

# Проблемы и методы управления состоянием изоляции трансформаторов

**Представлен анализ проблемы эксплуатации изоляции трансформаторов. Проведена оценка влияния влаги на электрическую прочность и диэлектрические характеристики изоляции, скорость окислительных процессов в масле и температурного старения изоляции. Показано влияние увлажненности на срок эксплуатации и нагрузочную способность трансформаторов. Проведен анализ нормативных требований в области оценки изоляции и существующей системы мер по обеспечению ее работоспособности. Предложена современная АСУ СИТО «TRANSEC».**

**Редькин С.М.,**

заместитель генерального директора по стратегическому развитию и инновациям АО «НПО «Стример»

**Высогорец С.П.,** д.т.н., руководитель направления мониторинга и управления техническим состоянием трансформаторного оборудования АО «НПО «Стример»

Силовой трансформатор (автотрансформатор) является одним из важнейших элементов электрической сети. Значительный парк трансформаторов находится в эксплуатации сверх нормативного срока. В ходе анализа аварийности было установлено, что 60% отказов трансформаторов обусловлено нарушением электрической изоляции [1], а наиболее повреждаемыми элементами были определены обмотки (до 50% отказов) по причинам износа, увлажнения и загрязнения изоляции, выгорания витковой изоляции и витков обмотки [2, 3].

Принимая во внимание старение парка, аварийность и значительную стоимость трансформаторов, необходим анализ и поиск решений повышения их надежности и долговечности.

## РЕСУРСОопРЕДЕЛЯЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Целлюлозная изоляция является ресурсоопределяющим элементом маслonaполненных трансформаторов, а срок ее эксплуатации зависит от ряда факторов: температуры, влагосодержания, качества трансформаторного масла и процессов, происходящих в нем. Так, при температуре 90°C бумага в масле стареет до степени полимеризации 360 примерно за 50 лет. При росте температуры скорость старения возрастает, таким образом, при 100°C старение происходит за 20 лет, а при 110°C — за 5 лет [4]. На скорость старения изоляции также существенно влияет влага, вызывающая необратимую гидролитическую деструкцию. Соответственно, при нормальной работе замена трансформаторов по истечении их назначенного срока экс-

плуатации (25 лет) не оправдана [2, 5], а проведенный капитальный ремонт позволяет восстановить его надежную работу. Однако, при значительном увлажнении, загрязнении изоляции для ее восстановления требуется дорогостоящий капитальный ремонт, при котором работы по восстановлению изоляции могут занимать от 25% до 50% общей длительности (от 3 до 7 дней в зависимости от исходного состояния изоляции). При этом невозможно восстановить состаренную изоляцию, вместе с этим можно уменьшить скорость ее старения.

## ВЛАГА КАК ОДИН ИЗ КЛЮЧЕВЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Состояние изоляционной системы вносит существенный вклад как в общую надежность трансформатора, так и в долговечность и эффективность его эксплуатации. Одним из факторов, влияющих на состояние изоляции, является наличие влаги.

Главным источником воды в трансформаторе является атмосферная влага, которая проникает в трансформатор вместе с воздухом через несовершенные системы защиты от увлажнения [6], а также через уплотнения (в случае их дефекта) под воздействием градиента давления. Вторым источником появления воды в трансформаторе являются процессы старения твердой изоляции и масла, где влага является одним из продуктов старения. Если целлюлозная изоляция сильно состарилась (механическая прочность бумаги на разрыв уменьшилась более чем вдвое), выделение воды в результате воздействия температуры значительно увеличивается (рисунки 1).

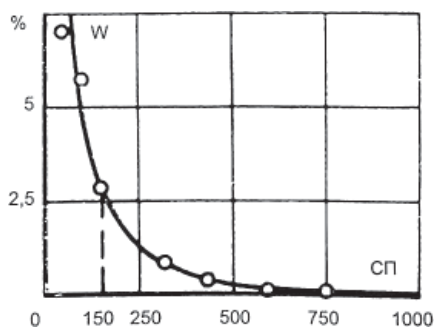


Рис. 1. Образование воды при термическом разложении бумаги: СП — степень полимеризации; W — количество влаги, % веса бумаги [6]

При этом вода растворяется в масле в очень небольших количествах, а ее растворимость зависит от температуры и химического состава масла [7]. Например, в масле ГК (ТУ 38101.1025-85) с содержанием ароматических углеводородов 1,6% растворимость воды при 20°C составляет 37 г/т, при 40°C — 85 г/т, при 70°C — 270 г/т. Соответственно, при резких изменениях условий, например, при сбросе нагрузки с быстрым понижением температуры масло может оказаться перенасыщенным, влага выделится в виде эмульсии — мелких капель, которые имеют тенденцию оседать на твердых включениях, имеющихся в масле, и таким образом влиять на изоляционные характеристики [8].

Вследствие изменения температуры при изменении нагрузки трансформатора и атмосферных условий в работающем трансформаторе происходит постоянное перераспределение влагосодержания между твердой изоляцией и маслом.

Увлажнение твердой изоляции трансформаторов в эксплуатации происходит путем миграции влаги из масла. При этом насыщающее значение влагосодержания целлюлозной изоляции, в отличие от масла, практически не зависит от температуры и составляет около 17% [8].

Влага в трансформаторе оказывает влияние на ухудшение электрической прочности и диэлектрических свойств изоляции. Растворенная влага (до точки насыщения) практически не влияет на электрическую прочность трансформаторного масла. Однако ее влияние существенно возрастает в присутствии механических примесей. При увлажненности твердой изоляции около 1% электрическая прочность изоляции практически не снижается, однако при этом значительно снижается напряжение начала образования ЧР [8]. Ухудшение диэлектрических характеристик ведет к росту потерь с повышенным тепловыделением, соответственно к тепловому пробою и местному перегреву изоляции [9]. В ходе эксплуатации влага может перемещаться и ее содержание может достигать критических значений в наиболее напряженных местах.

Влага влияет на ускорение окислительных процессов в трансформаторном масле, скорость температурного старения целлюлозы и ее гидролитическую деструкцию, что ведет к снижению механической стойкости бумажной изоляции. Так скорость разложения бумаги приблизительно пропорциональна количеству содержащейся в ней воды, что справедливо при содержании влаги в бумаге от 0,3% до 7% и при относительно небольшой степени разрушения бумаги. Например, при увлаж-

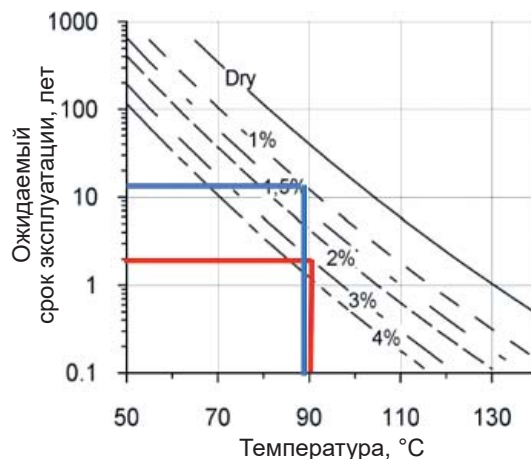


Рис. 2. Зависимость ожидаемого срока эксплуатации трансформатора от температуры эксплуатации и влажности твердой изоляции

ненности твердой изоляции 3%, скорость теплового старения бумаги будет протекать в 30 раз быстрее, чем при влагосодержании 0,3%. При значительном износе бумажной изоляции влияние влаги становится более заметным [8].

Таким образом, влага оказывает влияние на срок эксплуатации изоляции. На рисунке 2 отражена зависимость расчетного срока эксплуатации трансформатора от увлажненности твердой изоляции и температуры его эксплуатации [10].

Из рисунка 2 следует, что при температуре эксплуатации трансформатора 90°C и при влажности бумажной изоляции, равной 1%, расчетный срок службы трансформатора составит приблизительно 14 лет, а при влажности твердой изоляции 3% и той же температуре эксплуатации, расчетный срок службы трансформатора составит примерно 2 года, то есть срок эксплуатации снижается в 6 раз.

Количеством воды определяется способность трансформатора работать под высокой нагрузкой. Влагосодержание изоляции ограничивает предел нагрузки трансформатора, из-за снижения температуры образования пузырьков воздуха [11]. Так под пузырьковым эффектом («bubble effect») понимают стремительное освобождение водного пара из бумажной изоляции трансформатора, вызванного увеличением температуры обмоток свыше критической, что ведет к увеличению давления внутри бака трансформатора — к аварии. Соответственно, трансформатор, например, с влажностью изоляции 0,5%, будет способен работать при почти вдвое более высокой температуре, чем трансформатор с влажностью изоляции 3% [11].

Таким образом, обеспечение оптимальной увлажненности изоляции трансформатора существенно влияет как на срок ее службы, так и на безаварийность эксплуатации.

### ПРЕДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УВЛАЖНЕННОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА

Различные нормативные требования в области контроля влажности изоляции представлены на рисунке 3.

Согласно рисунку 3 можно отметить, что степень влажности до 2% определяет «сухую» изоляцию. Степень влажности от 2% до 3% определяют «среднее увлажнение изоляции», а все, что выше 3%, определяют «влажную» или «чрезмерно влажную» изоляцию (за исключением нормативов ПАО «Россети»). В отношении требований увлажненности у ПАО «Россети» следует отметить, что для трансформаторов, отработавших установ-

ленные нормативные сроки, «допускается значение влагосодержания твердой изоляции эксплуатируемых трансформаторов — 4% по массе» [12, п. 9.3]. Таким образом, указанные нормы позволяют эксплуатировать трансформаторы со сниженной надежностью.

Для поддержания удовлетворительного состояния изоляции работающих трансформаторов применяется система мер. Недостатки классической системы мер отражены в таблице 1.

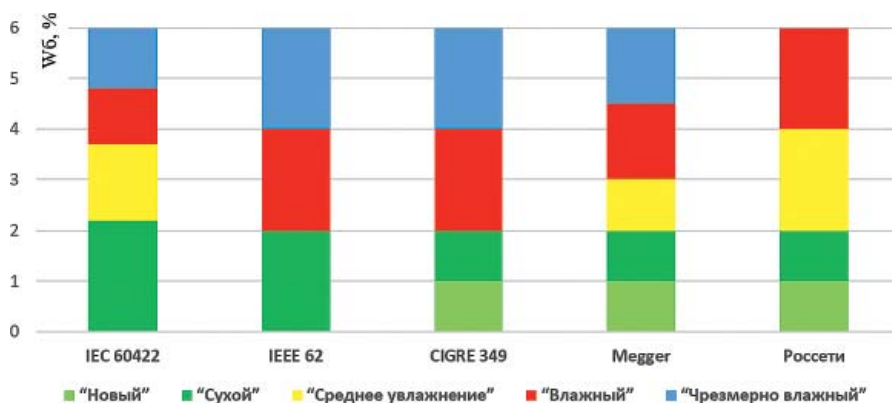


Рис. 3. Нормативные требования степени увлажненности изоляции (W6, %) трансформаторов

## СОВРЕМЕННАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ — АСУ СИТО

Для повышения эффективности эксплуатации трансформаторов, в том числе за рамками нормативного срока эксплуатации, разработана АСУ СИТО «TRANSEC» (торговая марка от англ. Transformer security — безопасность трансформатора).

Система представляет собой адсорбционные колонны специальной конструкции, наполненные молекулярными ситами, оснащенные системой мониторинга для автоматического управления режимами работы (рисунок 4).

Технологический процесс сушки работающего трансформатора системой TRANSEC разработан для обеспечения безопасной работы в течение 24 часов в сутки без участия обслуживающего персонала. В контур трансформатора встраивается циркуляционный насос, прокачивающий масло со скоростью 60–450 л/час через 3 (модель CL3) или 1 (модель CL1) фильтра.

Табл. 1. Недостатки классической системы мер оценки состояния изоляции работающих трансформаторов

| Недостатки мер на работающем оборудовании  | Недостатки мер на обесточенном оборудовании   |
|--|---|
| <b>Воздухоосушительные фильтры</b>   | <b>Текущие, средние ремонты</b>   |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая эффективность моделей старой конструкции.</li> <li>2. Фильтры не предназначены для осушки масла.</li> </ol>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая эффективность осушки чрезмерно влажной изоляции. В ряде случаев краткосрочный эффект.</li> <li>2. Ограничения по продолжительности выполняемых работ.</li> <li>3. Ограничения по мощности применяемых технологических установок (маслоочистительных).</li> </ol>   |
| <b>Термосифонные / адсорбционные фильтры</b>   | <b>Капитальные ремонты</b>  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Фильтры не предназначены для осушки масла.</li> <li>2. Низкая эффективность в увлажненных маслах.</li> <li>3. Зависимость эффективности работы от нагрузки трансформатора.</li> <li>4. Ревизия приоритетно проводится на обесточенном оборудовании.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Требуется наличие специальной оснастки и спецподготовки персонала.</li> <li>2. Ограничения по продолжительности выполняемых работ.</li> <li>3. Конструктивные ограничения в применении ряда методик обработки изоляции.</li> <li>4. Ряд методик имеют негативное воздействие на изоляцию (ослабленную изоляцию): высокотемпературный нагрев.</li> </ol> |



Рис. 4. АСУ СИТО «TRANSEC»:  
 1 — выпускной клапан (возврат масла в трансформатор);  
 2 — деаэрактор;  
 3 — пробоотборный клапан на выходе;  
 4 — датчик влагосодержания и температуры масла на выходе;  
 5 — фильтр микрочастиц;  
 6 — промежуточный воздухоперепускной клапан;  
 7 — быстроразъемные муфты;  
 8 — цилиндры с молекулярным ситом (цеолит);  
 9 — шкаф блока контроля и мониторинга (опция);  
 10 — стравливающий воздушный клапан;  
 11 — фильтр предочистки масла;  
 12 — датчик влагосодержания и температуры масла на входе;  
 13 — индикатор потока;  
 14 — насос;  
 15 — пробоотборный клапан на входе;  
 16 — впускной клапан (вход масла в модуль);  
 17 — рама

Всасывающая линия подсоединена к донному заливочному крану трансформатора, масло возвращается из установки в трансформатор через вентиль в верхней части бака. С помощью одного комплекта цилиндров (3 шт.) можно удалить до 11 литров воды. Система имеет облегченный монтаж на работающий трансформатор, который длится не более 4–5 часов.

АСУ СИТО «TRANSEC» оснащена системой датчиков, осуществляющих измерение влаги масла в PPM и температуру (°C).

Система мониторинга TRANSEC по разработанным алгоритмам производит расчет влагосодержания бумаги в %, определяет насыщение цилиндров. Все сведения выводятся на дисплей (рисунок 5) и транслируются в SCADA и мобильные приложения.

Дополнительно АСУ СИТО «TRANSEC» оснащена системой защиты от протечек и перегрузки насоса.

Функциональными преимуществами TRANSEC являются: работа системы на оборудовании под нагрузкой/напряжением в круглосуточном режиме; работа в автоматизированном режиме; самодиагностируемая система; эффективная система комплексного воздействия на изоляцию в щадящем режиме (осушка твердой изоляции и жидкого диэлектрика).

АСУ СИТО «TRANSEC» прошла успешную апробацию на крупных производственных объектах: ПАО «Россети», АО «Металлургический завод «Петросталь», ООО «Газпром энерго», Корпорации Казахстан. На работающих трансформаторах из изоляции было удалено от 3 до 8 литров воды, соответственно восстановлены изоляционные характеристики, ИТС доведен до значений не менее 80.

Срок окупаемости системы составляет не более 4 лет и приоритетно формируется за счет экономии затрат на капитальные ремонты (уменьшения/исключения объема работ по восстановлению изо-



Рис. 5. Дисплей системы мониторинга АСУ СИТО «TRANSEC»

ляции) и экономии амортизационных отчислений (увеличения долговечности трансформаторов на 15–20 лет). Дополнительный экономический эффект ожидается за счет снижения затрат на аварийно-восстановительные работы (уменьшения количества и последствий отказов трансформаторов).

## ВЫВОДЫ

Изоляция трансформаторов является ресурсопределяющим элементом. Обеспечение оптимальной увлажненности изоляционной системы трансформаторов существенно влияет как на срок ее службы, так и на безаварийность эксплуатации.

Анализ нормативных требований в области контроля изоляции показал их широкое разнообразие. При этом требования ПАО «Россети» являются наименее жесткими и допускают эксплуатацию трансформаторов с влажной (чрезмерно влажной) изоляцией в сравнении с европейскими стандартами (и основными российскими). Существующие традиционные способы поддержания удовлетворительного состояния изоляции трансформаторов малоэффективны.

Предложена современная автоматизированная система управления состоянием изоляции трансформаторов — АСУ СИТО «TRANSEC», позволяющая повысить эффективность и продлить срок эксплуатации трансформатора. **Р**

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов В.В., Лукашук В.А. Вопросы оценки и обеспечения надежности силовых трансформаторов / Соколов В.В. Избранные труды. Сост. А.Г. Овсянников, В.Н. Осотов, В.Н. Бережной. Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010. С. 22–30.
2. Ванин Б.В., Львов Ю.Н., Львов М.Ю., Неклепаев Б.Н., Антипов К.Н., Сурба А.С., Чичинский М.И. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации // Электрические станции, 2001, № 9. С. 53–58.
3. Статистические данные о повреждении трансформаторов. Обзор 12-го комитета СИГРЭ. URL: <http://leg.co.ua/transformatory/praktika/pozharobezopasnost-silovyh-transformatirov-2.html>.
4. Stannett A.W. Problems of water in power transformers. The New Zealand electrical Journal, 1966, 25 June, pp. 163-166.
5. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 216 с.
6. Fabre J., Pichon A. Deteriorating processes and products of paper in oil. Application to transformers, CIGRE, 1960, 137 p.
7. Griffin P., Socolov V. Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation. CIGRE WG 12.18, Site management of transformers.
8. Силовые трансформаторы: справочная книга. Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.
9. Кучинский Г.С., Кизиветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
10. Lundgaard L.E., Hansen W., Linhjell D., Painter T.J. Ageing of oil-impregnated paper in power transformers / IEEE PWRD, 2003.
11. Frimpong G.K., Perkins M., Fazlagic A., Gafvert U. Estimation of Moisture in Cellulose and Oil Quality of Transformer Insulation using Dielectric Response Measurements, Doble Client Conference, Paper 8M, 2001.
12. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Стандарт организации ПАО «Россети». Дата введения: 29.05.2017. М.: ПАО «Россети», 2017. 262 с.