

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖИДКОЙ ИЗОЛЯЦИИ С МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ

Длительность работы трансформаторов сетевого электрохозяйства промышленных предприятий определяется состоянием магнитопровода и целлюлозной изоляции, необратимые ухудшения которых приводят к сокращению сроков службы трансформаторов. Если срок жизни магнитопроводов практически неограничен, то старение целлюлозной изоляции происходит постоянно и значительно быстрее. Поэтому именно состояние целлюлозной изоляции определяет срок жизни трансформатора.

Естественное старение целлюлозной изоляции процесс достаточно длительный, но в трансформаторе она подвергается воздействию факторов, ускоряющих этот процесс: нагреву, воздействию влаги, кислорода и наиболее активно, воздействию продуктов старения жидкой изоляции, которые концентрируются в целлюлозной изоляции.

Другим важным обстоятельством исключительного внимания к жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования (МВВЭО) является тот факт, что в изолирующую жидкость погружены все внутренние составные части высоковольтных аппаратов и она, по сути, является средой, в которой сосредотачиваются и проявляются признаки негативных событий и состояний всех компонентов МВВЭО, ухудшающие производственную эксплуатацию. Поэтому главным объектом диагностического внимания и общим для всех маслонаполненных электротехнических аппаратов элементом является электрическая жидкая изоляция.

Снижение прочности изоляции определяется большим числом различных воздействий и является случайным процессом. В ней могут образовываться и развиваться скрытые и неявные неисправности. К такой категории жидкой изоляции относят состояния, которые не могут быть обнаружены из-за отсутствия методов и средств обнаружения физических процессов, которые приводят к неисправности или к отказу.

Для разработки новых методов и средств контроля технического состояния жидкой изоляции необходимо дальнейшее исследование ее

физических свойств и поиск параметров и критериев, которые чувствительны к изменению структуры изоляции при различных воздействиях на неё.

Изучение и описание трансформаторной изоляционной жидкости, как и других реальных жидкостей, связано со значительными трудностями, так как физические свойства реальных жидкостей зависят от их состава, от различных компонентов, которые могут образовывать с жидкостью различные смеси как гомогенные (растворы) так и гетерогенные (эмульсии, суспензии и др.). По этой причине, для описания математической модели жидкой изоляции с использованием основных уравнений жидкости приходится пользоваться некоторыми абстрактными моделями жидкостей, которые наделяются не всеми свойствами изоляционной жидкости.

Применение теоретических уравнений для расчета кривой жизни и характеристик надежности изоляции затруднено их громоздкостью и малой пригодностью для инженерных расчетов. Однако применение моделей изоляции с дефектом позволяет существенно повысить эффективность экспериментальных исследований и получить необходимые данные, позволяющие оптимизировать методику измерений.

Основными параметрами, характеризующими термодинамическое состояние жидкости, являются температура T , давление p и плотность ρ .

Одной из основных является модель несжимаемой идеальной (или невязкой) жидкости. Так называется гипотетическая сплошная среда, обладающая текучестью, лишенная вязкости и полностью несжимаемая. Игнорирование свойств вязкости и сжимаемости сильно упрощает математическое описание движения жидкости и позволяет получить многие решения в конечном замкнутом виде.

В случае рассмотрения жидкой изоляции МВВЭО как идеальной жидкости (в отсутствие вязкости и теплопроводности) используется система уравнений движения Эйлера, непрерывности и состояния:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v \vec{\nabla})v \right] = -\vec{\nabla}P, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0, \quad P = P(\rho), \quad (1)$$

где v – колебательная скорость частиц среды. В первом уравнении системы (1) нелинейным является член $(v \vec{\nabla})v$, ответственный за конвективный перенос вещества; в свою очередь, в уравнении непрерывности компонента $\text{div}(\rho v)$ имеет второй порядок малости.

Однако во время работы трансформатора в его магнитопроводе и обмотках имеют место потери электрической энергии, в результате которых трансформатор нагревается. Средний температурный градиент между поверхностью бака трансформатора и окружающим воздухом зависит от электрических потерь в обмотке и магнитопроводе. При установившемся режиме и естественном охлаждении трансформатора температура масла в каждой горизонтальной плоскости имеет неизменное значение. При этом следует заметить, что только в граничных слоях масла (толщиной около 3 мм), непосредственно омывающих поверхность катушек и бака, происходят колебания температуры.

В случае изменения режимов работы МВВЭО потери электрической энергии могут увеличиваться, что приводит к еще большему нагреву изоляционной среды, появляются перегревы локальных объемов жидкой изоляции и как следствие кавитационные процессы. В изоляционной среде сплошность жидкости нарушается с образованием микрополостей (каверн), наполненных газом и могут появляться дефектные области с микропузырьками различных размеров и концентраций. Так радиус стабильного пузырька колеблется в пределах от $R = 10^{-3}$ см до $R = 10^{-7}$ см. Концентрация микропузырьков меняется от $n = 1 \text{ см}^{-3}$ до $n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Объемное газосодержание монодисперсных пузырьков определяется обычным образом формулой:

$$\varphi = \frac{4}{3} \pi n R^3. \quad (2)$$

Здесь R – радиус пузырьков, φ – объёмное содержание газа, n – число монодисперсных пузырьков в единице объёма.

Среда становится двухкомпонентной смесью.

Наиболее простой подход к моделированию жидкой изоляционной среды с микровключениями связан с предположением о сферичности формы пузырька и об однородности термодинамических параметров внутри пузырька. Математические уравнения данной модели содержат уравнения гидродинамики жидкости на макроуровне (1). Нелинейное уравнение Рэлея (3), описывающее радиальное движение пузырьков на микроуровне [1].

$$R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{\rho_0} (P_g - P), \quad (3)$$

$$P - P_0 = c^2(\rho - \rho_0) \quad (4)$$

$$P_g = P_0 \left(\frac{R_0}{R(t)} \right)^{3\gamma} \quad (5)$$

Где t – время, γ – показатель политропы дисперсной газовой фазы, ρ – плотность несущей жидкости, c – скорость звука в жидкости без пузырьков, P_0 — давление в жидкости в окрестности пузырька в начальный момент, определяемое атмосферным давлением над свободной поверхностью и гидростатическим давлением столба жидкости над пузырьком, P_g — давление газа в пузырьках.

Формула (4) является акустическим уравнением состояния жидкости. Поведение газа в пульсирующем пузырьке выражает уравнение (5).

В жидком диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ϵ , заполняющем все пространство на сферический пузырек радиуса R_0 , граница которого подвержена действию сил давления электрического поля, собственного заряда пузыря Q [2]:

$$P_Q = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon R_0^4}, \quad (6)$$

P_Q — давление электрического поля собственного заряда.

Таким образом, система уравнений 1 – 6 представляет акустическую модель жидкой изоляции с микровключениями МВВЭО.

Математическое описание жидкой среды как трансформаторная жидкость общими дифференциальными уравнениями, учитывающими все физические свойства, присущие этой среде, оказывается весьма сложной задачей. Если даже ограничиться учетом только текучести, вязкости и сжимаемости, то и тогда уравнения движения, выражающие основные законы механики, оказываются настолько сложными, что пока не удалось разработать общих аналитических методов их решения. Применение численных методов интегрирования таких уравнений на базе современных ЭВМ также связано со значительными трудностями. Поэтому широко используют различные упрощенные модели среды и отдельных явлений.

Для разработки средств контроля дефектной области жидкой изоляции с микровключениями на основе нелинейных акустических эффектов с использованием параметрической излучающей антенны необходимо

разработать и исследовать только волновую модель жидкой изоляции трансформаторного типа с газосодержанием [3].

Литература

1. *Ким Д.Ч.* К теории акустических солитонов в жидкости с распределёнными пузырьками газа / Д.Ч. Ким // Журнал технической физики, 2007. – Том 77, вып.6 – с.8 – 12.

2. *Григорьев А.И.* Устойчивость равновесных состояний заряженных пузырей в диэлектрической жидкости / А.И. Григорьев, А.Н. Жаров // Журнал технической физики, 2000. – Том 70, вып.4 – с.8 – 13.

3. *Лукьянов М.М.* О выборе математической модели способа диагностирования маслonaполненного оборудования на основе нелинейного параметрического взаимодействия колебаний / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко, В.Б. Иванченко // «Электроснабжение промышленных предприятий»: Материалы XXIX сессии Всероссийского семинара Академии наук РФ «Кибернетика». - Новочеркасск: Издательство ЮРГТУ. - 2007.