

На правах рукописи

ПРУСАКОВ Михаил Вячеславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЦ ПРИМЕСЕЙ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО
МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность: 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2010

Работа выполнена на кафедре «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Митькин Юрий Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Семенов Владимир Константинович

кандидат технических наук
Слышалов Андрей Владимирович

Ведущая организация: ОАО "Ивэлектроналадка"

Защита состоится 28 июня 2010 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.03 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ученый совет ИГЭУ.
Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01
E-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета, с авторефератом – на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «27» мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.А. Шульпин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В электроэнергетических системах в эксплуатации находится большое количество высоковольтного маслонаполненного оборудования (МНО) (трансформаторное оборудование, высоковольтные вводы, измерительные трансформаторы, выключатели), в значительной степени определяющего эффективность передачи и распределения электрической энергии. Основными электроизоляционными средами в этих аппаратах являются трансформаторное масло и электроизоляционная бумага, поэтому процессы, протекающие в изоляции, и методы контроля такого оборудования во многом носят общий характер. Результаты эксплуатации МНО свидетельствуют о том, что основной причиной его отказов является снижение электрической прочности маслосодержащей изоляции.

В процессе эксплуатации МНО выявились случаи нарушения его электрической прочности по причине формирования разрядного канала по поверхности твердого диэлектрика (вводы, трансформаторы). Это явление во многом определяется процессами оседания частиц примесей из объема трансформаторного масла на поверхность твердой изоляции, так как они инициируют возникновение частичных разрядов (ЧР), а затем и развитие сквозного разряда по поверхности. С увеличением времени работы оборудования увеличивается количество примесей в результате физико-химического старения трансформаторного масла, а также образования углеродосодержащих частиц в масле при коммутациях в выключателях и устройствах регуляторов напряжения под нагрузкой (РПН) силовых трансформаторов. Это приводит к ускорению процессов, обуславливающих снижение характеристик изоляции в эксплуатации.

Существующие традиционные методы оценки характеристик маслосодержащей изоляции высоковольтного МНО не в полной мере учитывают влияние частиц примесей в объеме масла и осадка из частиц на поверхности твердой изоляции на снижение качества изоляции в процессе эксплуатации оборудования.

В этих условиях для повышения эффективности эксплуатации МНО, особенно с большим сроком службы, необходимы новые подходы к оценке влияния твердых частиц примесей на снижение характеристик изоляции маслонаполненного оборудования.

Данное исследование проводилось в соответствии с планами НИР ИГЭУ, ФЦП «Интеграция» (тема № Б-0092; 2002, 2003 гг.), а также планами договоров с энергетическими предприятиями России.

Объект исследования – маслосодержащая изоляция высоковольтного маслонаполненного оборудования.

Предмет исследования – физические и математические модели поведения заряженных частиц примесей в неоднородном переменном электрическом поле и методы оценки их влияния на техническое состояние маслосодержащей изоляции высоковольтного оборудования.

Цель работы – разработка методов оценки влияния частиц примесей на характеристики изоляции маслонаполненного оборудования на основе исследования особенностей поведения заряженных частиц в неоднородном переменном электрическом поле и формирования осадка из частиц на поверхности твердой изоляции.

Задачи исследования.

1. Анализ режимов работы и повреждаемости МНО в эксплуатации. Выявление особенностей и характерных мест формирования осадка из частиц примесей и развития разряда на поверхности изоляции высоковольтного оборудования. Определение направлений по созданию эффективных методов оценки влияния частиц примесей на характеристики изоляции МНО.

2. Разработка математической модели движения заряженных частиц в пространст-

венно неоднородном переменном электрическом поле, учитывающей физические характеристики частиц примесей и трансформаторного масла применительно к масляным каналам, характерным для маслонаполненного оборудования.

3. Разработка метода оценки времени формирования осадка из частиц примесей на поверхности твёрдой изоляции, приводящего к снижению её технического состояния при характерных условиях эксплуатации МНО.

4. Разработка методов нахождения и прогнозирования статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла по результатам эксплуатационных испытаний в стандартном маслопробойнике.

5. Получение экспериментальных результатов, отражающих закономерности движения трансформаторного масла, содержащего частицы примесей, в характерных для маслонаполненного оборудования каналах с учётом влияния температуры и параметров канала.

6. Разработка алгоритмов и программ расчёта на ЭВМ, реализующих предложенные методы оценки технического состояния изоляции МНО.

Методы исследования. Применялись методы физического и математического моделирования электрофизических и гидродинамических процессов, характерных для маслосодержащей изоляции высоковольтного оборудования, а также методы теории вероятностей и математической статистики для разработки методов оценки влияния частиц примесей на характеристики изоляции МНО.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель движения заряженных частиц в пространственно неоднородном переменном электрическом поле, позволяющая рассчитать траекторию и скорость движения частиц в масляном канале с учётом влияния электрофизических характеристик частиц примесей и трансформаторного масла, а также технологических параметров высоковольтного маслонаполненного оборудования.

2. Разработан метод оценки времени формирования осадка из заряженных частиц примесей на поверхности твёрдой изоляции под действием неоднородного переменного электрического поля, приводящего к снижению её электроизоляционных характеристик в эксплуатации, учитывающий влияние характеристик частиц, трансформаторного масла, электрического поля, а также динамики старения масла и технологических режимов, характерных для маслонаполненного оборудования.

3. Разработаны методы нахождения статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла по результатам эксплуатационных испытаний в стандартном маслопробойнике, позволяющие определять нижний предел пробивного напряжения и прогнозировать его изменение в процессе эксплуатации оборудования при дифференцированном учёте ограниченного числа данных эксплуатационного мониторинга.

4. Получены экспериментальные результаты, отражающие закономерности движения трансформаторного масла и частиц примесей в характерных для маслонаполненного оборудования каналах с учётом влияния температуры и параметров канала, включая его пространственное расположение.

Достоверность основных научных положений и выводов работы обеспечивается применением фундаментальных положений электрофизики, электротехники и гидродинамики, обоснованностью выбора физических и математических моделей, применением результатов эксплуатационных испытаний, необходимым объемом литературных и полученных в работе лабораторных экспериментальных данных, адекватностью расчётных и экспериментальных результатов.

Личный вклад автора определяется постановкой цели и задач исследования,

разработкой физических и математических моделей, проведением вычислительного и лабораторного экспериментов с обработкой их результатов, формулировкой выводов и рекомендаций.

Практическая ценность:

– разработаны методики и программы расчета на ЭВМ нижнего предела пробивного напряжения трансформаторного масла по результатам эксплуатационных испытаний в стандартном маслопробойнике, определяющего электрическую прочность большого объема масла в действующем МНО, а также прогнозирования изменения пробивных напряжений трансформаторного масла в эксплуатации по результатам ограниченного числа эксплуатационных испытаний;

– разработана методика расчёта концентрации частиц в осадке на поверхности твёрдой изоляции, которая достигается к заданному времени эксплуатации МНО;

– разработана методика расчёта времени формирования осадка из частиц примесей на поверхности твёрдой изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования в процессе его эксплуатации, начиная с которого происходит снижение электроизоляционных параметров изоляции;

– получены экспериментальные результаты, отражающие особенности конвективного движения трансформаторного масла в характерных каналах МНО.

Внедрение. Научные и практические результаты работы внедрены в Ивановском филиале ОАО ТГК №6; филиале "Ивановские ПГУ" ОАО "ИНТЕР РАО ЕЭС"; филиале "Калининградская ТЭЦ-2" ОАО "ИНТЕР РАО ЕЭС"; в учебный процесс ИГЭУ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция – 2006» (СПб., 2006), Международных научно-технических конференциях: «XI Бенардосовские чтения» (Иваново, 2003), «XII Бенардосовские чтения» (Иваново, 2005), «XIII Бенардосовские чтения» (Иваново, 2006), «XIV Бенардосовские чтения» (Иваново, 2007) и «XV Бенардосовские чтения» (Иваново, 2009); а также на научно-технических семинарах кафедр ВЭТФ ИГЭУ.

Публикации по материалам диссертации – 17 печатных работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Общий объём работы составляет 169 страниц, содержит 61 рис., 24 табл. Список литературы состоит из 102 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлены результаты анализа литературных данных по повреждаемости в эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов, герметичных вводов, измерительных трансформаторов; определено влияние загрязнения трансформаторного масла и поверхности твёрдой изоляции частицами примесей на повреждаемость этого оборудования. Поставлены задачи исследования. Показано, что основной причиной отказов МНО является снижение электрической прочности маслосодержащей изоляции. При этом наиболее опасным видом повреждений является перекрытие изоляции по поверхности масляного канала, вероятность появления которого возрастает с увеличением времени эксплуатации оборудования.

В работах ВНИИЭ (Ю.Н. Львов, Б.В. Ванин, Л.Г. Мамиконянц, М.Ю. Львов) по-

казано, что развитие таких повреждений обусловлено образованием в масле мелких (коллоидных) частиц в результате его старения в эксплуатации, формированием осадка из частиц на поверхности твёрдой изоляции, возникновением ЧР и науглероженных дорожек в слое частиц, переходящих затем в сквозной разряд по поверхности изоляции. Эти процессы имеют место при различных видах трансформаторного масла, отличие проявляется только во времени образования осадка из мелких частиц примесей (Ю.А. Евсеев, С.Д. Кассихин, И.П. Куликов, Е.И. Савина, М.И. Шахнович).

Для решения практических задач по повышению эксплуатационной надёжности МНО проводятся исследования (Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов) по выявлению условий формирования осадка на поверхности твёрдой изоляции с учётом силы тяжести и технологических параметров оборудования.

В исследованиях, выполненных в ИЭИ под руководством В.В. Пучковского и В.Н. Волкова, рассматриваются физические и математические модели движения частиц и формирования цепочек из них, показана необходимость учёта при описании поведения частиц сил, действующих на частицу в неоднородном электрическом поле.

Развитие этого направления нашло отражение в работах В.Н. Волкова (1976 г.) и С.С. Духина (1978 г.). Независимо друг от друга ими разработаны математические модели поведения заряженных частиц в жидких средах в пространственно неоднородных переменных электрических полях. В них установлено, что заряженные частицы при определённых условиях в неоднородных переменных электрических полях могут двигаться, в отличие от диэлектрофореза, в область наименьшей напряжённости поля. Следует отметить, что формирование осадка из мелких частиц примесей на поверхности твёрдой изоляции МНО и возникновение частичных разрядов в слое в большинстве случаев происходит в области с меньшей напряжённостью поля.

В ряде работ (Г. С. Кучинский, А. К. Лоханин, В.Я. Ушаков, J. Kok, J. Skowronski) указывается на существенное влияние частиц, особенно крупных, на пробивное напряжение трансформаторного масла и на необходимость совершенствования методов контроля его электрической прочности в условиях эксплуатации оборудования.

Анализ состояния проблемы позволил сделать вывод о том, что для комплексного её решения необходимо провести специальные исследования по выявлению поведения заряженных частиц в трансформаторном масле в неоднородном переменном электрическом поле, закономерностей формирования из них осадка на поверхности твёрдой изоляции, а также по разработке новых методов оценки влияния частиц примесей на электроизоляционные характеристики маслонаполненного высоковольтного оборудования в целях повышения эффективности его эксплуатации.

Сформулированы задачи исследования, проводимого в рамках данной работы.

Во второй главе разработана математическая модель движения заряженных частиц в пространственно неоднородном переменном электрическом поле, позволяющая рассчитать траекторию и скорость движения частиц в масляном канале с учётом влияния электрофизических характеристик частиц примесей и трансформаторного масла, а также технологических параметров высоковольтного маслонаполненного оборудования.

Исследования показывают, что частицы примесей в трансформаторном масле высоковольтного оборудования имеют заряд. Наиболее вероятными механизмами заряда частиц являются: контактная зарядка и адсорбционная.

На основе анализа полного уравнения движения заряженной частицы с учётом воздействия силы тяжести, Архимедовой силы, силы Кулона, диэлектрофореза и силы сопротивления жидкой среды получено уравнение, отражающее движение частицы в направлении стенки масляного канала:

$$m_{\text{ч}} \cdot \frac{dv}{dt} = q_{\text{ч}} E_{\text{м}}(x) \cdot \sin \omega t + \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{dE_{\text{м}}^2(x)}{dx} \cdot \sin^2 \omega t - 6\pi\eta R_{\text{ч}} v, \quad (1)$$

где $m_{\text{ч}}$, $R_{\text{ч}}$, $q_{\text{ч}}$, v – масса, радиус, заряд и скорость движения частицы; $E_{\text{м}}(x)$ – амплитудное значение напряженности электрического поля; ω – угловая частота электрического поля; α – поляризуемость частицы; η – динамическая вязкость жидкости.

Усреднение полученного в первом приближении уравнения движения частицы по периоду позволяет получить уравнение для аperiodического дрейфа частицы:

$$m_{\text{ч}} \cdot \frac{d^2 x_{\text{а}}}{dt^2} + 6\pi\eta R_{\text{ч}} \cdot \frac{dx_{\text{а}}}{dt} = - \frac{q^2 R_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} E_{\text{м}} E'_{\text{м}}(x_{\text{а}})}{54\pi\eta^2 \left[1 + \left(\frac{2\omega R_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}}}{9\eta} \right)^2 \right]} + \frac{\alpha}{2} \cdot E_{\text{м}} E'_{\text{м}}(x_{\text{а}}), \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частицы.

В правой части (2) первое слагаемое отражает силу, действующую на заряженную частицу в неоднородном переменном электрическом поле. При этом знак минус указывает на то, что она направлена в область наименьшей напряженности поля. Второе слагаемое отражает силу, действующую на незаряженную частицу в неоднородном электрическом поле (дielekтрофорез), направленную в область максимальной напряженности поля. Отмечается, что сила $F_{\text{а,з}}$, обуславливающая аperiodический дрейф частицы, пропорциональна квадрату заряда частицы, поэтому направление силы не зависит от знака заряда. Соотношение рассматриваемых сил не зависит от геометрии электрического поля и знака заряда частицы.

Получены выражения для определения траектории и скорости движения частицы, заряженной при её контакте с электродом, а также выражение для определения критического радиуса частицы, начиная с которого наблюдается изменение направления движения частицы. Характерные расчётные траектории движения заряженной частицы представлены на рис. 1, где $t = t/T$; $x^* = x / (qE_{\text{м,п}} T / (6\pi\eta R_{\text{ч}}))$. Показано, что направление движения частицы определяется соотношением $R_{\text{ч}} / R_{\text{ч,кр}}^k$. Так, при $R_{\text{ч}} / R_{\text{ч,кр}}^k > 1$ частица выталкивается из области максимальной напряженности поля (рис. 1, в).

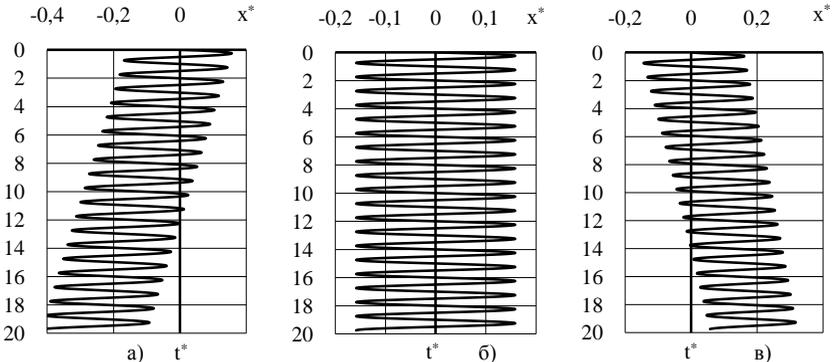


Рис. 1. Траектории движения заряженной частицы в неоднородном переменном электрическом поле для характерных случаев: а – ($R_{\text{ч}} < R_{\text{ч,кр}}^k$); б – ($R_{\text{ч}} = R_{\text{ч,кр}}^k$); в – ($R_{\text{ч}} > R_{\text{ч,кр}}^k$)

Отмечается, что с ростом температуры масла (рис.2) и напряженности электрического поля диапазон размеров заряженных частиц, которые выталкиваются из области максимальной напряженности электрического поля, расширяется. Это способствует увеличению потока частиц на стенку масляного канала и формированию на её поверх-

ности осадка из частиц, в первую очередь, в области повышенных температур. Выявленные закономерности находятся в соответствии с результатами эксплуатационных испытаний, в которых указывается на то, что в маслонаполненных вводах наибольший осадок формируется в нижней части ввода, где максимальная рабочая температура.

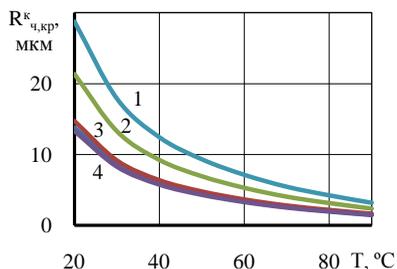


Рис. 2. Зависимость критического радиуса частицы от температуры масла для частиц различной природы: 1 – бумага (влажная); 2 – сажа; 3 – железо; 4 – медь и бумага (сухая)

показали, что для всех исследованных образцов масла наблюдается данная связь.

Показано, что заряженные коллоидные частицы будут выталкиваться из области максимальной напряженностью поля. Для этого случая также получены выражения для определения траектории и скорости движения коллоидной частицы.

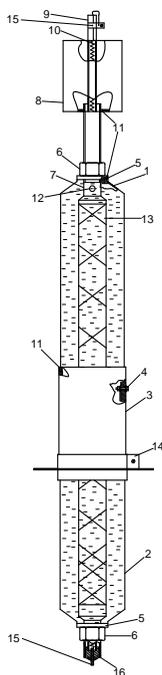


Рис. 3. Схема модели ввода: 1 – верхняя стеклянная крышка; 2 – нижняя стеклянная крышка; 3 – соединительная втулка; 4 – вывод для заземления; 5 – диэлектрическая прокладка; 6 – крепежные гайки; 7 – центральная труба; 8 – масло-расширитель; 9 – стеклянная трубка; 10 – нагревательная спираль; 11 – силиконовая прокладка; 12 – отверстия для подачи масла; 13 – изоляционный остов; 14 – опорный фланец; 15 – выводы для подключения спирали; 16 – резиновая пробка

На основе выполненных оценок показано, что при контактной зарядке частиц на электроде вклад аperiodической выталкивающей силы, возникающей в неоднородном переменном электрическом поле, по сравнению с силой Кулона, действующей в первый момент времени при отталкивании частицы от электрода, является определяющим при формировании движения частицы от электрода в область наименьшей напряженности поля.

Выполненные оценки связи воздействующей на заряженные частицы аperiodической силы $F_{a,з}$ с экспериментальными значениями пробивных напряжений трансформаторного масла при различных частотах

показали, что для всех исследованных образцов масла наблюдается данная связь.

В третьей главе с применением разработанной и созданной экспериментальной модели высоковольтного ввода с бумажно-масляной изоляцией (рис. 3) получены экспериментальные результаты, отражающие закономерности движения трансформаторного масла и частиц примесей в характерных для маслонаполненного оборудования каналах с учётом влияния температуры и параметров канала, включая его пространственное расположение.

Для наблюдения за процессами, происходящими в масляном канале модели ввода, создана экспериментальная установка. С применением двух катетометров с коэффициентами увеличения $3,6^x$ и 50^x определялись характер и скорости движения масла и частиц в модели ввода при температуре масла в «баке» $85-90^{\circ}\text{C}$ при нагреве центральной трубы и без её нагрева, при вертикальной установке ввода и под углом 15° относительно вертикали. При проведении экспериментов применялись модели ввода с шириной масляного канала 6 и 19 мм.

Установлено, что конвективное движение масла представляет собой два замкнутых гидродинамических потока, причём один поток располагает-

ся в верхней части модели, другой – в нижней, между ними не происходит заметного массообмена. Поэтому в нижней части ввода масло подвергается повышенным температурным воздействиям, что обуславливает ускоренные темпы его старения в эксплуатации.

В области верхней крышки наблюдался восходящий поток около изоляционно-го остова и нисходящий рядом с поверхностью крышки. В области нижней крышки имеется восходящий поток около стенки и нисходящий около изоляционного остова. При подаче высокого напряжения на модель ввода распределение гидродинамических потоков масла оставалось без изменения.

Отмечается, что скорости восходящего и нисходящего потоков в верхней части модели ввода максимальны у соединительной втулки и уменьшаются при подъёме к вершине ввода. В нижней части скорости потоков также максимальны у соединительной втулки и уменьшаются при приближении к нижней части ввода. В целом, скорости движения масла в канале изменяются в пределах 2 – 12 мм/с. При увеличении ширины масляного канала с 6 до 19 мм скорость движения восходящего потока масла у верхней крышки возрастает на 15 – 50%, а скорость движения нисходящего потока масла у нижней крышки уменьшается на 10 – 35%. При наклоне модели на 15° скорость движения потока масла снижается.

При отсутствии внешнего электрического поля частицы примесей движутся в канале вместе с маслом. При подаче высокого напряжения на модель ввода частицы, расположенные вблизи поверхности металлической трубы без бумажного покрытия, оседают на поверхность трубы, получают заряд и выталкиваются из области максимальной напряженности электрического поля. Аналогично ведут себя частицы вблизи бумажного покрытия, однако время их пребывания на поверхности изоляции значительно больше.

Заряженные частицы в неоднородном переменном электрическом поле в рассматриваемой модели ввода двигаются от поверхности трубы по направлению к диэлектрической стенке канала преимущественно в нижней и верхней частях модели (вблизи фланцев), где масло имеет небольшие вертикальные составляющие скорости движения. При удалении от торцевых фланцев, где начинает возрастать вертикальная составляющая скорости движения масла, частицы увлекаются внешним потоком масла. В эксплуатации также отмечается интенсивное формирование осадка из частиц в этих местах, причём наибольший осадок формируется в нижней части ввода, где температура масла максимальная, а вязкость его небольшая.

В четвёртой главе разработан метод оценки времени формирования осадка из заряженных частиц примесей на поверхности твёрдой изоляции под действием неоднородного переменного электрического поля, приводящего к снижению её электроизоляционных характеристик в эксплуатации, учитывая влияние физических параметров частиц и трансформаторного масла, характеристик электрического поля, а также динамики старения масла и технологических режимов, характерных для маслонаполненного оборудования.

Поведение частиц вблизи стенки канала. На основе выполненных численных оценок показано, что в пристенной области 1 (рис. 4), когда $0 < x \leq x_a$, при переменном напряжении заряженная частица под

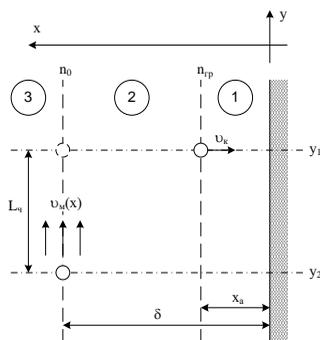


Рис. 4. Основные области, определяющие поведение частиц около твёрдой стенки канала

действием внешних сил двигается по направлению к стенке канала и одновременно колеблется. Как только частица приближается к стенке на расстояние, равное амплитуде её колебаний x_a , частица под действием кулоновской силы устремляется к стенке и осаждается на ней. В области $2 (\delta > x > x_a)$ на заряженную частицу в переменном электрическом поле действует апериодическая сила, направленная в сторону меньших значений напряженности электрического поля, то есть к стенке канала. Одновременно на частицы действуют диффузионные процессы, причём потоки частиц, обусловленные воздействием электрического поля и диффузией, направлены в сторону стенки канала.

Внешняя область 3 характеризуется постоянством счётной объёмной концентрации частиц n_0 , так как в силу случайных процессов в движущемся трансформаторном масле происходит выравнивание концентрации частиц по объёму.

Формирование осадка из частиц на стенке канала. Рассматриваемые процессы движения частиц имеют статистическую природу и описываются уравнением диффузии, которое для данного плоского случая (вблизи стенки канала) для стационарного процесса ($\partial n / \partial t = 0$) имеет вид

$$D\Delta n + \text{div}(v n) = 0, \quad (3)$$

где n – счётная концентрация частиц; D – коэффициент диффузии; Δ – оператор Лапласа; v – скорость движения частиц.

В результате решения уравнения (3) найдено выражение для потока частиц, а затем с учётом динамики старения масла в эксплуатации и распределения частиц по размерам в объёме масла получено выражение для определения времени эксплуатации, за которое на единице поверхности стенки канала осядет заданная масса частиц:

$$t_s = \frac{1}{2a_n} \left[\sqrt{1 + \frac{3a_n c_{m,s}}{\pi \rho_{ch} \sum_{i=1}^N \Phi_i(n_{0,i}(0)) R_{ch,i}^3}} - 1 \right], \quad (4)$$

где a_n – постоянный для заданных условий эмпирический коэффициент, характеризующий динамику старения масла; $c_{m,s}$ – массовая концентрация частиц на единице поверхности; $\Phi_i(n_{0,i}(0))$ – поток частиц при $t = 0$ ($n = n_{0,i}$).

Выполненные расчёты показали, что расчётное время формирования осадка с заданной массовой концентрацией на единице поверхности твёрдой изоляции соответствует времени достижения такой же концентрации частиц на поверхности, наблюдаемой в эксплуатации.

Отмечается, что время формирования заданного осадка из частиц на поверхности канала существенно уменьшается при увеличении температуры масла и концентрации частиц в его объёме.

Влияние дисперсного осадка на электроизоляционные характеристики маслонаполненного оборудования. Слой осевших на поверхности изоляции заряженных частиц создаёт локальное электрическое поле и оказывает влияние на распределение напряженностей поля по слоям изоляции в области границы их раздела. С учётом небольшой толщины слоя заряженных частиц его заряд можно рассматривать как поверхностный свободный заряд с плотностью σ_n .

Время установления поляризационных процессов в рассматриваемом двухслойном диэлектрике мало по сравнению с временем формирования слоя заряженных частиц на поверхности канала, поэтому эти процессы можно рассматривать как независимые квазиустановившиеся. Тогда максимальные значения напряженностей на слоях

диэлектрика и свободный поверхностный заряд $\sigma_{\text{п}}$ будут связаны выражением

$$\varepsilon_{\text{м}} \varepsilon_0 E_{\text{м,м}} - \varepsilon_{\text{т}} \varepsilon_0 E_{\text{м,т}} = \sigma_{\text{п}}, \quad (5)$$

где $E_{\text{м,м}}$, $E_{\text{м,т}}$ – амплитуды напряженностей соответственно в слоях масла и твёрдой изоляции.

С ростом времени эксплуатации $\tau_{\text{э}}$ величина напряженности в масле вблизи стенки канала будет возрастать и в некоторый момент превышать рабочую напряжённость $E_{\text{р,н}}$, что может привести к изменению электропроводности плёнок трансформаторного масла, находящихся между частицами в слое. Выполненный анализ имеющихся экспериментальных данных показывает, что, начиная с некоторой критической напряженности поля $E_{\text{кр}}$, обнаруживается экспоненциальное возрастание тока для эксплуатационных трансформаторных масел. В процессе эксплуатации эти процессы обуславливают дальнейшее возрастание электрического тока, что приводит к ухудшению электроизоляционных свойств трансформаторного масла в слое и инициирует предразрядные процессы по поверхности твёрдой изоляции с дисперсным осадком.

С учётом этого найдено выражение для определения времени работы оборудования $\tau_{\text{э,кр}}$, при котором на поверхности твёрдой изоляции образуется слой заряженных частиц, обуславливающий возникновение ускоренного ухудшения электроизоляционных свойств трансформаторного масла при $E_{\text{кр}}$:

$$\tau_{\text{э,кр}} = \frac{1}{2a_{\text{н}}} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{4a_{\text{н}} \varepsilon_{\text{м}} \varepsilon_0 (E_{\text{кр}} - E_{\text{р,н}})}{\sum_{i=1}^N q_i \Phi_i(n_{0,i}(0))}} - 1 \right]. \quad (6)$$

Расчёт времени возникновения ускоренного ухудшения свойств трансформаторного масла, находящегося между частицами в осадке, показал, что наблюдается существенное уменьшение этого времени с увеличением температуры масла, рабочей напряженности и концентрации частиц в масле.

Показано, что в процессе эксплуатации по мере формирования осадка на поверхности изоляции выполняется условие возникновения ускоренного ухудшения свойств трансформаторного масла, а затем идут процессы дальнейшего ухудшения свойств масла, которые в конечном итоге заканчиваются выходом оборудования из строя.

Рассмотрены также случаи повышенных скоростей движения масла в канале, когда $\delta = x_{\text{а}}$. Получено выражение, определяющее критические скорости, при которых реализуются эти случаи. Показано, что в силовых трансформаторах с направленной циркуляцией масла возможен режим интенсивного формирования осадка из частиц примесей на твёрдой изоляционной стенке канала под действием электрической кулоновской силы. Эти процессы могли иметь место при формировании предпробивной ситуации в таких трансформаторах при перекрытии по поверхности твёрдой изоляции.

В пятой главе разработаны метод нахождения статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла, содержащего частицы примесей, по результатам эксплуатационных испытаний в стандартном маслопробойнике, позволяющий определять нижний предел пробивного напряжения, и метод прогнозирования изменения пробивного напряжения масла в процессе эксплуатации МНО, позволяющий дифференцированно учитывать ограниченное число данных эксплуатационных испытаний.

Метод нахождения статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла. Отмечается, что существующая методика определения характеристик электрической прочности трансформаторного масла в стандартном

маслопробойнике не позволяет оценить нижний предел пробивного напряжения.

Показано, что в силу физических представлений о пробое масла, содержащего примеси, распределение пробивных напряжений должно соответствовать распределению наименьших членов выборки, обусловленных наличием слабых мест в системе, то есть распределению Гнеденко-Вейбулла, одним из параметров которого является нижний предел пробивного напряжения U_n :

$$F(U) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{U - U_n}{U_0 - U_n} \right)^\alpha \right], \quad (7)$$

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

С учётом выявленных наиболее информативных эмпирических характеристик (минимальное значение пробивного напряжения масла в данной серии испытаний, среднее пробивное напряжение, эмпирическая функция распределения пробивных напряжений) и свойств этого распределения (его несимметричность, наличие точек перегиба в дифференциальной функции распределения) разработана методика оценки диапазонов возможных значений параметров этого распределения. Полученные результаты подтверждаются расчётными данными при обработке специально полученного большого экспериментального массива.

На основе полученных результатов найдено выражение для интегральной функции распределения пробивных напряжений в стандартном маслопробойнике

$$F(U) = 1 - \exp \left[- 0,693 \cdot \left(\frac{(1 - 0,22\%)U + 0,22\% < U_{np} > - U_{мин}}{< U_{np} > - U_{мин}} \right)^\alpha \right], \quad (8)$$

на основе которого разработаны алгоритм и программа Stat_Un расчёта нижнего предела пробивного напряжения и других параметров распределения. Данная программа позволяет одновременно выполнять расчёты и по традиционной методике. Общая картина получаемой информации представляется на экране монитора компьютера в цифровом и графическом видах.

Выполненными расчётами с применением разработанной программы для 14 случайных выборок по 6 пробоев каждая из массива в 200 пробоев показано соответствие полученных параметров α , U_n , U_0 по предложенной методике и результатов их расчёта по массиву в 200 пробоев с применением метода наименьших квадратов. Расчётами для 20 серий эксплуатационных испытаний, а также специально проведёнными лабораторными экспериментами по термическому старению масла показано, что значение нижнего предела пробивного напряжения заметно меньше минимального пробивного напряжения в каждой из рассматриваемых серий испытаний, что отвечает статистической природе формирования пробоя эксплуатационного трансформаторного масла.

Прогнозирование изменения пробивного напряжения трансформаторного масла при ограниченном числе эксплуатационных данных. С учётом этого для прогнозирования выбран метод постепенного накопления повреждений В.В. Болотина, в соответствии с которым записывается уравнение, характеризующее изменение пробивного напряжения во времени:

$$- \frac{dU_{np}}{dt} = U_{np} \varphi(q(t)), \quad (9)$$

где $q(t)$ – функция, включающая в себя действующие факторы: электрофизические, физико-химические, температурные и др.

С учётом имеющихся процессов постепенного накопления повреждений в МНО и выявленной на основе анализа эксплуатационных испытаний особенности плавного спада пробивного напряжения в эксплуатации показано, что на ограниченном отрезке времени, на котором осуществляется прогнозирование (время упреждения), можно применить кусочно-линейную аппроксимацию тренда для изменения пробивного напряжения, которая применяется каждый раз на разных отрезках времени с учётом выбранного времени упреждения T_y :

$$U_{пр} = U_{пр,0} \left(1 - k_u \cdot \frac{t}{T_y} \right), \quad (10)$$

где $U_{пр,0}$ – эффективное пробивное напряжение при $t = 0$, характеризующее ход тренда на каждом из участков прогнозирования; k_u – постоянный коэффициент, определяемый по результатам экспериментальных испытаний.

Для повышения точности прогнозирования изменения пробивного напряжения разработана методика определения параметров данного тренда, в которой предложено экспериментальные данные в обучающей области разбить на две части с учётом их весовых коэффициентов. Первая область экспериментальных данных $T_{0,1}$, примыкающих к области прогнозирования T_y , оказывает основное влияние на тренд изменения пробивного напряжения, поэтому эти данные учитываются с весовым коэффициентом, равным единице. Вторая область данных $T_{0,2}$ оказывает меньшее влияние на ход тренда в области прогнозирования, поэтому эти результаты учитываются с весовым коэффициентом, меньшим единицы. Предложена функциональная зависимость весового коэффициента k_b от времени в области $T_{0,2}$.

Аппроксимация экспериментальных данных расчётным трендом производится по методу наименьших квадратов. В результате определению подлежат, в отличие от имеющихся методик, всего три постоянных коэффициента: $U_{пр,0}$, k_u , $k_T = T_{0,1}/T_y$. Истинным считается тренд, соответствующий глубококому минимуму, то есть сумма квадратов невязок при этом является минимальной:

$$\sum k_u(t) (U_{пр,i}(t) - U_{пр,рi}(t_i))^2 \rightarrow \min . \quad (11)$$

В соответствии с разработанными алгоритмом и программой расчёта Progn_Un+ на рис. 5 представлены результаты прогнозирования изменения значений среднего и нижнего предела пробивных напряжений эксплуатационного масла для одного из трансформаторов 110 кВ.

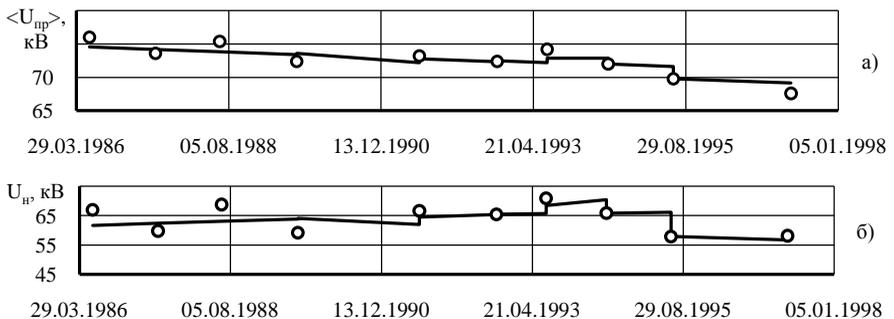


Рис. 5. Изменение и прогноз пробивных напряжений трансформаторного масла в эксплуатации: а – среднее пробивное напряжение; б – нижний предел пробивного напряжения

Отмечается, что предложенный метод прогнозирования параметров электрической прочности масла с применением кусочно-линейного тренда при дифференцированном учёте результатов эксплуатационных испытаний позволяет обеспечить прогноз средних пробивных напряжений с погрешностью до 2,53 %. При весовом коэффициенте $K_b = 1$ максимальная погрешность прогноза возрастает до 7,43 %.

Погрешности прогнозирования изменения нижнего предела пробивного напряжения при дифференцированном учёте эксплуатационных испытаний составляют до 13,51 %. В случае весового коэффициента $K_b = 1$ максимальная погрешность прогноза возрастает до 14,42 %. Особенно это проявляется при большом времени работы трансформатора. Следовательно, при дифференцированном учёте эксплуатационных данных расчётный тренд ближе аппроксимирует экспериментальные результаты.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель движения заряженных частиц в пространственно неоднородном переменном электрическом поле, позволяющая рассчитать траекторию и скорость движения частиц в масляном канале с учётом влияния электрофизических характеристик частиц примесей и трансформаторного масла, а также технологических параметров высоковольтного маслонаполненного оборудования.

2. Получено выражение для определения критического радиуса частиц, начиная с которого изменяется направление движения заряженной частицы в неоднородном переменном электрическом поле. На этой основе показано, что с увеличением температуры масла и напряженности электрического поля диапазон размеров заряженных частиц, которые выталкиваются из области максимальной напряженности электрического поля, расширяется.

3. Получены экспериментальные результаты, отражающие закономерности движения трансформаторного масла и частиц примесей в характерных для маслонаполненного оборудования каналах с учётом влияния температуры и параметров канала, включая его пространственное расположение. Установлено, что конвективное движение масла в модели ввода с бумажно-масляной изоляцией представляет собой два замкнутых гидродинамических потока, расположенных в верхней и нижней частях ввода, между которыми не происходит заметного массообмена.

4. При отсутствии внешнего электрического поля частицы примесей движутся в канале вместе с маслом, при подаче высокого напряжения на модель ввода частицы, расположенные вблизи поверхности металлической трубы без бумажного покрытия, оседают на поверхность трубы, получают заряд и выталкиваются из области максимальной напряженности электрического поля. Аналогично ведут себя частицы вблизи бумажного покрытия, однако время их пребывания на поверхности изоляции значительно больше.

5. Разработан метод оценки времени формирования осадка из заряженных частиц примесей на поверхности твёрдой изоляции под действием неоднородного переменного электрического поля, приводящего к снижению её электроизоляционных характеристик в эксплуатации, учитывающий влияние физических параметров частиц и трансформаторного масла, характеристик электрического поля, а также динамики старения масла и технологических режимов, характерных для маслонаполненного оборудования.

6. Разработан метод нахождения статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла по результатам эксплуатационных испытаний в стандартном маслопробойнике, позволяющий определять нижний предел пробивного

напряжения на основе распределения Гнеденко-Вейбулла

7. Разработан метод прогнозирования изменения среднего пробивного напряжения и нижнего предела пробивного напряжения в процессе эксплуатации МНО, позволяющий дифференцированно учитывать ограниченное число эксплуатационных данных весовым коэффициентом, значение которого увеличивается при приближении к участку прогнозирования. Выполненными расчётами по разработанной программе показано, что предложенный метод прогнозирования позволяет уменьшить погрешность прогноза пробивных напряжений.

8. Разработанные программы расчёта на ЭВМ, реализующие предложенные методы оценки влияния частиц примесей на качество изоляции МНО, нашли практическое применение на электроэнергетических предприятиях.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Формирование осадка из частиц примесей на поверхности твёрдого диэлектрика в маслонаполненном высоковольтном оборудовании / Ю.А. Митькин, М.В. Прусаков // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып.4. – С. 82 – 84.

2. Проблемы оценки технического состояния маслосодержащей изоляции высоковольтного оборудования в эксплуатации / Ю.А. Митькин, А.В. Вихарев, М.В. Прусаков // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып.2. – С. 78 – 82.

3. Особенности формирования движения трансформаторного масла в канале модели высоковольтного ввода / М.В. Прусаков, И.А. Хальзев // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып.4. – С. 154 – 155.

4. Математическое моделирование движения масла и распределение температуры в модели ввода высокого напряжения / Ю.А. Митькин, Ф.Н. Ясинский, А.В. Солдатов, М.В. Прусаков // Вестник ИГЭУ. – 2004. – Вып.3. – С. 52 – 54.

Публикации в других изданиях

5. Движение частиц примесей в трансформаторном масле в переменном неоднородном электрическом поле высоковольтного оборудования / Ю. А. Митькин, М. В. Прусаков // Высоковольтные техника и электротехнология: межвуз. сб. науч. тр. – Иваново, 2003. – Вып. 3. – С. 43 – 46.

6. Электрофизические процессы в масляном канале высоковольтного ввода / М.В. Прусаков // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (XII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2005. – Т. 1. – С. 27.

7. Поведение частиц примесей в трансформаторном масле в переменном неоднородном электрическом поле / Ю.А. Митькин, М.В. Прусаков // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (XI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2003. – Т. 1. – С. 19.

8. 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: межвуз. сб. науч. тр. – Иваново, 2003. – Вып. 3. – С. 47–54.

9. Исследование движения трансформаторного масла во вводе при различных режимах его работы / М.В. Прусаков // Электрическая изоляция – 2006: тр. IV междунар. науч.-техн. конф. – СПб., 2006. – С. 255–257.

10. Экспериментальное определение формирования движения трансформаторного масла во вводе / М. В. Прусаков, И. А. Хальзев, М. Е. Тихов // Состояние и перспективы раз-

вития электротехнологии: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (XII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2005. – Т. 1. – С. 28.

11. Методика обработки испытаний трансформаторного масла в стандартном маслопробойнике / С. В. Ларионов, А. А. Мизонов, А. В. Вихарев, М. В. Прусаков // Электроэнергетика: тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студ. и асп. – Иваново, 2006. – С. 41.

12. Процессы формирования осадка из частиц примесей на поверхности фарфоровой покрышки высоковольтного ввода / М. В. Прусаков // Состояние и перспективы развития электротехнологии: мат.-лы междунар. науч.-техн. конф. (XIII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2006. – С. 21–23.

13. Оценка влияния коллоидных частиц на характеристики твердой маслосодержащей изоляции / М. В. Прусаков // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (XIV Бенардосовские чтения). – Иваново, 2007. – Т. 1. – С. 33.

14. Повышение эффективности электроочистки трансформаторного масла от механических примесей / Ю. А. Митькин, С. В. Ларионов, М. В. Прусаков // Энергия 2007. Электроэнергетика: мат.-лы регион. науч.-техн. конф. студ. и асп. – Иваново, 2007. – Т. 3. – С. 84–86.

15. Модифицированная методика оценки электрической прочности трансформаторного масла / Ю. А. Митькин, М. В. Прусаков // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (XV Бенардосовские чтения). – Иваново, 2009. – Т. 1. – С. 51.

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

17. Метод контроля электрической прочности трансформаторного масла на разряд по поверхности / А. В. Вихарев, М. В. Прусаков // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (XV Бенардосовские чтения). – Иваново, 2009. – Т. 1. – С. 53.

ПРУСАКОВ Михаил Вячеславович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЦ ПРИМЕСЕЙ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО
МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 25.05.10 Формат 60х84 1/16.
Печать плоская. Усл.печ.л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ № 114

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

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

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.