1816-67 (1971) (США) [67], VDE 0370-1 DIN 57370-1 1978-12 (Германия) [65], IEC 60156 1995 (Международная электротехническая комиссия (МЭК)) [61]. Стандарты России и Германии в своих регламентах имеют ссылки на методику стандарта международной электротехнической комиссии (МЭК).

Проведённый анализ вышеотмеченных традиционных методик определение пробивного напряжения масла [95] позволил установить, что они имеют общий порядок проведения испытаний, предусматривающий предварительную подготовку испытательной ячейки, промывку ячейки с электродами испытуемой жидкостью и последующее заполнение её порцией масла, предназначенного для испытания.

Основные контролируемые параметры по этим методикам определения пробивного напряжения в маслопробойнике представлены в таблице 4.1.

Основные контролируемые параметры по традиционным методикам определения пробивного напряжения в маслопробойнике

Контролируемые параметры	Страна			IEC 60156 1995 (МЭК)
	Россия ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81)	США ASTM D1816-67 (1971)	Германия VDE 0370-1 DIN 57370-1 1978-12	
Электроды	сферической формы с радиусом 25 мм	VDE-электроды с радиусом 25 мм	сферической формы с радиусом 25 мм	сферической формы диаметром 12,5-13 мм
Расстояние между электродами, мм	2,5 ± 0,05	2,04 1,02	2,5 ± 0,05	2,5 ± 0,05
Объем, требуемый для одной пробы (порция)	не менее 300 мл	0,95 л	400±100 см ³	350-600 мл
Расстояние электродов до дна, стенок сосуда, мешалки, мм	12	12,7	15	12
Время выдержки перед началом испытания в сосуде, мин	10	3	10	5
Перемешивание масла перед испытанием	+	+	+	-;+
Скорость подъема напряжения	2 кВ/с ± 20 %	0,5 кВ/с±20%	2 кВ/с	2 кВ/с ± 0,2 кВ
Интервал времени между пробоями, мин	5	1	2	2
Число последовательных пробоев при испытаниях	6	6	6	6
Перемешивание масла при подъеме напряжения	-	+	-	-;+
Перемешивание масла между пробоями	+	+	+	+
Критерий статистического постоянства	$V_{<U_{пп}}> < 20\%$	$3(U_{пп,max} - U_{пп,min}) < U_{пп,min}$	-	-

Во всех методиках предусмотрено перемешивание масла между пробоями и 6 последовательных пробоев в испытуемой пробе масла.

Одновременно с этим в каждой методике имеются различия в значениях времён выдержки до начала испытания, после пробоев и длительности перемешивания масла.

По стандарту США перемешивание жидкости осуществляется перед проведением испытания и при подъеме напряжения. По российскому стандарту

не предусматривается перемешивание жидкости во время подъема напряжения. Стандарт МЭК предусматривает испытание с перемешиванием масла и без него.

Различие в имеющихся методиках определения пробивных напряжений в маслопробойнике, а также введение в эксплуатации более строгого соблюдения нормативных параметров не только по общему количеству механических примесей, но и по их количеству в зависимости от размера примесей [60], обуславливают необходимость уточнения влияния механических частиц примесей на эффективность определения пробивного напряжения в маслопробойнике.

В рассмотренных методиках различных стран применяется перемешивание масла между пробоями. Перемешивание масла, в котором находятся осевшие частицы примесей, образовавшиеся при пробоях, приводит к попаданию этих частиц в межэлектродное пространство и, соответственно, к снижению значений пробивного напряжения в последующих испытаниях.

Поэтому целесообразно проанализировать роль твёрдых примесей в исходной пробе масла, а также частиц примесей, образующихся после пробоя масла в маслопробойнике.

Роль примесей, находящихся в исходной пробе масла, при определении пробивного напряжения в маслопробойнике. Для каждой категории электрооборудования предусмотрены соответствующие классы чистоты трансформаторного масла [96], для которых в соответствии с ГОСТ 17216-71 [66] устанавливается распределение частиц по размерам в единице объёма масла. По методике ГОСТ 6581-75 в испытательную ячейку заливают объём масла 0,4 л., причём объём масла между электродами на два порядка меньше объёма ячейки. Это следует учитывать при анализе эффективности испытаний масла на пробой в стандартном маслопробойнике.

В связи с этим важно выяснить особенности изменения распределения частиц по размерам в объёме масла испытательной ячейки и в объёме масла между электродами. Для этого проведён расчёт числа частиц заданного размера в исследуемых объёмах масла при испытании его в маслопробойнике

применительно к эксплуатационному маслу различных категорий электрооборудования. Число частиц в объёме масла определялось по формуле:

$$N_{\text{ч}} = n_0 V_{\text{м}}, \quad (4.1)$$

где n_0 – число частиц заданного размера в единице объёма (счётная концентрация); $V_{\text{м}}$ – исследуемый объём масла.

Результаты расчёта представлены в таблице 4.2. Из анализа полученных данных следует, что в объёме масла, находящемся в зазоре между электродами испытательной ячейки, нет частиц в виде волокон, хотя в самой ячейке находится 80 и 160 волокон соответственно для классов чистоты эксплуатационного масла 12 и 13.

Из (4.1) находится выражение для определения граничного объёма масла между электродами, в котором будет хотя бы одна частица, то есть

$$V_{\text{м,г}} = 1/n_{\text{о,в}}, \quad (4.2)$$

где $n_{\text{о,в}}$ – штучная концентрация волокон в масле.

Тогда в соответствии с (4.2) граничные объёмы масла для классов чистоты (12) и (13) соответственно равны $5 \cdot 10^{-6}$ и $25 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$. В обоих случаях эти объёмы масла больше соответствующего объёма между электродами испытательной ячейки, равного $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Таким образом, существующая методика определения пробивного напряжения в стандартном маслопробойнике приводит к тому, что влияние волокон (особенно увлажнённых) на пробивное напряжение масла отражается не в полной мере.

С другой стороны, как отмечалось выше, содержание волокон в объёме испытательной ячейки достаточно велико, поэтому необходимо обеспечить их участие в формировании пробоя масла между электродами. Это можно осуществить путём совершенствования системы перемешивания масла в испытательной ячейке.

Содержание механических частиц примесей в заданном объёме трансформаторного масла, шт.

Категория электрооборудования	Класс чистоты масла по ГОСТ 17216-71 [97]	Объём масла	Число частиц в объёме масла при заданном диапазоне их размеров, мкм					
			св. 5 до 10	св. 10 до 25	св. 25 до 50	св. 50 до 100	св.100до 200	волокна
Электрооборудование до 220 кВ включительно	13	1 м ³	не нормируется	63·10 ⁷	63·10 ⁶	8·10 ⁶	2·10 ⁶	4·10 ⁵
		4·10 ⁻⁴ м ³ (объём масла в испытательной ячейке маслопробойника)	не нормируется	252·10 ³	252·10 ²	32·10 ²	800	160
		2·10 ⁻⁶ м ³ (объём масла в зазоре между электродами испытательной ячейки)	не нормируется	1260	126	16	4	нет
Электрооборудование свыше 220 кВ до 750 кВ включительно	12	1 м ³	63·10 ⁷	315·10 ⁶	315·10 ⁵	4·10 ⁶	10 ⁶	2·10 ⁵
		4·10 ⁻⁴ м ³	252·10 ³	126·10 ³	126·10 ²	16·10 ²	400	80
		2·10 ⁻⁶ м ³	1260	630	63	8	2	нет

Роль примесей, образующихся после пробоя масла, при определении пробивного напряжения в маслопробойнике. Образовавшиеся после пробоя частицы после снятия электрического напряжения начинают покидать промежуток: науглероженные твёрдые частицы постепенно оседают на дно, а пузырьки газа всплывают к границе раздела масло-воздух. Оценка возможного влияния примесей на эффективность определения пробивных напряжений масла в маслопробойнике проводилась с применением модели электродной системы маслопробойника (рис.4.1). Пробой масла происходит в центральной части электродов и сопровождается образованием пузырьков газа и науглероженных частиц.

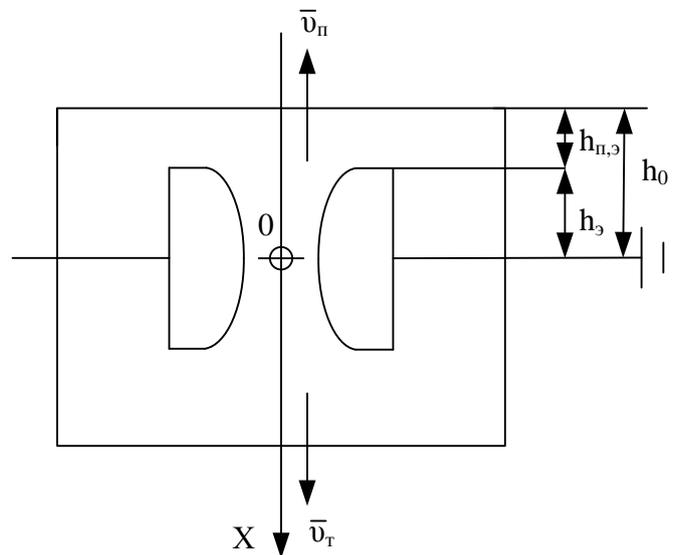


Рис. 4.1. Модель электродной системы маслопробойника

После пробоя масла на пузырьки газа и твёрдые частицы действуют силы тяжести F_T , Архимеда F_a и сопротивления масла движению этих частиц F_C . Тогда дифференциальное уравнение, описывающее движение этих частиц в общем виде запишется [68] так:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_T + \vec{F}_a + \vec{F}_c, \quad (4.3)$$

где m – масса дисперсной частицы, \vec{v} – скорость движения частицы.

С учётом выражений для действующих сил уравнение (4.3) принимает вид:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{\rho_{\text{ч}}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}}) - \frac{9\eta v}{2R_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}}}, \quad (4.4)$$

где g – ускорение свободного падения; $\rho_{\text{ч}}$, $\rho_{\text{м}}$ – плотность соответственно материала частицы и масла; $R_{\text{ч}}$ – радиус частицы; η – динамическая вязкость жидкости.

Граничные условия:

$$t=0, v = 0; t \rightarrow \infty, v = v_{\text{с}}, \quad (4.5)$$

где $v_{\text{с}}$ – скорость движения частицы в стационарном режиме.

Решение уравнения (4.4) при граничных условиях (4.5) даёт:

$$v = v_{\text{с}} \cdot \left(1 - e^{-t/\tau}\right), \quad (4.6)$$

$$\tau = \frac{2R_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}}}{9\eta}, \quad (4.7)$$

$$v_{\text{с}} = \frac{2R_{\text{ч}}^2 g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}})}{9\eta}. \quad (4.8)$$

Проведена оценка постоянной времени τ для характерных исходных данных: для масла – $\eta = 0,021$ Па·с, $\rho_{\text{м}} = 890$ кг/м³; для газа – $\rho_{\text{г}} = 1,293$ кг/м³; для твёрдых частиц – $\rho_{\text{ч}} = 2 \cdot 10^3$ кг/м³; радиусы газовых пузырьков и твёрдых частиц составляют $5 \cdot 10^{-5}$ м.

Расчёты по (4.7) показали, что постоянная времени τ для пузырьков газа и твёрдых частиц соответственно равны $0,34 \cdot 10^{-7}$ с и $0,5 \cdot 10^{-4}$ с. Следовательно, переходный процесс занимает незначительное время, и процесс движения пузырьков газа и твёрдых частиц можно считать стационарным, для которого пройденный частицей путь за время t найдётся так:

$$x = v_{\text{с}} t = \frac{2R_{\text{ч}}^2 g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}}) t}{9\eta}. \quad (4.9)$$

Применительно к маслопробойнику проведена оценка времени удаления пузырьков газа из области пробоя масла до поверхности раздела масло-воздух, а также времени оседания твёрдых частиц за пределы электродного пространства за время паузы в перемешивании масла после его пробоя. Время прохождения частиц примесей заданной высоты h определялось из (4.9):

$$t_h = \frac{9\eta h}{2R_q^2 g (\rho_q - \rho_m)}. \quad (4.10)$$

В случае всплывания пузырьков газа при определении высоты h учтено, что при пробое промежутка масла в маслопробойнике происходит их выброс из места пробоя под действием гидродинамических воздействий. Проведённые экспериментальные наблюдения показали, что в результате этого пузырьки газа сосредотачиваются на уровне внешней границы электродов. Тогда для маслопробойника [66] высоту всплывания пузырьков газа в оставшемся слое масла h можно оценить порядка 20 мм.

Выполненные расчёты для этого случая по (4.10) времён удаления пузырьков газа различного диаметра после его пробоя представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

**Изменение времени удаления пузырьков газа из места пробоя масла
в зависимости от их диаметра**

Диаметр пузырька газа, мкм	50	55	65	75	85
Время удаления пузырька t_h , мин	5,63	4,65	3,33	2,5	1,92

Из табл. 4.3 следует, что пузырьки газа с радиусом более 50 мкм удаляются из масла за время выдержки 5 минут, которое предусмотрено ГОСТ 6581-75 между пробоями.

Проведена также оценка размера газового пузырька, при котором он имеет минимальное пробивное напряжение, с применением закона Пашена [68]:

$$U_{n,p} = \frac{B \cdot p \cdot d_p}{\ln\left(A \cdot p \cdot \frac{d_p}{K}\right)}, \quad (4.11)$$

где, A , B – эмпирические постоянные, значения которых определяются видом электрического газа [68, с.56]; K - безразмерный коэффициент, определяющий условие самостоятельности разряда в газе; p – давление газа в пузырьке.

В соответствии с (4.11) минимальное разрядное напряжение имеет место при выполнении условия:

$$(p \cdot d_p)_{\text{экстр}} = \frac{e \cdot K}{A}, \quad (4.12)$$

где e – основание натурального логарифма.

В свою очередь минимальное разрядное напряжение с учётом (4.12) найдётся из (4.11) [68] так:

$$U_{п,р\ мин} = \frac{e \cdot K \cdot B}{A}. \quad (4.13)$$

Тогда из (4.12) при заданном давлении p найдется диаметр пузырька газа, при котором будет минимальное разрядное напряжение, то есть:

$$d_{п,экстр} = \frac{e \cdot K}{A \cdot p}, \quad (4.14)$$

При дальнейшем анализе учтем, что при пробоях трансформаторного масла в основном образуется водород [68, с.686]. Следовательно, образующиеся при этом пузырьки будут заполнены водородом H_2 . Тогда для водорода постоянные A и B найдутся из [68, с.56]: $A_{H_2} = 3,27 \quad 1/(\text{Па} \cdot \text{м})$, $B_{H_2} = 97,5 \quad \text{В}/(\text{Па} \cdot \text{м})$.

Коэффициент K для водорода K_{H_2} найдется из соотношения комплексов $(p \cdot d_{п})_{экстр}$ для воздуха и водорода по экспериментальным данным [68, с.92]. В результате с учетом (4.12) имеем:

$$\frac{(p \cdot d_{п})_{H_2}}{(p \cdot d_{п})_B} = \frac{1}{0,6} = \frac{K_{H_2} \cdot A_B}{K_B \cdot A_{H_2}}. \quad (4.15)$$

С учетом (4.15) запишется равенство:

$$K_{H_2} = \frac{K_B \cdot A_{H_2}}{0,6 \cdot A_B}. \quad (4.16)$$

Здесь в соответствии с вышеотмеченными рекомендациями можно принять $K_B=14$. Значение коэффициентов для воздуха находятся из [68, с.56]: $A_B = 11,25 \quad 1/(\text{Па} \cdot \text{м})$, $K_B=14$. Тогда из (4.21) имеем $K_{H_2} = 7,8$.

Тогда из (4.14) определяется диаметр пузырька водорода, соответствующего минимальному пробивному напряжению $d_{п,экстр} = 65 \text{ мкм}$. Время всплывания этого пузырька газа в соответствии с (4.10) равно 3,33 мин.

Аналогично из (4.14) найдётся граничный диаметр пузырька газа, при котором он удаляется из слоя масла в 20 мм за 5 минут – $d_{п,гр} = 53 \text{ мкм}$.

Таким образом, за время выдержки масла 5 мин (ГОСТ 6581-75) после его пробоя из слоя масла удаляются пузырьки газа диаметром $d_{п} \geq 53$ мкм. При этом пузырьки газа $d_{п} < 65$ мкм находятся в левой области кривой Пашена, где возрастают пробивные напряжения пузырьков.

Следовательно, нормативное время выдержки масла после его пробоя в 5 мин, предусмотренное в нашей стране является оправданным.

Твёрдые науглероженные частицы после пробоя масла формируются в центральной области электродной системы, поэтому в качестве характерной высоты, определяющей удаление частиц из межэлектродной области, можно принять высоту электродов. Тогда для стандартного маслопробойника [66] эту высоту слоя масла h можно принять 18 мм.

Выполненные расчёты для этого случая по (4.10) времён оседания твёрдых частиц после его пробоя представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

**Изменение времени оседания твёрдых частиц из места пробоя масла
в зависимости от их радиуса**

Диаметр твёрдой частицы, мкм	30	40	45	60	80	100
Время оседания частицы t_h , мин	11,1	6,3	5	2,8	1,6	1

Твёрдые науглероженные частицы (табл. 4.4) за 5 минут покидают межэлектродный промежуток при значениях их диаметров более 45 мкм.

Таким образом, после 5 мин выдержки масла после пробоя между электродами остаются частицы диаметром менее 45 мкм, которые оказывают существенное влияние на пробивное напряжение масла, а вблизи электродов находятся частицы диаметром 45 – 60 мкм, которые после подачи электрического напряжения могут затянуться в межэлектродную область и снизить пробивное напряжение масла.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что необходимо совершенствовать систему перемешивания трансформаторного масла в измерительной ячейке после его пробоя.

Разработка новой испытательной ячейки маслопробойника, позволяющей повысить эффективность определения пробивного напряжения масла как диагностического параметра. Анализ вышеотмеченных традиционных методик определения пробивного напряжения масла [96] также позволил выявить существенные различия в системе перемешивания масла в испытательной ячейке.

По ГОСТ 6581-75 после каждого пробоя жидкий диэлектрик в испытательной ячейке между электродами перемешивают при помощи стеклянной палочки. Это является существенным недостатком методики, так как при перемешивании жидкости стеклянной палочкой после каждого пробоя могут образовываться воздушные пузырьки, которые искажают значения пробивного напряжения.

Стандарт ASTM D1816-67 (1971, США) [67] предусматривает конструкцию испытательной ячейки, снабженную пропеллерной мешалкой, установленной вертикально. При этом за счёт вращения вертикально установленного вала пропеллерной мешалки на границе раздела воздух - жидкий диэлектрик вблизи поверхности вала жидкостью захватывается воздух, что также приводит к образованию воздушных пузырьков и искажению значения пробивного напряжения жидкого диэлектрика. Одновременно с этим при вращении пропеллера, установленного вблизи дна ячейки, происходит интенсивное взмучивание жидкого диэлектрика в придонном слое, в котором находятся осевшие частицы примесей, что приводит к заносу этих частиц в межэлектродное пространство и искажению значений пробивного напряжения в последующих испытаниях.

В испытательной ячейке для определения электрической прочности жидких диэлектриков ОТ-60 (испанская фирма CIRCUTOR) [98] в конструкции имеется, расположенный на дне ячейки перемешивающий стержень из магнитного материала. При проведении испытаний после каждого пробоя жидкий диэлектрик перемешивается стержнем, движущимся по поверхности дна ячейки под воздействием внешнего магнитного поля. Недостатком такой ячейки является то,

что при движении магнитного стержня по поверхности дна ячейки происходит интенсивное перемешивание жидкого диэлектрика в придонном слое, в котором находятся осевшие частицы примесей, образовавшиеся при предыдущих пробоях жидкого диэлектрика, что приводит к попаданию этих частиц в межэлектродное пространство и соответственно к искажению значений (снижению) пробивного напряжения в последующих испытаниях.

С учётом выявленных недостатков имеющихся конструкций испытательных ячеек была поставлена и решена задача по созданию новой испытательной ячейки для маслопробойника с эффективной системой перемешивания масла (рис. 4.2).

Устройство содержит источник высокого напряжения 1 с регистрирующими приборами и системой управления, электроды 2, испытательную ячейку 3 с жидким диэлектриком 4. Испытательная ячейка 3 выполнена из материала, который не оказывает воздействия на испытываемые жидкости и не растворяется в жидких электроизоляционных материалах. Корпус испытательной ячейки на параллельной оси электродов 2 боковой стороне выполнен с камерой 5, внутри которой установлены диэлектрический подшипник 6 и диэлектрический гребной вал 7, на котором со стороны электродов закреплена пропеллерная мешалка 8 так, что её ось перпендикулярна оси электродов по линии их симметрии. Пропеллерная мешалка 8 соединяется с приводом через магнитную муфту, состоящую из ведомой 9 и ведущей 10 полумуфт. Ведомая магнитная полумуфта 9 установлена на гребном валу 7 внутри камеры 5, ведущая магнитная полумуфта 10 установлена на приводном диэлектрическом валу 11. На чертеже представлен вариант магнитной муфты, состоящей из двух плоских полумуфт 9 и 10. Полумуфты 9 и 10, изготавливаются, например, с применением постоянных магнитов. Приводной вал 11 с ведущей магнитной полумуфтой 10 установлены внутри диэлектрического колпака 12, закреплённого с внешней стороны камеры 5, например, при помощи винтов.

Система из подшипника 6, гребного вала 7 с пропеллерной мешалкой 8 и ведомой магнитной полумуфтой 9 представляет собой единый узел, который удерживается в камере ячейки 3 за счёт взаимодействия магнитных полумуфт 9 и

10. Подшипник 6 в камере ячейки 3 и гребной вал 7 в подшипнике 6 установлены с зазором, что обеспечивает быстрое удаление воздуха при заполнении ячейки жидким диэлектриком, а также уменьшает трение при вращении гребного вала. Присоединение приводного вала 11 к приводу 13 выполняется через специальный разъем, позволяющий оперативно снимать испытательную ячейку для смены и испытания очередного образца жидкого диэлектрика.

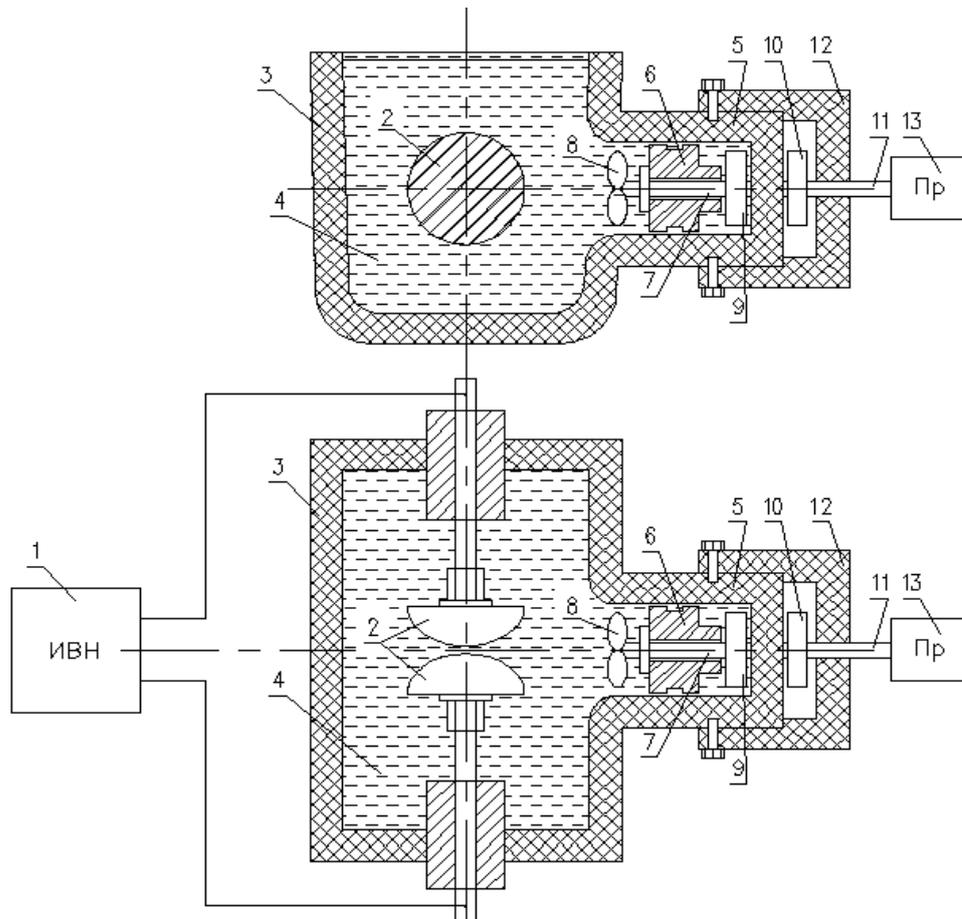


Рис. 4.2. Конструктивное исполнение предложенной испытательной ячейки

При определении пробивного напряжения жидкого диэлектрика через десять минут после заполнения ячейки маслом на образец подают электрическое напряжение от источника высокого напряжения 1, плавно поднимают до пробоя и фиксируют значение пробивного напряжения. При одном заполнении ячейки жидким диэлектриком осуществляют шесть последовательных пробоев с интервалами между каждым из них в пять минут. После каждого пробоя и в интервалах между ними при помощи пропеллерной мешалки 8 жидкость между

электродами 2 перемешивается для удаления продуктов разложения из межэлектродного пространства. При запуске привода 13 начинает вращаться приводной вал 11 с ведущей магнитной полумуфтой 10, которая увлекает ведомую магнитную полумуфту 9 и пропеллерную мешалку 8.

При вращении пропеллерной мешалки 8 формируется «затопленная струя» жидкого диэлектрика, направленная в межэлектродный промежуток перпендикулярно электродам по оси их симметрии. Тем самым происходит смена порции жидкости между электродами. При этом в объёме жидкости не образуются пузырьки воздуха, так как «затопленная струя» не выходит на границу раздела жидкость – воздух. Данный положительный эффект обусловлен также тем, что «затопленная струя» достигает противоположной стенки испытательной ячейки и плавно растекается по ней. В результате этого «затопленная струя» не затрагивает придонную область испытательной ячейки, в результате чего осевшие на дне ячейки частицы примесей, образующиеся в результате предварительных пробоев жидкого диэлектрика, остаются на дне и не участвуют в формировании пробоя жидкого диэлектрика. Всё это приводит к повышению достоверности определения пробивного напряжения.

Главным отличительным признаком предложенной испытательной ячейки является применение 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.

Основным конструктивным отличием этой испытательной ячейки от рассмотренных конструкций ячеек является то, что боковая стенка корпуса ячейки, параллельная оси электродов, выполнена с камерой, внутри которой горизонтально установлена пропеллерная мешалка, ось которой перпендикулярна оси электродов по линии их симметрии, соединённая с приводом через магнитную полумуфту.

Предложенная конструкция испытательной ячейки запатентована [99] – патент на изобретение №2507524 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1). Данное устройство для

определения пробивного напряжения жидких диэлектриков может использоваться при соблюдении регламентов, установленных ГОСТ 6581-75 (Россия), стандартом ASTM D1816-67 (1971, США) и другими аналогичными нормативными документами.

Оценка эффективности предложенной системы перемешивания масла с применением затопленной струи была произведена экспериментально. Проводились сравнительные испытания масла на пробой с применением предложенной системы перемешивания, а также по ГОСТ 6581-75.

Для создания одинаковых условий пробоя масла по этим методикам была проведена работа по адаптации предложенных технических принципов перемешивания масла (патент №2507524) применительно к стандартной испытательной ячейке. С этой целью были разработаны специальная диэлектрическая (пластмассовая) насадка с пропеллером, которая устанавливалась на боковую стенку стандартной ячейки (рис. 4.3), и блок ведущей магнитной полумуфты с приводом (рис. 4.4).

Насадка с диэлектрическим пропеллером размещается в ячейке так (рис. 4.3), что пропеллер устанавливается вблизи внутренней поверхности ячейки, а его ось перпендикулярна оси электродов по линии их симметрии. На поверхности диэлектрического пропеллера, обращённой к внутренней боковой поверхности ячейки жёстко закреплены ферромагнитные частицы удлинённой формы, которые придают пропеллеру функции ведомой магнитной полумуфты.

Блок ведущей магнитной полумуфты с приводом (рис. 4.4) состоит из магнитной полумуфты, выполненной из постоянного магнита, и привода, включающего в себя двигатель постоянного тока и редуктор. Валы элементов данного блока соединены между собой механическими муфтами, что обеспечивает вращение постоянного магнита с различной скоростью от электродвигателя. Измерение скорости вращения постоянного магнита проводилось лазерным портативным цифровым тахометром АКПП-9202 с погрешностью измерения 0,1 об/мин.

Общий вид предложенной системы перемешивания масла в стандартной ячейке представлен на рис. 4.5. Здесь ведущая магнитная полумуфта

устанавливается так, что постоянный магнит находится вблизи боковой поверхности ячейки (зазор 1,5 – 2 мм обеспечивается конструкцией блока полумуфты), а ось его вращения совпадает с осью вращения пропеллера. Электродвигатель подключается к источнику питания постоянного тока Б5-49, обеспечивающего регулировку величины выходного напряжения.

Испытания трансформаторного масла на пробой проводились с применением маслопробойника АИМ-80, в который устанавливалась испытательная ячейка с маслом. Насадка с диэлектрическим пропеллером оставалась в испытательной ячейке при проведении сопоставительных испытаний по двум методикам. При этом за основу была принята методика по ГОСТ 6581-75, в соответствии с которой после заполнения ячейки маслом выдерживается интервал 10 мин. Затем последовательно проводят 6 пробоев в данной пробе масла. Между пробоями выдерживается интервал 5 мин. После каждого пробоя при помощи стеклянной палочки масло между электродами перемешивают.

Особенность испытаний по предложенной методике состояла в том, что после каждого пробоя масло в ячейке перемешивалось с применением пропеллера, приводимого в движение ведущей магнитной полумуфтой.

При этом испытательная ячейка извлекалась из маслопробойника и устанавливалась вблизи ведущей магнитной полумуфты (рис. 4.5).

Затем включался электропривод и проводилось перемешивание масла в ячейке вращающимся пропеллером в течение 20 секунд. Этого времени достаточно для полного перемешивания масла в ячейке при используемых в экспериментах скоростях вращения пропеллера, изменяющихся в диапазоне 180 – 310 об/мин. Такие скорости перемешивания масла приняты с учётом накопленного опыта испытаний за рубежом по стандартам ASTM D1816-67 (1971, США), где скорость пропеллерной мешалки составляет 200 – 300 об/мин.

После перемешивания масла пропеллером ячейка вновь устанавливалась в маслопробойник и после выдержки времени – 5 минут между пробоями – производился очередной пробой.



Рис. 4.3. Съёмная диэлектрическая насадка с пропеллером, установленная на боковой стенке стандартной ячейки



Рис. 4.4. Блок ведущей магнитной полумуфты с приводом



Рис. 4.5. Общий вид предложенной системы перемешивания масла в стандартной ячейке

Полученные результаты представлены в табл. 4.5. Отмечается, что результаты испытаний по ГОСТ 6581-75 и в ячейке с применением предложенного устройства, формирующего затопленную струю, имеют определённые различия.

Наблюдается уменьшение значений среднего пробивного напряжения и параметра U_0 в случае перемешивания масла по предложенной методике. Однако для исследуемых образцов масла это различие находится в узком диапазоне 2,1 – 5,7 %.

Для всех масел наблюдается существенное увеличение значений отношения U_0/U_H 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_H 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 перемешивания масла с применением предложенного устройства в исследуемом диапазоне скоростей в явном виде не обнаружено.

Полученные результаты можно объяснить тем, что применение предложенного устройства позволяет более эффективно перемешивать масло в ячейке, обеспечивая тем самым полную смену масла между электродами. В результате возрастает вероятность попадания в промежуток между электродами волокон и других крупных частиц, что в первую очередь проявляется в снижении нижнего предела пробивного напряжения и возрастании отношения U_0/U_H .

Таблица 4.5

**Статистические характеристики электрической прочности трансформаторного масла, определяемые по результатам испытаний
в маслопробойнике при различных методах его перемешивания**

№ образца масла	Методы перемешивания масла	Режимы перемешивания масла	Пробивные напряжения при текущем номере пробы, кВ						$\langle U_{пр} \rangle$, кВ	$V_{\langle U_{пр} \rangle}$, %	U_0 , кВ	U_H , кВ	α	U_0/U_H
			1	2	3	4	5	6						
1	ГОСТ 6581-75	ручное	64	67	69	80	69	80	71,5	3,902	72,872	60,170	1,707	1,211
	Предложенный	180 об/мин	73	82	64	61	68	76	70,667	4,529	73,369	47,089	3,312	1,558
		250 об/мин	56	72	78	70	71	80	71,167	4,846	74,269	41,258	3,97	1,8
		310 об/мин	80	60	75	58	68	68	68,167	5,059	71,037	43,527	3,202	1,632
2	ГОСТ 6581-75	ручное	61	66	60	65	74	75	66,833	3,891	67,216	59,496	1,155	1,13
	Предложенный	180 об/мин	70	71	59	57	73	70	66,667	4,183	69,175	42,481	3,97	1,628
		250 об/мин	52	63	66	67	55	75	63,0	5,453	65,9	37,696	3,312	1,748
		310 об/мин	52	69	67	68	67	62	64,167	4,092	66,529	41,396	3,97	1,607
3	ГОСТ 6581-75	ручное	62	58	57	74	66	65	63,667	3,99	64,042	56,496	1,16	1,134
	Предложенный	180 об/мин	65	56	51	66	63	68	61,5	4,378	63,922	38,149	3,97	1,676
		250 об/мин	58	60	64	69	49	64	60,667	4,617	63,186	36,378	3,97	1,737
		310 об/мин	59	65	68	53	53	61	59,833	4,193	61,951	41,352	3,312	1,498
4	ГОСТ 6581-75	ручное	51	50	54	54	66	65	56,667	5,067	58,408	43,118	2,016	1,36
	Предложенный	180 об/мин	44	45	51	54	60	58	52	5,2	54,4	28,6	3,97	1,9
		250 об/мин	55	55	40	59	61	58	54,667	5,641	57,441	27,922	3,97	2,057
		310 об/мин	46	42	47	58	62	63	53	6,992	56,128	25,701	3,312	2,184
5	ГОСТ 6581-75	ручное	44	45	46	45	46	57	47,167	4,22	48,156	39,033	1,719	1,234
	Предложенный	180 об/мин	41	39	49	45	36	49	43,33	4,828	45,1	27,92	3,312	1,615
		250 об/мин	43	49	40	39	49	50	45	4,481	46,814	27,512	3,97	1,702
		310 об/мин	50	43	40	39	48	51	45,167	4,694	47,074	26,782	3,97	1,758

4.2. Применение трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла для определения диагностических параметров пробивных напряжений трансформаторного масла в маслопробойнике

Оценка диапазонов изменения параметров распределения Гнеденко-Вейбулла. Наличие трёх параметров распределения обуславливает трудности их определения по результатам малой экспериментальной выборки, когда применение вероятностных бумаг [72] и компьютерных программ с реализацией метода наименьших квадратов [58] не даёт приемлемых результатов.

В силу этого важно разработать метод определения параметров трёхпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла на основе более полного учёта параметров экспериментального распределения по результатам малой выборки.

Для рационального решения этой задачи важно предварительно установить диапазоны изменения определяемых параметров.

Область изменения параметра $U_{пр,н}$ по физическим соображениям можно записать так:

$$0 < U_{пр,н} < U_{пр,мин} , \quad (4.17)$$

где $U_{пр,мин}$ – минимальное значение пробивного напряжения в серии экспериментальных данных.

Параметр α может быть любой положительной величиной [72, с.335]. Однако для рационального решения поставленной задачи важно установить нижнее и верхнее значения этого параметра, характерные для распределения электрической прочности трансформаторного масла.

При $\alpha = 1$ распределение Гнеденко-Вейбулла вырождается в простое экспоненциальное распределение, потому должно соблюдаться условие:

$$\alpha > 1. \quad (4.18)$$

Верхнее значение параметра α можно установить на основе анализа свойств моды распределения Гнеденко-Вейбулла. Она соответствует максимальной плотности вероятности [100. с.90], поэтому имеет место условие: $f'(U)=0$. Тогда с

учетом этого условия и выражения (1.2) находится выражение для моды распределения:

$$U_M = U_H + (U_0 - U_H) \cdot (1 - 1/\alpha)^{1/\alpha}. \quad (4.19)$$

Оценка значений моды распределения при изменении параметра α в диапазоне $1 < \alpha < \infty$ в соответствии с (4.19) даёт: при $\alpha \rightarrow \infty$ мода распределения U_M стремится к U_0 , при $\alpha \rightarrow 1$ значение U_M стремится к U_H . В результате диапазон изменения моды распределения запишется так:

$$U_H < U_M < U_0. \quad (4.20)$$

При достаточно больших значениях α распределение становится более симметричным и U_M смещается к U_0 , оставаясь всегда меньше U_0 , то есть

$$U_M = \gamma \cdot U_0, \quad (4.21)$$

где γ – постоянный коэффициент, причём $\gamma < 1$.

С учётом (4.21) выражение (4.19) примет вид:

$$[(\gamma \cdot U_0 / U_H - 1)] / [(U_0 / U_H - 1)] = (1 - 1/\alpha)^{1/\alpha}. \quad (4.22)$$

Для случая больших α , когда $(1/\alpha) \ll 1$, из (4.22) найдётся выражение для оценки параметра α :

$$\alpha = [(1 - U_H / U_0) / (1 - \gamma)]^{1/2}. \quad (4.23)$$

При больших значениях α , как отмечалось выше, значения U_M близки к U_0 , поэтому для оценки верхней границы можно принять $\gamma = 0,99$. Предварительно проведёнными экспериментами показано, что значения отношения U_H / U_0 , равные 0,3 – 0,4, находятся в средней части возможных значений U_H / U_0 , наблюдаемых в опытах. Тогда с учётом этой исходной информации, найденные по (4.23) значения α находятся вблизи $\alpha = 8$.

В результате рациональный диапазон значений α определяется так:

$$1 < \alpha \leq 8. \quad (4.24)$$

Оценку диапазона изменения параметра U_0 можно получить из (1.5) при анализе соотношения:

$$\frac{U_0}{\langle U \rangle} = \frac{1}{N} - \frac{U_n}{\langle U \rangle} \cdot \left(\frac{1}{N} - 1 \right), \quad (4.25)$$

$$N = \ln [- (1 - F(\langle U \rangle))]^{1/\alpha}.$$

С учётом вышеуказанных диапазонов изменения параметров α и U_n диапазон изменения соотношения $U_0/\langle U_{пр} \rangle$ в соответствии с выражением (4.25) определяется так:

$$1,0 < (U_0/\langle U_{пр} \rangle) < 1,2. \quad (4.26)$$

Выражение (4.26) указывает на близость значений параметров U_0 и $\langle U_{пр} \rangle$.

Выбор и обоснование метода и основных уравнений для определения параметров распределения Гнеденко-Вейбулла по результатам эксперимента. С учётом того, что вид распределения пробивных напряжений известен для полной оценки характеристик распределения электрической прочности масла целесообразно применение метода моментов [72, 101], который состоит в том, что по результатам эксперимента определяются моменты, характеризующие заданное распределение.

В исследуемом распределении Гнеденко-Вейбулла имеется три параметра, поэтому для их определения необходимо знать три момента.

К наиболее информативным моментам относятся [100]:

- первый начальный момент – математическое ожидание $M(U)$;
- второй центральный момент – дисперсия электрической прочности масла $D(U)$;
- третий центральный момент μ_3 .

В общем виде выражение для математического ожидания пробивного напряжения запишется [100]:

$$M(U) = \int_{U_n}^{\infty} U f(U) dU, \quad (4.27)$$

Дифференциальная функция распределения пробивного напряжения $f(U)$ найдётся из (1.5) так:

$$f(m,U) = F'(m,U) = \frac{\alpha_m}{U_0 - U_H} \cdot \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^{(\alpha-1)} \times \exp \left[-m \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^\alpha \right]. \quad (4.28)$$

Тогда выражение (4.27) с учётом (4.28) примет вид:

$$M(U) = \frac{\alpha_m}{U_0 - U_H} \cdot \int_{U_H}^{\infty} \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^{(\alpha-1)} \times \exp \left[-m \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^\alpha \right]. \quad (4.29)$$

В качестве оценки математического ожидания выступает экспериментально определяемое значение среднего пробивного напряжения:

$$\langle U_{np} \rangle = \left(\sum_{i=1}^n U_{np,i} / n \right). \quad (4.30)$$

В общем виде выражение для дисперсии пробивного напряжения запишется [100]:

$$D(U) = \int_{U_H}^{\infty} (U - \langle U_{np} \rangle)^2 f(U) dU. \quad (4.31)$$

Тогда выражения (4.31) с учётом (4.30) примет вид:

$$D(U) = \sigma_{U_{np}}^2 = \frac{\alpha_m}{U_0 - U_H} \cdot \int_{U_H}^{\infty} (U - \langle U_{np} \rangle)^2 \cdot \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^{(\alpha-1)} \times \exp \left[-m \cdot \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^\alpha \right] dU \quad (4.32)$$

Здесь $\sigma_{U_{np}}$ – среднее квадратическое отклонение пробивного напряжения масла от его среднего значения.

В качестве оценки дисперсии выступает квадрат экспериментально определяемого значения среднего квадратического отклонение пробивного напряжения масла [101]:

$$\sigma_{U_{np}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{np,i} - \langle U_{np} \rangle)^2}{n-1}}. \quad (4.33)$$

В общем виде выражение для третьего центрального момента μ_3 пробивного напряжения запишется [100]:

$$\mu_3 = \frac{\alpha}{U_0 - U_H} \cdot \int_{U_H}^{\infty} (U - \langle U_{np} \rangle)^3 \cdot \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^{(\alpha-1)} \times \exp \left[- \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^\alpha \right] dU. \quad (4.34)$$

В качестве оценки μ_3 выступает экспериментально определяемое значение $\mu_{3, \text{эксп}}$:

$$\mu_{3, \text{эксп}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (U_{np,i} - \langle U_{np} \rangle)^3. \quad (4.35)$$

В результате параметры распределения найдутся из (4.29), (4.32) и (4.34) численными методами.

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: первый начальный момент, второй и третий центральные моменты.

На первом этапе исследования было выявлено, что численным методом с применением специально разработанной программы при заданных различных значениях параметра α_i находятся соответствующие комбинации значений параметров распределения $U_{0,i}$ и $U_{H,i}$, при которых расчётные и экспериментальные значения для среднего пробивного напряжения и среднеквадратичного отклонения полностью совпадают.

Применение третьего центрального момента распределения μ_3 для отыскания истинных значений параметров U_H , U_0 , α показало, что не удаётся получить приемлемого результата по критерию минимума погрешности при сопоставлении расчётных и экспериментальных значений μ_3 .

Кроме того, при анализе результатов расчёта различных серий экспериментальных данных встречаются неопределённости – значение нижнего предела пробивного напряжения, начиная с некоторого значения α_i , становится отрицательным, что противоречит физическому смыслу.

Для исключения этих неопределённостей решения этой задачи был проведён специальный анализ экспериментальных распределений пробивных напряжений по данным эксплуатационных испытаний в маслопробойнике в целях

установления связей третьего центрального момента μ_3 с другими параметрами и признаками исследуемого распределения Гнеденко-Вейбулла. При этом было выявлено, что величина и знак μ_3 отражают степень асимметрии распределения и положение моды распределения по отношению к среднему пробивному напряжению.

Степень асимметрии распределения оценивалась с применением коэффициента асимметрии [100]:

$$S_{k, \text{эксп}} = \frac{\mu_{3, \text{эксп}}}{\sigma_{U_{\text{пр}}}^3}. \quad (4.36)$$

Далее положение и значение моды распределения определялись на основе анализа гистограмм экспериментального распределения пробивных напряжений. Для исследуемых малых выборок число разрядов в гистограммах принималось равным 4.

Анализ 50 серий эксплуатационных испытаний трансформаторного масла в стандартном маслопробойнике для силовых трансформаторов с номинальным напряжением 110 кВ позволил выявить три характерных случая, которые отличаются величиной и знаком коэффициента асимметрии распределения, а также положением моды распределения:

$$S_{k, \text{эксп}} < 0; \quad (\langle U_{\text{пр}} \rangle) < U_{\text{м}} < U_0; \quad (4.37)$$

$$S_{k, \text{эксп}} = 0; \quad U_{\text{м}} = \langle U_{\text{пр}} \rangle; \quad (4.38)$$

$$S_{k, \text{эксп}} > 0; \quad U_{\text{пр, мин}} \leq U_{\text{м}} < (\langle U_{\text{пр}} \rangle), \quad (4.39)$$

где $U_{\text{пр, мин}}$ – минимальное значение пробивного напряжения в серии экспериментальных данных.

Для этих трёх случаев в табл. 4.6 представлены соответствующие статистические характеристики, по которым на рис. 4.6 представлены гистограммы распределений пробивных напряжений трансформаторного масла. Отмечается, что при $S_{k, \text{эксп}} < 0$ (рис. 4.6а) мода распределения смещается вправо от среднего пробивного напряжения; при $S_{k, \text{эксп}} = 0$ (рис. 4.6б) мода распределения совпадает со средним пробивным напряжением; при $S_{k, \text{эксп}} > 0$ (рис. 4.6в) мода распределения смещается влево от среднего пробивного напряжения.

Параметры распределения пробивных напряжений трансформаторного масла при различных значениях коэффициента асимметрии $S_{к,эксп}$

1). $S_{к,эксп} < 0$													
Упр, кВ – при соответствующем № пробы						$\langle U_{пр} \rangle$, кВ	$\sigma_{U_{пр}}$, кВ	$V_{U_{пр}}$, %	$\sigma_{\langle U_{пр} \rangle}$, кВ	$V_{\langle U_{пр} \rangle}$, %	$S_{к,эксп}$	$U_{м,эксп}$, кВ	
1	2	3	4	5	6								
45	50	57	62	53	57	54	5,85	10,8	2,39	4,4	-0,21	57,5	
Частоты по разрядам $U_{пр}$	Параметры		Разряды $U_{пр}$, кВ										
			40 – 45	45 – 50	50 – 55	55 – 60	60 – 65						
	m		1	1	1	2	1						
p		0,166	0,166	0,166	0,333	0,166							
2). $S_{к,эксп} = 0$													
Упр, кВ – при соответствующем № пробы						$\langle U_{пр} \rangle$, кВ	$\sigma_{U_{пр}}$, кВ	$V_{U_{пр}}$, %	$\sigma_{\langle U_{пр} \rangle}$, кВ	$V_{\langle U_{пр} \rangle}$, %	$S_{к,эксп}$	$U_{м,эксп}$, кВ	
1	2	3	4	5	6								
40	57	52	68	80	63	60	13,8	23	5,63	9,4	0	60	
Частоты по разрядам $U_{пр}$	Параметры		Разряды $U_{пр}$, кВ										
			35 – 45	45 – 55	55 – 65	65 – 75	75 – 85						
	m		1	1	2	1	1						
p		0,166	0,166	0,333	0,166	0,166							
3). $S_{к,эксп} > 0$													
Упр, кВ – при соответствующем № пробы						$\langle U_{пр} \rangle$, кВ	$\sigma_{U_{пр}}$, кВ	$V_{U_{пр}}$, %	$\sigma_{\langle U_{пр} \rangle}$, кВ	$V_{\langle U_{пр} \rangle}$, %	$S_{к,эксп}$	$U_{м,эксп}$, кВ	
1	2	3	4	5	6								
39	46	45	53	75	65	53,8	13,3	24,6	5,43	10	+0,44	45	
Частоты по разрядам $U_{пр}$	Параметры		Разряды $U_{пр}$, кВ										
			30 – 40	40 – 50	50 – 60	60 – 70	70 – 80						
	m		1	2	1	1	1						
p		0,166	0,333	0,166	0,166	0,166							

Таким образом, полученные на основе анализа свойств третьего центрального момента и моды распределения результаты позволяют принять в качестве третьего условия для определения параметров распределения равенство теоретического и экспериментального значений для моды распределения. Тогда с учётом (4.19) это условие запишется в виде:

$$U_H + (U_0 - U_H) \cdot (1 - 1/\alpha)^{1/\alpha} = U_{m,S_k}; \quad (4.40)$$

где U_{m,S_k} – экспериментальные значения моды распределения, определяемые с учётом $S_{k,эксп}$ в соответствии с условиями (4.37), (4.38) и (4.39).

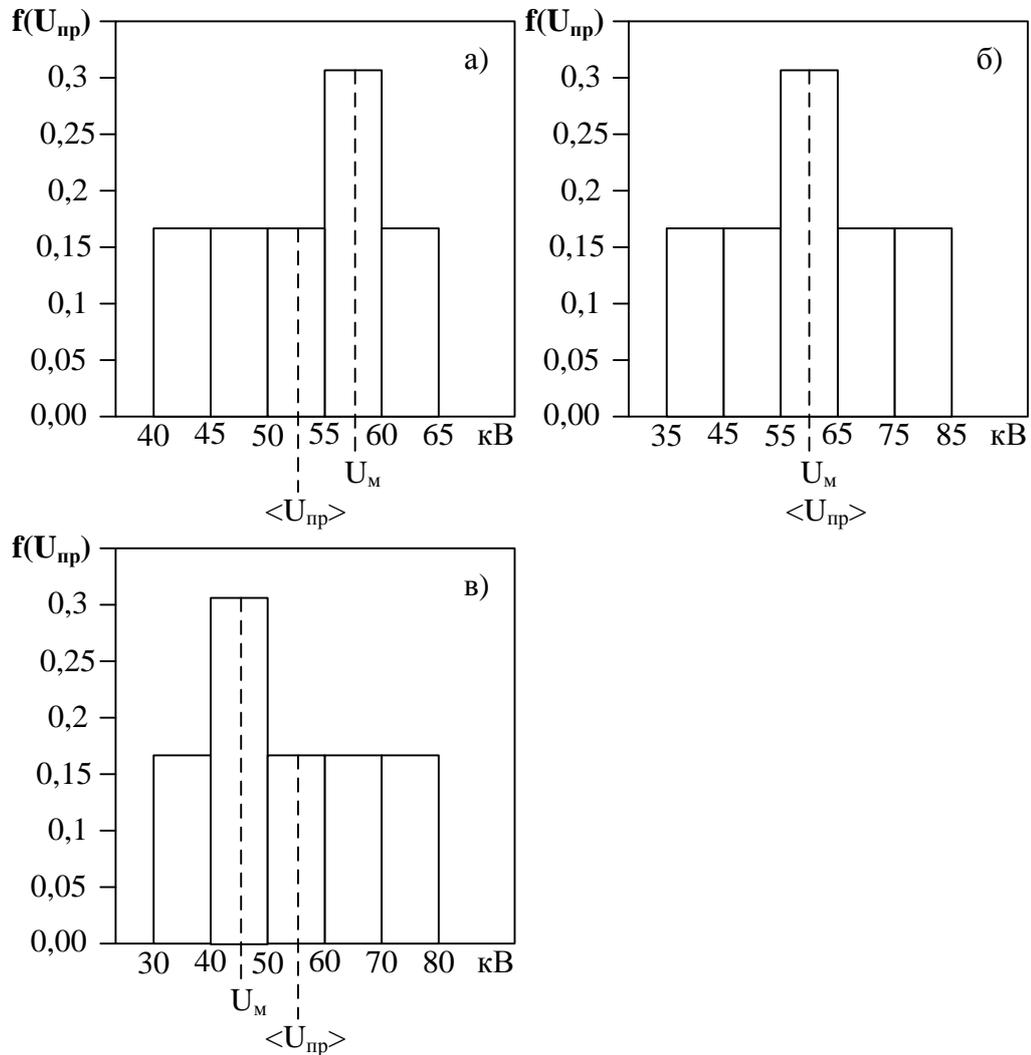


Рис. 4.6. Гистограммы распределения пробивного напряжения трансформаторного масла при различных S_k : а) – $S_k < 0$; б) – $S_k = 0$; в) – $S_k > 0$

Для каждого из условий (4.37), (4.38) и (4.39) необходимо определить методику определения моды распределения.

Для условия (4.37) значение моды распределения находится на интервале между средним пробивным напряжением и параметром U_0 . Оценочные результаты, приведённые выше, показывают, что параметры $\langle U_{пр} \rangle$ и U_0 близки друг к другу (различие составляет около 4%).

В силу этого предварительно исследовался вид гистограммы распределения пробивного напряжения в интервале $(\langle U_{\text{пр}} \rangle) \langle U_{\text{пр},i} \rangle \langle U_0$ при двух разрядах. При этом длина разряда равнялась:

$$\Delta U_{\text{пр}} = (U_0 - \langle U_{\text{пр}} \rangle) / 2. \quad (4.41)$$

Анализ экспериментальных данных показал, что при $S_{k,\text{эксп}} < 0$ значение моды распределения располагается в первом разряде, то есть вблизи среднего пробивного напряжения. Это указывает на то, что вблизи области $\langle U_{\text{пр}} \rangle$ распределение Гнеденко-Вейбулла близко к нормальному закону распределения.

Тогда в качестве моды распределения можно принять среднее пробивное напряжение для первого разряда, то есть:

$$U_{m,S_k} = \langle U_{\text{пр}} \rangle + \Delta U_{\text{пр}} / 2. \quad (4.42)$$

С учётом (4.41) выражение (4.42) запишется:

$$U_{m,S_k} = (3 \langle U_{\text{пр}} \rangle + U_0) / 4, \quad S_{k,\text{эксп}} < 0. \quad (4.43)$$

Для условия (4.38) значение моды распределения равняется среднему пробивному напряжению, поэтому имеем:

$$U_{m,S_k} = \langle U_{\text{пр}} \rangle \quad S_{k,\text{эксп}} = 0. \quad (4.44)$$

Вместе с тем обработка результатов эксперимента показала, что условие $U_{m,S_k} = \langle U_{\text{пр}} \rangle$ соблюдается в тех случаях, когда абсолютные значения $S_{k,\text{эксп}}$ находятся вблизи нуля. Этот диапазон изменения $S_{k,\text{эксп}}$ установлен на основе анализа гистограмм распределения:

$$0 \leq |S_{k,\text{эксп}}| \leq 0,05. \quad (4.45)$$

Для условия (4.39) значение моды распределения находится на интервале между средним пробивным напряжением и минимальным значением пробивного напряжения $U_{\text{пр,мин}}$ в серии экспериментальных данных.

Для определения моды распределения в данном случае по экспериментальным данным строится ряд значений пробивных напряжений $U_{\text{пр},i}$ в порядке возрастания в диапазоне:

$$U_{\text{пр,мин}} \leq U_{\text{пр},i} \leq (\langle U_{\text{пр}} \rangle). \quad (4.46)$$

Далее определяется частота наблюдения пробивных напряжений $U_{\text{пр},i}$:

$$p(U_{\text{пр},i}) = m_i / n, \quad (4.47)$$

где, m_i – число одинаковых значений пробивных напряжений $U_{\text{пр},i}$ из данной серии испытаний, n – общее число испытаний в серии (для маслопробойника $n=6$ или 12).

Затем рассматриваются два случая:

а). Находится значение пробивного напряжения $U_{\text{пр},i,p_{\text{макс}}}$, при котором наблюдается максимальная частота $p_{i,\text{макс}}$. Это напряжение и выбирается в качестве экспериментальной моды распределения, то есть

$$U_{m,S_k} = U_{\text{пр},i,p_{\text{макс}}}. \quad (4.48)$$

б). Если частота для всех значений $U_{\text{пр},i}$ в заданном интервале $U_{\text{пр},\text{мин}} \leq U_{\text{пр},i} < \langle U_{\text{пр}} \rangle$ будет одинаковая, то следует исходный статистический ряд представить в сгруппированном виде по разрядам.

Длина разряда выбирается так:

$$\Delta U_{\text{пр}} = (\langle U_{\text{пр}} \rangle - U_{\text{пр},\text{мин}}) / N, \quad N = 4, 3, 2. \quad (4.49)$$

Здесь N – число разрядов в интервале $U_{\text{пр},\text{мин}} \leq U_{\text{пр},i} \leq \langle U_{\text{пр}} \rangle$.

Нижние $U_{\text{пр},н(j)}$ и верхние $U_{\text{пр},в(j)}$ границы разрядов j определяются соответственно равенствами:

$$U_{\text{пр},н(j)} = U_{\text{пр},\text{мин}} + (j-1)\Delta U_{\text{пр}}; \quad (4.50)$$

$$U_{\text{пр},в(j)} = U_{\text{пр},\text{мин}} + j \cdot \Delta U_{\text{пр}}, \quad U_{\text{пр},в(j)} < \langle U_{\text{пр}} \rangle. \quad (4.51)$$

Здесь $j = 1, 2, \dots, N$ – номер разряда.

Расчёт начинается с $N = 4$.

Определяется число значений $U_{\text{пр},i} - m_j$, – попадающих в разряд j . При этом значение $U_{\text{пр},i}$, находящееся в точности на границе двух разрядов j и $j+1$ следует относить к разряду j .

Затем определяется частота наблюдения пробивных напряжений в разряде j :

$$p_j(U_{\text{пр},j}) = m_j / n, \quad (4.52)$$

где $U_{\text{пр},j}$ – среднее пробивное напряжение в разряде j , определяемое выражением:

$$U_{\text{пр},j} = (2 \cdot U_{\text{пр,мин}} + (2j-1) \cdot \Delta U_{\text{пр}}) / 2; \quad (4.53)$$

Находится значение пробивного напряжения $U_{\text{пр},j,\text{Р}_{\text{макс}}}$, при котором наблюдается максимальная частота $\text{Р}_{j,\text{макс}}$. Это напряжение и выбирается в качестве экспериментальной моды распределения, то есть

$$U_{\text{м},S_k} = U_{\text{пр},j,\text{Р}_{\text{макс}}}. \quad (4.54)$$

Если при $N=4$ нет максимума для частоты $\text{Р}_{j,\text{макс}}$, то осуществляется переход на $N=3$ и выполняются аналогичные расчёты. В случае необходимости (при отсутствии максимума для частоты $\text{Р}_{j,\text{макс}}$) принимается $N = 2$ и расчёты продолжаются.

Находится значение пробивного напряжения $U_{\text{пр},j,\text{Р}_{\text{макс}}}$, при котором наблюдается максимальная частота $\text{Р}_{j,\text{макс}}$. Это напряжение и выбирается в качестве экспериментальной моды распределения, то есть по аналогии с (4.54) имеем: $U_{\text{м},S_k} = U_{\text{пр},j,\text{Р}_{\text{макс}}}$.

В результате три основных уравнения для определения параметров распределения Гнеденко-Вейбулла запишутся так:

$$\frac{\alpha}{U_0 - U_H} \cdot \int_{U_H}^{\infty} U \cdot \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^{(\alpha-1)} \times \exp \left[- \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^\alpha \right] dU = \langle U_{\text{пр}} \rangle; \quad (4.55)$$

$$\frac{\alpha}{U_0 - U_H} \cdot \int_{U_H}^{\infty} (U - \langle U_{\text{пр}} \rangle)^2 \cdot \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^{(\alpha-1)} \times \exp \left[- \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^\alpha \right] dU = \sigma_{U_{\text{пр}}}^2; \quad (4.56)$$

$$U_H + (U_0 - U_H) \cdot (1 - 1/\alpha)^{1/\alpha} = U_{\text{м},S_k}; \quad (4.57)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{м},S_k} = (3 \langle U_{\text{пр}} \rangle + U_0) / 4, \quad S_{\text{к,эксп}} < 0; \end{array} \right. \quad (4.58)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{м},S_k} = \langle U_{\text{пр}} \rangle, \quad 0 \leq S_{\text{к,эксп}} \leq 0,05; \end{array} \right. \quad (4.59)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{м},S_k} = U_{\text{пр},\text{Р}_{\text{макс}}}, \quad S_{\text{к,эксп}} > 0. \end{array} \right. \quad (4.60)$$

Для реализации полученных уравнений (4.55) и (4.56) в программе преобразуем их до следующих выражений с помощью гамма - функции [72, 102]:

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha}{U_0 - U_H} \cdot \int_{U_H}^{\infty} U \cdot \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^{\alpha - 1} \times \exp \left[- \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^{\alpha} \right] dU = \\ & = \frac{U_0 - U_H}{\alpha} \Gamma \left(\frac{1}{\alpha} \right) + U_H = \langle U_{np} \rangle; \end{aligned} \quad (4.61)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha}{U_0 - U_H} \cdot \int_{U_H}^{\infty} (U - \langle U_{np} \rangle)^2 \cdot \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^{\alpha - 1} \times \exp \left[- \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^{\alpha} \right] dU = \\ & = \frac{2 \cdot (U_0 - U_H)}{\alpha} \left((U_0 - U_H) \Gamma \left(\frac{2}{\alpha} \right) + (U_H - \langle U_{np} \rangle) \Gamma \left(\frac{1}{\alpha} \right) \right) + \\ & + (U_H - \langle U_{np} \rangle)^2 = \sigma_{U_{np}}^2. \end{aligned} \quad (4.62)$$

Выразив из (4.61) U_0 и U_H через α , получаем:

$$U_0(\alpha) = \frac{\alpha}{\Gamma \left(\frac{1}{\alpha} \right)} \cdot (\langle U_{np} \rangle - U_H(\alpha)) + U_H(\alpha). \quad (4.63)$$

С учётом (4.63) из (4.62) получаем:

$$U_H(\alpha) = \langle U_{np} \rangle - \frac{\sigma_{U_{np}}}{\sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\Gamma^2 \left(\frac{1}{\alpha} \right)} \cdot \Gamma \left(\frac{2}{\alpha} \right) - 1}}. \quad (4.64)$$

При условии (4.58) уравнение (4.57) примет следующий вид:

$$U_H + (U_0 - U_H) \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha}} = (3 \cdot \langle U_{np} \rangle + U_0) / 4. \quad (4.65)$$

Подставив полученные выражения для $U_0(\alpha)$ и $U_H(\alpha)$ в уравнение (4.65), получим:

$$\frac{\alpha}{\Gamma \left(\frac{1}{\alpha} \right)} \cdot \left(\left(1 - \frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - \frac{1}{4} \right) = \frac{3}{4}. \quad (4.66)$$

Решая численно уравнение (4.66) получаем:

$$\alpha = 3,9700997. \quad (4.67)$$

При условии (4.59) уравнение (4.57) примет следующий вид:

$$U_n + (U_0 - U_n) \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha}} = \langle U_{np} \rangle. \quad (4.68)$$

Подставив полученные выражения для $U_0(\alpha)$ и $U_n(\alpha)$ в уравнение (4.68), получим:

$$\frac{\alpha}{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha}} = 1. \quad (4.69)$$

Решая численно последнее уравнение (4.69), получаем

$$\alpha = 3,3124692. \quad (4.70)$$

Алгоритм для определения параметров распределения Гнеденко-Вейбулла по результатам эксперимента. Разработанный алгоритм предусматривает следующую последовательность действий:

1. Ввод результатов эксплуатационных испытаний $U_{np,i}(n)$;
2. Расчет статистических характеристик испытания трансформаторного масла по стандартным методикам [66, 67] $\langle U_{np} \rangle$; $\sigma_{\langle U_{np} \rangle}$; $V_{\langle U_{np} \rangle}$; $\sigma_{U_{np}}$; $V_{U_{np}}$:

$$\langle U_{np} \rangle = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n U_{np,i}; \quad (4.71)$$

$$\sigma_{\langle U_{np} \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{np,i} - \langle U_{np} \rangle)^2}{n \cdot (n-1)}}; \quad (4.72)$$

$$V_{\langle U_{np} \rangle} = \frac{\sigma_{\langle U_{np} \rangle}}{\langle U_{np} \rangle} \cdot 100\%; \quad (4.73)$$

$$\sigma_{U_{np}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{np,i} - \langle U_{np} \rangle)^2}{(n-1)}}; \quad (4.74)$$

$$V_{U_{np}} = \frac{\sigma_{U_{np}}}{\langle U_{np} \rangle} \cdot 100\%. \quad (4.75)$$

3. Расчет $\mu_{3,эксп}$ по (4.35) и $S_{k,эксп}$ по (4.36), определение знака коэффициента асимметрии $S_{k,эксп}$:

4. Определение параметр U_{m,S_k} .

4.1. При $S_{k,эксп} < 0$ используется условие (4.58);

4.1.1. Производится расчет по уравнениям (4.63), (4.64) и условию (4.67).

4.2. При $S_{k,эксп} = 0$ используется условие (4.59);

4.2.1. Производится расчет по уравнениям (4.63), (4.64) и условию (4.70).

4.3. Если $S_{k,эксп} > 0$, то производится определение экспериментальной моды распределения по (4.60).

4.3.1. По экспериментальным данным строится ряд значений пробивных напряжений $U_{пр,i}$ в порядке возрастания в диапазоне: $U_{пр,мин} \leq U_{пр,i} < (<U_{пр}>)$.

4.3.2. Находится значение пробивного напряжения $U_{пр,i, p_{макс}}$, при котором наблюдается максимальная частота $p_{i,макс}$ по (4.47). Значению пробивного напряжения присваивается значение экспериментальной моды распределения, то есть $U_{M,S_k} = U_{пр,i, p_{макс}}$.

4.3.3. Производится расчет по уравнениям (4.63), (4.64) и (4.57).

4.3.4. Если частота для всех значений $U_{пр,i}$ в заданном интервале будет одинаковой, то исходный статистический ряд представляется в сгруппированном виде по разрядам. Длина разряда определяется по (4.49). Число разрядов в интервале начинается с $N=4$. Если при $N=4$ нет максимума для частоты $p_{j,макс}$, то осуществляется переход на $N = 3, 2, 1$ и выполняются аналогичные расчёты. Нижние $U_{пр,н(j)}$ и верхние $U_{пр,в(j)}$ границы разрядов j определяются соответственно по (4.50) и (4.51). Определяется число значений $U_{пр,i} - m_j -$, попадающих в разряд j . При этом значение $U_{пр,i}$, находящееся в точности на границе двух разрядов j и $j+1$ относится к разряду j . Находится значение пробивного напряжения $U_{пр,j, p_{макс}}$

по (4.53) при котором наблюдается максимальная частота $p_{j,макс}$. Это напряжение выбирается в качестве экспериментальной моды распределения, то есть

$$U_{M,S_k} = U_{пр,j, p_{макс}}.$$

4.3.5. Производится расчет по уравнениям (4.63), (4.64) и (4.57).

5. Расчет отношений $U_{пр,макс} / U_{пр,мин}$; $U_0 / <U_{пр}>$; $U_n / <U_{пр}>$.

6. Вывод результатов расчета на экран:

$$— <U_{пр}>; \sigma_{<U_{пр}>}; V_{<U_{пр}>}; \sigma_{U_{пр}}; V_{U_{пр}};$$

- $U_{\text{пр,мин}}; U_{\text{пр,макс}}; U_{\text{пр,макс}}/U_{\text{пр,мин}};$
- $\mu_{3,\text{эсп}}; S_{k,\text{эсп}};$
- $\alpha; U_{\text{н}}; U_0;$
- $U_0/\langle U_{\text{пр}} \rangle; U_0/U_{\text{н}}$

По данному алгоритму была создана расчетная программа в среде Borland C++ Builder, блок-схема для которой представлена на рис. 4.7. Разработанная расчетная программа для n экспериментальных значений пробивного напряжения позволяет определить значения СХЭП трансформаторного масла и их отношения (ПРИЛОЖЕНИЯ 2, 3).

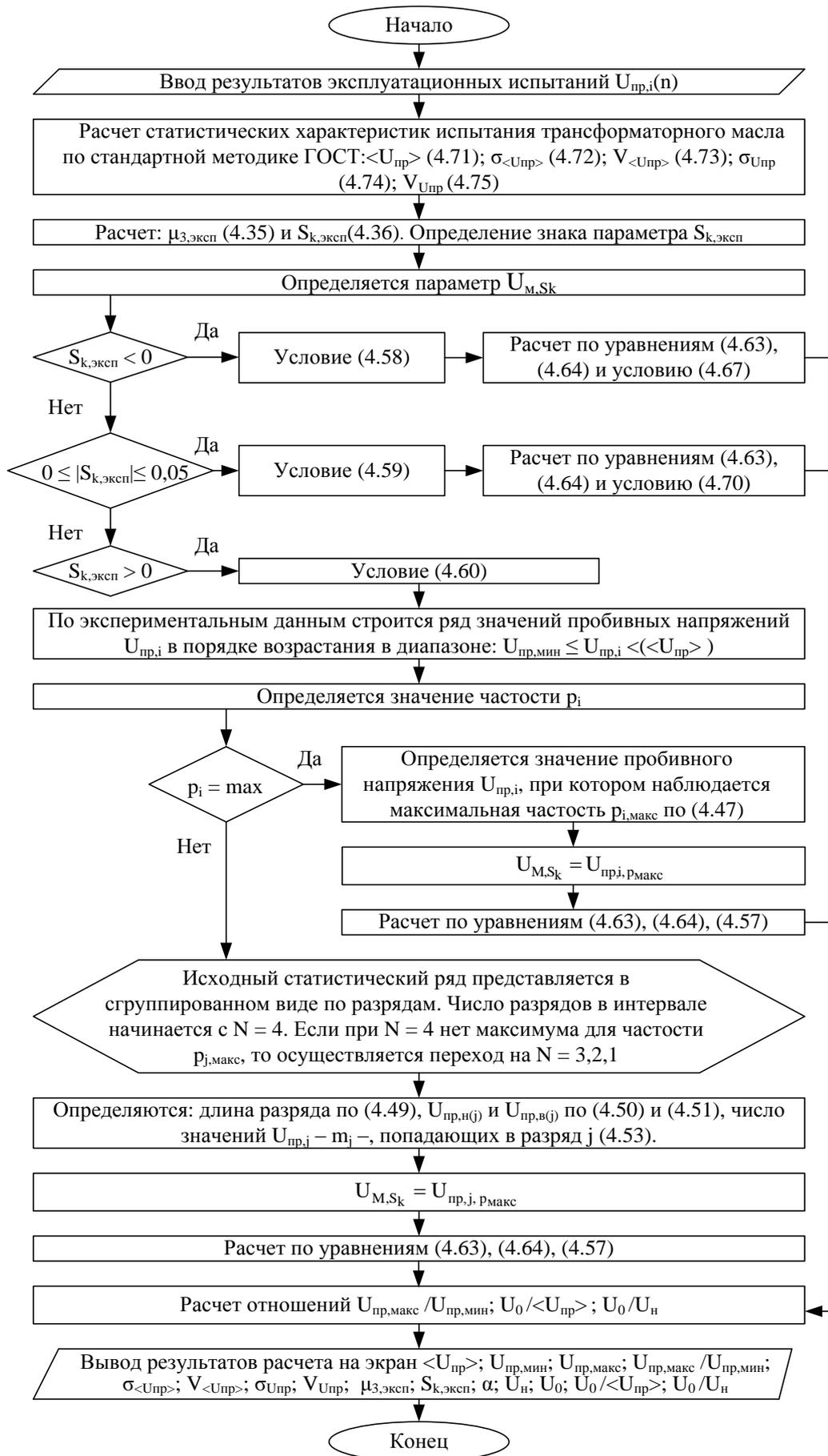


Рис. 4.7. Блок-схема для программы по определению СХЭП трансформаторного масла по результатам эксперимента

4.3. Выводы по главе 4

1. Разработан метод определения диагностических СХЭП трансформаторного масла как параметров распределения Гнеденко-Вейбулла с применением теоретических и эмпирических значений первого начального момента, второго и третьего центральных моментов, а также положением моды распределения с учётом коэффициента асимметрии распределения. позволяющий определять все три параметра распределения, включая и нижний предел пробивного напряжения, для результатов малой экспериментальной выборки применительно к испытаниям эксплуатационного масла в маслопробойнике.

2. Разработаны алгоритм и расчетная программа в среде Borland C++ Builder для определения по предложенному методу диагностических СХЭП трансформаторного масла как параметров распределения Гнеденко-Вейбулла для результатов малой экспериментальной выборки. Программа также позволяет выполнить расчёты по традиционной методике (ГОСТ-6581-75).

3. Анализ распределения нормативного содержания твёрдых частиц примесей в объёме эксплуатационного трансформаторного масла по размерам частиц показал, что в объёме масла, находящемся в зазоре между электродами испытательной ячейки, фактически нет частиц в виде волокон, хотя в самой ячейке находится 80 и 160 волокон соответственно для классов чистоты эксплуатационного масла 12 и 13. Поэтому важно повысить эффективность методик выявления влияния этих частиц на пробивное напряжение масла в маслопробойнике.

4. Выполненные расчёты времён удаления примесей, образующихся после пробоя, из места пробоя масла в маслопробойнике показали, что за время выдержки 5 минут между пробоями, предусмотренное ГОСТ 6581-75, пузырьки газа с радиусом более 53 мкм удаляются из масла, а твёрдые науглероженные частицы покидают межэлектродный промежуток при значениях их размеров более 45 мкм. Оставшиеся частицы оказывают влияние на снижение пробивного напряжения масла, поэтому важно совершенствовать систему перемешивания

масла в ячейке маслопробойника для выявления влияния этих частиц на пробивное напряжение трансформаторного масла.

5. Разработана новая (патент на изобретение №2507524, ПРИЛОЖЕНИЕ 1) испытательная ячейка для определения пробивных напряжений жидких диэлектриков в маслопробойнике, 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.

6. Анализ полученных результатов экспериментального определения диагностических статистических характеристик пробивных напряжений трансформаторного масла по ГОСТ 6581-75 и по предложенному методу в ячейке с применением устройства, формирующего затопленную струю, показал их различия:

– наблюдается уменьшение значений среднего пробивного напряжения и диагностического параметра U_0 в случае перемешивания масла по предложенной методике. Однако для исследуемых образцов масла это различие не превышает 2,1 – 5,7 %;

– для всех исследуемых масел наблюдается существенное увеличение значений отношения U_0/U_n при их перемешивании с применением пропеллера, которое изменяется в пределах 1,5 – 2,2. При этом кратность увеличения параметра U_0/U_n 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 перемешивания масла с применением предложенного устройства в исследуемом диапазоне скоростей в явном виде не обнаружено.

Полученные результаты можно объяснить тем, что применение предложенного устройства позволяет более эффективно перемешивать масло в ячейке, обеспечивая тем самым полную смену масла между электродами. В результате возрастает вероятность попадания в промежуток между электродами волокон и других крупных частиц, что в первую очередь проявляется в снижении нижнего предела пробивного напряжения и возрастании отношения U_0/U_H .

Предложенное устройство для определения пробивного напряжения жидких диэлектриков может использоваться при соблюдении регламентов, установленных ГОСТ 6581-75 (Россия), стандартом ASTM D1816-67 (1971, США) и другими аналогичными нормативными документами.

ГЛАВА 5**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО СТАТИСТИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ
ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАСЛА НА
ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ
В МАСЛОПРОБОЙНИКЕ****5.1. Определение статистических характеристик пробивных напряжений масла и их корреляционных связей по результатам его эксплуатационных испытаний**

Статистические характеристики пробивных напряжений эксплуатационных трансформаторных масел. С применением разработанных в гл. 4 методе и программы были выполнены расчеты традиционных и предложенных СХЭП образцов трансформаторного масла по результатам испытаний в стандартном маслопробойнике. Для расчетов были использованы данные эксплуатационных испытаний в маслопробойнике для силовых трансформаторов напряжением 110 кВ. Здесь и далее приводятся данные, которые были собраны в процессе выполнения договоров о содружестве с энергетическими системами Ярославского, Вологодского, Санкт-Петербургского и Ивановского регионов.

Массив экспериментальных результатов в рассматриваемом случае включал 40 образцов масла (табл.5.1). Результаты расчетов по традиционным методикам представлены в табл. 5.2.

На основе полученных данных (табл. 5.2) по [90] определены функции распределения коэффициентов вариации $V_{<U_{пр}>}$ и $V_{U_{пр}}$ (табл. 5.3).

**Данные эксплуатационных испытаний масла в стандартном маслопробойнике для
силовых трансформаторов напряжением 110 кВ**

№ образца масла	Пробивные напряжения при текущем номере пробоя, кВ					
	1	2	3	4	5	6
1	56	58	60	62	58	64
2	56	40	58	44	55	48
3	64	72	68	72	72	74
4	50	68	60	68	68	70
5	45	40	42	39	46	35
6	46	50	52	54	58	44
7	74	70	66	72	70	74
8	76	76	72	72	74	74
9	69	62	64	66	40	70
10	70	70	70	70	58	70
11	70	66	70	70	70	62
12	70	70	63	58	70	68
13	40	50	56	66	52	58
14	50	44	57	62	60	58
15	60	70	62	70	62	74
16	74	74	72	70	70	70
17	70	70	58	56	56	58
18	40	40	40	44	52	54
19	44	78	58	52	68	56
20	50	48	50	46	42	50
21	32	42	34	30	32	42
22	45	44	60	60	60	60
23	32	30	40	32	40	46
24	50	70	70	60	64	62
25	70	70	70	68	68	68
26	34	38	44	40	40	42
27	70	66	70	58	70	70
28	56	40	58	54	44	40
29	38	58	46	46	52	60
30	34	36	32	35	35	40
31	58	52	54	54	56	54
32	39	51	61	63	61	71
33	61	65	73	41	55	45
34	40	56	48	50	55	51
35	30	42	38	45	40	41
36	62	64	71	43	55	49
37	52	64	70	72	75	78
38	30	40	35	42	40	45
39	40	55	56	52	57	55
40	40	52	60	62	62	70

**Статистические характеристики пробивных напряжений трансформаторного масла,
определяемые в разработанной программе по традиционным методикам**

№ образца масла	$\langle U_{пр} \rangle$, кВ	$U_{пр, min}$, кВ	$U_{пр, max}$, кВ	$\frac{U_{пр, max}}{U_{пр, min}}$	$\sigma_{U_{пр}}$, кВ	$V_{U_{пр}}$, %	$\sigma_{\langle U_{пр} \rangle}$, кВ	$V_{\langle U_{пр} \rangle}$, %
1	59,67	56	64	1,143	2,94	4,93	1,2	2,01
2	50,2	40	58	1,45	7,28	14,51	2,97	5,92
3	70,3	64	74	1,156	3,67	5,22	1,5	2,13
4	64	50	70	1,4	7,69	12,02	3,14	4,91
5	41,2	35	46	1,314	4,07	9,89	1,66	4,04
6	50,67	44	58	1,318	5,16	10,19	2,11	4,16
7	71	66	74	1,121	3,03	4,27	1,24	1,74
8	74	72	76	1,056	1,79	2,42	0,73	0,99
9	61,8	40	70	1,75	11,11	17,96	4,53	7,3
10	68	58	70	1,207	4,90	7,20	2	2,94
11	68	62	70	1,129	3,35	4,92	1,37	2,01
12	66,5	58	70	1,207	4,97	7,47	2,03	3,05
13	53,67	40	66	1,65	8,71	16,23	3,56	6,63
14	55,2	44	62	1,409	6,82	12,37	2,79	5,05
15	66,33	60	74	1,233	5,72	8,62	2,33	3,52
16	71	70	74	1,057	1,97	2,74	0,8	1,12
17	61,3	56	70	1,25	6,77	11,04	2,77	4,51
18	45	40	54	1,35	6,42	14,26	2,62	5,82
19	59,3	44	78	1,773	12,04	20,30	4,92	8,29
20	47,7	42	50	1,19	3,20	6,72	1,31	2,74
21	35,3	30	42	1,4	5,32	15,05	2,17	6,14
22	54,8	44	60	1,364	8,01	14,61	3,27	5,96
23	36,7	30	46	1,533	6,28	17,13	2,56	6,99
24	62,7	50	70	1,4	7,45	11,88	3,04	4,85
25	69	68	70	1,029	1,10	1,59	0,45	0,65
26	39,7	34	44	1,294	3,44	8,68	1,41	3,55
27	67,3	58	70	1,207	4,84	7,19	1,98	2,94
28	48,6	40	58	1,45	8,26	16,98	3,37	6,93
29	50	38	60	1,579	8,29	16,59	3,39	6,77
30	35,3	32	40	1,25	2,66	7,52	1,09	3,07
31	54,67	52	58	1,115	2,066	3,779	0,843	1,543
32	57,67	39	71	1,821	11,15	19,33	4,55	7,89
33	56,67	41	73	1,78	12,16	21,46	4,96	8,76
34	50	40	56	1,4	5,76	11,52	2,35	4,71
35	39,33	30	45	1,5	5,13	13,03	2,09	5,32
36	57,33	43	71	1,651	10,33	18,01	4,22	7,35
37	68,5	52	78	1,5	9,38	13,69	3,83	5,59
38	38,67	30	45	1,5	5,35	13,85	2,19	5,65
39	52,5	40	57	1,425	6,35	12,09	2,59	4,94
40	57,67	40	70	1,75	10,39	18,01	4,24	7,35

Распределение коэффициента вариации среднего арифметического значения пробивного напряжения при числе образцов масла N=40

№ интервала	Границы интервалов отклонений $V_{<U_{пр}>}$, %	Границы интервалов отклонений $V_{U_{пр}}$, %	Частота в интервале m	Частость $f(V_{<U_{пр}>})=m/N$ $f(V_{U_{пр}})=m/N$	Вероятность, функция распределения $F(V_{<U_{пр}>})$
1	0,65 – 1,461	1,59 – 3,577	3	0,075	0,075
2	1,461 – 2,272	3,577 – 5,564	5	0,125	0,2
3	2,272 – 3,083	5,564 – 7,551	5	0,125	0,325
4	3,083 – 3,894	7,551 – 9,538	2	0,05	0,375
5	3,894 – 4,705	9,538 – 11,525	3	0,075	0,45
6	4,705 – 5,516	11,525 – 13,512	6	0,15	0,6
7	5,516 – 6,327	13,512 – 15,499	6	0,15	0,75
8	6,327 – 7,138	15,499 – 17,486	4	0,1	0,85
9	7,138 – 7,949	17,486 – 19,473	4	0,1	0,95
10	7,949 – 8,76	19,473 – 21,46	2	0,05	1

По данным табл. 5.3 на рис. 5.1 представлена гистограмма распределения коэффициентов вариации $V_{<U_{пр}>}$ и $V_{U_{пр}}$.

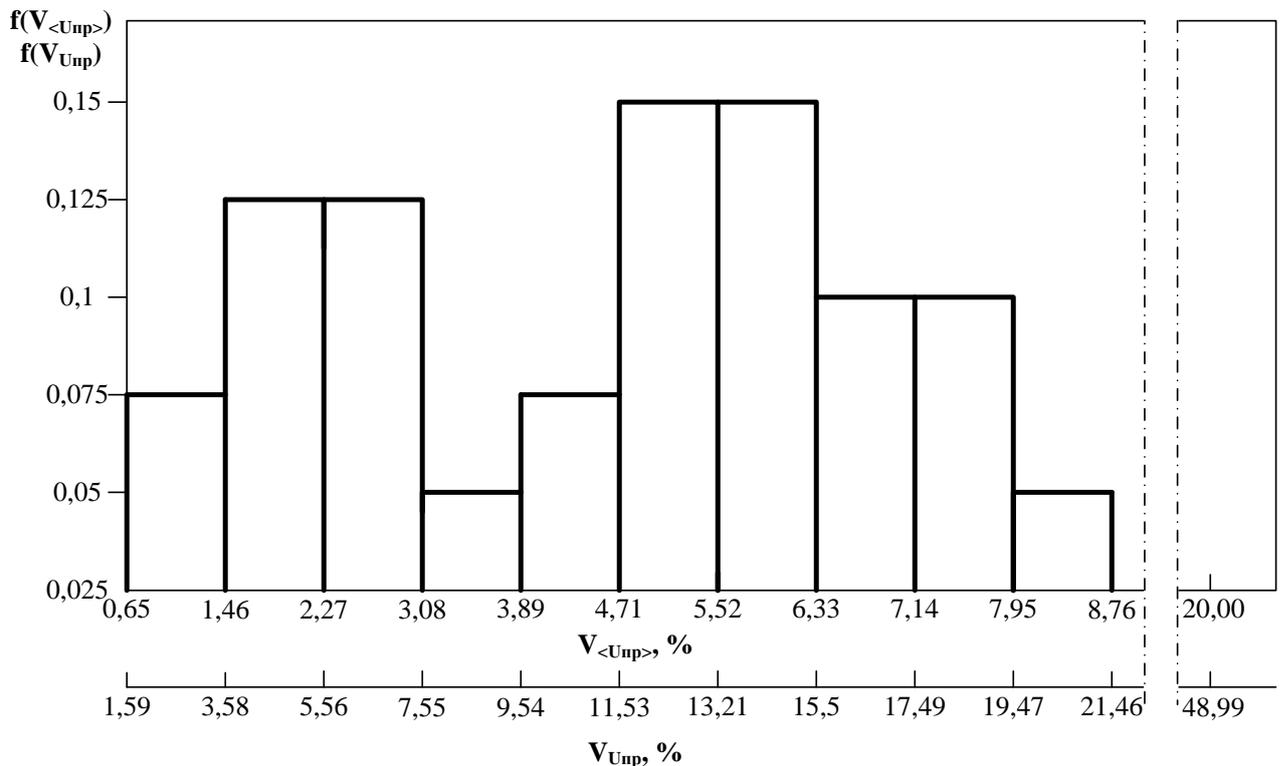


Рис. 5.1. Гистограмма распределения коэффициентов вариации $V_{<U_{пр}>}$ и $V_{U_{пр}}$

Из табл. 5.3 и рис. 5.1 следует, что в эксплуатации наиболее вероятные значения коэффициента вариации $V_{<U_{пр}>}$ (вероятность наблюдения 15%)

находятся в диапазоне (4,71–6,33)%. Наибольшие значения $V_{<U_{пр}>}$ наблюдаются в диапазоне (7,95–8,76)% с вероятностью 5%.

Здесь также следует отметить, что в соответствии с ГОСТ 6581-75 (Россия) предельное значение коэффициента вариации $V_{<U_{пр}>}$ установлено в 20%, то есть допускаются ещё большие границы снижения качества масла в условиях эксплуатации.

Результаты расчетов предложенных в работе СХЭП образцов трансформаторного масла представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Статистические характеристики пробивных напряжений трансформаторного масла, определяемые в разработанной программе по предложенной методике

№ образца масла	$\mu_{\text{экс}}$	$S_{k,\text{экс}}$	α	U_n , кВ	U_0 , кВ	U_0/U_n	$U_0/<U_{пр}>$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,926	0,232	1,68	54,858	60,243	1,098	1,010
2	-83,907	-0,218	3,97	24,400	52,839	2,166	1,053
3	-33,926	-0,687	3,97	57,341	71,681	1,250	1,019
4	-400,	-0,878	3,97	36,760	66,826	1,818	1,044
5	-12,741	-0,189	3,97	26,756	42,661	1,594	1,036
6	5,926	0,043	3,312	35,137	52,446	1,493	1,035
7	-12,000	-0,430	3,97	60,261	72,114	1,197	1,016
8	0	0	3,312	68,620	74,616	1,087	1,008
9	-1568,759	-1,145	3,97	22,510	65,912	2,928	1,066
10	-160,00	-1,361	3,97	50,656	69,799	1,378	1,026
11	-32,000	-0,854	3,97	56,152	69,229	1,233	1,018
12	-87,500	-0,713	3,97	48,905	68,325	1,397	1,027
13	-106,074	-0,161	3,97	22,829	56,866	2,491	1,060
14	-178,241	-0,561	3,97	31,007	57,673	1,86	1,045
15	22,074	0,118	1,179	59,617	66,724	1,119	1,006
16	1,926	0,253	1,286	69,157	71,868	1,039	1,003
17	154,074	0,496	1,642	50,497	62,61	1,24	1,021
18	116,000	0,439	1,378	36,264	45,824	1,264	1,018
19	519,407	0,297	2,601	30,166	63,004	2,089	1,062
20	-24,741	-0,752	3,97	36,323	48,843	1,345	1,025
21	60,741	0,404	1,413	27,924	36,065	1,292	1,021
22	-278,426	-0,542	3,97	26,473	57,775	2,182	1,054
23	64,593	0,261	1,236	28,946	37,214	1,286	1,015
24	-210,074	-0,509	3,97	36,299	65,402	1,802	1,044
25	0	0	3,312	65,706	69,378	1,056	1,005
26	-15,407	-0,377	3,97	27,471	40,932	1,490	1,032
27	-123,259	-1,084	3,97	50,183	69,112	1,377	1,026
28	-7,407	-0,013	3,312	23,819	51,514	2,163	1,059

Продолжение таблицы 5.4

1	2	3	4	5	6	7	8
29	-56	-0,098	3,97	20,634	53,046	2,571	1,061
30	10,407	0,554	2,723	28,626	36,166	1,263	1,024
31	3,259	0,370	2,14	50,468	55,209	1,094	1,010
32	-700,741	-0,506	3,97	18,200	61,761	3,393	1,071
33	-70,074	-0,039	3,312	20,098	60,857	3,028	1,074
34	-111,000	-0,580	3,97	29,600	52,116	1,761	1,042
35	-101,593	-0,755	3,97	21,188	41,216	1,945	1,048
36	-97,593	-0,089	3,97	20,768	61,126	2,943	1,066
37	-567,5	-0,689	3,97	35,307	71,943	2,038	1,050
38	-67,407	-0,439	3,97	19,711	40,633	2,061	1,051
39	-298	-1,165	3,97	30,025	54,831	1,826	1,044
40	-607,407	-0,542	3,97	20,897	61,481	2,942	1,066

На основе полученных данных (табл. 5.4) определены функции распределения отношения U_0/U_H и коэффициента α .

Результаты расчётов распределения отношения U_0/U_H представлены в табл. 5.5, а на рис. 5.2 – гистограмма распределения параметра U_0/U_H .

Таблица 5.5

Распределение отношения U_0/U_H при числе образцов масла $N=40$

№ интервала	Границы интервалов отклонений отношения U_0/U_H	Частота в интервале m	Частость $f(U_0/U_H)=m/N$	Вероятность, функция распределения $F_3(U_0/U_H)$
1	1,039 – 1,2744	12	0,3	0,3
2	1,2744 – 1,5098	8	0,2	0,5
3	1,5098 – 1,7452	1	0,025	0,525
4	1,7452 – 1,9806	6	0,15	0,675
5	1,9806 – 2,216	6	0,15	0,825
6	2,216 – 2,4514	0	0	0,825
7	2,4514 – 2,6868	2	0,05	0,875
8	2,6868 – 2,9222	0	0	0,875
9	2,9222 – 3,1576	4	0,1	0,975
10	3,1576 – 3,393	1	0,025	1

Из табл. 5.5 и рис. 5.2 следует, что в эксплуатации значения отношения U_0/U_H наблюдаются с вероятностью более 20% в диапазоне 1,04 – 1,51. При этом наибольшие значения этого параметра (вероятность наблюдения 30%) находятся в диапазоне 1,04 – 1,27.

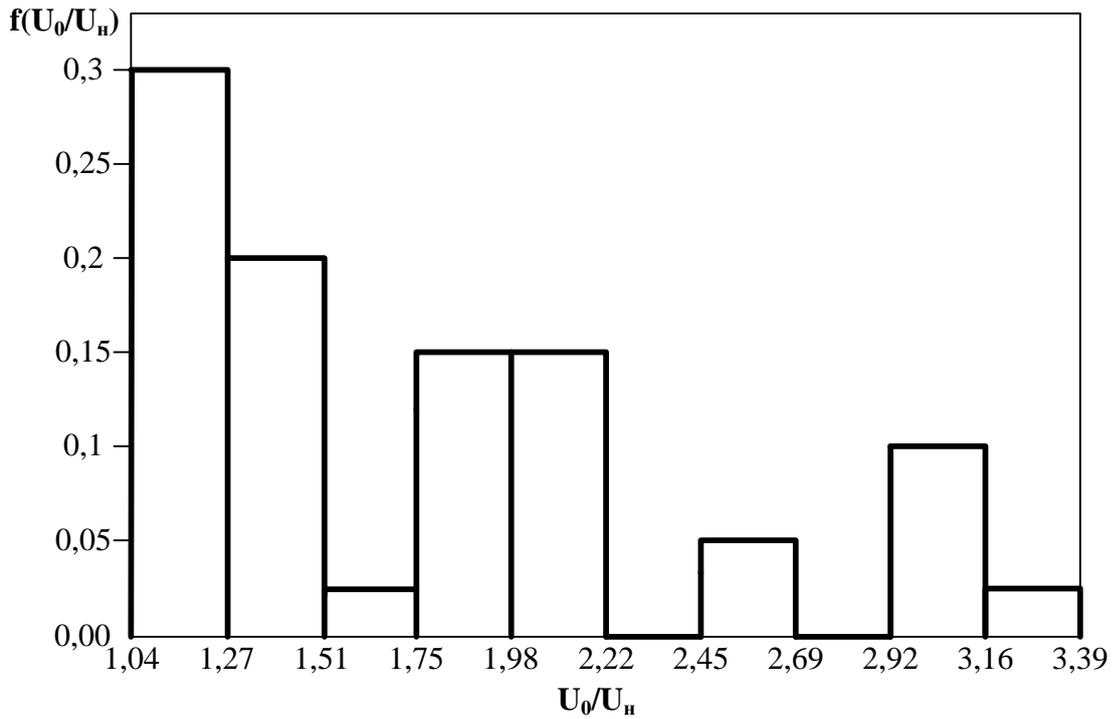


Рис. 5.2. Гистограмма распределения отношения U_0/U_n

В свою очередь результаты расчётов распределения коэффициента α представлены в табл. 5.6, а на рис. 5.3 – гистограмма распределения коэффициента α .

Таблица 5.6

Распределение коэффициента α при числе образцов масла $N=40$

№ интервала	Границы интервалов отклонений α	Частота в интервале m	Частость $f(\alpha)=m/N$	Вероятность, функция распределения $F_3(\alpha)$
1	1,179 – 1,4581	5	0,125	0,125
2	1,4581 – 1,7372	2	0,05	0,175
3	1,7372 – 2,0163	0	0	0,175
4	2,0163 – 2,2954	1	0,025	0,2
5	2,2954 – 2,5745	0	0	0,2
6	2,5745 – 2,8536	2	0,05	0,25
7	2,8536 – 3,1327	0	0	0,25
8	3,1327 – 3,4118	5	0,125	0,375
9	3,4118 – 3,6909	0	0	0,375
10	3,6909 – 3,97	25	0,625	1

Из табл. 5.6 и рис. 5.3 следует, что в эксплуатации максимальные значения коэффициента α наблюдаются с вероятностью 62,5% в диапазоне 3,69 – 3,97.

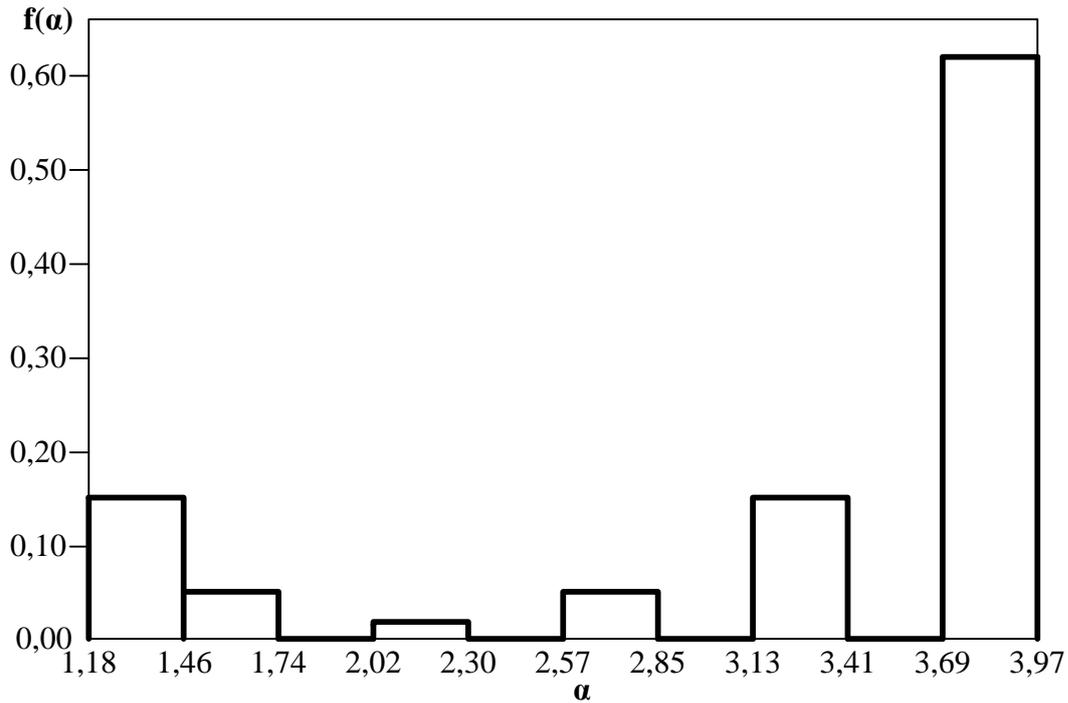


Рис. 5.3. Гистограмма распределения коэффициента α

Исследование корреляционных связей традиционных и предложенных статистических характеристик пробивных напряжений эксплуатационных трансформаторных масел. По результатам выполненного анализа изменения отношения $U_{\text{пр,max}}/U_{\text{пр,min}}$ (табл. 5.2) на рис. 5.4 представлена корреляционная связь отношения $U_{\text{пр,max}}/U_{\text{пр,min}}$ и коэффициента вариации $V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$.

Из рис. 5.4 видно, что наблюдается явно выраженная положительная корреляция между величинами $U_{\text{пр,max}}/U_{\text{пр,min}}$ и $V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$. При этом расчётный тренд имеет вид:

$$U_{\text{пр,max}}/U_{\text{пр,min}} = \exp(0,059 \cdot (V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle})^{1,074}). \quad (5.1)$$

Коэффициент корреляции составил 83,9%.

На рис. 5.5 представлены наблюдаемые пары значений параметра распределения Гнеденко-Вейбулла U_0 и среднего пробивного напряжения $\langle U_{\text{пр}} \rangle$. Из этого рисунка следует, что между параметрами U_0 и $\langle U_{\text{пр}} \rangle$ имеет место ярко выраженная положительная корреляция, близкая к линейной:

$$U_0 = 1,035 \langle U_{\text{пр}} \rangle. \quad (5.2)$$

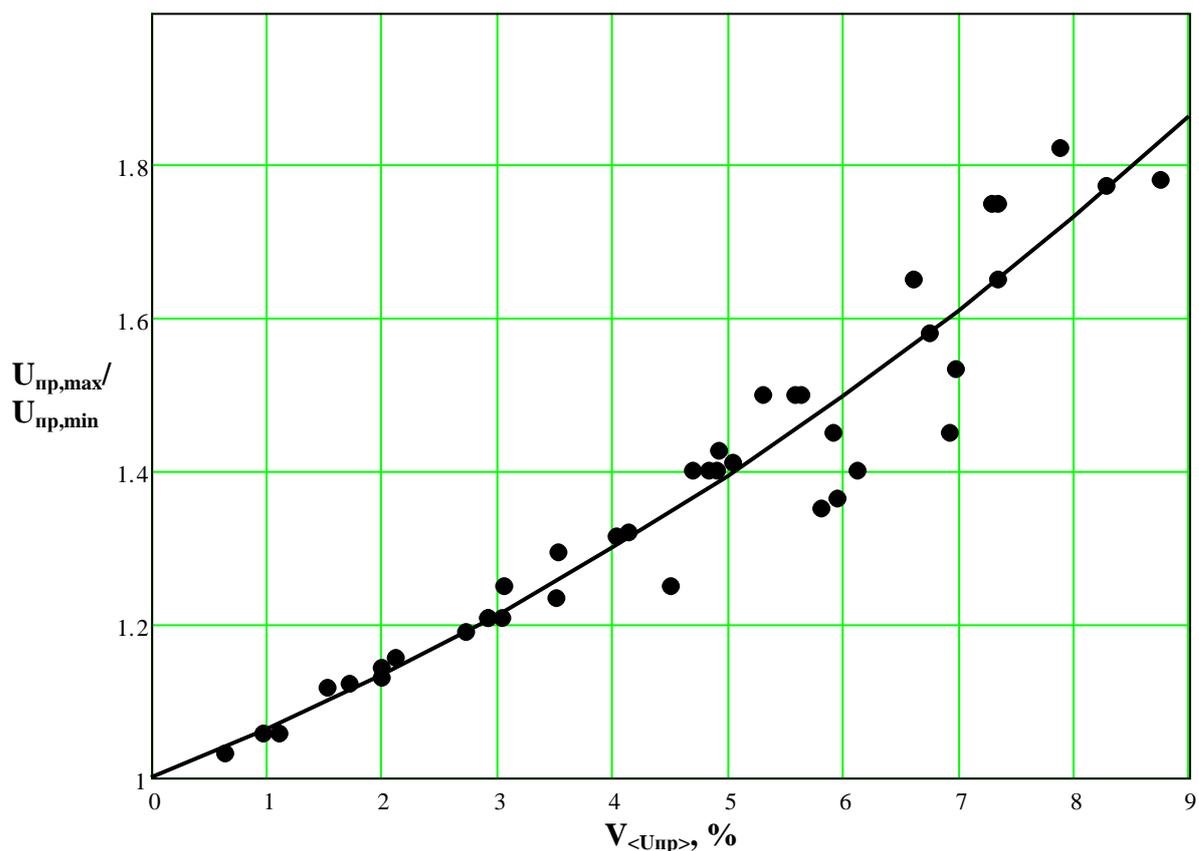


Рис. 5.4. Корреляционная связь параметров $U_{\text{пр,маx}}/U_{\text{пр,миn}}$ и $V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$.

Различие параметров U_0 и $\langle U_{\text{пр}} \rangle$ составляет 3,5%, коэффициент корреляции составил 99,5%.

На рис. 5.6 представлены наблюдаемые пары значений отношений параметров распределения Гнеденко-Вейбулла U_0/U_H и экспериментальных значений $U_{\text{пр,маx}}/U_{\text{пр,миn}}$. Из этого рисунка следует, что между отношениями U_0/U_H и $U_{\text{пр,маx}}/U_{\text{пр,миn}}$ имеет место явно выраженная положительная корреляция, близкая к:

$$U_0/U_H = \exp(1,396 \cdot (U_{\text{пр,маx}}/U_{\text{пр,миn}} - 1)^{1,01}) \quad (5.3)$$

Коэффициент корреляции составил 91%.

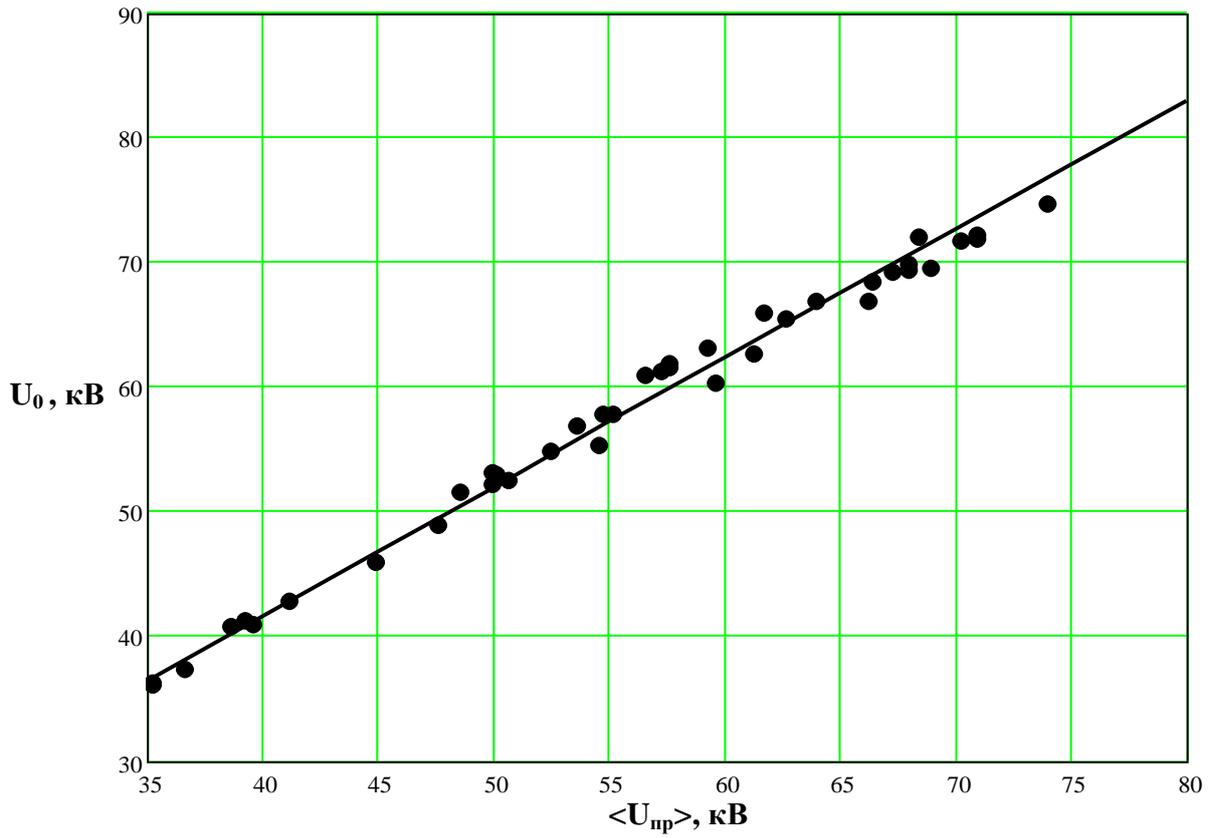


Рис. 5.5. Корреляционная связь параметров U_0 и $\langle U_{\text{пр}} \rangle$.

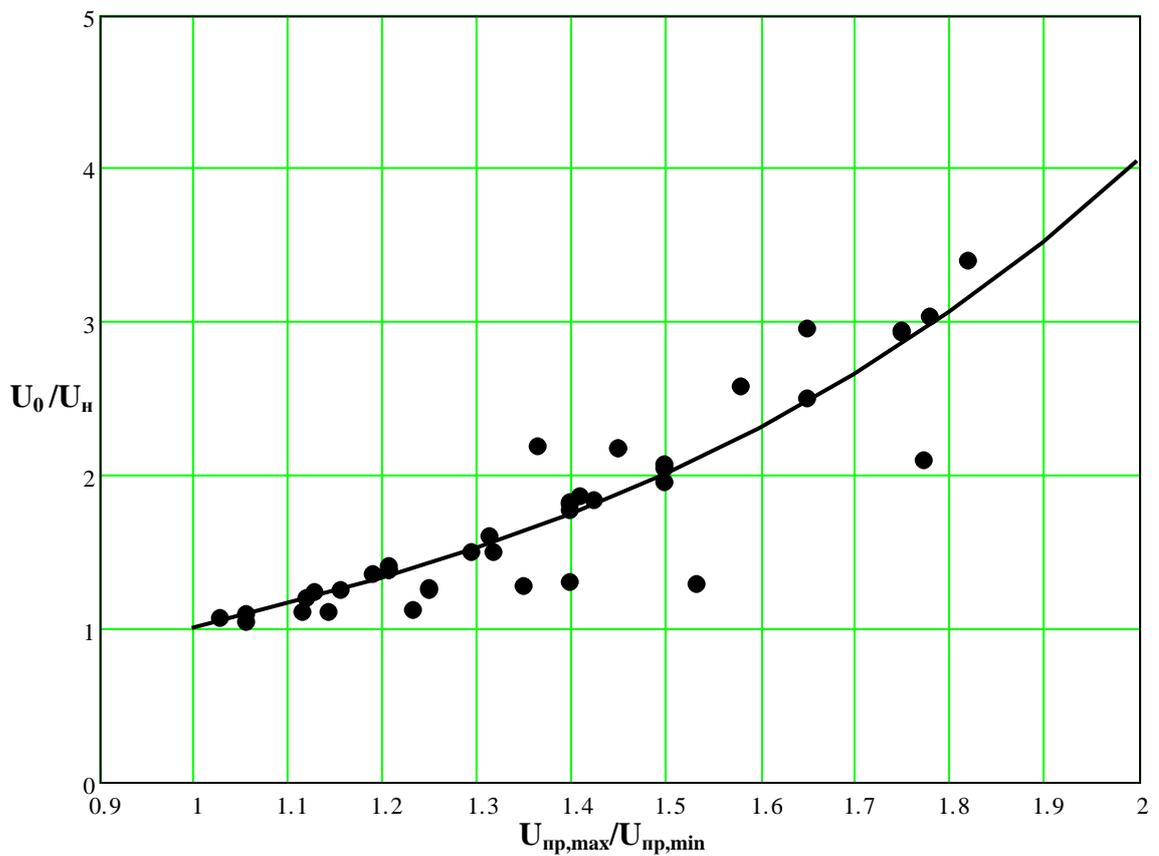


Рис. 5.6. Корреляционная связь параметров $U_0/U_{\text{н}}$ и $U_{\text{пр,max}}/U_{\text{пр,min}}$.

5.2. Выбор и обоснование применения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике как критерия изменчивости его электрической прочности и разработка алгоритма диагностирования главной изоляции трансформаторов

В главе 3 показано, что основными диагностическими статистическими характеристиками электрической прочности масла являются параметры распределения Гнеденко–Вейбулла E_0 , E_n и безразмерный комплексный параметр E_0/E_n . Эти параметры, как отмечалось в главах 1 и 2, непосредственно в эксплуатации не контролируются в связи с тем, что пробой масляного канала в трансформаторе не допускается, так как он приводит к необратимым разрушениям твёрдой изоляции (барьеров).

В силу этого контроль электрической прочности масляных каналов главной изоляции трансформаторов проводится, как отмечалось в главе 4, с применением внешнего средства диагностирования – стандартного маслопробойника, а в качестве диагностического параметра предусмотрено применение среднего пробивного напряжения эксплуатационных масел, для которых установлены нормативные значения [60] с учётом класса напряжения электрооборудования.

В связи с этим важно провести выбор и обоснование применения статистических характеристик пробивного напряжения масла в маслопробойнике как диагностических параметров с учётом полученных результатов с использованием параметров распределения Гнеденко–Вейбулла U_0 и U_n , а также безразмерного комплексного параметра U_0/U_n .

Выше показано, что параметр U_0 по величине близок к среднему пробивному напряжению $\langle U_{пр} \rangle$ (различие в пределах 3–4 %), поэтому в качестве одного из диагностических параметров следует оставить среднее пробивное напряжение $\langle U_{пр} \rangle$, для которого установлены нормативные значения и накоплен большой эксплуатационный опыт.

В главе 3 также показано, что основным диагностическим параметром, позволяющим оценивать влияние номинальных мощности и напряжений

трансформаторов является безразмерный комплекс E_0/E_n , поэтому целесообразно выбрать и обосновать для диагностирования в эксплуатации аналогичный безразмерный комплексный параметр U_0/U_n , который определяется по результатам испытания масла в маслопробойнике.

Такой подход открывает возможность применения результатов определения пробивного напряжения эксплуатационного масла в маслопробойнике и на этой основе выбрать статистический критерий изменчивости пробивного напряжения масла $(U_0/U_n)_{пр}$, эквивалентный аналогичному критерию $(E_{0,1}/E_n)_{пр}$.

Непосредственно пересчитать результаты определения характеристик электрической прочности в маслопробойнике на масляные каналы в главной изоляции трансформатора затруднительно, так как электрическое поле и условия определения электрической прочности масла в маслопробойнике и модели изоляции трансформатора существенно различаются.

В этом случае при выборе критерия $(U_0/U_n)_{пр}$ важно установить его качественную корреляционную связь со статистическим критерием изменчивости электрической прочности масла $(E_{0,1}/E_n)_{пр}$.

Для этого проанализируем особенности формирования пробоя масла в модели трансформатора и в маслопробойнике.

В модели трансформатора электрическое поле близко к однородному, поэтому частицы примесей распределены фактически равномерно по всему объёму. При этом в качестве диагностического параметра выступает статистический критерий изменчивости электрической прочности заданного исходного масла $K_{иЕ} = E_{0,1}/E_n$

В случае пробоя масла в маслопробойнике электрическое поле неоднородное. При этом частицы примесей затягиваются в область максимальной напряжённости поля (в центральную часть между электродами) из окружающего пространства, что приводит к возрастанию их числа в центральной части электродной системы. Это обуславливает снижение пробивных напряжений масла в маслопробойнике.

Здесь следует учесть, что на величину нижнего предела пробивного напряжения U_n наибольшее влияние оказывают крупные частицы, а на величину U_0 в значительной степени оказывает влияние общее число примесей в промежутке. В силу этого скорость уменьшения величины пробивного напряжения U_0 в рассматриваемом случае неоднородного поля будет выше, чем для величины U_n . Поэтому значение отношения U_0/U_n будет уменьшаться.

В силу этого отношение пробивных напряжений U_0/U_n в маслопробойнике будет приближаться к отношению параметров электрической прочности масла $E_{0,1}/E_n$ для исходного масла в модели трансформатора.

Вместе с тем значение отношения U_0/U_n , полученное по результатам испытаний в маслопробойнике, будет оставаться больше соответствующего отношения $E_{0,1}/E_n$ для модели главной изоляции трансформатора.

Тогда, если принять в качестве основного условия выбора статистического критерия изменчивости пробивного напряжения эксплуатационного масла $(U_0/U_n)_{пр}$ равенство:

$$(E_{0,1}/E_n)_{пр} = (U_0/U_n)_{пр}, \quad (5.4)$$

то тем самым выполнение условия (5.4) обуславливает более жёсткие требования к качеству эксплуатационного трансформаторного масла.

В результате в качестве одной из основных диагностических СХЭП эксплуатационного трансформаторного масла следует принять статистический критерий изменчивости пробивного напряжения (СКИПН) масла в маслопробойнике $K_{и,пр}=(U_0/U_n)_{пр}$, предельные значения которого определяются в соответствии с (5.4). Поэтому данный параметр рассматривается как статистический критерий изменчивости электрической прочности масла для диагностирования масляных каналов главной изоляции трансформаторов в эксплуатации.

С учётом этого в табл. 5.7 в соответствии с (5.4) и рис. 3.12 представлены предельные значения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $K_{и,пр}=(U_0/U_n)_{пр}$ для различных мощностей

трансформаторов класса напряжения 110 кВ при заданном отношении $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$.

Таблица 5.7

Предельные значения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике для различных мощностей трансформаторов 110 кВ при заданном отношении $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$

Диагностический параметр	$E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$	Номинальная мощность трансформатора, ВА				
		10^5	10^6	10^7	10^8	10^9
Статистический критерий изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $K_{и,пр} = (U_0/U_n)_{пр}$	0,85	4,45	3,2	2,52	2,16	1,96
	0,9	2,98	2,28	1,9	1,7	1,58
	0,95	1,9	1,57	1,41	1,32	1,27

В соответствии с табл. 5.7 на рис. 5.7 представлено изменение предельных значений статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $K_{и,пр}=(U_0/U_n)_{пр}$ для различных мощностей трансформаторов класса напряжения 110 кВ при заданных отношениях $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$.

Из рис. 5.7 следует, что расчётные значения СКПН масла $K_{и,пр}=(U_0/U_n)_{пр}$ имеют тенденцию спада при увеличении мощности трансформаторов и при возрастании допустимой минимальной пробивной напряжённости масла $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$.

Алгоритм диагностирования главной изоляции трансформаторов по статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике. В соответствии с предложенным методом и приведёнными выше результатами анализа расчётных и экспериментальных данных разработан алгоритм диагностирования главной изоляции трансформаторов по статистическому критерию $K_{и,пр}=(U_0/U_n)_{пр}$:

1). Для заданной пробы масла из трансформатора проводится 6 пробоев в соответствии с ГОСТ 6581-75 [66];

2). Выписываются значения всех шести пробивных напряжений в маслопробойнике;

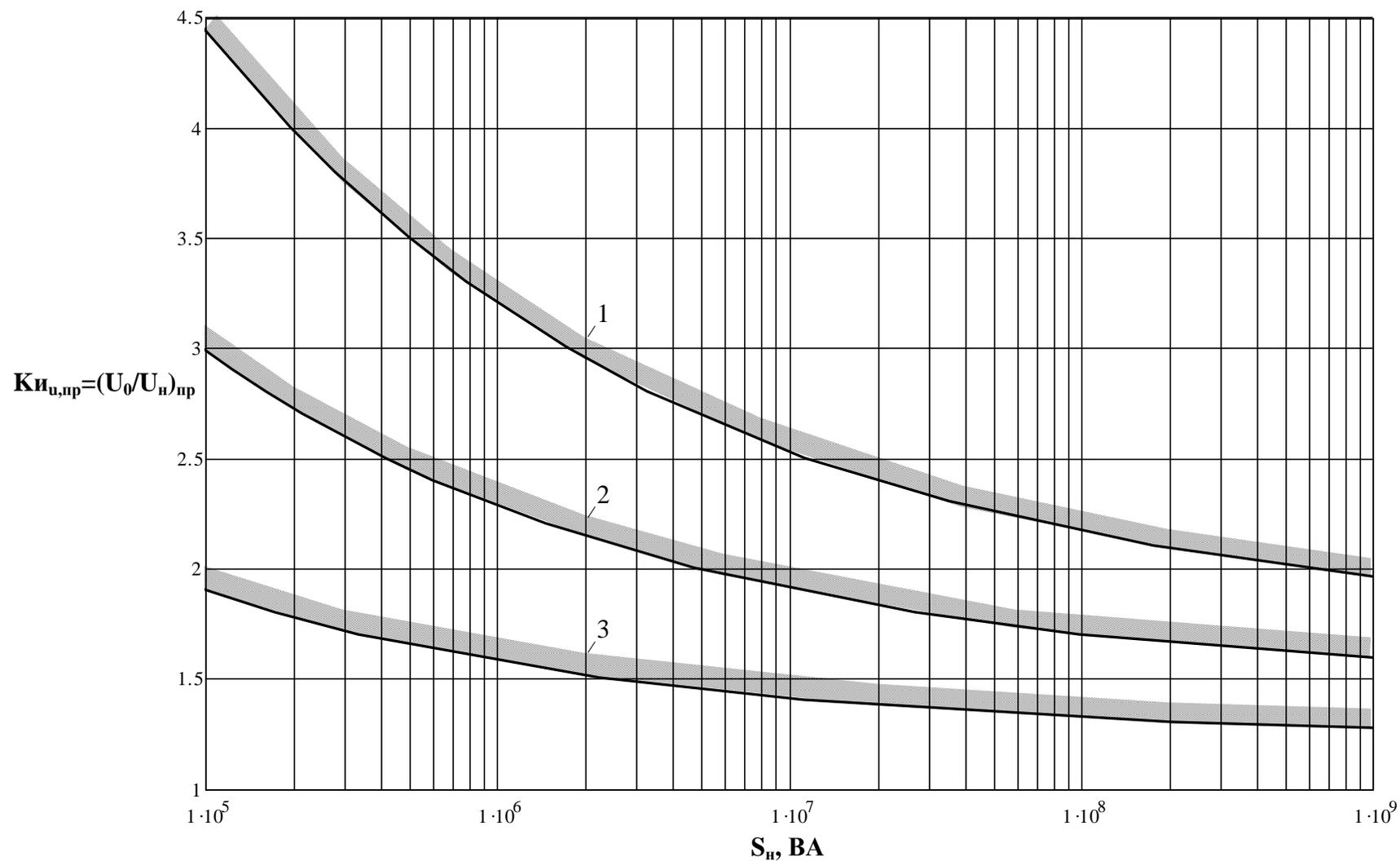


Рис. 5.7. Зависимость СКИПН масла $K_{и,пр}=(U_0/U_n)_{пр}$ от мощности силовых трансформаторов при различных значениях относительной минимальной пробивной напряжённости масла $E_{мк.пр.мин,п}/E_{мк.пр.мин,1}$:

1, 2, 3 – для $E_{мк.пр.мин,п}/E_{мк.пр.мин,1}$ соответственно 0,85; 0,90; 0,95

3). Все значения пробивных напряжений заводятся в качестве исходных данных в разработанную программу для расчёта статистических характеристик пробивных напряжений: U_0 , U_n , α , $Kи_U = U_0/U_n$, $\langle U_{пр} \rangle$, $V_{\langle U_{пр} \rangle}$;

4). В соответствии с предложенным методом определения СХЭП трансформаторного масла по разработанному алгоритму определяются предельные значения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $Kи_{u,пр}$ с учётом мощности и класса напряжения силового трансформатора, из которого взята проба исследуемого масла, для различных значений относительной минимальной пробивной напряжённости масла. Рекомендуются их значения принять равными: 0, 85; 0,90; 0,95.

Для ускорения этого процесса в эксплуатации применительно к трансформаторам напряжением 110 кВ следует воспользоваться полученными в работе (рис. 5.7) зависимостями предельного значения СКИПН масла $Kи_{u,пр}$ от мощности силовых трансформаторов;

5). Проводится сопоставление расчётного значения СКИПН масла в маслопробойнике $Kи_u$ и предельного значения этого критерия $Kи_{u,пр}$ при заданном значении относительной минимальной пробивной напряжённости масла.

6). Масло удовлетворяет предъявляемым требованиям при выполнении следующих условий:

$$Kи_u < Kи_{u,пр}; \quad (5.5)$$

$$\langle U_{пр} \rangle > \langle U_{пр} \rangle_{норм}. \quad (5.6)$$

Здесь $\langle U_{пр} \rangle_{норм}$ – среднее пробивное напряжение трансформаторного масла, установленное для заданного класса напряжения трансформаторов в соответствии с нормативными документами [60].

Разработанный алгоритм принят за основу при диагностировании главной изоляции трансформаторов по статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $Kи_{u,пр}=(U_0/U_n)_{пр}$ применительно к действующим силовым трансформаторам по результатам эксплуатационных испытаний трансформаторного масла.

5.3 Диагностирование главной изоляции трансформаторов по статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике по результатам его эксплуатационных испытаний

Для решения этой поставленной задачи была создана база данных пробивных напряжений трансформаторного масла в маслопробойнике по результатам его эксплуатационных испытаний в 34 действующих трансформаторах напряжением 110 кВ различной мощности (ПРИЛОЖЕНИЕ №4).

На основе созданной базы были рассчитаны диагностические статистические параметры пробивных напряжений трансформаторного масла в маслопробойнике по традиционному и предложенному методам. Результаты данных расчётов и их сопоставление представлены в таблице 5.8.

Оценка технического состояния главной изоляции силовых трансформаторов далее приведена по предложенному статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике и по традиционным диагностическим параметрам. Проведён анализ полученных результатов.

По данным табл. 5.8 на рис. 5.8 представлена гистограмма распределения средних пробивных напряжений масла из 34 силовых трансформаторов. Исследования изменения традиционных диагностических статистических параметров (табл. 5.8 и рис. 5.8) показало, что средние пробивные напряжения эксплуатационных трансформаторных масел для всех исследуемых трансформаторов удовлетворяют нормативным требованиям [$\langle U_{пр} \rangle > 35$ кВ]. При этом наибольшая плотность вероятностей наблюдается при напряжениях выше 55 кВ.

Таблица 5.8

Диагностические статистические параметры пробивных напряжений масла в маслопробойнике для действующих трансформаторов класса 110 кВ, полученные по традиционному и предложенному методам на основе результатов эксплуатационных испытаний

№	Мощность трансформатора S_n , МВА	Признак параметра	Традиционный метод				Предложенный метод			
			$\langle U_{пр} \rangle$, кВ		$V_{\langle U_{пр} \rangle}$, %		$K_{иц} = U_0/U_n$			Текущие значения $K_{иц}$ по результатам испытаний
			Норматив, не менее	Результаты испытаний	Норматив, не более	Результаты испытаний	Предельные значения $K_{иц,пр}$ (не более) при различной относительной минимальной пробивной напряжённости масла			
8	9	10	0,85	0,9	0,95					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2,5	Значение параметров	35	66,667	20	8,82	2,85	2,1	1,5	3,068
		Соответствие нормам	да		да		нет	нет	нет	
2	2,5	Значение параметров	35	70,5	20	7,023	2,85*	2,1	1,5	2,72*
		Соответствие нормам	да		да		да	нет	нет	
3	2,5	Значение параметров	35	49,5	20	7,128	2,85	2,1	1,5	2,526
		Соответствие нормам	да		да		да	нет	нет	
4	2,5	Значение параметров	35	61,667	20	6,345	2,85	2,1	1,5	2,351
		Соответствие нормам	да		да		да	нет	нет	
5	2,5	Значение параметров	35	53,33	20	4,61	2,85	2,1	1,5	1,735
		Соответствие нормам	да		да		да	да	нет	
6	2,5	Значение параметров	35	74	20	3,121	2,85	2,1	1,5	1,41
		Соответствие нормам	да		да		да	да	да	
7	2,5	Значение параметров	35	70,83	20	2,51	2,85	2,1	1,5	1,307
		Соответствие нормам	да		да		да	да	да	
8	2,5	Значение параметров	35	76,33	20	1,963	2,85	2,1	1,5	1,226
		Соответствие нормам	да		да		да	да	да	
9	6,3	Значение параметров	35	71,667	20	5,507	2,6	1,95	1,48	2,009
		Соответствие нормам	да		да		да	нет	нет	

Продолжение таблицы 5.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1
10	6,3		35	70,667	20	4,529	2,6	1,95	1,48	1,558
		Соответствие нормам	да		да	да	да	нет		
11	6,3	Значение параметров	35	69,667	20	3,509	2,6	1,95	1,48*	1,483*
		Соответствие нормам	да		да	да	да	нет		
12	6,3	Значение параметров	35	66	20	3,499	2,6	1,95	1,48	1,481
		Соответствие нормам	да		да	да	да	нет		
13	6,3	Значение параметров	35	61,33	20	4,45	2,6	1,95	1,48	1,25
		Соответствие нормам	да		да	да	да	да		
14	6,3	Значение параметров	35	75,33	20	1,481	2,6	1,95	1,48	1,163
		Соответствие нормам	да		да	да	да	да		
15	6,3	Значение параметров	35	77,33	20	1,09	2,6	1,95	1,48	1,115
		Соответствие нормам	да		да	да	да	да		
16	10	Значение параметров	35	53,667	20	6,626	2,52*	1,9	1,47	2,491*
		Соответствие нормам	да		да	да	да	нет	нет	
17	10	Значение параметров	35	72,667	20	5,489	2,52	1,9	1,47	2,003
		Соответствие нормам	да		да	да	да	нет	нет	
18	10	Значение параметров	35	55,167	20	4,643	2,52	1,9*	1,47	1,744*
		Соответствие нормам	да		да	да	да	да	нет	
19	10	Значение параметров	35	73,667	20	4,766	2,52	1,9	1,47	1,605
		Соответствие нормам	да		да	да	да	да	нет	
20	10	Значение параметров	35	77,667	20	2,775	2,52	1,9	1,47	1,35
		Соответствие нормам	да		да	да	да	да	да	
21	10	Значение параметров	35	75,33	20	2,534	2,52	1,9	1,47	1,311
		Соответствие нормам	да		да	да	да	да	да	
22	10	Значение параметров	35	69	20	2,214	2,52	1,9	1,47	1,217
		Соответствие нормам	да		да	да	да	да	да	
23	10	Значение параметров	35	57,667	20	3,516	2,52	1,9	1,47	1,152
		Соответствие нормам	да		да	да	да	да	да	
24	16	Значение параметров	35	58,667	20	6,141	2,4*	1,85	1,46	2,257*
		Соответствие нормам	да		да	да	да	нет	нет	

Продолжение таблицы 5.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
25	16	Значение параметров	35	67,33	20	3,036	2,4	1,85	1,46*	1,394*
		Соответствие нормам	да		да		да	да	да	
26	16	Значение параметров	35	75,667	20	1,588	2,4	1,85	1,46	1,176
		Соответствие нормам	да		да		да	да	да	
27	16	Значение параметров	35	76,33	20	1,574	2,4	1,85	1,46	1,175
		Соответствие нормам	да		да		да	да	да	
28	16	Значение параметров	35	68	20	3,48	2,4	1,85	1,46	1,159
		Соответствие нормам	да		да		да	да	да	
29	20	Значение параметров	35	57,667	20	5,55	2,36	1,83	1,45	2,024
		Соответствие нормам	да		да		да	нет	нет	
30	20	Значение параметров	35	45	20	4,407	2,36	1,83	1,45*	1,371*
		Соответствие нормам	да		да		да	да	да	
31	25	Значение параметров	35	58	20	7,123	2,35	1,81	1,44	2,783
		Соответствие нормам	да		да		нет	нет	нет	
32	25	Значение параметров	35	56,667	20	2,976	2,35	1,81	1,44	1,313
		Соответствие нормам	да		да		да	да	да	
33	31,5	Значение параметров	35	54,8	20	5,701	2,3	1,8	1,42	2,079
		Соответствие нормам	да		да		да	нет	нет	
34	125	Значение параметров	35	70	20	1,952	2,2	1,7	1,4	1,187
		Соответствие нормам	да		да		да	да	да	

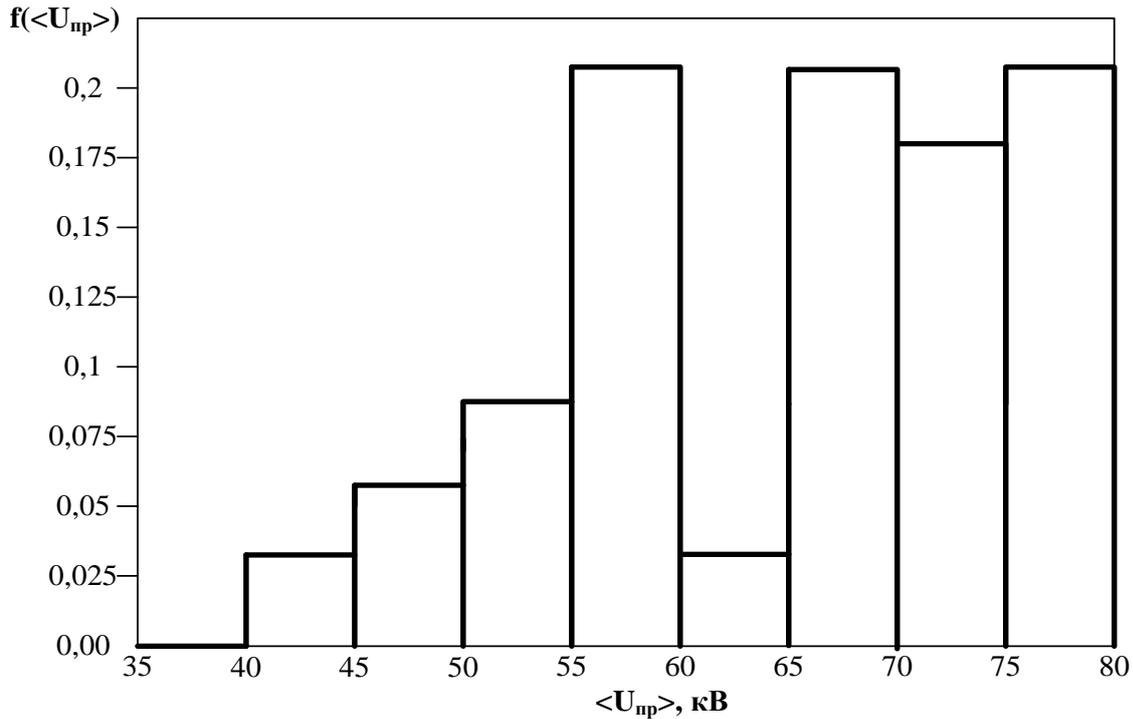


Рис. 5.8. Гистограмма распределения средних пробивных напряжений эксплуатационных трансформаторных масел ($N = 34$)

Для оценки технического состояния главной изоляции силовых трансформаторов по предложенному статистическому критерию изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике по данным табл.5.8 исследовано распределение критерия изменчивости $K_{и_у}$ при различных значениях средних пробивных напряжений (табл. 5.9). Отмечается, что критерий изменчивости $K_{и_у}$ находится в пределах 1,0– 3,5. При этом из распределения критерия $K_{и_у}$ (рис.5.9) следует, что наибольшая вероятность появления критерия изменчивости $K_{и_у} = U_0/U_H$ наблюдается при его значениях 1,0 – 1,5 в диапазоне пробивных напряжений 65 – 80 кВ. По мере возрастания критерия $K_{и_у}$ вероятность его появления уменьшается.

Для сопоставления полученных результатов по критерию изменчивости $K_{и_у} = U_0/U_H$ с данными эксплуатационных испытаний масла по параметру $V_{\langle U_{пр} \rangle}$ выполнены исследования по выявлению корреляционной связи параметров $K_{и_у}$ и $V_{\langle U_{пр} \rangle}$ по результатам пробивных напряжений масла в маслопробойнике с

применением расширенной выборки его проб из 74 силовых трансформаторов. Результаты расчётов представлены на рис. 5.10.

Таблица 5.9

Распределение критерия изменчивости $K_{и}$ при различных границах интервалов отклонений $\langle U_{пр} \rangle$, $N = 34$

Границы интервалов отклонений критерия изменчивости $K_{и}$	Границы интервалов отклонений $\langle U_{пр} \rangle$, кВ									Сумма
	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70-75	75-80	
1,0 – 1,5	0,0	0,029	0,029		0,088		0,177	0,029	0,207	0,559
1,5 – 2,0	0,0	0,0	0,0	0,029	0,029	0,0	0,0	0,059	0,0	0,117
2,0 – 2,5	0,0	0,0	0,0	0,059	0,059	0,029	0,0	0,059	0,0	0,206
2,5 – 3,0	0,0	0,0	0,029	0,0	0,029	0,0	0,0	0,029	0,0	0,088
3,0 – 3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,029	0,0	0,0	0,029
Сумма										1,000

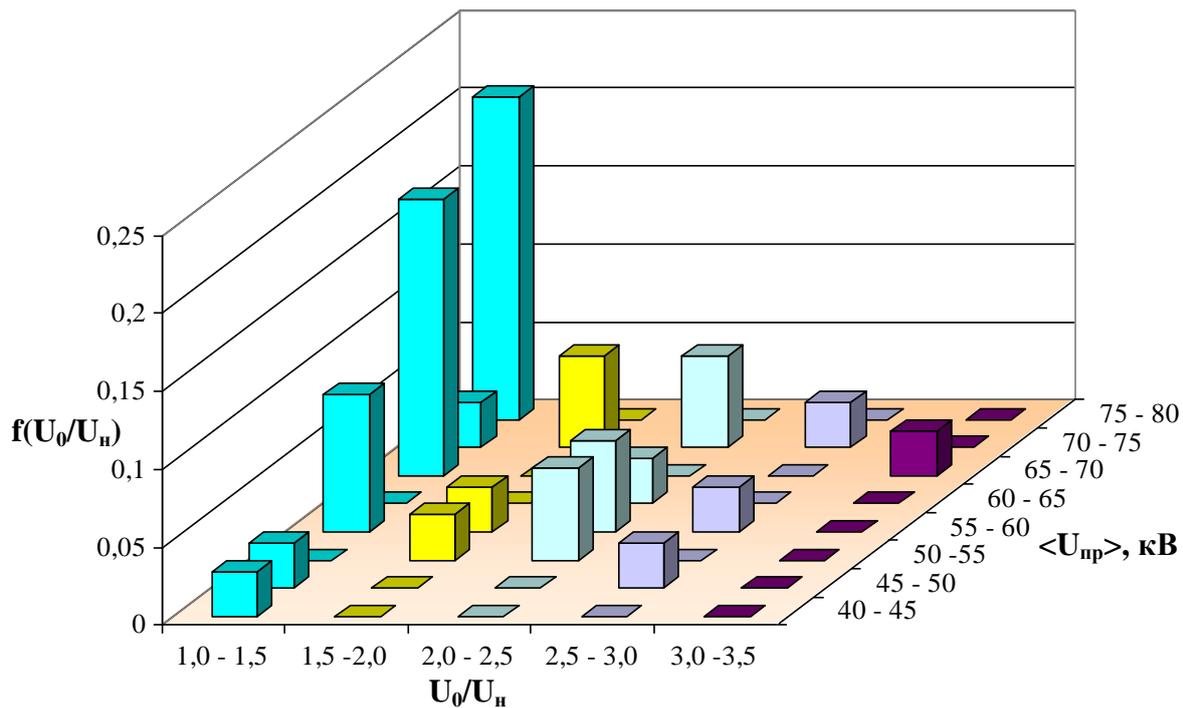


Рис. 5.9. Гистограммы распределения критерия изменчивости $K_{и} = U_0/U_n$ при различных границах интервалов отклонений средних пробивных напряжений трансформаторного масла

Из рис. 5.10 следует, что между коэффициентами $K_{и}$ и $V_{\langle U_{пр} \rangle}$ имеет место явно выраженная положительная корреляция, близкая к:

$$K_{и_u} = U_0/U_n = \exp(0,072 \cdot (V_{<U_{пр}>})^{1,319}). \quad (5.7)$$

Коэффициент корреляции составил 96,4 %.

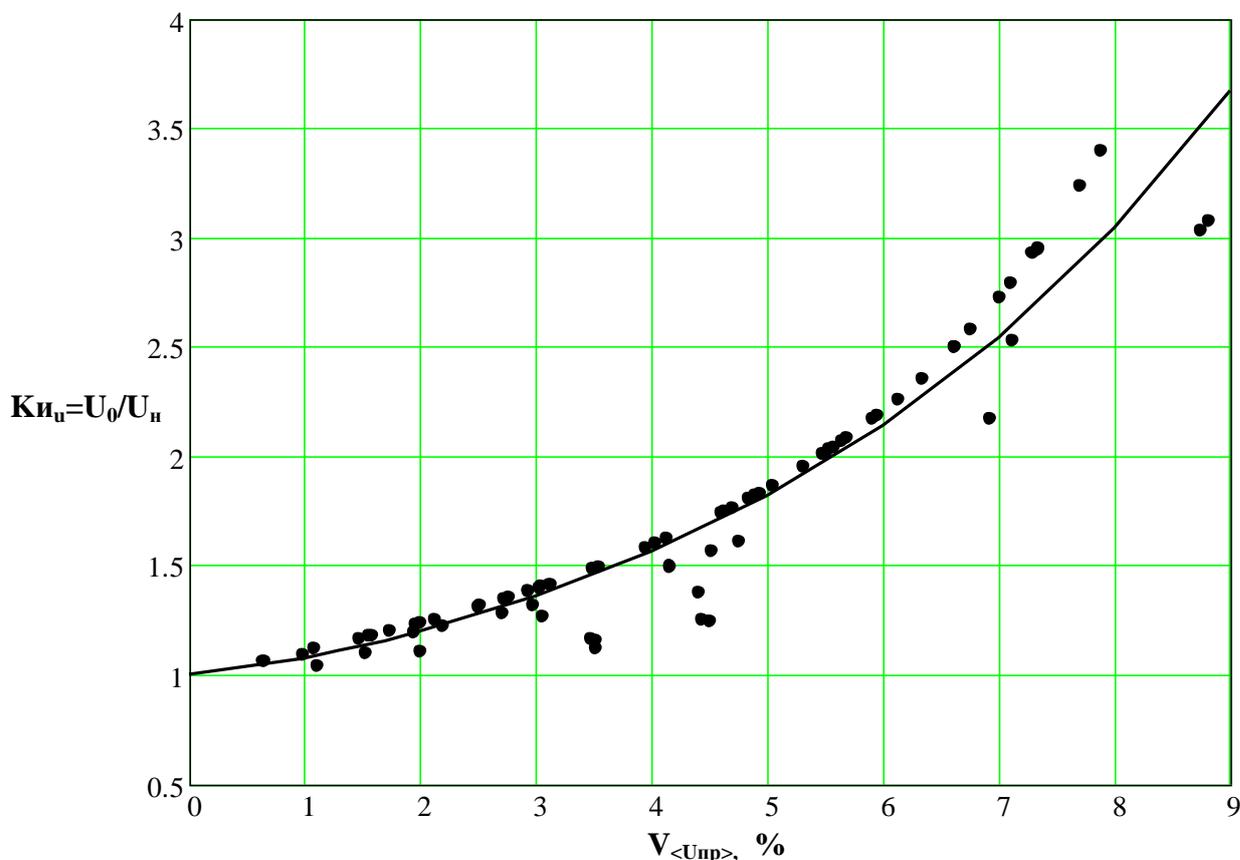


Рис. 5.10. Корреляционная связь параметров $K_{и_u}$ и $V_{<U_{пр}>}$, $N = 74$

Из табл. 5.8 и рис. 5.10 следует, что для всех исследуемых проб масла коэффициент вариации $V_{<U_{пр}>}$ не превышает 9%, что значительно меньше нормативного по ГОСТ 6581-75 значения 20%.

По данным табл. 5.8 на рис. 5.11 представлено сопоставление значений статистического критерия изменчивости $K_{и_u} = U_0/U_n$, наблюдаемых при обработке результатов испытаний эксплуатационного трансформаторного масла в маслоробойнике для действующих трансформаторов, с требованиями к предельным значениям критерия изменчивости $K_{и_u,пр} = (U_0/U_n)_{пр}$, которые определяются по разработанному методу при заданных уровнях минимальной электрической прочности масла $E_{мк.пр.мин,п}/E_{мк.пр.мин,1}$ для различных мощностей силовых трансформаторов класса 110 кВ.

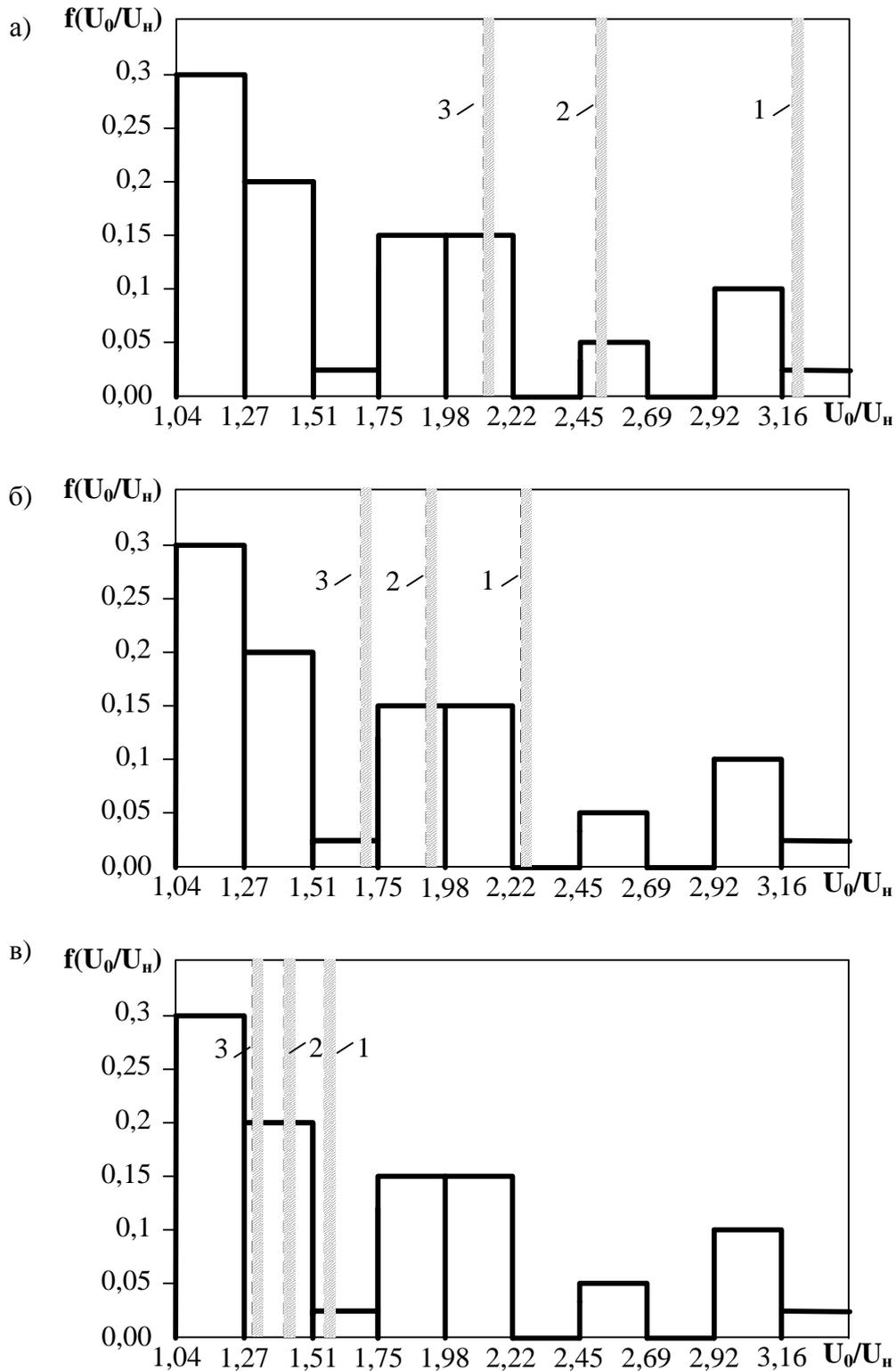


Рис. 5.11. Сопоставление значений критерия изменчивости $Ki_u = U_0/U_n$, наблюдаемых при эксплуатационных испытаниях, с предельными значениями $Ki_{u,pr} = (U_0/U_n)_{pr}$, которые определены по разработанному методу при заданных уровнях минимальной электрической прочности масла $E_{мк.пр.мин,п}/E_{мк.пр.мин,1}$ для различных мощностей трансформаторов:

а), б), в) – значения $E_{мк.пр.мин,п}/E_{мк.пр.мин,1}$ соответственно 0,85; 0,90; 0,95;

1, 2, 3 – значения $Ki_{u,pr} = (U_0/U_n)_{pr}$ для мощностей трансформаторов соответственно: 10^6 , 10^7 , 10^8 ВА

Из рис. 5.11 видно, что эксплуатационное трансформаторное масло в действующих трансформаторах класса 110 кВ имеет области критерия изменчивости $K_{и_у}$, удовлетворяющих условию $K_{и_у} < K_{и_у,пр} = (U_0/U_n)_{пр}$, причём с ростом мощности трансформаторов эта область становится более узкой при всех заданных уровнях минимальной электрической прочности масла $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1}$.

Наибольший процент трансформаторов, удовлетворяющих предъявляемым требованиям по критерию изменчивости $K_{и_у}$ имеет место (табл. 5.10) при $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1} = 0,85$ и составляет 94,1%, причём с учётом «зоны риска» (отличие от норматива 5%) этот процент уменьшается до 85%. Здесь следует отметить, что в действующих трансформаторах при выборе изоляции заложено значение $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1} = 0,85$. При возрастании значений $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1}$ доля трансформаторов, для которых наблюдается соответствие требованиям по коэффициенту изменчивости $K_{и_у}$, уменьшается (табл. 5.10).

Таблица 5.10

Оценка доли трансформаторов, для которых наблюдается соответствие нормам по диагностическим статистическим параметрам пробивных напряжений масла, N = 34

Наименование показателя	Традиционный метод		Предложенный метод, по критерию $K_{и_у} = U_0/U_n$		
	по $\langle U_{пр} \rangle$	по $V_{\langle U_{пр} \rangle}$	При значениях относительной минимальной пробивной напряжённости масла:		
			0,85	0,90	0,95
Доля трансформаторов (%), для которых наблюдается соответствие нормам	100	100	94,1	67,6	50
Доля трансформаторов (%), для которых наблюдается соответствие нормам с учётом «зоны риска»* – отличие от норматива 5%	100	100	85	64,7	44,1

По данным табл. 5.8 на рис. 5.12 в целях сопоставления представлены предельные значения $K_{и_у,пр} = (U_0/U_n)_{пр}$ при различных значениях $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1}$ и экспериментальные значения $K_{и_у} = U_0/U_n$ для действующих силовых трансформаторов различной мощности. Здесь следует отметить, что за

пределы $K_{и,пр}$ при $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1}=0,85$ выходят только 2 трансформатора: мощностью 2 МВА (№1 – табл. 5.8) и 25 МВА (№31 – табл. 5.8).

При этом доля трансформаторов, удовлетворяющих предъявляемым требованиям по данному параметру при $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1} = 0,95$ составляет 50% (табл. 5.10), причём в число этих трансформаторов попадают трансформаторы всех значений мощностей (рис. 5.12).

По данным табл. 5.8 и рис. 5.12 составлена табл. 5.11 в целях выявления корреляции между долей трансформаторов (%), для которых наблюдается соответствие требованиям по критерию изменчивости $K_{и_u}=U_0/U_n$ и мощностью трансформаторов.

Таблица 5.11

Изменение доли трансформаторов (%), для которых наблюдается соответствие требованиям по критерию изменчивости $K_{и_u}=U_0/U_n$, в зависимости от мощности трансформаторов

№ группы трансформаторов	Мощность трансформаторов, МВА	Количество трансформаторов		Предложенный метод, по критерию изменчивости $K_{и_u} = U_0/U_n$		
		n	N	При значениях относительной минимальной пробивной напряжённости масла:		
				0,85	0,90	0,95
1	10	8	8	87,5	62,5	50
2	20	2	4	75	50	25
	25	2				

Для этого были выбраны две группы трансформаторов: 10 МВА и 20 – 25 МВА. Эти трансформаторы имеет одинаковую систему охлаждения и достаточную кратность их мощностей – (2,0–2,5).

Из табл. 5.11 видно, что в группе силовых трансформаторов большей мощности отмечается уменьшение доли трансформаторов, для которых наблюдается соответствие требованиям к трансформаторному маслу по коэффициенту изменчивости $K_{и_u}$. Этот момент следует учитывать в эксплуатации при анализе диагностических статистических параметров пробивных напряжений трансформаторного масла.

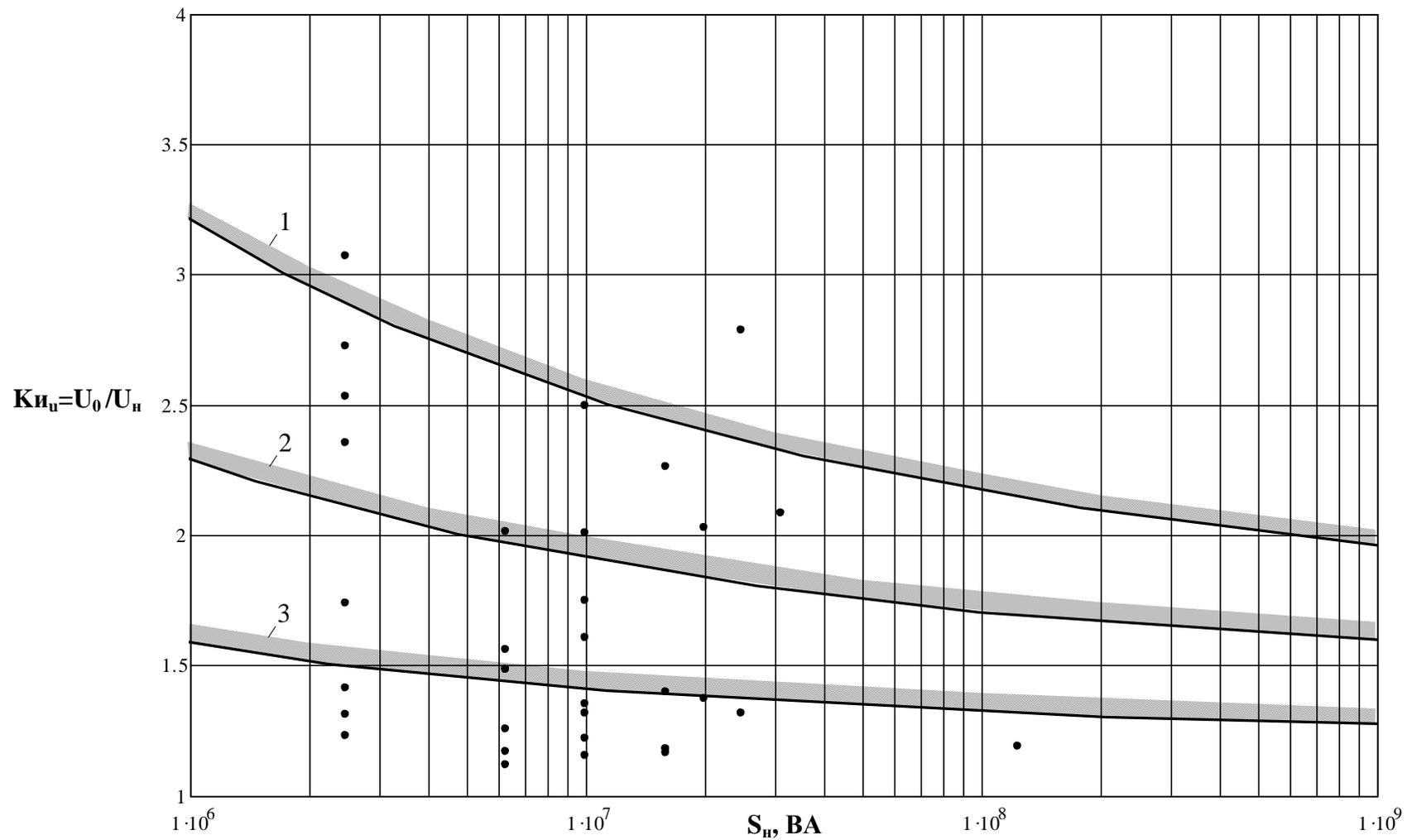


Рис. 5.12. Зависимости критерия изменчивости K_u трансформаторного масла от мощности силовых трансформаторов:
 1, 2, 3 – предельные значения критерия изменчивости $K_{u,\text{пр}} = (U_0/U_n)_{\text{пр}}$ при $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$ соответственно 0,85; 0,90; 0,95;
 • – экспериментальные значения $K_u = U_0/U_n$

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 позволяет в отличие от традиционного метода диагностирования оценивать техническое состояние главной изоляции трансформаторов с учётом их мощности.

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

Научные и практические результаты работы внедрены в Главном управлении ОАО «ТГК-2» по Ярославской области и в Филиале «Ивановские ПГУ» ОАО «Интер РАО–Электрогенерация» для диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов класса напряжения 110 кВ, а также в учебный процесс ИГЭУ (ПРИЛОЖЕНИЯ 5, 6, 7).

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 $K_{и_у,пр}$ и применения предложенного алгоритма диагностирования по аналогии с исследованными трансформаторами класса 110 кВ для диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов других классов напряжения.

Таким образом, на основе анализа полученных результатов исследования показана возможность и определены перспективы практического использования разработанных методов и алгоритма диагностирования главной изоляции с

применением статистического критерия изменчивости пробивного напряжения эксплуатационного трансформаторного масла для повышения эффективности диагностирования электрической прочности главной изоляции действующих силовых трансформаторов с учётом влияния их мощности и класса напряжения.

5.4. Выводы по главе 5

1. Анализ результатов выполненных исследований показал, что в качестве оценки электрической прочности масла в каналах главной изоляции трансформаторов при эксплуатационных испытаниях может служить критерий изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $K_{и_u} = U_0/U_n$. С применением этого критерия разработан алгоритм диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов на основе результатов эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике. Показано, что масло удовлетворяет предъявляемым требованиям при выполнении следующих условий: $K_{и_u} < K_{и_{u,пр}}$; $\langle U_{пр} \rangle > \langle U_{пр} \rangle_{норм}$.

2. 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 $K_{и_{u,пр}} = (U_0/U_n)_{пр}$ уменьшаются при увеличении мощности трансформатора. При этом их большая часть находится в области наблюдаемых при эксплуатационных испытаниях значений критерия изменчивости $K_{и_u}$, удовлетворяющих условию $K_{и_u} < K_{и_{u,пр}}$, причём с ростом мощности трансформаторов эта область становится более узкой.

3. Анализ результатов выполненного диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов по предложенному алгоритму и данным эксплуатационных испытаний масла в маслопробойнике из действующих трансформаторов напряжением 110 кВ различной мощности показал, что

наибольший процент трансформаторов, удовлетворяющих предъявляемым требованиям по коэффициенту изменчивости $K_{и_0}$, имеет место при $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1} = 0,85$ и составляет 94,1%, причём с учётом «зоны риска» (отличие от норматива 5%) этот процент уменьшается до 85%. При возрастании значений $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1}$ доля трансформаторов, для которых наблюдается соответствие требованиям по коэффициенту изменчивости $K_{и_0}$, уменьшается.

4. Анализ результатов диагностирования главной изоляции исследуемых действующих трансформаторов напряжением 110 кВ различной мощности по традиционному методу показал, что традиционные диагностические параметры для всех трансформаторов удовлетворяют нормативным требованиям:

- средние пробивные напряжения эксплуатационных трансформаторных масел для всех трансформаторов удовлетворяют нормативным требованиям [$\langle U_{пр} \rangle > 35$ кВ]. При этом их наибольшая плотность вероятностей наблюдается при напряжениях выше 55 кВ;

- наибольшие значения коэффициента вариации среднего пробивного напряжения масла $V_{\langle U_{пр} \rangle}$ для исследованных образцов масла не превышают 9%, что значительно меньше его нормативного по ГОСТ 6581-75 значения 20%. Наиболее вероятные значения коэффициента вариации $V_{\langle U_{пр} \rangle}$ находятся в диапазоне 4,71–6,33%.

5. На основе выполненных расчетов статистических характеристик пробивных напряжений образцов масла по разработанной программе с применением распределения Гнеденко-Вейбулла получены численные значения диагностических параметров U_0 , U_n , α и их эмпирические распределения.

Для исследуемых образцов масла значения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $K_{и_0} = U_0/U_n$ 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 $K_{и_0}$ вероятность его появления уменьшается.

6. Показано, что между диагностическими параметрами U_0 (параметр распределения Гнеденко-Вейбулла) и средним пробивным напряжением $\langle U_{пр} \rangle$ имеет место линейная корреляция. Различие параметров U_0 и $\langle U_{пр} \rangle$ находится в пределах 3 – 4%.

Установлены также математические выражения для корреляционных зависимостей статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $K_{и_u} = U_0/U_n$ и экспериментальных значений $U_{пр,max}/U_{пр,min}$, критерия $K_{и_u}$ и коэффициента вариации $V_{\langle U_{пр} \rangle}$, а также отношения $U_{пр,max}/U_{пр,min}$ и коэффициента вариации $V_{\langle U_{пр} \rangle}$.

7. 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 трансформаторов с учётом влияния их мощности и класса напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что в настоящее время фактически отсутствует приемлемый метод оценки технического состояния главной изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации с применением диагностических СХЭП масла и учётом влияния мощности трансформаторов. 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 критерия изменчивости пробивного напряжения масла в маслопробойнике $K_{и_у} = U_0/U_n$. Определены предельные значения статистического критерия изменчивости пробивного напряжения масла $K_{и_у,пр}=(U_0/U_n)_{пр}$, 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: $K_{и_у} < K_{и_у,пр}$; $\langle U_{пр} \rangle > \langle U_{пр} \rangle_{норм}$.

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 $K_{и_у,пр}=(U_0/U_n)_{пр}$ уменьшаются при увеличении мощности трансформатора. При этом их большая часть находится в области наблюдаемых при эксплуатационных испытаниях значений критерия изменчивости $K_{и_у}$, удовлетворяющих условию $K_{и_у} < K_{и_у,пр}$, причём с ростом мощности трансформаторов эта область становится более узкой.

Наибольший процент трансформаторов, удовлетворяющих предъявляемым требованиям по коэффициенту изменчивости $K_{и_у}$, имеет место при $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1}=0,85$ и составляет 94,1%. При возрастании значений $E_{мк.пр.мин,м}/E_{мк.пр.мин,1}$ доля трансформаторов, для которых наблюдается соответствие требованиям по коэффициенту изменчивости $K_{и_у}$, 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 $K_{и_у}=U_0/U_n$ 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 $K_{и_у}$ вероятность его появления уменьшается;

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

– наиболее вероятные значения коэффициента вариации масла $V_{\langle U_{пр} \rangle}$ 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 статистических 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 $K_{и,пр}$ и применения предложенного алгоритма диагностирования по аналогии с исследованными трансформаторами класса 110 кВ для диагностирования главной изоляции силовых трансформаторов других классов напряжения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГИСТ – главная изоляция силового трансформатора

СХЭП – статистические характеристики электрической прочности

СКИПН – статистический критерий изменчивости пробивного напряжения

табл. – таблица

рис. – рисунок

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичинский М.И. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния // Энергетик. – 2000. – №11. – С. 29 – 30.
2. О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей / Львов М.Ю. и др. // Энергетик. – 2005. – №11. – С. 69–75.
3. Соколов В.В., Гурин В.В. Продление срока службы силовых трансформаторов // Электротехника. – 1994. – №10. – С. 31 – 32.
4. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. История трансформаторного направления в ВЭИ // Электро. – 2006. – №5. – С. 46 – 51.
5. Лавринович В.А., Мытников А.В. Разработка технологии диагностики состояния обмоток трансформаторов и электродвигателей на основе импульсного метода // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 286 – 292.
6. Андреев Д.А., Назарычев А.Н. Управление жизненным циклом электроустановок при эксплуатации по техническому состоянию // Надёжность и безопасность энергетики. – 2013. – №3. – С. 32 – 36.
7. Гольдштейн В.Г., Назарычев А.Н., Хренников А.Ю. Диагностические модели для оценки технического состояния электрооборудования электростанций и подстанций // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – №3. – С. 41 – 44.
8. Хренников А.Ю., Терешко О.А. Основные методы диагностики состояния электрооборудования для выявления дефектов и повреждений. – Москва: ВИПКэнерго, 2005. – 50 с.
9. Ермаков Е.Г., Монастырский А.Е., Шавловский С.В. О критериях идентификации дефектов силовых трансформаторов по электрическим

характеристикам частичных разрядов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2010. – №5. – С. 35 – 40.

10. Соколов В.В. Актуальные задачи развития методов и средств диагностики трансформаторного оборудования под напряжением // Изв. РАН, Энергетика. – 1997. – №1. – С. 155 – 168.

11. Ванин Б.В., Львов Ю.Н., Львов М.Ю. и др. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110 – 500 кВ в эксплуатации // Электрические станции. – 2001. – №9. – С. 53 – 58.

12. Гурин В.В., Соколов В.В. Обследование силовых трансформаторов в эксплуатации // Электротехника. – 1994. – №9. – С. 43 – 45.

13. Лоханин А.К., Соколов В.В. Обеспечение работоспособности маслонаполненного оборудования после расчетного срока службы // Электро. – 2002. – №1. – С. 10 – 16.

14. Серебряков А.С. Семёнов Д.А. Определение оставшегося ресурса главной изоляции распределительных трансформаторов // Электротехника. – 2013. – №6. – С. 2 – 8.

15. Никитин О.А., Верещагин И.П., Пинталь Ю.С. Возможности оценки остаточного ресурса и продление сроков эксплуатации высоковольтного оборудования энергосистем // Электро. – 2001. – № 1. – С.2 – 3.

16. Долин А.П., Крайнов В.К., Смекалов В.В., Шамко В.Н. Повреждаемость, оценка состояния и ремонт силовых трансформаторов // Энергетик. – 2001. – № 7. – С. 30 – 34.

17. РДИ 34-38-058-91. Типовая технологическая инструкция. Трансформаторы напряжением 110 – 1150 кВ, мощностью 80 МВА и более. Капитальный ремонт. – М.: СПО ОРГРЭС, 1993.

18. Михеев Г.М. Диагностика высоковольтного электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2010. – №4. – С. 27–32.

19. Михеев Г.М., Ефремов Л.Г., Иванов Д.Е. Способы повышения энергоэффективности силовых трансформаторов // Вестник Чувашского университета. – 2013. – №3. – С. – 212 – 218.

20. Комаров В.Б., Львова М.М. Изменение показателей изоляции и трансформаторного масла в процессе длительной эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 5. – С. 44 – 49.
21. Львов М.Ю., Львова М.М. К вопросу о длительной эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше // Энергетик. – 2014. – №5. – С. 27 – 30.
22. Львова М.М., Львов С.Ю., Комаров В. Б., Лютько Е.О., Вдовико В. П., Демченко В. В., Беляев С. Г., Савельев В.А., Львов М.Ю., Львов Ю.Н. О снижении риска повреждений силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше, сопровождающихся внутренними КЗ // Электрические станции. – 2014. – №9. – С. 41 – 48.
23. Арбузов Р.С., Живодерников С.В., Шиллер О.Ю., Овсянников А.Г. Проблемы эксплуатации и диагностирования некоторых видов электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. –2013. – №2. – С. 51 – 56.
24. Смекалов В.В., Долин А.П., Першина Н.Ф. Оценка состояния и продление срока службы силовых трансформаторов // Техническое перевооружение и ремонт энергетических объектов. Доклады юбилейной научно-практической конференции, посвященной 50-летию ИПКГосслужбы. Т. 4./ под ред. В.В. Барило. – М.: ИПКГосслужбы, ВИПКЭнерго, 2002. С. 120 – 136.
25. Алексеев Б.А. Крупные силовые трансформаторы. Эксплуатационная надежность, контроль состояния и оценка работоспособности. // Энергетика за рубежом: прил. к журн. «Энергетик». – М. – 2008. – Вып. 2. – С. 3 – 56
26. Гурин В.В., Соколов В.В., Обследование силовых трансформаторов в эксплуатации // Электротехника. – 1994. – №9. – С. 43 – 45.
27. Соколов В.В. Актуальные задачи развития методов и средств диагностики трансформаторного оборудования под напряжением // Изв. Академии наук, Энергетика. – 1997. – №1. – С. 177 – 167.

28. Изоляция установок высокого напряжения: учебник для вузов / Г.С. Кучинский, В.Е. Кизеветтер, Ю.С. Пинталь; под общ. ред. Г.С. Кучинского – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
29. Черноготский В.М., Джунь Л.П., Методология выбора изоляции трансформаторного оборудования УВН переменного тока / Электро. – 2009. – №4. – С. 19 – 25.
30. Панов А.В., Морозова Т.И. Электрические характеристики и методы расчёта главной изоляции мощных высоковольтных трансформаторов // Труды ВЭИ. Вопросы трансформаторостроения. – 1969. – Вып. 79. – С. 12 – 32.
31. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / М. Бейер и др.; пер. с нем.; под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
32. Кадомская К.П. Качесов В.Е., Лавров Ю.А., Овсянников А.Г., Сахно В.А. Диагностика и мониторинг кабельных сетей средних классов напряжения // Электротехника, – №11 – 2000. – С. 48 – 51.
33. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). – М.: ГИТТЛ, 1949. – 500 с.
34. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: ГИФМЛ, 1958. – 907 с.
35. Черноготский В.М., Джунь Л.П. Электрическая прочность масляных каналов и изоляция края обмотки трансформаторов // Электричество. – 1980. – №11. – С. 47 – 50.
36. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
37. Овсянников А.Г., Коробейников С.М., Вагин Д.В. Связь кажущегося и истинного зарядов частичных разрядов // Электричество. – 2014. – № 8. – С. 37 – 43.
38. РТМ 16.800.853-81. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 – 750 кВ. Методика расчёта изоляции между обмотками. 1981.

39. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
40. Техника высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, и др.; под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2003. – 608 с.
41. Лоханин А.К., Ларин В.С., Матвеев Д.А. Инженерный метод расчёта электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения // Электричество. – 2005. – №3. – С. 82 – 85.
42. Moser H.P. Transformerboard, Scientia Electrica, 1979. – 121 p.
43. Moser H. P., Dahinden V // Transformerboard II, H. AG. – Rapperswil, Switzerland. – 1987. – 222 p.
44. Küchleretall A. Function of Solid Insulation in Transformers // Transform 98, Convention Report, – München, – April 1998, – pp. 41 – 54.
45. Nelson J.K., Salvage B., Sharpley W.A. Electrical strength of transformer oil for large electrode areas // Proc. IEE, – 1971. – vol. 118, № 2. – pp.388-393.
46. Ушаков В.Я., Лопатин В.В., Багин В.В. Эффект площади электродов при пробое трансформаторного масла // Изв. вузов, Физика. – 1964. – № 4. – С. 147 – 149.
47. Weber K.H., Endicott H.S. Extremal area effect for large electrodes for electric breakdown of transformer oil // AIEE Trans., Power App. And Syst., – 1957. – vol.76 pt.3 – p.1091-1096.
48. [Kok](#) J.A. Electrical breakdown of insulating liquids. – New York: Interscience Publishers, 1961. – с. 132.
49. Matches K.N. Influence of electrical discharge in oil and combinations of oil and paper. IEEE Trans. Elec. Insul. – 1976. – vol.11, № 4. – pp. 164 – 180.
50. Волков В.Н., Митькин Ю.А. Теория образования мостиков в жидкости, помещённой в электрическое поле. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – М. – 1973. – № 3. – С. 139 – 145

51. Макаревич Л.В., Шифрин Л.Н., Алпатов М.Е. Современные тенденции в создании и диагностике силовых трансформаторов больших мощностей // Известия академии наук. Энергетика. –2008. – №1. – С. 45 – 69.
52. Ковалёв В.Д., Макаревич Л.В. Перспективные разработки высоковольтного электротехнического оборудования // Электро. – №1. – 2010. – С. 2 – 8.
53. Тихомиров П.М. Расчёт трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – 5-е изд, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
54. Видмар. М. Трансформатор в эксплуатации. – М.-Л.: ГНТИ, 1931. – 292 с.
55. Лоханин А.К., Ларин В.С., Матвеев Д.А. Развитие систем проектирования внутренней изоляции трансформаторного оборудования. // Электроэнергетика. –2009. –№5. – С. 19 – 24.
56. Ikeda M., Inone T. Statistical approach to breakdown stress of transformer insulation, 3 International Symposium on high voltage Engineering, Milan, 23-31.3.79, pp.13-23.
57. Ларин В.С., Лоханин А.К., Матвеев Д.А. Вопросы расчёта изоляции силовых трансформаторов // Сборник научных трудов к 85-летию ВЭИ. – Москва, 2006. – С. 22 – 34.
58. Математическое моделирование статистических характеристик электрической прочности жидких электроизоляционных сред / Ю.А. Митькин, Ф.Н. Ясинский, А.В. Солдатов, М.В. Прусаков // Высоковольтные техника и электротехнология: межвузовский сборник научных трудов / М-во общего и профессионального образования РФ, ИГЭУ; – Иваново. – 2003. Вып.3. – С. 47 – 54.
59. Обзор повреждаемости мощных силовых трансформаторов в эксплуатации по данным разных стран / под ред. С.Д. Лизунова // Трансформаторы. Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам СИГРЭ – 82.– М.: Энергоатомиздат, 1984. – С. 125 – 139.

60. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – Изд. 6-е, с изм. и доп. – М.: НЦ ЭНАС, 2004. – 355 с.
61. IEC 60156 1995 МЭК.
62. Lokhanin A.K., Shneider G.Y., Morozova T.I. et al. Механизмы дефектов внутренней изоляции оборудования ВН в эксплуатационных условиях // СИГРЭ 15-201. – 2002.
63. Ванин Б.В., Львов Ю.Н., Львов М.Ю., Шифрин Л.Н. Эксплуатация силовых трансформаторов при достижении предельно допустимых показателей износа изоляции обмоток // Электрические станции. –2004. –№ 2. – С. 63 – 65.
64. Осотов В.Н. О методологии оценки состояния изоляции силовых трансформаторов с большим сроком службы // Электро. –2008. – №6. – С. 27 – 29.
65. VDE 0370-1 DIN 57370-1 1978-12 (Германия).
66. ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81). Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.
67. ASTM D1816-67 (1971, США). Метод определения пробивного напряжения нефтяных электроизоляционных масел с помощью VDE-электродов /Сборник стандартов США по испытанию электроизоляционных материалов // перевод с англ. под. ред. проф. Н.В. Александрова. – М.: Энергия, 1979. – 344 с.
68. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для вузов/ И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.
69. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кизеветтер В.Е. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. – Л.: Энергия, 1969. – 240 с.
70. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь; под общ. ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

71. Дмитриевский В.С., Меркулов В.И. Функция распределения вероятностей пробивных напряжённости электрического поля полимерных диэлектриков. // Известия вузов, Физика. – 1971. – №1. – С. 49 – 55.
72. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. – М.: Мир, 1965. – 351 с.
73. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1965. – 512 с.
74. Endicott H.S, Weber K.H., Electrode area effect for impulse breakdown of transformer oil //AIEE Trans., Power App. And Syst., – 1957. – vol.76 – pp. 393 – 398.
75. Гельман М.З., Мурович В.И. Методы расчета кратковременной электрической прочности эпоксидной изоляции // Электрофизические проблемы применения твердых и комбинированных диэлектриков в ТВН. – Новосибирск: «Наука», Сиб. Отд., 1974. – с. 87 – 94
76. Freudenthal A.M., Gumbel E.J. On the statistical interpretation of fatigue tests // Proc. Roy. Soc., A216 – 1953. – p. 309.
77. Кучинский Г.С. Техника высоких напряжений. Разряды в жидких и твёрдых диэлектриках: учеб. пособие. – Л: ЛПИ,1981. – 79 с.
78. Митькин Ю.А. Электрофизические характеристики жидких диэлектриков, содержащих примеси: учеб. пособие. – Иваново: ИГЭУ, 2002. –148 с.
79. Волков В.Н., Митькин Ю.А. Статистические характеристики пробоя трансформаторного масла при воздействии коммутационных перенапряжений // Новые методы исследования в теоретической электротехнике и инженерной электрофизике. Сб. науч. тр. / ИЭИ Иваново,1975. – вып.4. –С.43-50.
80. Бортник И.М. Физические свойства и электрическая прочность элегаза. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 77 с.
81. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Бортник и др.; под ред. Верещагина И.П., Ларионова В.П.. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.

82. Митькин Ю.А., Шишкова И.Е., Вихарев А.В., Прусаков М.В.. Разработка научно-методических аспектов оценки технического состояния изоляции маслонаполненного оборудования // Комплексные инновационные проекты (работы) по развитию структурных подразделений ИГЭУ в 2009 г.: Сб. отчётов / ИГЭУ. – Иваново, 2010. – С. 248.
83. Справочник по вероятностным расчетам / Г.Г. Абезгауз, А.П. Тронь, Ю.Н. Копенкин, И.А. Коровина / – М.: Воениздат, 1970.- 536с.
84. Худсон Д. Статистика для физиков. – М.: Мир, 1967. – 247 с.
85. Солдатов А.В., Вихарев А.В. Методика и программа расчёта статистических характеристик электрической прочности жидких диэлектриков. // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез.докл. междунар. науч.-техн. конф. (XI Бенардосовские чтения). ИГЭУ. – Иваново, 2003. – Т.1 – с.21
86. В.Д. Ковалёв. Силовые трансформаторы. Важный элемент на всех уровнях производства, передачи и распределения энергии // Аналитический обзор материалов XVI Международной конференции «Силовые и распределительные трансформаторы и реакторы. Системы диагностики». Энерго-Info. – Москва, 2013. – №8 (79). – С. 68 – 73.
87. В. Осотов. Диагностика мощных силовых трансформаторов // Электроэнергетика: сегодня и завтра. – 2014. – №1. –С. 67 – 69.
88. Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Черезов А.В. Развитие системы нормативно-технической документации для обеспечения эксплуатационной надёжности силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше // Электрические станции. – 2013. –№11. – С. 54 –59.
89. 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.
90. ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВА и более. Ряд номинальных мощностей:. введ. 1979-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – 4 с. – (Национальные стандарты Российской Федерации).

91. Уралэлектротяжмаш электронный каталог, интернет ресурс <http://www.uetm.ru/>.
92. Palmer S., Scharpley W.A. Electric strength of transformer oil. Proc. IEE. – 1966. – vol.116, No.12. – p.2029-2035.
93. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М.: Энергия, 1968. – 488 с.
94. Кирьянов Д.В. Mathcad 13. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 608 с.
95. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad 15: учебный курс. – СПб.: Питер, 2011. – 400 с.
96. Мельникова О.С. Анализ эффективности традиционных методик определения пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез.докл. междунар. науч.-техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2013. – Т. 1. – С. 76-79.
97. ГОСТ 17216-2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. Введ. 2003-01-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 7с. (Межгосударственный стандарт)
98. Интернет ресурс OT-60 (испанская фирма CIRCUTOR) [<http://www.analyzers.ru/analyzers/testers/ot/testerot.php>]
99. 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.
100. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
101. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
102. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения: в 2 т. Т. 2. – М.: Мир, 1965. – с. 765.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2507524

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОБИВНОГО
НАПРЯЖЕНИЯ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012130700

Приоритет изобретения 17 июля 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 февраля 2014 г.

Срок действия патента истекает 17 июля 2032 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU**⁽¹¹⁾ **2 507 524**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
G01R 31/12 (2006.01)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2012130700/28, 17.07.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.07.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.07.2012

(45) Опубликовано: 20.02.2014 Бюл. № 5

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2220427 C2, 27.12.2003. RU 2332677 C1,
08.27.2008. EA 15038 B1, 29.04.2011. EP
2388604 A1, 23.11.2011. DE 3300468 A,
12.07.1984.

Адрес для переписки:

153003, г.Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
ИГЭУ, патентно-лицензионный отдел, О.Г.
Трухиной

(72) Автор(ы):

Митькин Юрий Алексеевич (RU),
Мельникова Ольга Сергеевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И.
Ленина" (ИГЭУ) (RU)**(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЖИДКИХ
ДИЭЛЕКТРИКОВ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электроизоляционной техники и используется для определения электрической прочности жидких диэлектриков. Сущность: устройство для определения пробивного напряжения жидких диэлектриков состоит из источника питания с регистрирующими приборами и системой управления, испытательной ячейки с жидким диэлектриком, снабженной

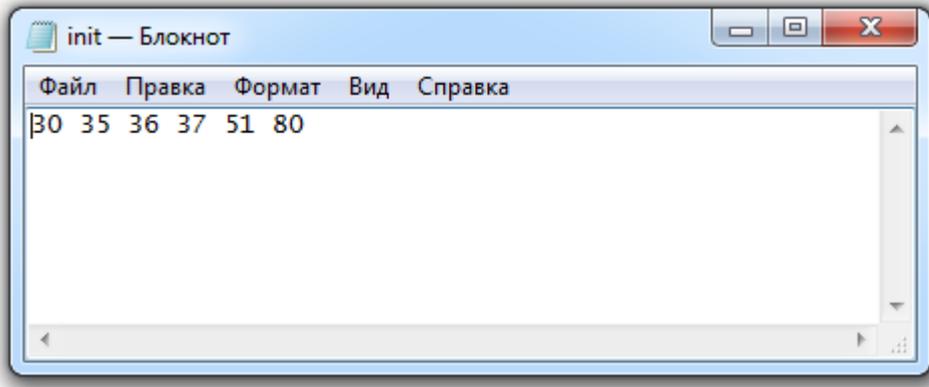
электродами и пропеллерной мешалкой. Боковая стенка корпуса ячейки, параллельная оси электродов, выполнена с камерой, внутри которой горизонтально установлена пропеллерная мешалка. Вал мешалки перпендикулярен оси электродов по линии их центральной симметрии. Мешалка соединена с приводом через магнитную муфту. Технический результат: повышение точности измерения пробивного напряжения. 1 ил.

RU 2 5 0 7 5 2 4 C 1

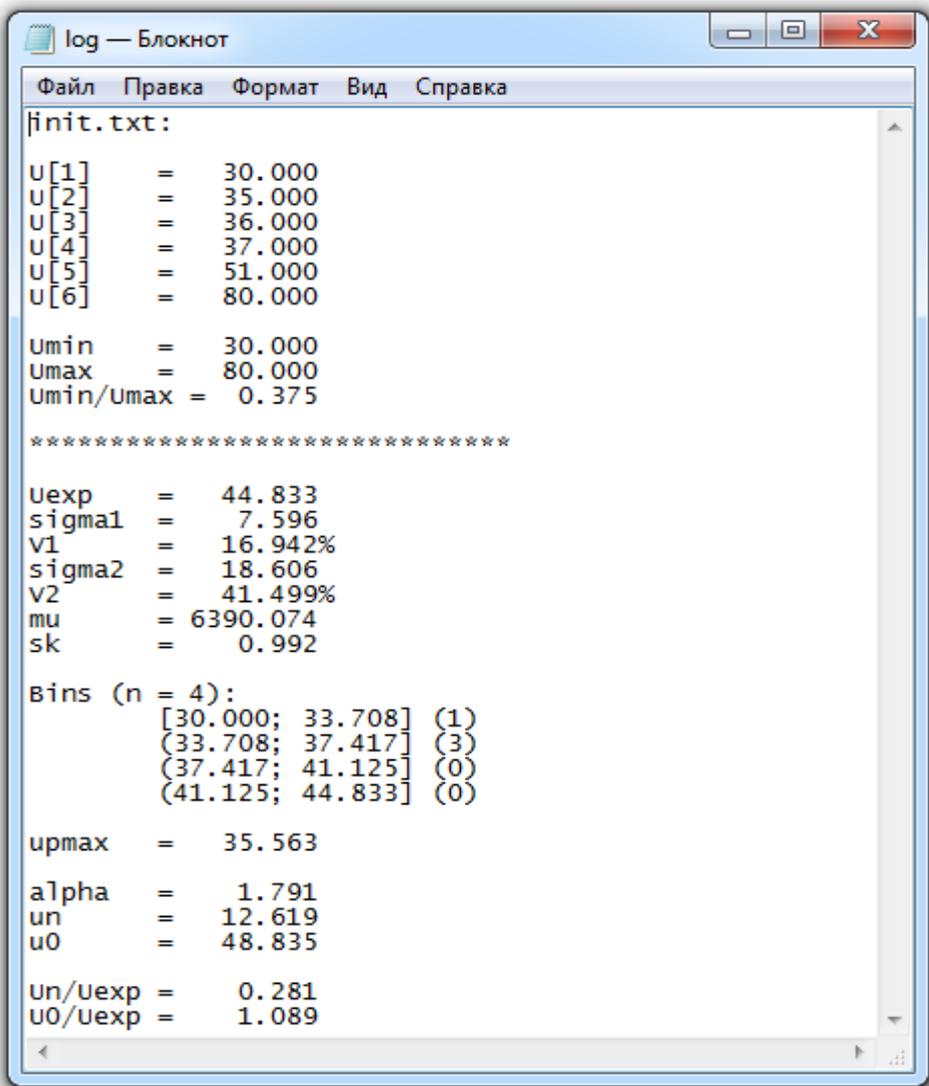
RU 2 5 0 7 5 2 4 C 1

Вид получаемой информации по определению характеристик электрической прочности масла с применением разработанной программы при проведении научных исследований

1. Ввод для n – значений пробивных напряжений $U_{пр}$

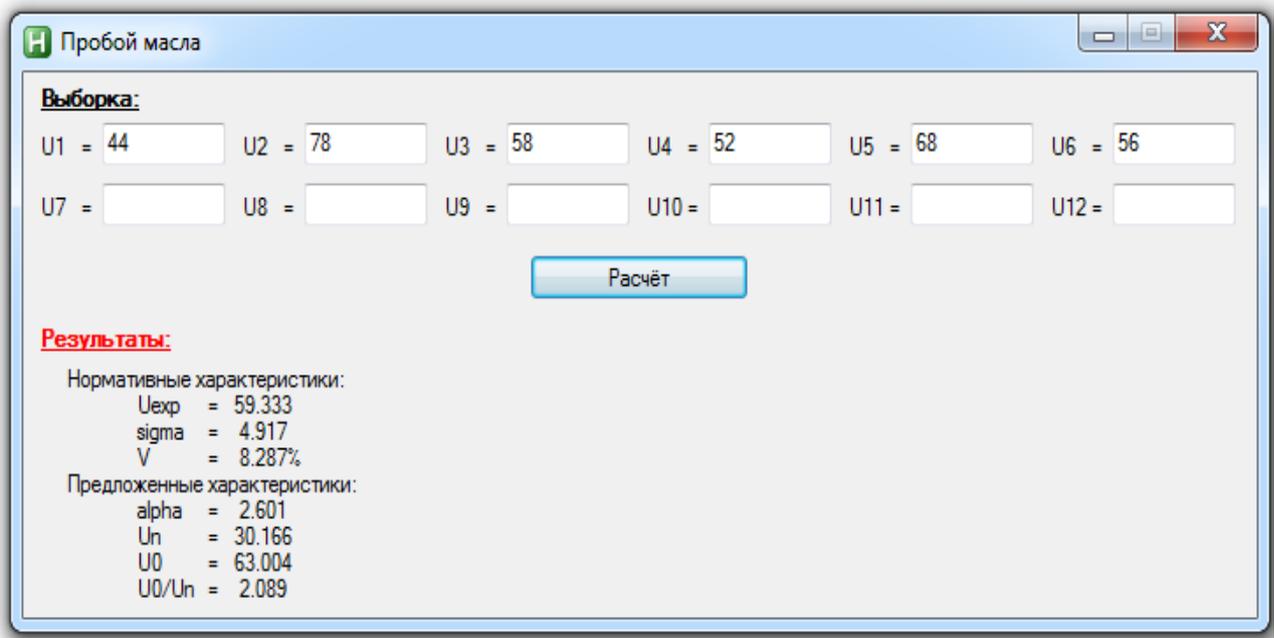


2. Вывод результатов расчета на экран компьютера



Вид получаемой информации по определению характеристик электрической прочности масла с применением разработанной программы при обработке эксплуатационных испытаний

Ввод значений пробивных напряжений $U_{пр}$



Пробой масла

Выборка:

U1 = 44 U2 = 78 U3 = 58 U4 = 52 U5 = 68 U6 = 56
U7 = U8 = U9 = U10 = U11 = U12 =

Расчёт

Результаты:

Нормативные характеристики:
U_{exp} = 59.333
sigma = 4.917
V = 8.287%

Предложенные характеристики:
alpha = 2.601
U_n = 30.166
U₀ = 63.004
U₀/U_n = 2.089

**Результаты эксплуатационных испытаний трансформаторного масла
в маслопробойнике для силовых трансформаторов**

№	Тип трансформатора	Пробивные напряжения масла при текущем номере пробы, кВ					
		1	2	3	4	5	6
1	ТМН-2500/110	78	52	88	68	62	52
2	ТМН-2500/110	73	48	66	78	78	80
3	ТМН-2500/110	50	40	43	50	49	65
4	ТМН-2500/110	52	68	50	72	70	58
5	ТМН-2500/110	54	56	42	58	58	52
6	ТМН-2500/110	66	80	78	76	68	76
7	ТДМ-2500/110	63	74	69	72	72	75
8	ТМН-2500/110	70	74	78	80	78	78
9	ТМН-6300/110	54	70	78	80	78	70
10	ТМН-6300/110	73	82	64	61	68	76
11	ТМН-6300/110	72	78	68	60	68	72
12	ТМН-6300/110	56	68	66	72	70	64
13	ТМН-6300/110	57	68	60	54	58	71
14	ТМН-6300/110	70	76	76	76	76	78
15	ТМН-6300/110	76	78	80	74	78	78
16	ТДТН-10000/110	40	50	56	66	52	58
17	ТДТН-10000/110	54	70	78	80	78	76
18	ТДТН-10000/110	51	46	54	64	58	58
19	ТДТН-10000/110	64	66	68	80	80	84
20	ТДТН-10000/110	78	80	82	82	68	76
21	ТДТН-10000/110	76	80	76	80	72	68
22	ТДТН-10000/110	70	74	68	64	72	66
23	ТДТН-10000/110	54	54	64	56	54	64
24	ТДТН-16000/110	62	58	60	42	62	68
25	ТДТН-16000/110	62	72	70	60	70	70
26	ТДТН-16000/110	76	76	76	78	78	70
27	ТДТН-16000/110	74	78	80	76	78	72
28	ТДТН-16000/110	66	78	72	64	64	64
29	ТДТН-20000/110	54	66	60	66	46	54
30	ТДТН-20000/110	44	42	40	44	46	54
31	ТДТН-25000/110	60	66	44	48	60	70
32	ТДТН-25000/110	62	58	52	56	60	52
33	ТДН-31500/110	42	60	50	60	62	54,8
34	ТДЦН-125000/110	70	66	70	68	76	70

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер
 Главного управления ОАО «ТГК-2»
 по Ярославской области



150044, г. Ярославль,
 пр-т Октября, 83

Ю. А. Чистов

«02» _____ 06 2014 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Мельниковой О.С.

В рамках традиционного сотрудничества Главного управления ОАО «ТГК-2» по Ярославской области с Ивановским государственным энергетическим университетом (ИГЭУ) ассистент кафедры «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» ИГЭУ Мельникова О. С. при выполнении диссертационной работы в направлении совершенствования контроля качества внутренней изоляции маслонаполненного электрооборудования на основе определения статистических характеристик электрической прочности эксплуатационного трансформаторного масла по результатам его испытаний в стандартном маслопробойнике адаптировала полученные в диссертации результаты для практического их применения при диагностике внутренней изоляции электрооборудования.

В результате в Главном управлении ОАО «ТГК-2» по Ярославской области в мае 2014 г. внедрены следующие научно-технические разработки Мельниковой О.С.:

- программа расчета на ЭВМ статистических характеристик пробивного напряжения трансформаторного масла по результатам его испытаний в стандартном маслопробойнике применительно к образцам эксплуатационного масла из маслонаполненного электрооборудования с различным номинальным напряжением;
- методика выбора рациональных значений статистических характеристик пробивного напряжения эксплуатационного трансформаторного масла в маслопробойнике для силовых трансформаторов с номинальным напряжением 110 кВ с учётом их мощности.

Внедрение данных разработок позволяет определять дополнительные статистические характеристики электрической прочности трансформаторного масла по данным его эксплуатационных испытаний, что расширяет возможности более качественного проведения диагностики технического состояния главной изоляции силовых трансформаторов и другого маслонаполненного электрооборудования.

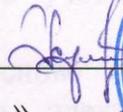
Акт внедрения составлен на основе обсуждения представленных материалов на техническом совете электроцеха 2 июня 2014 г.

Начальник электроцеха
 Ярославской ТЭЦ-2

А. Б. Косенко

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель главного инженера
Филиала «Ивановские ПГУ»
АО «Интер РАО – Электрогенерация»




А.А. Кузнецов

« 07 »

2015 г.

155150, Ивановская область,
г. Комсомольск,
ул. Комсомольская, д.1.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Мельниковой О.С.

В мае–июне 2015 г. в Филиале «Ивановские ПГУ» АО «Интер РАО–Электрогенерация» реализованы научно-технические результаты диссертационной работы ассистента кафедры «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» ИГЭУ О.С. Мельниковой, посвящённой совершенствованию контроля электрической прочности главной изоляции трансформаторного электрооборудования на основе определения статистических характеристик электрической прочности эксплуатационного трансформаторного масла по результатам его испытаний в стандартном маслопробойнике.

Работа по внедрению данных разработок проведена на некоммерческой основе в соответствии с традиционным сотрудничеством Филиала «Ивановские ПГУ» АО «Интер РАО–Электрогенерация» с Ивановским государственным энергетическим университетом (ИГЭУ).

В результате представители ИГЭУ передали на безвозмездной основе Филиалу «Ивановские ПГУ» АО «Интер РАО–Электрогенерация» для внедрения следующие научно-технические разработки Мельниковой О.С.:

- Программу расчета на ЭВМ статистических характеристик пробивного напряжения трансформаторного масла по результатам его испытаний в стандартном маслопробойнике применительно к образцам эксплуатационного масла из маслонеполненного электрооборудования и методику её использования;

- Методику выбора рациональных значений статистических характеристик пробивного напряжения эксплуатационного трансформаторного масла в маслопробойнике для силовых трансформаторов Филиала «Ивановские ПГУ» АО «Интер РАО–Электрогенерация» с учётом мощностей данных трансформаторов.

Внедрение этих разработок позволяет определять дополнительные статистические характеристики электрической прочности эксплуатационного трансформаторного масла по результатам его испытаний в маслопробойнике, что повышает эффективность диагностики технического состояния главной изоляции силовых трансформаторов с учётом их мощности и класса напряжений.

Акт внедрения составлен на основе обсуждения представленных материалов на техническом совете электрического цеха Филиала «Ивановские ПГУ» АО «Интер РАО–Электрогенерация» 07.07.2015г.

Начальник электрического цеха
Филиала «Ивановские ПГУ»

А.Б. Крутов

Заместитель начальника
Электрического цеха по ремонту

М.Н. Круглов

Заместитель начальника
Электрического цеха по эксплуатации

М.С. Яшин

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе

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

А. В. Гусенков

2014 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Мельниковой О.С.

В Ивановском государственном энергетическом университете (ИГЭУ) на кафедре «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» (ВЭТФ) ассистент Мельникова О.С. проводит научно-исследовательскую работу по изучению закономерностей изменения состояния внутренней изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации и разработке на этой основе методов и технических средств повышения эффективности диагностики главной изоляции с применением статистических характеристик электрической прочности эксплуатационного трансформаторного масла в этих аппаратах.

Данная работа проводится в соответствии с планами НИР ИГЭУ и направлена на внедрение её результатов в электроэнергетику и в учебный процесс.

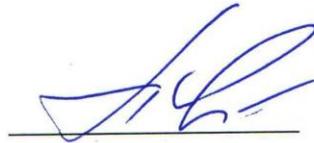
Результаты диссертационной работы Мельниковой О.С. внедрены в учебном процессе на кафедре ВЭТФ при подготовке специалистов для высоковольтной электроэнергетики. Это внедрение выразилось в следующем:

1. Разработаны и внедрены в учебный процесс методические указания к комплексным учебно-исследовательским лабораторным работам по

электрофизическим процессам в диэлектриках для проведения лабораторной работы "Определение статистических характеристик электрической прочности эксплуатационных трансформаторных масел" по дисциплине "Электрофизические процессы в газах, жидкостях и твёрдых диэлектриках" под номером №2153;

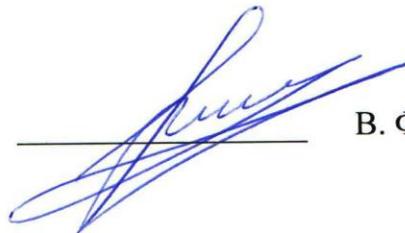
2. Разработанные методические материалы и полученные научно-технические результаты диссертационной работы, позволяющие рассчитывать статистические характеристики электрической прочности масляной изоляции в процессе эксплуатации, используются при проведении лекционных и практических занятий со студентами и магистрантами по направлению "Электроэнергетика".

Декан электроэнергетического
факультета, к. т. н., профессор



А. Ф. Сорокин

Заведующий кафедрой ВЭТФ,
к. т. н., доцент



В. Ф. Воробьев