

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Виктор Соколов. Научно-инженерный центр «ЗТЗ-Сервис»

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы отмечен значительный интерес к технологической обработке трансформаторов под напряжением, в частности к восстановлению характеристик масла, сушке и регенерации изоляции. По опросу 1992 г девять клиентов фирмы "Doble" (США) ответили, что проводят восстановительные работы на работающих трансформаторах.

В настоящее время имеется очевидная тенденция к внедрению подобных процедур для трансформаторов напряжением до 500 кВ.

Очевидная экономическая выгода способствует быстрому развитию технологий обработки. Помимо традиционного технологического оборудования, появились новые технологические системы таких фирм как Fluidex, Pall, Velcon и др.

Некоторые методы обработки имели положительные результаты в течение последних 25 – 40 лет.

В бывшем СССР для всех трансформаторов выше 2.5 МВА применялись постоянные системы регенерации (патроны, заполненные силикагелем); автотрансформаторы 1150 кВ и некоторые специальные трансформаторы 750 и 500 кВ (с повышенной рабочей напряженностью) были оснащены постоянными фильтрующими системами, которые эксплуатировались более 25 лет.

Первый положительный опыт сушки трансформаторов 500 кВ под напряжением был получен в СССР в начале 1970-х годов (использовались молекулярные сита).

Положительный опыт дегазации трансформаторов 330-750 кВ под напряжением имелся на некоторых энергопредприятиях Украины («Донбассэнерго»).

Необходимо отметить несколько факторов, создающих технические и психологические препятствия для широкого распространения технологической обработки трансформаторов под напряжением:

- Риск отказа оборудования из-за проникновения в бак воздуха, пузырьков, частиц и других примесей, снижения уровня масла, возникновения статической электризации,
- Риск повреждения при обработке «больного» трансформатора,
- Длительное время и высокая стоимость обработки: например, сушка может продолжаться несколько месяцев, что приводит к значительным затратам на технологическую обработку.

Однако в общем случае можно утверждать, что если трансформатор функционально пригоден к эксплуатации, любое улучшение его состояния может быть выполнено без отключения. Необходимо только убедиться в полноте принятых соответствующих мер безопасности.

Целью данной статьи является освещение проблем, связанных с технологической обработкой трансформаторов под напряжением, а также стимулирование исследований СИГРЭ по разработке технологического оборудования, в частности для технологической обработки трансформаторов под напряжением.

2. ЦЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

А. Восстановление изоляции состаренных трансформаторов, имеющих:

- Состаренное масло,
- Загрязнение целлюлозной изоляции продуктами старения масла,
- Высокое содержание воздуха в масле,
- Загрязнение масла влагой и мехпримесями,
- Загрязнение масла полихлорбифенилами.

В. Восстановление технического состояния дефектных трансформаторов, у которых:

- имеется источник газообразования (например, локальный перегрев),
- имеется источник загрязнения масла мехпримесями (углерод, металл),
- твердая изоляция сильно увлажнена,
- твердая изоляция сильно загрязнена шламом или другими агрессивными продуктами старения масла.

С. Восстановление изоляционной системы как часть программы по продлению срока службы трансформаторов.

Такая программа должна включать комплекс процедур, направленных на восстановление запасов электрической прочности изоляции посредством сушки, очистки, дегазации изоляционной системы, а также на предотвращение ее дальнейшего износа путем удаления продуктов старения и кислорода из масла и твердой изоляции.

Некоторые общие соображения по программе технологической обработки:

- Эффективная программа обработки должна основываться на достоверных результатах оценки технического состояния,
- Наиболее важными процедурами, направленными на продление срока службы, являются: удаление влаги, мехпримесей и агрессивных продуктов старения из масла, а также (что особенно важно!) извлечение и удаление продуктов старения масла из твердой изоляции,
- В некоторых случаях, особенно при состаренном масле, необходимым является моделирование технологического процесса для выбора оптимального и эффективного метода (например, для выбора типа и количества регенерирующей земли),
- Технологический процесс всегда можно минимизировать, если учитывать реальное техническое состояние трансформатора.

3. ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Вода, кислород, продукты старения масла (особенно кислоты) и механические примеси различного происхождения являются теми факторами, которые приводят к деградации изоляции и могут существенно уменьшить срок службы трансформатора в условиях высоких тепловых, электрических, электромагнитных и электродинамических воздействий.

Процесс ухудшения состояния изоляции включает в себя медленную диффузию воды, газов и продуктов старения и затрагивает в основном только часть изоляции, так называемую «тонкую изоляцию» (бумажная изоляция витков и катушек, барьеры из электрокартона и т.п.), которая составляет обычно 40-60% от общей массы изоляции. «Активная доля» изоляции в трансформаторах 35-110 кВ гораздо меньше, чем в трансформаторах 150-400 кВ, поэтому упрощенное представление трансформатора в виде 2-компонентной системы (масса масла – масса твердой изоляции) может приводить к неправильным выводам.

Например, твердая изоляция РПН состоит, в основном, из водостойких материалов и проникающая вода остается, как правило, в масле. Прогнозирование влагосодержания твердой изоляции РПН на основе равновесного распределения влаги в данном случае неприемлемо. Аналогичная картина наблюдается в большинстве трансформаторов 35кВ и даже 110 кВ, в которых количество водопоглощающей изоляции относительно мало.

Поэтому 30 ppm воды в масле при 20°C еще не означает, что влагосодержание изоляции превышает 5%. Это практически невозможно. Более вероятно, что вода аккумулировалась маслом или скопилась на дне бака.

Степень деградации изоляции (деполимеризации) пропорциональна влагосодержанию и кислотному числу. Поэтому оценка «остаточного ресурса» изоляции является достоверной только в том случае, когда учтены указанные выше факторы.

Невозможно восстановить до исходного состояния целлюлозную изоляцию, изношенную в результате старения, но вполне возможно восстановить обратимые изменения и практически восстановить начальные запасы прочности.

Можно также снизить скорость дальнейшего износа изоляции. Вполне очевидно, что «восстановление» означает в первую очередь очистку трансформатора, в частности, удаление влаги, мехпримесей, продуктов старения и адсорбированных газов.

Необходимо всегда различать естественную деградацию изоляции, которая происходит под воздействием температуры, кислорода, механического трения, проникновения воздуха и влаги через систему дыхания, предусмотренную конструкцией, и аномальную деградацию, которая происходит с участием дефекта. В последнем случае важным является идентификация дефекта и его устранение (или рекомендации по устранению).

Следующие типичные случаи могут иметь место:

- Повышенное содержание воды в масле, вызванное проникновением свободной воды из-за недостаточной герметичности, например, через ввод протяжной конструкции. Эффективным методом оценки и устранения проблемы является испытание на герметичность посредством приложения избыточного давления,
- Чрезмерное старение масла, особенно в герметичных трансформаторах, связанное с местным или общим перегревом. Выявить проблему можно при помощи ХАРГ,
- Наличие частиц металла и углерода, как правило, вызванное износом насосов или местным перегревом. Идентифицировать проблему можно при помощи ХАРГ, вибрационных и акустических испытаний.

Предположение о высоком влагосодержании твердой изоляции можно подтвердить или опровергнуть при помощи опыта Water Heat Run Test [14]. Этот метод очень полезен для оценки состояния эксплуатируемого оборудования и выбора подходящего метода технологической обработки.

Относительно плохое состояние трансформатора не должно служить препятствием для технологической обработки под напряжением, проводимой для улучшения его технического состояния. Если трансформатор находится в эксплуатации и выдерживает эксплуатационные воздействия, то процесс улучшения его состояния не может причинить вреда. Единственным вопросом остается – насколько тщательно предусмотрены меры безопасности.

4. МЕТОДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Необходимо иметь в виду, что практически все загрязняющие примеси распределяются в определенном соотношении между маслом и твердой изоляцией. Значительное количество газов и продуктов старения масла концентрируется в целлюлозе.

Масло является средой, переносящей воду. Вода присутствует в масле в растворенном виде, а также в «гидратированном» виде, когда она абсорбирована полярными продуктами старения (ароматическими соединениями) и мехпримесями. При использовании метода Карла Фишера измеряется практически только растворенная, а не связанная вода. В результате, как правило, мы получаем заниженное влагосодержание, особенно в состаренных маслах.

В некоторых случаях для снижения влагосодержания достаточно лишь тщательно про- фильтровать масло. Запасы электрической прочности увлажненной главной и продольной изоляции трансформатора определяются электрической прочностью масла. Опасность растворимой воды заключается в резком снижении электрической прочности масла с ростом его влагосодержания из-за повышения удельной проводимости имеющихся мехпримесей. Чем меньше содержание мехпримесей, тем слабее влияние воды на электрическую прочность масла.

Эффективная технологическая обработка включает в себя сушку и фильтрацию, которые выполняются одновременно.

Для улучшения запасов электрической прочности можно рекомендовать следующее:

- Не допускать образования пузырьков,
- Удалить свободную воду,
- Удалить мехпримеси, особенно крупные и проводящие,
- Удалить растворенную воду,
- Удалить продукты старения масла.

Вода в витковой изоляции ускоряет деструкцию изоляции, вызванную старением. Деструкция целлюлозы пропорциональна содержанию воды. Этот процесс становится более опасным в присутствии кислот и полярных продуктов некислотного происхождения. Если предотвратить абсорбцию продуктов старения изоляцией, то это может значительно снизить опасное влияние воды, в том числе в отношении температуры образования пузырьков.

Если на энергопредприятии возможна работа трансформатора с перегрузками, то настоятельно рекомендуется восстановление изоляционной системы.

Таким образом, программа технологической обработки должна включать в себя проведение одновременного комплекса следующих процедур: сушка, фильтрация и удаление продуктов старения.

4.1 Следующие хорошо известные и апробированные виды технологической обработки могут проводиться на трансформаторах под напряжением:

- Сушка масла,
- Дегазация масла,
- Регенерация масла,
- Фильтрация масла,
- Очистка изоляции за счет фильтрации масла,
- Сушка изоляции посредством сушки масла,
- Регенерация (удаление шлама) изоляции с использованием масла в качестве растворителя,
- Удаление полихлорбифенилов.

Следует различать активные и пассивные методы технологической обработки.

В активных методах масло принудительно пропускается через фильтр, вакуумную дегазационную установку, адсорберы с Фуллеровой землей. Этот подход позволяет контролировать и ускорять процесс, хотя и имеет некоторые недостатки (наладка, обслуживание с помощью оператора, затраты электроэнергии).

В пассивных методах используется система патронов, заполненных сорбентом, подсоединенная к баку или охладителям (например, метод «Dry Keep»). Пассивные методы гораздо более экономичны, однако более продолжительны.

Сравним эффективность технологической обработки маслонаполненного трансформатора под напряжением и в отключенном состоянии.

Эффективность метода зависит от физических процессов используемых для технологической обработки.

Методы, основанные на диффузионных процессах: восстановление характеристик масла, вакуумная дегазация (диффузия через масляную пленку), сушка целлюлозы и др. - более эффективны при высоких температурах.

Методы, основанные на абсорбционных процессах: сушка масла с помощью абсорбционного фильтра (например, бумажного), восстановление цвета и др. – более эффективны при низких температурах.

4.2 Сушка и дегазация масла термовакuumным методом

Данный метод заключается в удалении из масла определенного объема газа (воздуха) и водяных паров. Для удаления находящегося в масле воздуха и паров параметры технологической обработки (скорость потока масла, остаточное давление и температура) должны быть скорректированы с производительностью вакуум-насоса.

Масло обычно содержит 9 - 11% воздуха и 3 - 5% паров воды.

Весовое содержание воды 10 г/т соответствует 1,2 – 1,3% по объему. 1 грамм воды при остаточном давлении 1 мм рт. ст. занимает объем примерно 1 м³ (при 0,5 мм рт. ст. – соответственно 2 м³).

При скорости потока масла 5 м³/час для удаления из масла 11% растворенного воздуха и 50 г/т воды при 60°C и 0,5 мм рт. ст. производительность насоса должна быть выше 1080 м³/час. Параметры технологического процесса должны быть выбраны такими, чтобы удалить желаемое количество «газо-водяной» смеси за один цикл.

Оптимизация процесса дегазации достигается за счет использования наиболее эффективных этапов этого процесса.

В работе вакуум - дегазационной установки можно выделить следующие два этапа:

а) Интенсивное извлечение растворенного воздуха и воды из масла под вакуумом приводит к вспениванию, что, в свою очередь, вызывает интенсивное диффузионное выделение газа и пара из масла. Этот этап дегазации является наиболее эффективным и не требует глубокого вакуума и высокой температуры.

в) Относительно медленная диффузия газа из струй масла, которые вытекают из разбрызгивателей или распыляются, образуя туман. Этот процесс требует довольно высокой температуры и глубокого вакуума.

Важно не допустить выхода пены из вакуумной камеры. Объем пены примерно в 8 раз больше объема самого масла, а оседание пены происходит примерно за 60 секунд.

Для выполнения вышеуказанных требований поток масла должен в 8 раз превышать объем вакуумной камеры. Склонность к вспениванию различна для разных масел.

Фирма «Doble» не рекомендует использовать масло со склонностью к вспениванию более 150 мл (испытание по стандарту D892).

Сушка и дегазация масла не требуют очень высокой температуры и глубокого вакуума. Необходимый уровень сушки достигается при средней температуре масла 40-50°C и вакууме 1-0,5 мм рт. ст.

Эффективность технологической обработки трансформатора под напряжением и на отключенном трансформаторе практически одинакова.

Важным преимуществом технологической обработки трансформатора под напряжением является возможность использовать внутренние потери трансформатора. Поэтому такая обработка более экономична, чем обработка на отключенном трансформаторе, если необходим дополнительный нагрев масла.

4.3 Сушка изоляции посредством сушки масла

Этот процесс требует гораздо более высокой температуры, чем сушка только масла. Для достижения низкого влагосодержания необходимо обеспечить очень низкую относительную влажность масла.

Количество воды в масле прямо пропорционально относительной влажности масла. Важным параметром является растворимость воды в масле.

Зависимость влагосодержания масла W_S от температуры T можно выразить в виде:

$$W_S = W_0 \exp (- B / T)$$

где: W_0 и B – константы, в основном зависящие от содержания ароматики в масле. Величины констант и максимальная растворимость воды для некоторых масел указаны в представленной ниже таблице. Зная содержание ароматики в масле, можно легко определить параметры растворимости.

Масло №3 можно использовать в качестве прототипа состаренного масла.

Для масел №1 и №2 влагосодержание 50ppm при 20°C превышает максимальную растворимость воды в масле. Но при 40°C уровень 50 г/т соответствует примерно 50% от максимальной растворимости, а при 70°C – только 16-18%.

Номер масла	Содержание ароматики C_A , %	W_0	B	Макс.растворимость, ppm		
				20 °C	40 °C	70 °C
1	5	$16.97 \cdot 10^6$	3777	42.8	97.5	279

Номер масла	Содержание ароматики С _А , %	W ₀	B	Макс.растворимость, ppm		
				20 °C	40 °C	70 °C
2	8	23.08 · 10 ⁶	3841	46.8	108	316
3	16	22.76 · 10 ⁶	3783	56.2	128.3	369.2
4	21	13.16 · 10 ⁶	3538	75	162	436
5	Кремний-органическое масло	1.9525 · 10 ⁶	2733	174	314.7	675.4

Для достижения влагосодержания целлюлозы около 2% относительная влажность φ «горячего» масла должно быть менее 8%. Если необходимо обеспечить влагосодержание масла в трансформаторе на уровне 15 ppm, то можно определить начальную температуру сушки. Например, для масла №2:

$$T = \frac{(-B)}{\ln\left(\frac{W_{oil}}{\varphi \cdot W_o}\right)} = \frac{(-3841)}{\ln\left(\frac{15}{0,08 \cdot 23,08 \cdot 10^6}\right)} = 328K (\approx 55^\circ C)$$

Для достижения влагосодержания в целлюлозе на уровне 1% температура сушки должна быть выше 70°C, а содержание воды в масле должно поддерживаться на уровне менее 10 ppm. Опыт показал, что сушка сильно увлажненной изоляции посредством циркуляции масла через осушитель требует высокой температуры и длительного времени и практически является менее эффективным методом, чем сушка трансформатора без масла.

С другой стороны, технологическая обработка трансформатора под напряжением однозначно более эффективна, чем на отключенном трансформаторе из-за возможности использовать внутренние потери трансформатора в качестве источника тепла.

Технологическая обработка под напряжением может быть очень эффективной в случае использования «пассивных методов» [1].

Два патрона, заполненных цеолитом массой 200 кг, способны за несколько месяцев удалить около 40 кг воды, то есть высушить трансформатор мощностью 200-300 МВА.

4.4 Фильтрация масла

Загрязнение мехпримесями – основной фактор снижения электрической прочности изоляции трансформатора, и поэтому главной целью технологической обработки масла является их удаление. Наиболее опасны проводящие частицы: частицы металла и углерода, влажные волокна и т.п.

По заключению рабочей группы СИГРЭ «Мехпримеси в масле» (WG 12.17) большое число повреждений высоковольтных трансформаторов вызвано загрязнением мехпримесями. Традиционного испытания масла на пробу недостаточно для идентификации проблемы; в качестве метода контроля рекомендуется определение содержания частиц счетным методом. Рабочая группа 12.17 рекомендовала типичные уровни загрязнения мехпримесями (по классификации стандарта NAS), включая возможный опасный уровень:

4-6	Нормальный	Типичный уровень для трансформаторов в эксплуатации
7-9	Высокий	Возможен выход трансформатора из строя
10-12	Очень высокий	Высокая вероятность выхода трансформатора из строя

Высокий уровень загрязнения означает наличие 32 000 – 64 000 частиц размером 5 мкм и более и 8000 частиц размером 15 мкм и более в 100 мл масла.

В этом случае улучшение состояния эксплуатируемого трансформатора является обязательным, при этом желательно выполнить фильтрацию масла под напряжением.

Процедуры практически одинаковы как для отключенного, так и для работающего трансформатора, однако в последнем случае не требуются дополнительный нагрев для снижения вязкости масла.

При очистке масла необходимо учитывать следующие технические проблемы:

- Для фильтрации небольших частиц, особенно углерода, необходимы фильтрующие элементы тонкой очистки,
 - Небольшие частицы сложно удалять (например, крошки отбеливающей земли). Из-за ничтожно малой массы они плавают в масле под действием конвекции. Это является недостатком по сравнению с очисткой масла, слитого из бака трансформатора,
 - Фильтр (особенно, бумажный) может сам быть источником образования примесей.
- Необходимо учитывать срок службы фильтра, особенно при технологической обработке трансформатора под напряжением.

4.5 Регенерация масла

Как и сушка масла, этот метод широко применяется для технологической обработки как для отключенного трансформатора, так и для работающего трансформатора.

Технологическая обработка трансформатора под напряжением является более эффективной из-за возможности использования внутренних потерь трансформатора для нагрева масла. Необходимо учитывать некоторые недостатки методов:

- Большое количество отходов,
- Потери масла при регенерации (более критично для работающего трансформатора),
- Ограниченное количество масла, которое можно обработать за одну загрузку земли,
- Риск попадания крошек отбеливающей земли в бак (более опасно для обработки трансформатора под напряжением).

В некоторых случаях более эффективным и безопасным является применение пассивных методов с установкой нескольких патронов, заполненных адсорбентом.

Опыт показал высокую эффективность так называемого «безотходной регенерации» с использованием технологии реактивации отбеливающей земли. В Чехии, например, в нескольких десятках трансформаторов масло было восстановлено до уровня выше качества нового масла (что вполне осуществимо). Около 30% этих трансформаторов обрабатывались под напряжением.

4.6 Регенерация изоляции (удаление шлама)

Данный процесс является важным для продления срока службы трансформатора.

На основании опыта можно сказать, что удаление продуктов старения из целлюлозы может, как минимум, удвоить срок службы.

Шлам – самый опасный враг изоляции трансформатора:

- шлам снижает электрическую прочность масла (подобно мехпримесям),
- шлам представляет собой полупроводящий осадок, который снижает импульсную прочность маслобарьерной изоляции и изоляционных деталей РПН,
- шлам имеет очень высокую кислотность и разрушает свежее масло и целлюлозу.

Шлам может иметь кислотное число в широком диапазоне - от 30 до 300 мг КОН/г, поэтому агрессивность шлама важнее его количества. С другой стороны, шлам может образоваться и при относительно низком кислотном числе масла (0.04-0.07 мг КОН/г).

Старое эмпирическое правило гласит, что вещества растворяются в растворителе такого типа.

Трансформаторное масло способно в определенной степени растворять продукты старения масла. Растворяющая способность масла зависит от содержания ароматики (чем больше, тем лучше), молекулярного веса (чем меньше вязкость, тем лучше) и наличия некоторых смол.

Моющая способность эксплуатационного масла может быть улучшена посредством:

- добавления моющих присадок,
- снижения концентрации продуктов окисления в масле (регенерации),

- поддержания высокой температуры масла для улучшения его растворяющей способности.

Имеется положительный опыт применения двух методов:

- Удаление шлама на отключенном трансформаторе как часть процесса реабилитации с использованием регенерирующего масла (метод НИЦ «ЗТЗ-Сервис»),
- Удаление шлама методом десорбции продуктов старения маслом, регенерированным через абсорбционные перколяционные колонки, при этом температура масла поддерживается выше его анилиновой точки (метод Fluidex).

Предпочтительной является обработка на работающем трансформаторе, поскольку используется тепло нагрузочных потерь.

5. РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ. КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Процесс постепенного улучшения состояния трансформатора посредством циркуляции масла через технологическое оборудование является экспоненциальным.

Необходимо учитывать три параметра:

- Соотношение конечной и начальной концентрации загрязняющего вещества,
- Соотношение скорости потока масла и общего объема масла в трансформаторе,
- Соотношение концентрации загрязняющего вещества на входе и выходе из технологического оборудования за один цикл обработки.

Наиболее важным параметром, определяющим эффективность обработки, является относительное снижение концентрации загрязняющего вещества, удаляемого за один цикл, а именно: соотношение содержания воды на входе и выходе, соотношение мех- примесей, соотношение характеристик старения масла (кислотное число, поверхностное натяжение, тангенс угла диэлектрических потерь, удельное сопротивление).

Например, если оборудование снижает влагосодержание масла с 50 ppm на входе до 10 ppm на выходе за один цикл при производительности 2 м³/ч, то для снижения влагосодержания масла объемом 20 м³ до уровня 10 ppm необходимо 20 часов чтобы (это равно времени обработки двух объемов масла трансформатора). Если технологическое оборудование устраняет только 50% входного содержания загрязняющих примесей за один цикл, то для этого понадобится 32 часа.

Еще одним важным контролируемым параметром является соотношение скорости потока масла и объема обрабатываемого масла. Оба эти параметра переменны, поэтому необходимо организовать непрерывный контроль параметров технологической обработки. Можно рекомендовать следующий подход:

- Проверить исходное состояние (концентрации загрязняющих веществ, которые необходимо удалить),
- Определить желаемое конечное состояние,
- Определить оптимальные параметры технологической обработки: скорость потока, температуру и вакуум, обеспечивающие максимальную скорость удаления загрязняющих веществ,
- Оценить длительность технологической обработки,
- Оценить возможный срок службы абсорбентов и фильтрующих элементов, которые потребуют замены в процессе технологической обработки,
- Установить контроль указанных выше основных параметров технологической обработки и дополнительных параметров (температура, скорость потока, вакуум).

Важным моментом является использование датчиков непрерывного контроля:

- Датчик воды,
- Датчик удельного сопротивления (эта характеристика является самой удобной для контроля процесса регенерации масла),
- Датчик газа для контроля дегазации трансформаторов с повышенными концентрациями газов.

Специальные исследования [15,16] показали, что процесс регенерации наиболее эффективен для масла с незначительным содержанием полярных продуктов неокислотного происхождения вне зависимости от кислотного числа и поверхностного натяжения, которые имеет масло в результате эксплуатационного старения.

Следует также учитывать, что низкое значение кислотного числа и высокое значение поверхностного натяжения не гарантируют хорошего состояния масла после процесса регенерации, если в масле присутствуют полярные продукты некислотного происхождения.

6. ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Главным недостатком технологической обработки под напряжением является риск отказа в результате непреднамеренного ухудшения состояния трансформатора. Различные меры предосторожности, направленные на сведение такого риска к минимуму, представлены в [1, 2, 3, 5, 6, 8, 10, 11, 13].

Ниже приведены некоторые рекомендуемые меры по обеспечению безопасности.

6.1 Рекомендации для минимизации риска снижения электрической прочности из-за возможного проникновения посторонних примесей в бак:

- Процесс не должен включать в себя вакуумирование,
- Не допускать проникновения воздуха в бак,
- Не допускать расплескивания масла,
- Не допускать проникновения пены в бак,
- Не допускать проникновения мехпримесей в бак,
- Учитывать возможность статической электризации [2],
- Не допускать турбулентности масла.

Активность частичных разрядов не причинит серьезного вреда, если ограничить время их действия.

6.2 Меры по минимизации риска потерь масла при технологической обработке:

- Оценить минимальный объем масла в трансформаторе с учетом возможных потерь масла в процессе регенерации (замена отработанной отбеливающей земли),
- Контролировать уровень масла с использованием индикатора уровня масла,
- Предусмотреть запасной резервуар для масла (для некоторых случаев),
- Предусмотреть аппаратуру для автоматического отключения.

6.3 Меры для минимизации риска повреждения при технологической обработке дефектного трансформатора

В общем случае любой дефектный трансформатор, находящийся в эксплуатации, может подвергаться технологической обработке под напряжением, если приняты соответствующие меры для предотвращения ухудшения его состояния.

Однако отсутствие необходимых диагностических характеристик часто препятствует определению реального технического состояния трансформатора.

Можно рекомендовать два варианта:

- Обрабатывать только недефектный трансформатор,
- Оценить состояние трансформатора перед технологической обработкой.

6.4 Учет возможности перегрева трансформатора во время технологической обработки

Процессы, требующие высокой температуры (сушка, регенерация изоляции), могут оказать влияние на тепловые характеристики трансформатора. Можно использовать рекомендации, разработанные на основе исследований Рабочей группы СИГРЭ 12.09.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sakkie van Wyk. Dry-out systems and techniques for power transformers, Proceedings of the EPRI 1998 Conference
[2] Abel Pereira. Safe-handling procedures for insulating oil with high concentration of combustible gases, Proceedings of the DOBLE 1996 Conference, Sec. 5-7

- [3] Larri Christodoulou, Bruce Baranowski. On-line energized oil processing of transformers a perspective of system manufacturer and service company, Proceedings of the 1995 DOBLE Conference, Sec. 5.7
- [4] Myers, S.D. Transformer life can be extended, Minutes of the 1982 DOBLE Conference, Sec. 6.6
- [7] B.Pahlavanpour et al. Extension of life span of power transformer by on-site improvement of insulating oil
- [8] P.Luccioni et al. On-line processing of transformer oil, Proceedings of 1995 DOBLE Conference, Sec.5-8
- [9] J.J.Kelly. A discussion of the on-line oil processing papers, Proceedings of 1995 DOBLE Conference, Sec.5-9
- [10] M.Girard. On-line processing of transformer oil, Minutes of 1997 EuroDOBLE Colloquium
- [11] P.W.Brunson et al, On-line degassing of EHV power transformers, Minutes of the 1990 DOBLE Conference, Sec.6-11
- [12] J. Laakso. Discussion of the P.Brunson paper”, 1990 DOBLE Conference, Sec.6.11.1A
- [13] Minutes of the 1998 FALL Meeting of DOBLE Clients
- [14] V.Sokolov, B. Vanin. Experience with in-field assessment of water contamination of large power transformers, Proceedings of EPRI 1999 Conference
- [15] C.Lamarre at al. Optimum reclamation time for insulating oils, Proceedings of the 1988 DOBLE Conference, Sec.10-6
- [16] A. Bassetto at al. Assessment of the optimum reclamation time for uninhibited oil by infrared spectroscopy, Proceedings of the 1991 DOBLE Conference, Sec.10-4
- [17] Alberto Herreno Rocha. On-line reclamation of power transformer insulating oil, Proceedings of 1999 DOBLE Conference, Sec.5-6