

Опыт применения автоматизированной системы восстановления изоляции маслонаполненного трансформаторного оборудования на объекте АО «Россети Тюмень»

Статья посвящена применению новейших технологий восстановления изоляционных характеристик маслонаполненных силовых трансформаторов (автотрансформаторов) под нагрузкой. В работе изложены основные требования к конструкции автоматизированных систем восстановления изоляции на работающем оборудовании. Представлены результаты успешной апробации автоматизированных модульных систем на 1Т ПС 110/35/6 кВ «Омичка» (ТДТН-16000/110) филиала АО «Россети Тюмень» Когалымские электрические сети.

В процессе эксплуатации под воздействием температуры, электромагнитных полей, кислорода, влаги и образующихся продуктов окисления в изоляции маслонаполненных силовых трансформаторов протекают деграционные процессы, приводящие к изменению физико-химических свойств изоляции, прежде всего диэлектрических характеристик, определяющих ее эксплуатационную пригодность. С точки зрения эксплуатационной надежности и обеспечения долговечности целлюлозной изоляции наиболее вредоносной является влага. Благодаря двум источникам влаги: атмосферной и влаги, образующейся как продукт старения, в процессе работы силового трансформатора, независимо от способа защиты масла, происходит ее постепенное накопление в изоляции, которое впоследствии может привести к отказу.

Существует ряд широко известных способов сушки твердой изоляции, реализуемых на обесточенном оборудовании в период капитальных ремонтов. Данные методы являются трудоемкими процедурами, требующими участия квалифицированного персонала и специальной оснастки, что сказывается на их значительной стоимости. Высокие температуры и вакуум при обработке изоляции могут вызывать коробле-



Денис НЕСТЕРЕНКО, начальник Службы изоляции и защиты от перенапряжений филиала АО «Россети Тюмень» — Когалымские электрические сети



Виталий ЛОПАТИН, главный специалист группы диагностики Департамента эксплуатации АО «Россети Тюмень»



Светлана ВЫСОГОРЕЦ, д.т.н., доцент кафедры ДЭО ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», член-корреспондент АЭН РФ

ние, тепловое старение, термическую деструкцию, локальные перегревы и микроповреждения, в особенности ослабленной изоляции. Необходимость формирования ремонтного режима ослабляет схему электроснабжения потребителя. Зачастую, в силу режимных ограничений, не всегда достаточно времени для проведения качественной сушки изоляции в период капитального ремонта, что сказывается на качестве работ, а, следовательно, на уменьшении межремонтного периода. Поэтому поиск и внедрение технологий, позволяющих проводить восстановление изоляции силовых трансформаторов под нагрузкой в автоматическом режиме, является важной отраслевой задачей.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ НА ОБОРУДОВАНИИ ПОД НАГРУЗКОЙ

Наиболее предпочтительными являются щадящие методы сушки твердой изоляции, не оказывающие негативного влияния на целлюлозную изоляцию, а также предиктивную диагностику. Таким способом автоматического восстановления твердой изоляции может выступать циркуляция в основном баке трансформатора глубоко осушенного изоляционного масла. Так, хорошо высушенное трансформаторное масло способно поглощать воду из более влажной бумажной изоляции [1]. На этом принципе основан метод сушки трансформаторов способом «последовательной обработки масла», согласно которому при заполнении трансформатора сухим маслом с высоким значением электрической прочности и низкой влажности по истечении некоторого времени вследствие перераспределения влаги между бумагой и маслом происходит рост влажности последнего. Масло в трансформаторе вновь подвергается сушке до получения прежних показателей качества. Такие циклы повторяются до приведения изоляции к установленной норме. Этот способ позволяет обрабатывать изоляцию без травмирующего воздействия высоких температур и макромеханического воздействия вакуума, процесс будет протекать медленно, но глубоко осушая как твердую, так и жидкую изоляцию в широком температурном диапазоне. При этом для работы в автоматическом режиме на трансформаторе под нагрузкой технология должна быть оснащена системой мониторинга, что позволит обеспечить контроль основных параметров процесса, а также глубину осушения твердой изоляции и масла.

Для целей сушки изоляции трансформаторов под нагрузкой применяются автоматизированные системы восстановления изоляции (АСВИ), которые наполняют синтетическими цеолитами. АСВИ проводят сушку твердой и жидкой изоляции в автоматическом режиме, благодаря наличию системы сервисных датчиков: тем-

пературы и влагосодержания масла, уровня и скорости потока масла.

В период работы модульной АСВИ проводят мониторинг следующих параметров:

- температуры масла (°С);
- относительного влагонасыщения (%);
- абсолютного влагосодержания масла (г/т);
- влажности твердой изоляции (%);
- суммарного объема перекачанного масла (л);
- скорости потока масла (л/ч);
- веса извлеченной воды (кг);
- остаточного ресурса цеолита (%);
- ориентировочной даты исчерпания ресурса цилиндров с цеолитом;
- уровня масла;
- температуры внутри шкафа электроники (°С).

Для обеспечения самодиагностики модулей АСВИ отслеживается ряд событий, на основе которых срабатывают управляющие уставки:

- ошибки сервисных датчиков;
- перегрев шкафа с электроникой;
- низкий поток масла;
- протечки масла;
- превышение допустимой верхней температуры масла;
- снижение предельной нижней температуры масла;
- пересушка изоляции;
- превышение допустимого уровня относительного влагонасыщения;
- превышение допустимого уровня влажности твердой изоляции;
- низкий остаточный ресурс цеолита.

Важным является удаленный доступ к потоку цифровых данных, на основе которых происходит контроль и управление АСВИ [2].

Следует отметить, что для АСВИ важным является вопрос удаленного контроля исчерпания ресурса синтетических цеолитов. Так, для исключения опасных процессов десорбции при насыщении цеолитов влагой, современные автоматизированные системы восстановления изоляции оснащаются аналитическим аппаратом, определяющим остаточный ресурс цеолита, а также количество извлеченной воды [2]. Наличие возможности контролировать количество (по массе) извлеченной из изоляции воды позволяет оценивать эффективность процесса сушки и, что не менее важно, косвенно оценивать изменение процента влажности бумаги трансформатора.

ВАЖНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Одним их важных функциональных узлов АСВИ являются резервуары адсорбции установленной конструкции,

в которые засыпаются молекулярные сита — синтетические цеолиты с размером пор 3–4 Å. Для засыпки используются следующие марки цеолитов: NaA (ТУ 24.13.52–020-72651045-2019), SYLOBEAD® MS 562 C (№ CAS 1327-36-2, № EINECS 215-475-1) или эквиваленты. Использование данных адсорбентов исключает негативное влияние обработки масла на предиктивную диагностику и качество диэлектрика. Так, указанные молекулярные сита позволяют избирательно извлекать только молекулы воды, не влияя при этом на содержание антиокислительных присадок, важных для обеспечения противоокислительной стабильности жидкого диэлектрика, и содержание фурановых производных, важных для диагностирования деструкции целлюлозной изоляции.

Размер молекул воды близок к размеру пор цеолита NaA, что обеспечивает ее глубокое избирательное удаление из трансформаторного масла даже при низком содержании, а полярность цеолитов обеспечивает высокую скорость процесса [3].

Следующим, не менее важным узлом модуля является фильтр тонкой фильтрации. Задача тонкой фильтрации сводится к улавливанию мелких пылевидных гигроскопичных частиц цеолита, исключая их попадание в основной бак трансформатора. Появление значительного количества гигроскопичных механических примесей в трансформаторном масле даже с незначительным содержанием влаги приводит к ухудшению его электроизоляционных характеристик. При этом опасность мелких загрязнений размером 5 мкм заключается еще и в их высокой способности проникать внутрь твердой изоляции, меняя ее электрофизические свойства [4]. Это одна из причин, не допускающая засыпку цеолита в штатные термосифонные/адсорбционные узлы трансформатора.

Важным в эксплуатации АСВИ является создание насосами принудительного потока масла с установленной скоростью не более 450 л/ч (0,0068 м/с). Это важно для недопущения ухудшения охлаждающих свойств масла [2]. При этом указанная скорость потока масла является достаточной для эффективной сушки жидкого диэлектрика синтетическими цеолитами в динамических условиях [5].

Присоединение модулей АСВИ к маслосистеме трансформаторов проводится к штатным точкам: сливному вентилю (забор масла) и вентилю для заливки и фильтрации масла (возврат масла), что исключает необходимость специального согласования точек подключения АСВИ с заводами-изготовителями трансформаторов. Наличие в конструкции АСВИ деаэраторов позволяет обеспечить подключение АСВИ к трансформатору под нагрузкой без риска попадания пузыря воздуха в основной бак.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКЕ

В 2022 году в течение шести месяцев (с февраля по август) на 1Т ПС 110/35/6 кВ «Омичка» (ТДТН-16000/110) филиала АО «Россети Тюмень» Когалымские электрические сети была проведена опытно-промышленная эксплуатация (ОПЭ) модуля автоматизированной системы восстановления изоляции (тип TR.CL.3-WS-A-5-I-6.1-УХЛ1, Россия, НПО «Стример»). Целью апробации технологии являлось приобретение опыта эксплуатации и оценка ее эффективности.

ОПЭ проводилась на силовом трансформаторе типа ТДТН-16000/110, 1980 года выпуска, залитом смесью масел массой 14,26 тонн, имеющим массу твердой изоляции в пределах 1355 кг.

Исходное состояние изоляционной системы трансформатора по результатам плановой диагностики было следующим:

- влажность твердой изоляции, измеренная методом диэлектрической спектроскопии, составляла 3,1%, что не превышало установленной нормы, согласно требованиям [6]. При этом расчетное значение влажности твердой изоляции по равновесным кривым Ооммена составило 2,95%, что не противоречит указанному измеренному значению;
- сопротивление и тангенс угла диэлектрических потерь изоляции обмоток находились в пределах установленной [6] нормы (таблица 1);
- влагосодержание эксплуатационного масла было неудовлетворительным — превышало значение, ограничивающее область нормального состояния [6], на 45% и составляло 36 г/т;
- пробивное напряжение эксплуатационного масла было неудовлетворительным — ниже значения, ограничивающего область нормального состояния [6], на 3,5% и составляло 28,6 кВ.

Дополнительно в августе 2021 года (до начала ОПЭ) проводился прогрев указанного трансформатора в течение трех дней с последующим измерением параметров эксплуатационного масла: влагосодержания и пробивного напряжения. Из результатов, представленных в таблице 2, следует, что с ростом температуры верхних слоев масла наблюдался некоторый рост влагосодержания. При этом пробивное напряжение изменялось незначительно, так как установленное

Табл. 1. Исходные диэлектрические характеристики изоляции (измерения августа 2021 года, температура обмоток + 41°C)

Схема измерения	$R_{60}/R_{60_{603}}^*$, %	$tg\delta/tg\delta_{603}^*$, % (прирост)
ВН-СН, НН, бак	512	+35
СН-ВН, НН, бак	106	+59
НН-ВН, СН, бак	164	+26

Табл. 2. Результаты контрольных измерений параметров масла в период прогрева трансформатора

Дата прогрева трансформатора под нагрузкой	Влаго-содержание масла, г/т	Пробивное напряжение, кВ	Температура верхних слоев масла, °С
5 августа 2021 года	39	30	58
6 августа 2021 года	42	30	65
7 августа 2021 года	39	36	60



Рис. 1. Модуль TRANSEC, смонтированный на 1Т ПС 110/35/6 кВ «Омичка» (ТДТН-16000/110) филиала АО «Россети Тюмень» Когалымские электрические сети

количество воды в данном масле не превышало пределов насыщения для установленной температуры, соответственно, находилось в растворенном состоянии и не оказывало существенного влияния на напряжение пробы.

По результатам проведенных измерений и расчетов было установлено:

- общий вес воды в трансформаторе (бумага + масло) составил 40,8 литров;
- общий вес воды в твердой изоляции (бумаге) трансформатора составил 40,2 литра;
- общий вес воды в эксплуатационном трансформаторном масле составил 0,6 литров.

Таким образом полученное общее распределение воды в разных компонентах изоляции не противоречит исследованиям ряда авторов [7, 8].

Эксплуатационной особенностью трансформатора, предусмотренного для обработки АСВИ, являлось наличие малого межремонтного периода. Так, при проведении средних ремонтов по восстановлению характеристик жидкого диэлектрика классическими методами (с применением вакуумных маслоочистительных систем) достигаемый результат на данном трансформаторе был краткосрочным, что обусловлено избыточным увлажнением твердой изоляции, согласно требованиям [9], и эффектам перетока влаги в среде «масло-целлюлоза» при нарушении равновесного состояния [7, 8].

С целью осушки изоляции 1Т ПС 110/35/6 кВ «Омичка» АСВИ была установлена в маслочаше в виде отдельно стоящего элемента в шкафу наружной установки (рисунок 1).

После 6 месяцев работы АСВИ на объекте отмечены улучшения параметров изоляции трансформатора. Показатели качества эксплуатационного масла приведены в норму — улучшены на 61% по влагосодержанию и на 70% по пробивному напряжению (рисунок 2).

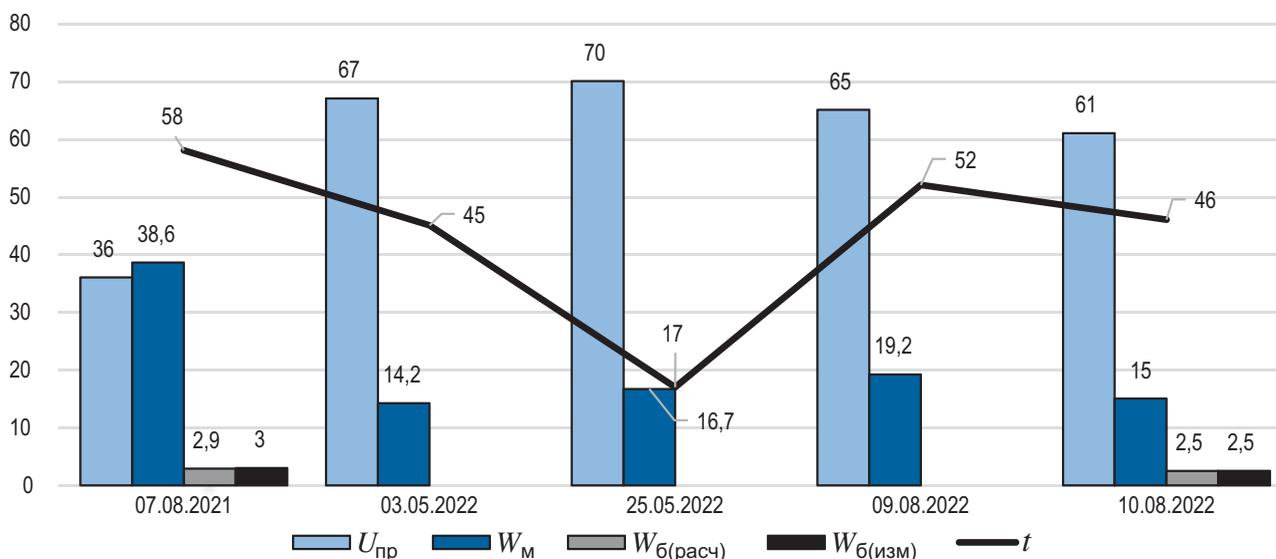


Рис. 2. Изменение пробивного напряжения масла, влажности твердой и жидкой изоляции с учетом влияния температуры верхних слоев масла в период апробации TRANSEC на 1Т ПС 110/35/6 кВ «Омичка»

Влагосодержание твердой изоляции улучшено на 17% (рисунок 2), что подтверждено инструментальными измерениями методом диэлектрической спектроскопии. При этом установлено, что удалено 7,2 кг воды, которое сопоставимо с процентами снижения влажности изоляции (на 0,5%).

Сопротивление и тангенс угла диэлектрических потерь изоляции обмоток улучшены в среднем на 79% (рисунок 3) и 30% (рисунок 4) соответственно.

В ходе ОПЭ проводился мониторинг ряда параметров, измеряемых сервисными датчиками АСВИ. По результатам мониторинга на фоне колебаний температуры масла зафиксирован некоторый тренд снижения относительного влагонасыщения масла на входе в модуль ($RS_{\text{вход}}$) — с 23,4% до

15,9%, что указывает на общее снижение влажности изоляции (рисунок 5).

При этом наблюдается постепенное уменьшение разницы значений относительного влагонасыщения масла на входе ($RS_{\text{вход}}$) и выходе ($RS_{\text{выход}}$) из резервуаров адсорбции АСВИ, что указывает на исчерпание ресурса цеолита.

Измеренные сервисными датчиками АСВИ температуры масла на входе ($t_{\text{вход}}, ^\circ\text{C}$) и на выходе ($t_{\text{выход}}, ^\circ\text{C}$) из резервуаров адсорбции сопоставимы и изменяются в ходе ОПЭ в широких пределах — от минус 5,9 $^\circ\text{C}$ до плюс 34,1 $^\circ\text{C}$. Это указывает на влияние климатической температуры на охлаждение масла в маслопроводах АСВИ. Учитывая зависимость растворимости воды в трансформаторном масле от его тем-

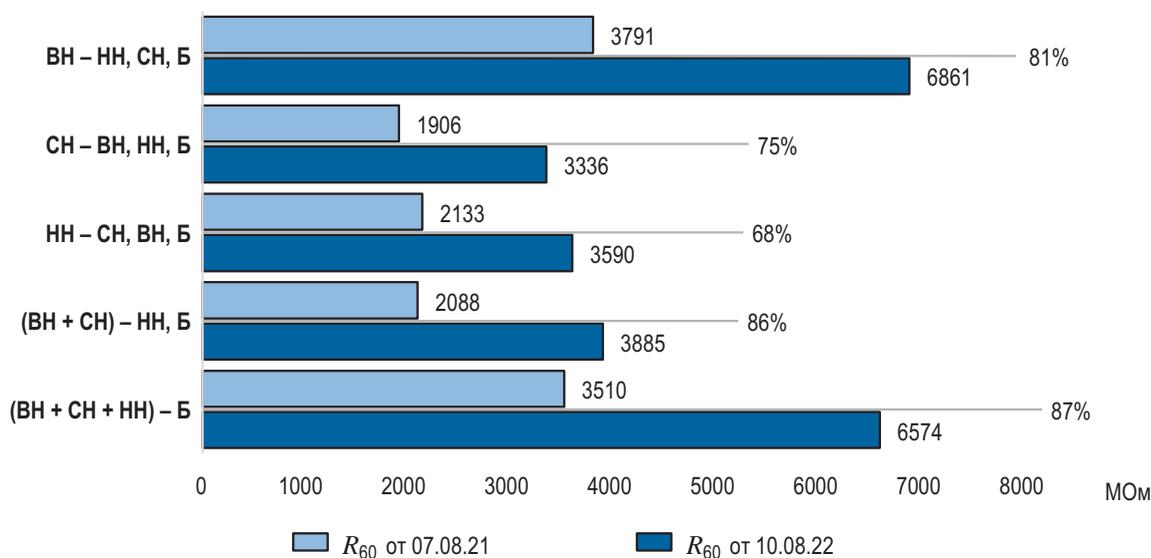


Рис. 3. Изменение сопротивления изоляции обмоток в период апробации TRANSEC на 1Т ПС 110/35/6 кВ «Омичка»

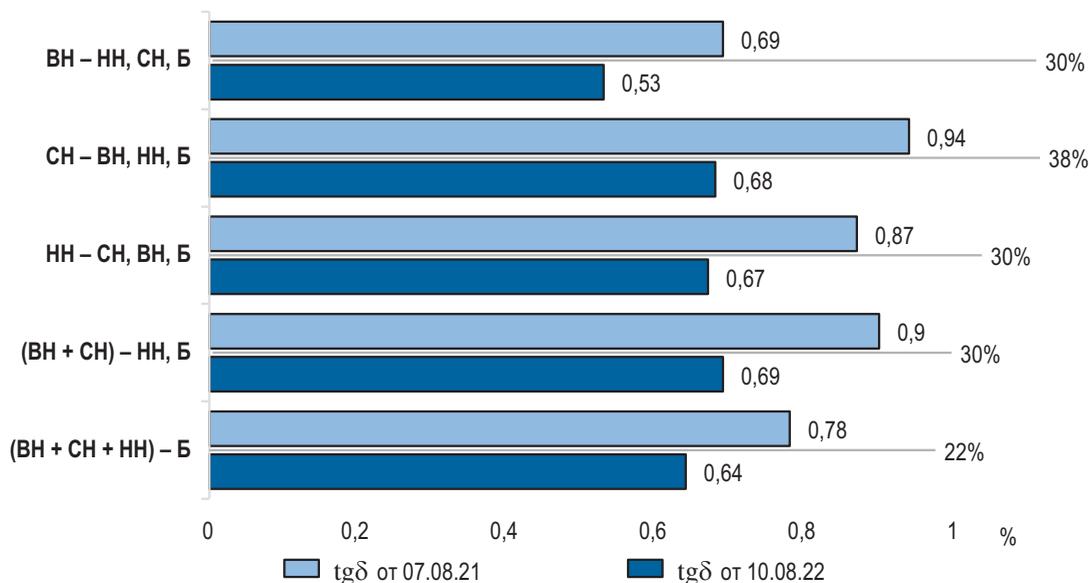


Рис. 4. Изменение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции обмоток в период апробации TRANSEC на 1Т ПС 110/35/6 кВ «Омичка»

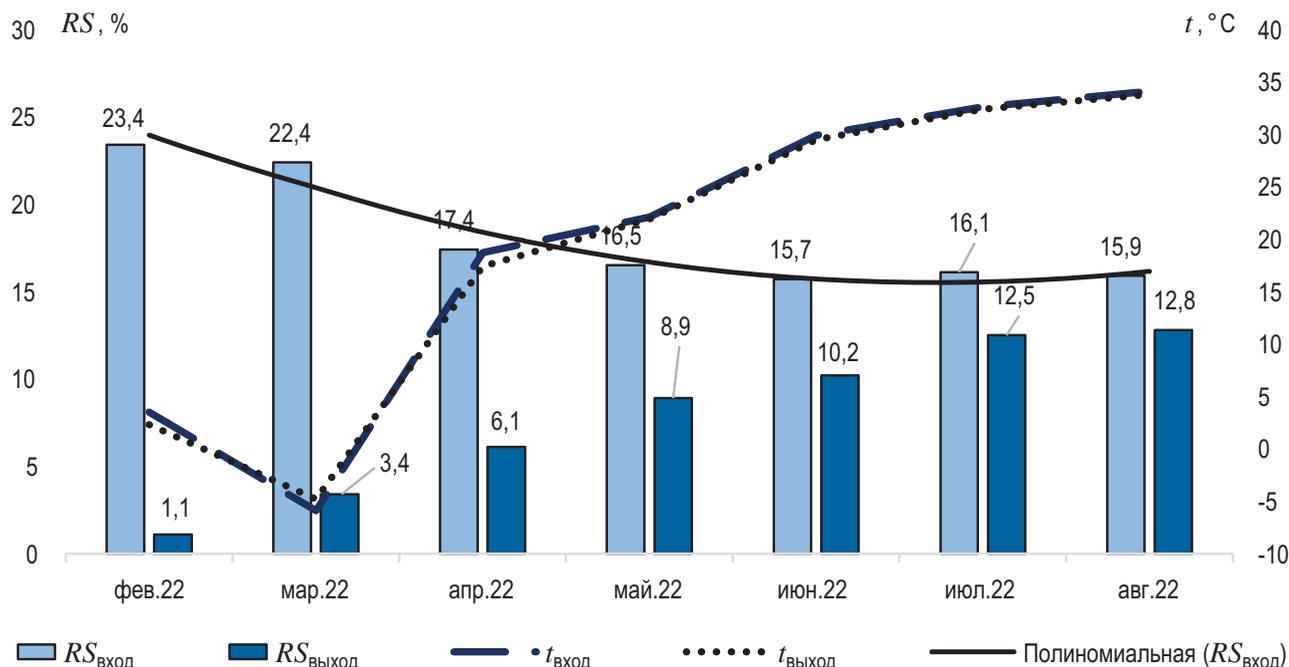


Рис. 5. Изменение относительного влагонасыщения масла на входе и выходе из резервуаров адсорбции TRANSEC с учетом влияния температуры масла трансформатора в период апробации на 1Т ПС 110/35/6 кВ «Омичка»

пературы [7, 8], указанные колебания температур влияют на эффективность сушки твердой изоляции модулем. Так, принимая во внимание способность цеолита извлекать воду в достаточно широких температурных пределах, АСВИ функционально [2]:

- при низких температурах (зимний период) удаляет избыточную влагу только из жидкой изоляции, так как при низких температурах растворимость воды в масле незначительная, что не обеспечивает ее диффузию из бумаги в жидкий диэлектрик;
- при высоких температурах активно удаляет избыточную влагу как из твердой, так и из жидкой изоляции, так как существенно растет растворимость воды в масле, влияющая на ее диффузию из бумаги в осушенный жидкий диэлектрик, с последующим извлечением цеолитом.

Таким образом за 6 месяцев ОПЭ модульная система АСВИ позволила на работающем трансформаторе 1Т ПС 110/35/6 кВ «Омичка» в автоматическом режиме без привлечения дополнительного персонала провести восстановление изоляционных характеристик до установленных [6] норм.

Лепестковая диаграмма (рисунок 6) демонстрирует зависимость влагонедержания масла от температуры верхних слоев масла бака трансформатора, что также обуслов-

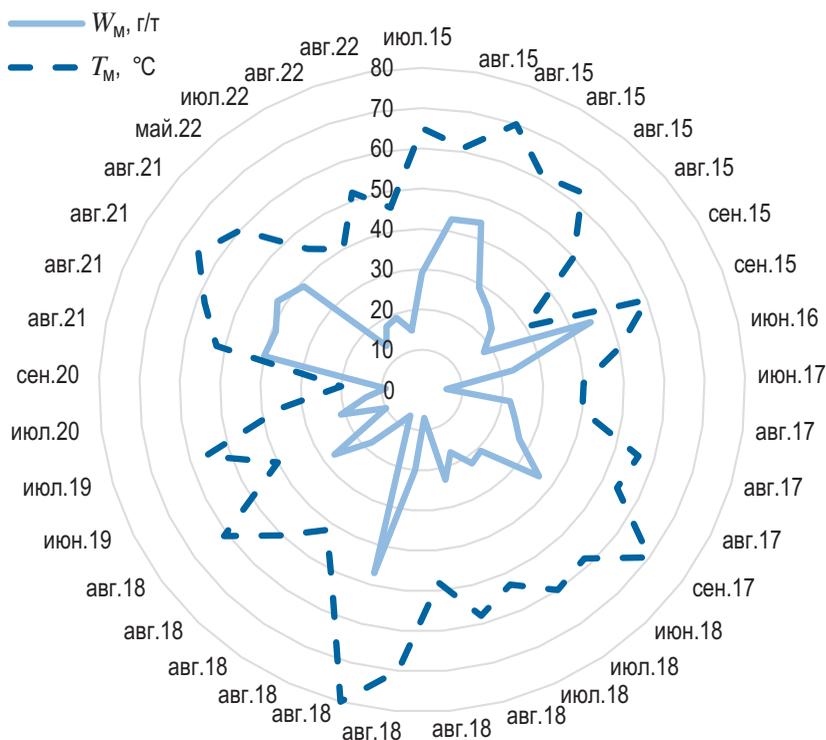


Рис. 6. Зависимость влагонедержания масла от температуры верхних слоев масла бака трансформатора

лено влиянием температуры на растворимость воды в нем. Указанное влияние и нестабильность температуры среды в ходе работы технологии усложняет оценку изменения влагосодержания масла. Однако исходные и конечные контрольные пробы были отобраны в условиях относительно близких температур верхних слоев масла, что позволяет их сравнивать и констатировать общее улучшение состояния изоляции по итогам работы АСВИ.

Указанные выше наблюдения отражают принципиальное значение температуры масла при отборе пробы на корректную оценку полученного значения влажности жидкого диэлектрика как фактора, косвенно характеризующего увлажнение целлюлозной изоляции трансформатора.

ВЫВОДЫ

Влага — злейший враг изоляции, влияющий на эксплуатационную надежность силовых трансформаторов (автотрансформаторов). Существующие традиционные способы ее

сушки технико-экономически не эффективны. Наиболее предпочтительными технологиями восстановления изоляции являются автоматизированные системы — АСВИ, работающие на оборудовании под нагрузкой с использованием щадящих методов, не влияющих на предиктивную диагностику.

Проведенная опытно-промышленная эксплуатация АСВИ установленного типа в филиале АО «Россети Тюмень» Когалымские электрические сети на 1Т ПС 110/35/6 кВ «Омичка» (ТДТН-16000/110) показала успешное восстановление изоляционных характеристик без формирования ремонтного режима электроустановки.

Дополнительно в ходе опытно-промышленной эксплуатации было подтверждено влияние температуры верхних слоев масла бака трансформатора при отборе пробы на корректную оценку полученного значения влагосодержания жидкого диэлектрика как фактора, косвенно характеризующего увлажнение целлюлозной изоляции трансформатора. ➡

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбаков Л.М., Иванова З.Г., Макарова Н.Л. Обслуживание элементов и оборудования электроустановок по результатам диагностирования состояния. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2015. 318 с.
2. Высогорец С.П., Редькин С.М., Житенев М.В. Поиск современных инженерных решений автоматического управления техническим состоянием изоляции трансформаторов // Материаловедение. Энергетика, 2021, т. 27, № 3. С. 50–62.
3. Тутубалина В.П., Гайнуллина Л.Р. Осушка трансформаторного масла адсорбентами на электрических станциях. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. 114 с.
4. Юсупов Д.Т., Юсупов Ш.Б., Маркаев Н.М. Влияние механических примесей на эксплуатационные характеристики трансформаторного масла // Молодой ученый, 2019, № 22(260). С. 144–146.
5. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1984. 591 с.
6. СО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Утвержден распоряжением ПАО «Россети» от 29.05.2017 № 280р «Об утверждении стандарта организации». 262 с.
7. Аракелян В.Г. Диагностика состояния изоляции маслонаполненного электрооборудования по влагосодержанию масла // Электротехника, 2004, № 3. С. 2–13.
8. Лизунов С.Д. Сушка и дегазация изоляции трансформаторов высокого напряжения. М.: Энергия, 1971. 128 с.
9. СО 34.45-51.300-97, РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005329>.

Хренников А.Ю.

Техническая диагностика и аварийность электрооборудования

Учебно-методическое пособие. ЛИТРЕС, 2021. 230 стр., 154 ил.

Представлен анализ методов диагностики состояния электрооборудования для выявления дефектов и повреждений в процессе эксплуатации. Эффективность применения методов диагностики сопровождается примерами обнаружения дефектов и повреждений конкретного оборудования: силовых трансформаторов, реакторов, трансформаторов тока и напряжения, разъединителей, турбогенераторов, ОПН и т.д. Приведены примеры повреждений и расследования технологических нарушений. Рассмотрены вопросы электродинамических испытаний силовых трансформаторов на стойкость к токам КЗ, которые служат инструментом для повышения надежности их конструкции. Предназначено для руководителей и специалистов технических служб предприятий электрических и распределительных сетей, станций, подразделений технической инспекции (ТИ) и служб охраны труда и надежности филиалов МЭС ПАО «ФСК ЕЭС» и ПАО «Россети», слушателей курсов повышения квалификации, а также для аспирантов, магистрантов и студентов электроэнергетических специальностей.



Книгу можно приобрести в интернет-магазине электронных книг «ЛитРес» в разделе «Техническая литература»