

Черкашина В.В.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В настоящее время в энергосистеме Украины находится в эксплуатации значительное число трансформаторов, срок службы которых составляет более 25 лет. Одновременная замена всех трансформаторов, отработавших свой нормативный ресурс, невозможна в силу экономических причин. Поэтому актуальным будет являться продление эксплуатации за пределами нормативного срока службы. В связи с этим ключевую роль в повышении эксплуатационной надежности оборудования будут составлять вопросы технической диагностики и оценки состояния высоковольтного оборудования.

Целью данной статьи является анализ эффективности существующих методов оценки механической прочности изоляции трансформаторов, а также разработка направлений, реализация которых позволит повысить достоверность принимаемых решений по результатам контроля.

Статистика повреждений, выполненная ЗТЗ-Сервис совместно с РАО ЭЭС России [1], представлена в таблице 1. Как видно из таблицы, значительное число повреждений обусловлено ухудшением свойств твердой изоляции высоковольтных масляно-полненных трансформаторов. При этом, как отмечается в большинстве работ [2], основные проблемы вызваны не снижением электрической прочности, а снижением механической прочности.

Таблица 1 – Ранжирование видов повреждений по частоте их проявления

Вид повреждения	Доля, %	
	РАО ЭЭС России	НИЦ ЗТЗ СЕРВИС
Дефекты маслянополненных вводов	36,2	32,9
Повреждения обмотки		
Динамическая нестойкость	5,4	
Увлажнение	27,3	7,3
Газовыделение	6,7	
Дефекты устройств РПН/ПБВ	24,2	23,5
Прочие причины	12,3	24,2

Известно, что одним из основных факторов, влияющих на старение диэлектриков, является температура. Для исследования процессов теплового старения используют уравнения, описывающие кинетику химических реакций. В общем виде такие уравнения могут быть представлены [3]:

$$-\frac{dx}{d\tau} = k \cdot x^n, \quad (1)$$

где x – контролируемый фактор; τ – время; n – порядок реакции определяющей интенсивность ее реагирования на повышение температуры; k – константа скорости реакции.

Согласно Аррениусу:

$$k = k_{\infty} \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot \Theta}}, \quad (2)$$

где Q – энергия активации процесса; R – универсальная газовая постоянная; Θ – абсолютная температура; k_{∞} – численный коэффициент, условно характеризующий значение k при $\Theta \rightarrow \infty$;

Поскольку k_{∞} зависит от состояния вещества, наличия в нем дефектов и от состояния окружающей среды (наличие в ней химически агрессивных сред), то учет влияния химически агрессивных сред можно произвести в виде степенной функции: $k_{\infty} = \beta \cdot \psi^m$, которая очень удобна для аппроксимации экспериментально наблюдаемых зависимостей в диапазоне ψ от 0 до 1. Если в качестве величины x принять мгновенную прочность объекта S , тогда для мономолекулярной реакции ($m = 1$) и неизменной температуры на протяжении времени τ , основное уравнение теплового старения имеет вид:

$$\ln S = \ln S_0 - \beta \cdot \psi^m \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot \Theta}} \cdot \tau. \quad (3)$$

Основными факторами, характеризующими процесс теплового старения, являются рабочая температура диэлектрика, концентрация химически агрессивных сред и время эксплуатации.

При постоянной концентрации химически агрессивных сред:

$$S = S_0 \cdot e^{-\alpha \cdot \tau}, \quad (4)$$

где $\alpha = \beta \cdot \psi^m \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot \Theta}}$.

При неизменной температуре и концентрации агрессивных сред мгновенная прочность объекта экспоненциально уменьшается с течением времени, при этом она может достигнуть критического значения (из-за разрыва химических связей диэлектрика), когда произойдет разрушение объекта и это позволит переписать уравнение (3) в виде:

$$\beta \cdot \psi^m \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot \Theta}} \cdot \tau_p = \ln S_0 - \ln S_p = \ln \frac{S_0}{S_p}, \quad (5)$$

где τ_p – время, через которое мгновенная прочность объекта материала достигнет критической, определяет срок службы объекта в заданных условиях.

Отсюда

$$\tau_p = \frac{\ln \frac{S_0}{S_p}}{\beta \cdot \psi^m} \cdot e^{\frac{Q}{R \cdot \Theta}}. \quad (6)$$

Если в процессе старения концентрация химически агрессивных сред не менялась, то следует, что срок службы экспоненциально убывает с ростом температуры старения:

$$\tau_p = \hat{A} \cdot e^{\frac{\hat{A}}{\Theta}}. \quad (7)$$

Выражение для τ_p можно переписать, выделив концентрацию химически агрессивных сред:

$$\tau_p = \frac{D}{\psi^m}. \quad (8)$$

Срок службы уменьшается с ростом концентрации химически агрессивных сред (кислот, щелочей, влаги).

Если в процессе старения концентрации химически активных сред не меняется, то срок службы изоляции экспоненциально уменьшается с ростом температуры старения. Таким образом, на механическую прочность изоляции оказывает влияние не только рабочая температура, но наличие химически агрессивных сред (кислот, щелочей, влаги). Ключевую роль в старении играет увлажнение, вода – катализатор этого процесса. Значение степени увлажнения твердой изоляции и масла является основой для принятия решений о дальнейших профилактических мероприятиях. Помимо влаги, существенное влияние на интенсивность старения целлюлозы оказывают и другие продукты старения жидкой изоляции.

Оценка механической прочности твердой изоляции, проводится с помощью следующих критериев:

1. Критериальное отношение CO/CO_2 [4] с помощью газохроматографии, т.е. выявление газообразных продуктов разложения целлюлозы. В этих случаях для оценки степени старения изоляции необходимо измерять концентрации этих газов периодически все время службы трансформатора или делать предположение о равномерном выделении этих газов, независимо от режима работы. Однако применяемая для этих целей газохроматографическая методика на содержание CO и CO_2 недостаточно информативна, поскольку CO и CO_2 не являются только следствием старения целлюлозной изоляции, а может быть также следствием частичного пиролиза углеводородов, происходящего за счет перегрева масла, частичных разрядов и др. Кроме того, будучи газообразными, эти продукты могут теряться, что особенно характерно для оборудования, имеющего защиту масла с помощью воздухоосушителя. [5].

2. Анализ содержания фурановых производных в масле

Известно, что температура, кислород и другие окисляющие компоненты, а также влага вызывают частичное разрушение макромолекул целлюлозы, что приводит к образованию компонентов фуранового ряда карбонильного, карбоксильного и гидроксильного характера [6]. Определение содержания фурановых соединений в масле, образующихся при разложении целлюлозы в процессе старения изоляции – является одним из методов оценки старения твердой изоляции. В то же время в работе [5] отмечается, что отсутствие значимых различий содержания фурановых соединений от срока эксплуатации трансформаторов, а также, что выход этих соединений в процессе деградации

изоляция не является стехиометрическим в отношении числа разрывов в макромолекуле и степени ее деструкции. Кроме того, там же отмечается, что фурановые соединения являются лабильными соединениями и разлагаются под действием кислой среды, что в результате резко повышает вероятность ошибки второго рода при контроле механической прочности твердой изоляции. Этому недостатка лишен метод непосредственного контроля степени полимеризации целлюлозы.

3. Оценка степени полимеризации целлюлозы

Степень деструкции изоляции обычно характеризуется числом разрывов молекул целлюлозы или фактором старения, который может быть представлен через начальное и конечное значение степени полимеризации. При этом изоляция считается полностью изношенной, если число разрывов достигло 5. Степень деградации изоляции при старении непосредственно определяется по коэффициенту полимеризации (СП). Для новой целлюлозы СП составляет около 1100 ед., а сокращение длины молекулы при деградации снижает СП до 200 ед. Вид новой и состаренной целлюлозы представлен на рисунке 1.

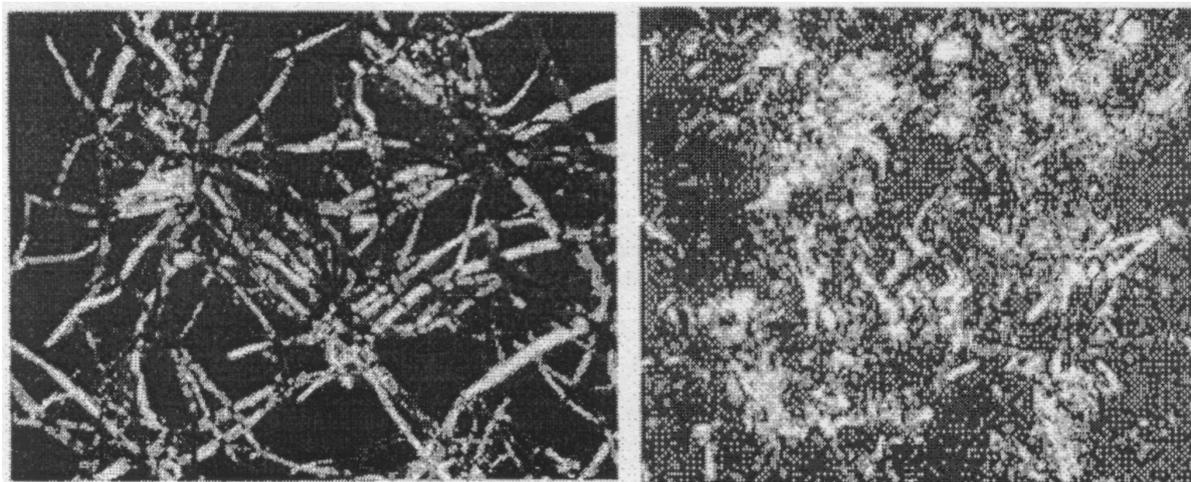


Рисунок 1 – Вид новой и состаренной целлюлозы

В этом состоянии целлюлоза становится ломкой и резко уменьшается ее сопротивление механическим воздействиям [7] (рис. 1). Из всех рассмотренных методов данный метод обладает более высокой достоверностью, но и он не лишен недостатков, таких как необходимость вывода трансформатора из эксплуатации для взятия проб, при этом, как правило, берутся образцы наружных слоев изоляции, которые находятся в благоприятных температурных условиях и, как следствие, не могут адекватно отражать степень полимеризации внутренних слоев изоляции.

Выполненный анализ показал, что из рассмотренных методов контроля каждый из них имеет как достоинства, так и недостатки. Если недостатки степени полимеризации бумажной изоляции в большей мере обусловлены технологическими сложностями процессов измерения, но это практически не отражается на достоверности принятия решения по результатам контроля, то использование критериального соотношения Co и CO_2 может привести к росту вероятности ошибки первого рода, поскольку рост данного соотношения возможен не только вследствие изменения механической прочности целлюлозы, а и вследствие частичного пиролиза углеводородов, происходящего за счет пе-

регрева масла, частичных разрядов и др. Наиболее опасным является увеличение вероятности ошибки второго рода, которая может возникнуть при контроле фурановых производных из-за их лабильности. Таким образом, наиболее перспективным является использование степени полимеризации в качестве диагностического критерия оценки механической прочности твердой изоляции.

Наиболее перспективными направлениями являются: исследование распределения степени полимеризации по высоте обмотки; исследование возможности оценки значения степени полимеризации без взятия образцов целлюлозы; исследования взаимовлияния продуктов старения бумажной и жидкой изоляции на механическую прочность целлюлозы.

Литература

1. Цурпал С.В. Причины повреждаемости и меры по повышению надежности мощных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов // Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции «Трансформаторостроение 2000» (19–21 сентября 2000 г.). Запорожье. ПО ЗТВ. С. 122–126.

2. Богомоллов В.С., Касаткина Т.Е., Кустов С.С. и др. Анализ повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования // Вестник ВНИИЭ. 1997. С. 25–32.

3. Богатенков И.М., Иманов Г.М. и др. Техника высоких напряжений. Учебное пособие для вузов. Под ред. Г.С. Кучинского – СПб: Изд. ПЭИПК, 1998. 700 с.

4. Райгородский И.М. Использование анализа газов для контроля состояния масляных трансформаторов // Энергохозяйство за рубежом, 1975, №2, – С. 27–33.

5. Львов М.Ю. Оценка информативности показателей контроля технического состояния изоляции трансформаторного оборудования // Электрические станции, 2002 г., № 12, С. 44–51.

6. Львов Ю.Н. Применение тонкослойной хроматографии при определении микроколичеств фурановых производных в изоляционном масле электрооборудования. // Электрические станции, 1993 г., № 8, С.48–51.

7. Силовые трансформаторы. Справочная книга под ред. Лоханина А.К., Лизунова С.Д.-М. «Энергоиздат» 2004, С. 407–434.

УДК 621.314

Черкашина В.В.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ОЦІНКИ МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Виконано аналіз ефективності методів оцінки механічної міцності целюлозної ізоляції високовольтних трансформаторів. Виконаний аналіз показав, що найбільш ефективним є метод безпосереднього контролю ступеню полімеризації основної ізоляції. Запропоновані заходи по удосконаленню методів оцінки ступеню полімеризації.