

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ СТАРЕНИЯ ТВЁРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ИХ ДИАГНОСТИКИ В РЕЖИМЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*У статті розглянутий вплив різних експлуатаційних факторів на швидкість старіння паперової ізоляції силових трансформаторів. Запропоновано уточнення формули Монтзингера для розрахунку в системах безперервного контролю відносного старіння ізоляції з урахуванням впливу вологовмісту твердої ізоляції, ступеня окислювання масла і вмісту кисню в маслі.*

*В статті рассмотрено влияние различных эксплуатационных факторов на скорость старения бумажной изоляции силовых трансформаторов. Предложено уточнение формулы Монтзингера для расчёта в системах непрерывного контроля относительного износа изоляции с учётом влияния влагосодержания твёрдой изоляции, степени окисленности масла и содержания кислорода в масле.*

### ВВЕДЕНИЕ

Надежная работа электрооборудования подстанций является одним из основных факторов, определяющих стабильное электроснабжение потребителей. В настоящее время, как в Украине, так и во всем мире, сложилась тенденция "старения" парка электрооборудования, в первую очередь – наиболее ответственного трансформаторного оборудования.

Так, по данным [1], на объектах ОАО "ФСК ЕЭС" (Россия) относительное количество силовых автотрансформаторов и шунтирующих реакторов, нормированный срок службы которых исчерпан, составляет от 18% до 45% в зависимости от класса напряжения, причем тенденция к "старению" оборудования продолжается. Подобная ситуация наблюдается и на объектах НЭК "Укрэнерго".

На фоне старения парка трансформаторного оборудования возникают следующие задачи:

1. Оценка возможности продолжения эксплуатации оборудования по истечении нормированного срока его службы.

2. Объективное обоснование выбора очередности и временной последовательности переоснащения.

3. В условиях рыночных отношений меняется идеология системы обслуживания оборудования. Энергопредприятия отказываются от плановой замены и ремонта электротехнического оборудования, и переходят на систему обслуживания "по состоянию".

Для решения этих задач необходимо знание закономерностей старения электрической изоляции. Критерием оценки её состояния служит, прежде всего, износ целлюлозной изоляции.

Старение изоляции в процессе эксплуатации оборудования обусловлено влиянием большого количества разных факторов. Исследования СИГРЭ [2, 3] показывают, что старение представляет собой комплексный процесс (см. рис. 1), включающий:

- деструкцию целлюлозы в результате пиролиза (термического разложения);
- деструкцию целлюлозы в результате гидролиза (разложения вследствие обменной реакции с водой);
- деструкцию целлюлозы в результате окисления (под воздействием кислот, кислорода и др.).

Гидролиз и пиролиз целлюлозы приводят к ее деполимеризации. Оба механизма образуют фурано-

вые производные, которые растворяются в масле и используются для оценки возможного снижения степени полимеризации. Оба механизма (особенно гидролиз) образуют воду. Пиролиз целлюлозы вызывает также выделение кислот и характерных газов CO и CO<sub>2</sub>. Последние используются для выявления перегрева изоляции.

Основными факторами ускоренного старения изоляции являются: повышенная температура, повышенная влажность витковой изоляции, кислород и продукты старения масла.

Существенным фактором окисления масла даже при небольшом содержании кислорода является повышенное содержание в масле металлов, особенно меди. Рассмотрим влияние некоторых из перечисленных факторов на старение изоляции.

### ДЕСТРУКЦИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПИРОЛИЗА

Исследователи давно занимаются оценкой степени старения изоляции трансформаторов. Еще в конце 20-х годов XX века были проведены фундаментальные исследования ухудшения свойств изоляции в результате теплового старения. Тогда же была предложена применяемая и поныне аналитическая связь интенсивности старения с температурой изоляции.

Тепловое старение – срок службы до критической деструкции целлюлозной изоляции и деградации механических свойств бумаги. Процессы старения имеют необратимый характер [3].

В качестве показателя старения твердой изоляции трансформатора принята ее остаточная механическая прочность, так как ее электрическая прочность снижается медленнее и основной причиной поврежденных состаренной изоляции в трансформаторе практически всегда является ее разрушение [2].

Определение степени деградации твердой изоляции обмоток трансформатора достаточно уверенно производится по степени полимеризации (СП). Однако её определение требует отбора проб изоляции из наиболее нагреваемых частей обмотки и сопряжено со вскрытием бака, что, как правило, нежелательно, а в рабочем состоянии – вообще нереально.

В такой ситуации важную роль должны играть косвенные методы, позволяющие накопить достаточные данные для оценки состояния изоляции.

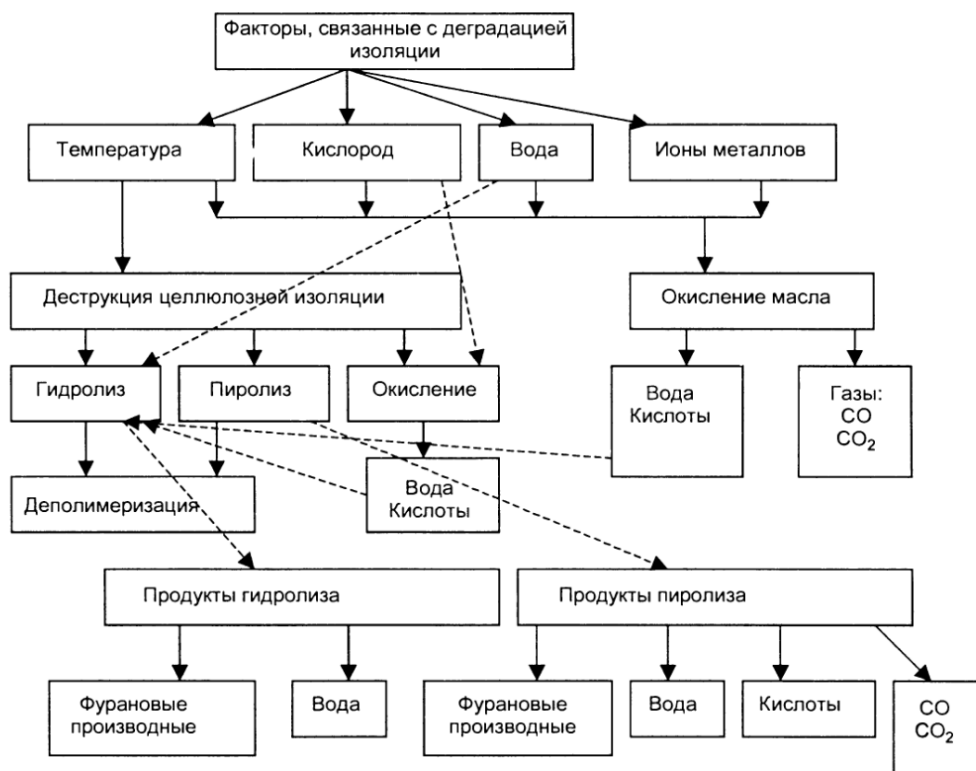


Рис. 1. Модель старения изоляции трансформатора

Законы термического старения бумажной изоляции изучены достаточно хорошо, и на их основе разработаны методики оценки относительного износа изоляции трансформаторов, по температуре наиболее нагретой точки (ТННТ) обмотки. Эти методики основаны на законе термохимического износа Аррениуса и на соотношении Монтзингера [4].

Расчетные методы определения ТННТ изложены в ГОСТ 14209-97 [4]. Применяемый в стандарте алгоритм расчета ТННТ обмотки трансформаторов основывается на упрощенных тепловых моделях, что снижает точность расчёта. На сегодняшний день существует более современный международный стандарт МЭК 60076-7 "Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов" [5].

В [6] представлена разработанная тепловая модель силового автотрансформатора, основанная на электрической схеме замещения тепловых процессов и учитывающая данные протоколов тепловых испытаний автотрансформатора. Применение модели позволяет получить более точный результат расчёта температуры ННТ обмотки в режиме эксплуатации, и больше подходит для применения в системах непрерывного контроля.

Применяемые в настоящее время стандарты не учитывают при расчёте износа изоляции такие эксплуатационные параметры, как влагосодержание твёрдой изоляции, содержание растворимых кислот, кислорода и продуктов старения в масле.

Исследования СИГРЭ [2, 3] показывают, что влага и продукты старения масла, особенно активные кислоты, могут ускорить процесс декомпозиции изоляции в два и более раза. Во многих случаях внутренние слои изоляции, прилегающей к проводнику, оказываются менее состаренными, чем внешние слои

изоляции, обращенные к маслу.

Поэтому разработка методики, позволяющей учитывать эти важные параметры, является актуальной задачей.

#### ДЕСТРУКЦИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ГИДРОЛИЗА

В свою очередь, темпы старения бумажной изоляции в значительной степени зависят от ее увлажненности. Влага, находящаяся в масле (растворенная или связанная) является одним из важнейших факторов, влияющим на изоляционные свойства бумажно-масляной изоляции. Непосредственной причиной снижения электрической прочности масла является наличие в нём растворенной влаги, однако связанная влага легко переходит в растворенную и считается целесообразным определение общей влаги в масле.

Опыт энергокомпании Ontario Hydro показал, что оценку увлажнения масла, непосредственно влияющего на состояние трансформатора, удобнее производить на основании результатов измерений относительной влажности масла в процентах насыщенного значения, а не абсолютного влагосодержания.

Относительная влажность связана с пробивной прочностью масла, с процессом влагообмена "масло-бумага". Измерения относительной влажности масла в системах непрерывного контроля производят тонкопленочным емкостным датчиком [2, 8].

Если при влагосодержании твёрдой изоляции 0,3 % (базовое значение) бумажная изоляция считается хорошо высушенной и имеет полный срок службы, то при влагосодержании твёрдой изоляции равном 1% скорость её старения увеличивается в 6 раз. Нормативы, используемые в странах СНГ допускают увлажнение бумажной изоляции до 4%. При прочих равных воздействиях на изоляцию со стороны других экс-

платационных факторов, получим, что износ при таком увлажнении бумаги, по сравнению с базовым значением влагосодержания, возрастает в 48 раз [9].

### ДЕСТРУКЦИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОКИСЛЕНИЯ

Необходимость контроля окисления масла и наличия кислорода в масле бака установлена давно. Известно, что при достаточно высокой концентрации кислоты целлюлоза может быть полностью разложена на глюкозу за 1 сутки. Как уже отмечалось выше, измерения относительной влажности масла производят тонкопленочным емкостным датчиком, позволяющим проводить непрерывные измерения в режиме эксплуатации. Проведение измерений содержания кислорода в масле в режиме эксплуатации несколько более затруднительно, ввиду дороговизны приборов, осуществляющих непрерывный контроль газов, растворенных в масле (таких как Kelman Transfix, Serveron TrueGas и др.).

Старение бумажно-масляной изоляции в зависимости от окисления масла и содержания в нем кислорода рассмотрено в литературе, посвященной переработке целлюлозы.

1. В окисленном масле, по данным [3], скорость старения целлюлозной изоляции, в зависимости от температуры, возрастает в 1,5-1,6 раза.

2. Увеличение содержания кислорода приводит к возрастанию скорости старения целлюлозы, в зависимости от температуры масла, в 3,5-3,7 раза [3].

### РАСЧЁТ ИЗНОСА ИЗОЛЯЦИИ С УЧЁТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

Модификация формулы Монтзингера [4] для расчёта относительного износа изоляции с учётом выше-рассмотренных эксплуатационных факторов для интервала времени  $(t_0, t_0+T)$  примет вид:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} V(\theta_h, K_w, K_a, K_{O_2}), \quad (1)$$

где  $V$  – скорость относительного износа изоляции, о.е.;  $\theta_h$  – температура наиболее нагретой точки обмотки, °C;  $K_w, K_a, K_{O_2}$  – коэффициенты влияния влаги, растворимых кислот и кислорода соответственно, о.е.

При этом скорость относительного износа изоляции с учётом влияния рассмотренных эксплуатационных факторов будет иметь следующий вид

$$V = \left( \frac{C_w}{C_{w.b}} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{C_a}{C_{a.b}} \right)^\beta \cdot \left( \frac{C_{O_2}}{C_{O_2.b}} \right)^\gamma \cdot 2^{\frac{\theta_h - 98}{6}}, \quad (2)$$

где  $C_w, C_a, C_{O_2}$  – текущее влагосодержание твёрдой изоляции, содержание кислот, кислорода в масле соответственно, г/г;  $C_{w.b}, C_{a.b}, C_{O_2.b}$  – базовые значения влагосодержания твёрдой изоляции, содержания кислот, кислорода в масле соответственно, г/г;  $\alpha, \beta, \gamma$  – показатели степени, определённые в [3, 9];  $\theta_h$  – температура ННТ обмотки, °C.

### ВЫВОДЫ

1. Основными задачами диагностики старения изоляции в режиме эксплуатации являются:

- выявление состояния трансформатора, при котором возможно существенное сокращение срока службы при заданной температуре ННТ (оценка сте-

пени увлажнения, степени старения масла и накопления активных кислот в изоляции);

- оценка остаточного ресурса и выявление степени старения изоляции, приближающейся к предельно допустимой;

- выявление аномального нагрева изоляции.

2. Проведенный анализ показывает, что существенное значение при оценке старения твердой изоляции имеет контроль ее влагосодержания, наличия растворимых кислот в масле и концентрация кислорода в нем. Эти параметры следует контролировать в создаваемых системах непрерывного контроля.

3. Предложенное в статье обобщение формулы теплового износа изоляции с учётом вышеуказанных эксплуатационных факторов даёт возможность в режиме эксплуатации оценить более точно старение изоляции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дарьян Л.А. Тенденции развития диагностики состояния оборудования в электроэнергетике России / Л.А. Дарьян, А.Г. Мордкович, В.В. Смекалов, В.А. Туркот // Доклад № Д4 на 8-ом Симпозиуме "Электротехника 2010". – М. 2005.
2. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.
3. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
4. ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. Введ. 30.12.98.
5. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers, vol. 14/512/FDIS, Sept. 2005.
6. Рассальский А.Н., Лучко А.Р., Гук А.А., Коноград С.П. Применение тепловой модели силового автотрансформатора для расчёта нагрева его элементов в режиме эксплуатации // Вісник НТУ "ХПИ". Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2009. – № 7. – С. 133-138.
7. Методические указания по определению содержания воды и воздуха в трансформаторном масле / РД 34.43.107-95. М.:АО "ВНИИЭ", 1996.
8. Оценка увлажнения электрической изоляции по увлажнению масла // Electrical World. 1996. №2. Р. 29.
9. Васин В.П., Долин А.П. Оценка выработанного ресурса изоляции маслonaполненных трансформаторов. – ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2009, № 2.

Поступила 30.08.2009

Коноград Сергей Петрович,  
Запорожский национальный технический университет  
кафедра "Электрические аппараты"  
Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64  
тел. (061) 289-61-39, e-mail: konogray@gmail.com

S.P. Konogray

### A solid insulation ageing model application to oil-filled power transformer for operation diagnostics

The article analyzes influence of various operational factors on speed of power transformer paper insulation ageing. Accurate definition of Montsinger equation for calculation of relative insulation aging in monitoring systems adjusted for influence of the solid insulation moisture load, degree of the oil oxidability, and oxygen content in the oil is carried out.

**Key words** – power transformer, insulation ageing, pyrolysis, hydrolysis, oil oxidation