

## ФОРМИРОВАНИЕ ОСАДКА ИЗ ЧАСТИЦ ПРИМЕСЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА В МАСЛОНАПОЛНЕННОМ ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Ю.А. МИТЬКИН, д-р техн. наук, М.В. ПРУСАКОВ, асп.

Рассмотрены особенности поведения заряженных частиц примесей в пространственно неоднородных электрических полях маслonaполненного высоковольтного оборудования с учетом влияния гидродинамического движения трансформаторного масла. Изложены основные положения предложенной модели формирования осадка из частиц примесей на поверхности твердой изоляции ввода, а также возникновения и развития частичных разрядов на этой поверхности.

*Ключевые слова:* высоковольтное оборудование, электрическое поле, примеси, коллоидные частицы, напряженность электрического поля.

## DREG FORMING FROM ADMIXTURE PARTICLES ON THE SOLID DIELECTRIC SURFACE IN OIL-FILLED HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT

Yu.A. MITKIN, Ph.D., M.V. PRUSSAKOV, postgraduate

This paper is devoted to the peculiarities of admixture charged particles behaviour in spatially non-homogeneous electric fields of oil-filled high-voltage equipment subject to transformer oil hydrodynamic motion influence. There are the main conditions of the model suggested for dreg forming from admixture particles on input solid insulation surface, and internal discharge occurrence and development on this surface as well.

*Key words:* high-voltage equipment, electric field, admixtures, colloidal ions, electric field density.

В энергосистемах в эксплуатации находится большое количество высоковольтного маслonaполненного оборудования (МНО), в значительной степени определяющего эффективность производства и распределения электрической энергии. Основной электроизоляционной и рабочей средой в этих аппаратах является трансформаторное масло. В процессе эксплуатации МНО происходит постепенное ухудшение электроизоляционных свойств трансформаторного масла. При этом увеличивается загрязнение масла коллоидными частицами различной природы, продуктами его окисления и разложения. Наиболее ярко этот процесс проявляется в высоковольтных вводах силовых трансформаторов, в трансформаторном масле которых образуются металлосодержащие коллоидные частицы [1]. Благодаря процессам коагуляции металлосодержащие коллоидные частицы имеют размеры от 100 до 10000 Å. В результате значительно возрастает тангенс угла диэлектрических потерь трансформаторного масла, снижается его электрическая прочность, на поверхности нижней фарфоровой крышки образуется осадок, по которому со временем развиваются разряды.

Процесс формирования осадка имеет несколько последовательных стадий, при которых на коллоидные частицы в определенных областях масляного канала действуют силы различной природы. В данном процессе можно выделить две области с различными явлениями в них: внешнюю и внутреннюю.

Во внешней области в результате температурного перепада и изменения плотности масла по высоте канала ввода наблюдается интенсивное движение масла (конвекция) в виде восходящего и нисходящего потоков [2]. Для модели ввода высотой 520 мм и шириной масляного канала 6–19 мм скорость движения масла находится в пределах 2–15 мм/с. Эти гидродинамические потоки трансформаторного масла оказывают значительное влияние на движение коллоидных частиц. Из проведенных расчетов и экспериментов показано, что скорость потока масла (более 2 мм/с) значительно превосходит скорость седиментации частиц (менее 0,35 мм/с) при 90°C и радиусе частиц менее 10 мкм. Следовательно,

движение коллоидных частиц во внешней области будет определяться конвективным движением среды. Движение трансформаторного масла сопровождается его перемешиванием по объему, поэтому концентрацию коллоидных частиц во внешней области можно считать постоянной.

Одновременно на коллоидные заряженные частицы в объеме масла действует пространственно неоднородное переменное электрическое поле. Воздействие внешнего поля приводит заряженные частицы в колебательное направленное движение [3–6].

Вблизи остова ввода заряженная частица колеблется в переменном неоднородном электрическом поле и одновременно выталкивается к внешнему электроду с некоторой скоростью (диполофорез). При совершении колебаний она может приблизиться к поверхности остова, но не останется на ней, так как скорость диполофореза будет ее увлекать во внешнюю область. Кроме того, процесс «захвата» (оседания) частиц твердой поверхностью занимает определенное время, которое будет больше, чем время, необходимое для удаления частицы на достаточное расстояние от остова под действием диполофореза.

Вблизи поверхности с меньшей напряженностью поля частица колеблется и одновременно приближается к поверхности в течение всего времени наблюдения. В результате она попадает в вязкий слой, где начинают действовать силы зеркального отображения, которые окончательно фиксируют ее в пристеночной области.

Таким образом, заряженные частицы в неоднородных переменных электрических полях в основном будут оседать на поверхностях, находящихся в областях с меньшей напряженностью электрического поля.

Проведенный анализ гидродинамического потока жидкости (конвективное движение) и движения заряженной частицы в неоднородном электрическом поле во вводе показал следующее:

– заряженные частицы удаляются от поверхности остова ввода по направлению к крышке; это наблюдается во всем объеме масляного канала, так как макси-

мальная напряженность электрического поля находится вблизи центрального стержня;

– результирующую траекторию движения с учетом электрического воздействия и гидродинамического потока предсказать заранее не представляется возможным, так как в потоке жидкости происходит обмен слоев жидкости;

– сила электрического поля оказывает заметное влияние на движение частицы к крышке в основном в области, прилегающей к крышке.

В результате в первом приближении можно считать, что частицы поставятся гидродинамическим потоком на границу пристеночного слоя и с этого момента на частицу начинает действовать электрическое поле.

Во внутренней области (пристеночный слой) скорость потоков масла небольшая (снижается при приближении к твердой поверхности крышки) и значительное влияние на движение коллоидных частиц начинают оказывать силы тяжести и электрического поля. Из-за увеличения влияния электрического поля процесс коагуляции частиц начинает ускоряться. На эти процессы оказывает также влияние диффузия частиц. В свою очередь, пристеночный слой можно разбить на две зоны: вдали от стенки и вблизи стенки.

Во внутренней области вдали от стенки под действием силы внешнего переменного неоднородного электрического поля главную роль начинает играть аperiodическое колебательное движение коллоидных частиц в область с наименьшей напряженностью электрического поля (поверхность твердой изоляции). В ней формируется общий поток частиц, состоящий из потоков частиц, обусловленных воздействием внешнего электрического поля, диффузионными процессами, радиальной составляющей гидродинамического движения масла в канале.

Во внутренней области вблизи стенки дополнительно возникают электрические силы зеркального отображения, которые притягивают частицы к стенке канала, начинается первый этап формирования осадка на твердой поверхности изоляции. В течение этого этапа в результате оседания частицы постепенно заполняют свободные места на твердой поверхности. При приближении заряженной частицы к поверхности изоляции на расстояние, равное ее размерам, на нее начинает действовать сила зеркального отображения. Эта сила притягивает и удерживает частицу у поверхности твердой изоляции. Концентрация частиц на поверхности будет со временем увеличиваться, а расстояние между ними уменьшаться.

Однако первый этап может продолжаться до определенного момента времени. По мере увеличения числа частиц на единице поверхности с некоторого момента времени  $t_{крит}$  поляризованные частицы на поверхности под действием собственного электрического поля начинают «захватывать» (притягивать) частицы, поступающие из внешнего пространства. Будем считать, что в течение этого времени ( $t < t_{крит}$ ) образуется одинарный слой из равномерно расположенных частиц. Тогда время  $t_{крит}$  можно оценить по формуле

$$t_{крит} = \frac{1}{\Phi(aR)^2},$$

где  $\Phi$  – поток частиц;  $a$  – некоторый постоянный коэффициент;  $R$  – радиус частиц.

Второй этап формирования осадка соответствует промежутку времени  $t \geq t_{крит}$ . На данном этапе коллоидные частицы будут присоединяться (захватываться) к частицам, уже расположенным на поверхности твердой

изоляции, начинается процесс построения цепочек. Происходит формирование цепочечных структур из одиночных частиц. Они располагаются вдоль поверхности твердой изоляции и далее служат центрами для формирования более длинных цепочек.

Полагая, что частицы, идущие из внешнего пространства, распределяются равномерно по всем «зародышам» цепочек, можно оценить время соединения соседних «зародышей» цепочек по поверхности изоляции в один непрерывный мостик по формуле

$$t_{мост} = \left(\frac{a}{2} + 1\right) \frac{1}{(aR)^2 \Phi}.$$

Следует также отметить, что цепочки формируют мостики из частиц, направление роста которых будет определяться конфигурацией силовых линий электрического поля вблизи поверхности твердой изоляции.

Выполненные оценочные расчеты характерных времен, определяющих процесс формирования осадка, показали, что критическое время образования «зародышей» цепочек по всей поверхности твердой изоляции для частиц размером 100–500 Å и при температуре масла 50–90 °C изменяется в пределах 0,5–11 лет, а время образования мостиков из частиц – в пределах 1–20 лет. На величины этих времен основное влияние оказывают температура масла, размер и концентрация частиц примесей. Эти оценочные данные по порядку величины соответствуют результатам эксплуатационных и лабораторных данных.

На следующем этапе цепочки и мостики, расположенные на поверхности изоляции, инициируют возникновение локальных частичных разрядов (ЧР), что обуславливает начало процессов развития и формирования сквозного разряда по поверхности твердой изоляции. Образовавшиеся при ЧР углеродные частицы способствуют зарождению более устойчивых цепочек и мостиков. ЧР возникают в различных местах с некоторой вероятностью. Однако с некоторого момента времени эти процессы начинают развиваться в определенном направлении, которое определяется неоднородностью внешнего электрического поля вблизи поверхности твердой изоляции. Завершающей стадией являются процессы формирования разрядного канала на поверхности твердой изоляции по науглероженным дорожкам, которые заканчиваются сквозным разрядом.

## Заключение

Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Скорость потока масла значительно превосходит скорость седиментации частиц, следовательно, движение коллоидных частиц во внешней области будет определяться конвективным движением среды.

2. Заряженные частицы в неоднородном переменном электрическом поле в основном оседают на поверхностях, находящихся в областях с меньшей напряженностью переменного электрического поля.

3. В пристеночной области главную роль играют дипольфоретическое движение коллоидных частиц в область с наименьшей напряженностью электрического поля (поверхность твердой изоляции). В ней формируется общий поток частиц, состоящий из потоков частиц, обусловленных воздействием внешнего электрического поля, диффузионными процессами, радиальной составляющей гидродинамического движения масла в канале.

4. Цепочки из частиц располагаются вдоль поверхности твердой изоляции и далее служат центрами

для формирования мостиков из частиц в соответствии с неоднородностью внешнего электрического поля.

#### Список литературы

1. Львов М.Ю. Коллоидно-дисперсные процессы в высоковольтных герметичных вводах трансформаторов // Электрические станции. – 2000. – № 4.

2. Прусаков М.В. Исследование движения трансформаторного масла во вводе при различных режимах его работы: Тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. «Электрическая изоляция – 2006». – СПб., 2006. – С. 255–257.

3. Духин С.С., Малкин Э.С., Духин А.С. Аperiodический инерционный дрейф дисперсных частиц в неоднородном переменном поле // Коллоидный журнал. – Т. XL. – 1978. – Вып. 4.

4. Волков В.Н., Крылов И.Л. Эффект выталкивания заряженных частиц суспензии из области сильного переменного электрического поля: Сб. науч. тр. ИЭИ. Вып. 4: Новые методы исследования в теоретической электротехнике и инженерной электрофизике. – Иваново, 1975. – С. 76–83.

5. Духин С.С., Ульберг З.Р., Нижник Ю.В., Малкин Э.С. Аperiodический электродиффузионно-теоретический дрейф заряженной частицы // Коллоидный журнал. – Т. XL. – 1978. – Вып. 4.

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

*Митькин Юрий Алексеевич,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,  
телефон (4932) 26-97-23,  
e-mail: mua@vetf.ispu.ru

*Прусаков Михаил Вячеславович,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант,  
телефон (4932) 26-97-23,  
e-mail: vav@vetf.ispu.ru