

ТРАНСФОРМАТОРЫ

С.Д. ЛИЗУНОВ

**СУШКА
И ДЕГАЗАЦИЯ
ИЗОЛЯЦИИ
ТРАНСФОРМАТОРОВ
ВЫСОКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ**



✓
1464678

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Выпуск 22

С. Д. ЛИЗУНОВ

СУШКА И ДЕГАЗАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1971

6П2.1.081

Л 55

УДК 621.314.2:66.047

Серия «Трансформаторы»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Г. В. Алексенко, В. В. Бритчук, Е. В. Веремей, И. Д. Воеводин,
Б. Б. Гальперин, А. И. Майорец, Э. А. Манькин, М. И. Николаева,
Г. Н. Петров, С. И. Рабинович, С. П. Розанов, А. В. Сапожиников

Лизунов С. Д.

Л 55 Сушка и дегазация изоляции трансформаторов
высокого напряжения, М., «Энергия», 1971.

128 с. с илл. (серия «Трансформаторы», вып. 22).

Книга представляет собой обзор зарубежной литературы (последних лет), посвященной вопросам сушки и вакуумной обработки изоляции трансформаторов преимущественно высших классов напряжения и ее защите от увлажнения.

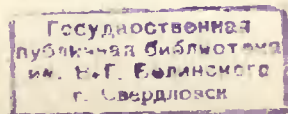
Рассмотрены требования к обработке изоляции трансформаторов, факторы, вызывающие ухудшение ее состояния в эксплуатации, методы сушки при изготовлении и в эксплуатации, а также меры по защите изоляции трансформаторов от увлажнения в эксплуатации.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, испытанием, производством, монтажом, эксплуатацией и ремонтом трансформаторов. Она может быть полезна для работников лабораторий и исследовательских институтов, имеющих отношение к изготовлению и эксплуатации трансформаторов.

Обзор не претендует на полное изложение вопроса и рассчитан на подготовленного читателя.

с. 1464678

3-3-10
154-70



6П2.1.081

ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемом обзоре зарубежной литературы последних лет рассматриваются вопросы сушки и вакуумной обработки изоляции трансформаторов (требования к сушке изоляции, ее методы, состояние изоляции в эксплуатации, защита от увлажнения).

Обработке изоляций масляных трансформаторов высокого напряжения в последние годы придается все большее значение. Сушка и вакуумная обработка на заводе, меры по поддержанию первоначального состояния изоляции в эксплуатации приобретают все большее значение в связи с повышением рабочих напряжений, повышением мощности трансформаторов в единице и ограничениями их габаритов по условиям транспортировки. Обеспечение надежности в работе трансформаторов также требует особого внимания к вопросам технологии и защиты в эксплуатации, так как имеются случаи, когда их несовершенство приводит к повреждениям трансформаторов.

Усовершенствование изоляции трансформаторов высокого напряжения в большой мере определяется усовершенствованием технологии ее сушки и пропитки.

Основными вопросами качественной обработки изоляции являются вопросы, связанные с наличием воды и газа в изоляции трансформаторов. Важно знать пределы, к которым следует стремиться при обработке изоляции на заводе. Трудной задачей является необходимость сохранить состояние изоляции, достигнутое на заводе, в течение всего срока эксплуатации.

Эти вопросы и рассматриваются в предлагаемом обзоре зарубежных публикаций.

В книге подробно рассмотрены зависимость электрической прочности изоляции трансформаторов от величины влагосодержания, а также влияние влаги на скорость старения изоляции.

Показана опасность даже сравнительно небольшого содержания влаги и газа в случае изменения режима

работы трансформатора. Приведены требования к состоянию изоляции трансформаторов высших классов напряжения. Произведен анализ причин ухудшения состояния изоляции в эксплуатации и вопросов влагообмена в различных условиях.

Рассмотрены достоинства и недостатки применяющихся методов сушки изоляции трансформаторов высокого напряжения при их изготовлении и в эксплуатации.

Описаны наиболее широко применяющиеся, а также новые способы защиты изоляции трансформаторов от увлажнения в эксплуатации.

В заключении сформулированы основные выводы.

По отдельным вопросам (защита изоляции от увлажнения и вопросы измерения) содержится описание только наиболее широко применяющихся или совершенно новых способов и методов.

Как правило, в зарубежной литературе не проводятся разграничения требований к состоянию изоляции по классам напряжения. Если применение этих требований к трансформаторам высших классов напряжения часто является технической необходимостью, то их использование применительно к трансформаторам классов напряжения 110 кВ и ниже, по-видимому, определяется только экономическими соображениями.

По мнению автора, с учетом отечественных условий материалы обзора относятся в основном к силовым и измерительным трансформаторам и реакторам высших классов напряжения, 220 кВ и выше, но они применимы также к трансформаторам более низких классов напряжения. В заключении приведены соответствующие рекомендации автора.

Обзор составлен по литературным источникам в основном за период с 1963 по 1968 г., хотя частично использованы материалы наиболее важных ранних работ. Охвачена литература Великобритании, США, Франции и других европейских стран, а также материалы СИГРЭ.

Основная цель обзора — информация о современном состоянии рассматриваемой темы за рубежом. Обзор не претендует на исчерпывающее изложение вопроса и рассчитан на подготовленного читателя.

Глава первая

КАЧЕСТВО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОЛЯЦИИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1-1. ОБЩИЕ ДАННЫЕ

Ниже рассматриваются обмотки силовых трансформаторов высокого напряжения, главная изоляция которых состоит из большого числа масляных каналов, разделенных барьерами из картона или бумаги (маслобарьерная изоляция). Электрическая прочность такой изоляции почти полностью определяется изоляцией масляных каналов, которая при испытаниях высоким напряжением подвергается воздействию больших градиентов, часто превышающих $5 \text{ кВ}_{\text{действ}}/\text{мм}$.

Технологическая обработка обмоток состоит из процессов, назначением которых являются удаление воздуха и воды как из твердой изоляции, так и из масла, пропитка твердой изоляции маслом и, наконец, придание обмотке механической прочности с целью сохранения ее формы в эксплуатации.

Первой целью, которая должна быть достигнута, естественно является придание изоляции достаточной электрической прочности, для того чтобы она выдержала предусмотренные испытания. К этому добавляется стремление уменьшить скорость старения изоляции во время эксплуатации, а также гарантировать способность обмоток противостоять электрическим и электродинамическим воздействиям. Скорость теплового старения изоляционных материалов увеличивается с ростом их влагосодержания, последнее подчеркивает важность процесса суш-

ки. Геометрическая стабильность и механические свойства изоляционных материалов, которые подвергаются электродинамическим воздействиям, являются факторами, определяющими поведение обмоток при этих воздействиях. Эти свойства достигаются обработкой, включающей сушку и пропитку изоляции маслом. Эффективность обработки активной части трансформатора следует оценивать не только с точки зрения получения достаточной электрической прочности при испытаниях, но и с точки зрения увеличения срока службы и эксплуатационной надежности. Стоимость обработки определяется ее длительностью и качеством, а также характеристиками изоляции, которые требуется получить. Однако эти элементы различны у разных изготовителей. Поэтому важно определять минимальные требования, которым изоляция и трансформатор в целом должны удовлетворять после обработки, а также предельные значения вакуума, циклы нагревания и т. п.

1-2. ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ВЛАГИ И ГАЗА НА КАЧЕСТВО ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Различные части изоляции нового трансформатора содержат некоторое количество влаги, газа и других примесей. Их количество уменьшается в зависимости от качества обработки на заводе и эффективности защиты трансформатора в эксплуатации. Ниже рассматривается влияние указанных примесей на электрическую прочность изоляции, на скорость старения в эксплуатации и на механическую прочность ее. Это влияние в принципе хорошо известно. Авторы [Л. 1] рассматривают его более детально и пытаются определить разумные пределы содержания примесей, которые можно считать допустимыми после окончания обработки.

Электрическая прочность изоляции

Масло. Не представляется возможным однозначно ответить на вопрос о том, в какой мере качество масла влияет на электрическую прочность трансформатора в целом. Это зависит от конфигурации электродов и характера воздействий, лимитирующих прочность данной конструкции.

Вода растворяется в масле в очень небольших количествах. Растворимость увеличивается с повышением температуры и изменяется в зависимости от химического

состава. Увеличение содержания ароматических углеводородов значительно увеличивает растворимость воды. Кривая на рис. 1-1 иллюстрирует сказанное.

Выше точки насыщения вода содержится в масле в виде эмульсии в форме очень мелких капель. Эти капли имеют тенденцию осажаться на твердых включениях, имеющих в масле. Они могут перемещаться под воздействием сильного электрического поля и переносить электрические заряды. Такое общее рассмотрение достаточно хорошо объясняет поведение масла, содержащего воду и твердые частицы. Систематическая проверка этого положения производилась авторами [Л. 1], которые подтверждают результаты, изложенные в [Л. 2 и 3].

Рассматривая рис. 1-2, можно сделать следующие выводы:

1. Электрическая прочность масла, не содержащего твердые частицы, слабо зависит от количества растворенной в нем воды (до точки насыщения).

2. При содержании воды свыше 5 г/т электрическая прочность уменьшается все больше по мере увеличения загрязнения твердыми частицами.

Предполагается, что масло свежее или очень мало работавшее. Поэтому не уделено внимания влиянию кислотности масла на его способность растворять воду (кислотность не имеет существенного влияния на диэлектрические свойства масла, как это следует из [Л. 4 и 5]).

Современные установки для обработки масла делают возможным уменьшить содержание влаги в масле значительно ниже насыщающего значения даже при низших температурах, которые могут быть на практике. Транс-

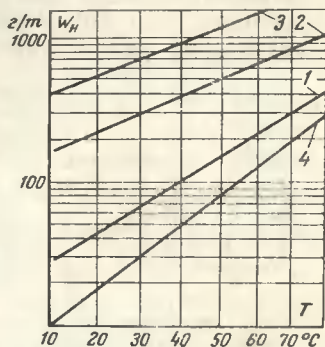


Рис. 1-1. Насыщающее влагосодержание масла W_n при различном содержании ароматических углеводородов при атмосферном давлении и плотность насыщенных водяных паров в зависимости от температуры.

1 — трансформаторное масло, содержащее около 6% ароматических углеводородов; 2 — масло, содержащее около 30% ароматических углеводородов; 3 — бензол; 4 — плотность насыщенных водяных паров (1 г/т соответствует массе воды 1 г/м³) [Л. 1].

форматорное масло может растворять воду двумя путями: 1) абсорбируя излишнюю воду, содержащуюся в твердых изоляционных материалах трансформатора; 2) растворяя атмосферную влагу вследствие прямого или непрямого контакта с воздухом. На рис. 1-3 и 1-4 проиллюстрированы эти законы обмена. Передача воды от твердой изоляции маслу (рис. 1-3) не приводит к неприемлемому увлажнению последнего при том влагосо-

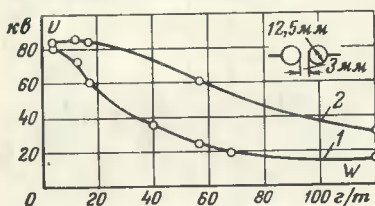


Рис. 1-2. Пробивное напряжение при частоте 50 гц трансформаторного масла при температуре 25°С в зависимости от влагосодержания W .

1 — технически чистое масло (содержит около 50 г/т твердых включений); 2 — технически чистое масло после двукратного прохождения через стеклянные фильтры (содержит менее 0,5 г/т твердых включений) [Л. 1].

держании, которое обычно достигается в высоковольтных трансформаторах после обработки на заводах (менее 1% остаточного содержания воды в твердой изоляции). С другой стороны, увлажнение масла окружающим воздухом должно учитываться. Оно очень сильно зависит от типа защиты трансформатора (см. гл. 2 и 6).

Масло растворяет воздух и различные газы, соприкасающиеся с ним, иногда в больших коли-

чествах, как показано на рис. 1-5 для воздуха (при давлении 735 мм рт. ст.). Газы, растворенные в масле, снижают его электрическую прочность на 20—30%, если они не образуют пузырьки [Л. 5]. Это явление происходит вблизи насыщенного состояния как следствие изменения температуры или по другим причинам, например при воздействии сильного электрического поля или очень большой скорости потока масла в трубах охладителя.

Обычные методы сушки трансформаторного масла обеспечивают дегазацию до такого состояния, при котором масло перед заполнением трансформатора содержит только следы газа, содержание его трудно измерить. Но это масло может абсорбировать газы во время эксплуатации трансформатора, если он не закрыт мембраной, а снабжен расширителем или имеет защитную подушку инертного газа (азота, метана, углекислого газа, окиси углерода и т. п.), который растворим в масле.

Скорость абсорбции газов маслом в трансформаторе, снабженном расширителем, в большой степени зависит от конструкции. Эта скорость мала, но ею нельзя пренебречь, учитывая срок службы трансформатора. Эта проблема заслуживает внимания.

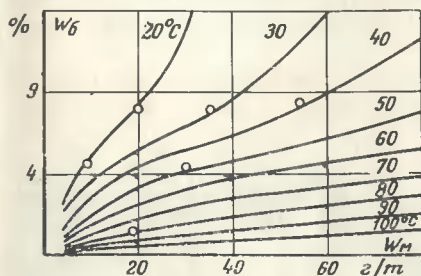


Рис. 1-3. Равновесное влагосодержание в бумаге (картоне) W_6 и в масле W_m при различной температуре. Точками отмечены результаты измерений в изоляции трансформатора, состоящей из картона и масла [Л. 1]. Здесь и далее влагосодержание твердой изоляции в процентах по массе.

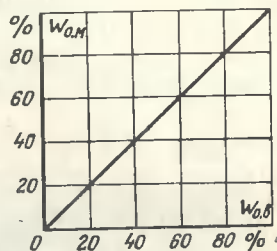


Рис. 1-4. Соотношение между относительной влажностью масла $W_{0.м}$ и относительной влажностью воздуха $W_{0.в}$. Относительная влажность определена как отношение массы воды в данном объеме к массе воды в том же объеме в состоянии насыщения и выражена в процентах [Л. 1].

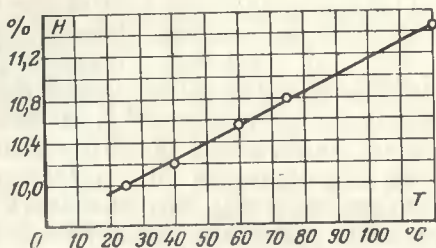


Рис. 1-5. Содержание воздуха (H), растворенного в масле, в процентах объема для разных температур при давлении 735 мм рт. ст. [Л. 1].

Целлюлозная изоляция. Рассматривается главным образом влияние влажности на поведение целлюлозных материалов, причем влиянием поглощенных газов, которые могут остаться после пропитки маслом, пренебрегаем. Рас-

сматривается трансформаторная изоляция, состоящая из тонкого (несколько миллиметров) изоляционного материала, за исключением концевых клиньев, которые очень медленно пропитываются. Не было получено каких-либо очевидных данных, свидетельствующих о влиянии остаточных газов на поведение твердых диэлектрических материалов, за исключением случая очень высоких давлений при пропитке.

Изменение электрической прочности пропитанного маслом трансформаторного картона в зависимости от его

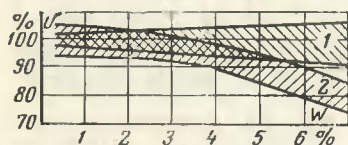


Рис. 1-6. Электрическая прочность пропитанного маслом трансформаторного картона при 50 гц и 20°С в зависимости от влагосодержания.

1 — перекрытие; 2 — пробой [Л. 1].

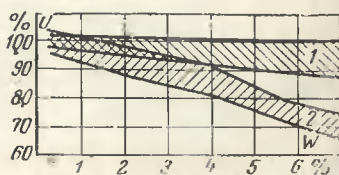


Рис. 1-7. Электрическая прочность пропитанного маслом трансформаторного картона при полной волне 1/50 мксек, температура 20°С, в зависимости от влагосодержания.

1 — перекрытие; 2 — пробой [Л. 1].

влагосодержания при температуре 20°С при воздействии напряжения 50 гц и импульсного (волна 1,5/40 мксек) приведено на рис. 1-6 и 1-7 соответственно [Л. 1]. Пробивное напряжение сначала уменьшается очень медленно (до влагосодержания около 3%), а затем быстро. С другой стороны, напряжение поверхностного перекрытия практически не изменяется до влагосодержания около 6%. Это объясняется тем, что прочность листа картона на перекрытие зависит от чистоты масляной пленки, соприкасающейся с ним [Л. 1]. На рис. 1-8, а и б приведены данные о снижении электрической прочности бумаги в зависимости от ее влагосодержания.

Как видим (см. рис. 1-3), целлюлозные изоляционные материалы имеют свойство абсорбировать воду, содержащуюся в масле. Если защита трансформатора от атмосферных воздействий недостаточна, то изоляционные материалы могут настолько увлажниться, что это станет опасным с точки зрения их диэлектрических свойств. Таким образом, можно сделать некоторые выводы в отно-

шении количества посторонних включений, допускаемого с точки зрения электрической прочности изоляции [Л. 1.] Можно полагать, что количество остаточной влаги в масле, равное 5 г/т, в трансформаторе перед испытанием допустимо. Предполагается такая обработка масла, чтобы оно содержало менее 5 г/т воды и подвергалось дополнительной обработке после заполнения трансформатора. Фильтрация масла перед и главным образом после за-

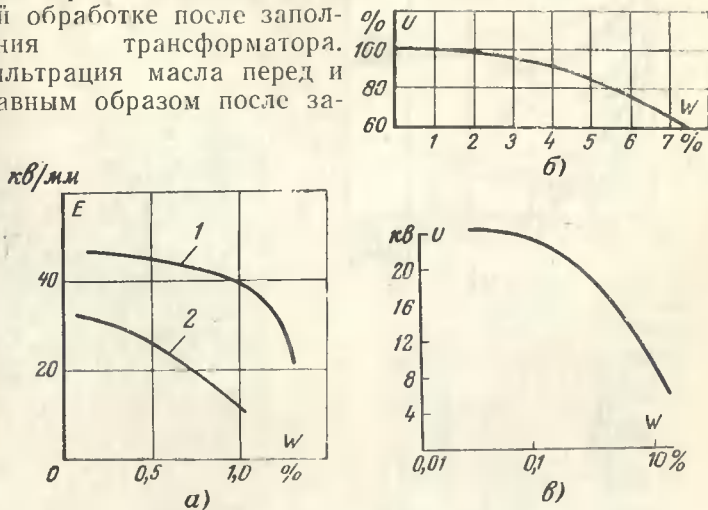


Рис. 1-8. Снижение электрической прочности и уменьшение напряжения начала частичных разрядов с увеличением влагосодержания бумаги.

а — электрическая прочность (1) и напряжение начала частичных разрядов (2) для бумаги толщиной 0,75 мм [Л. 41]; б — электрическая прочность бумажной изоляции [Л. 9]; в — напряжение начала частичных разрядов в бумаге, толщина бумаги около 7,6 мм [Л. 10 и 11].

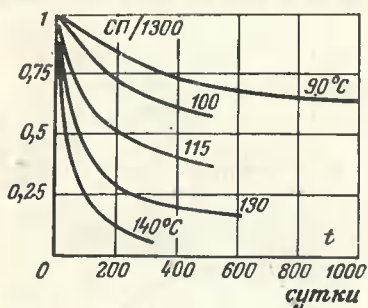
полнения должна снизить уровень механических включений до величины порядка 0,5 г/т.

Содержание остаточной влаги, равное 1% по массе, является приемлемым в случае целлюлозной изоляции, рассмотренной пока только с точки зрения электрической прочности диэлектрика.

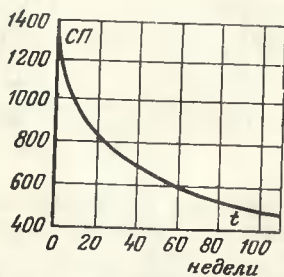
Следует отметить, что приведенное в [Л. 1] рассмотрение не затрагивает влияние влажности на частичные разряды. На эту тему имеется очень мало работ, которые однако свидетельствуют о снижении напряжения возникновения частичных разрядов при увеличении влагосодержания бумаги. Так, на рис. 1-8, а и в приведены

данные о снижении напряжения начала частичных разрядов бумаги различной толщины в зависимости от ее влагосодержания.

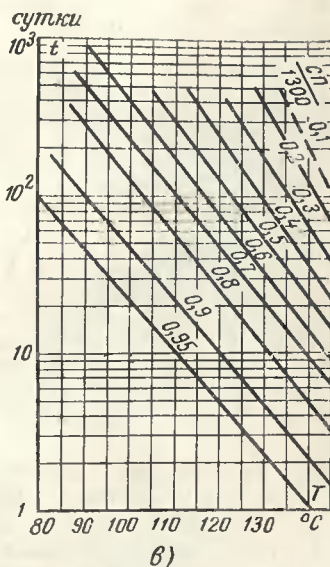
Приведенные на рис. 1-8, *а* и *в* кривые, характеризующие снижение напряжения возникновения частичных



а)



б)



в)

Рис. 1-9. Старение пропитанной маслом бумаги в зависимости от времени и температуры.

а — относительные значения степени полимеризации СП/1300, пропитанной маслом бумаги (опыты проводились в вакууме, содержание воды в бумаге в начале опыта составляло 0,3%) [Л. 15]; *б* — степень полимеризации СП в моделях трансформаторов в масле при 85° С, температура бумаги 100° С [Л. 7 и 8]; *в* — зависимость между временем *t*, потребным для снижения степени полимеризации до определенной относительной величины СП/1300, и температурой *T* [Л. 15].

разрядов с увеличением влажности твердой изоляции, иллюстрируют качественную зависимость без указания уровня частичных разрядов. Более подробные данные, в том числе по маслосодержательной изоляции, отсутствуют.

Скорость старения изоляции

Относительная скорость старения масла и бумаги, которая имеет место в эксплуатации, точно не известна.

Для бумаги она зависит главным образом от температуры, а для масла также и от наличия в нем кислорода.

Масло. По существу разложение масла происходит вследствие окисления. Поэтому удаление воздуха, растворенного в масле, содействует замедлению этого процесса. Но дегазация масла происходит почти полностью во время сушки, которой она подвергается. Последующая абсорбция кислорода маслом во время эксплуатации зависит от системы защиты трансформатора от атмосферных влияний. Поэтому устройства, предотвращающие контакт масла с окружающим воздухом (мембрана, азотная подушка), весьма желательны. С точки зрения старения масла наличие нескольких граммов воды на 1 т масла не имеет существенного значения.

В большинстве случаев за рубежом срок службы трансформаторного масла до его очистки или смены составляет более 10 лет. Однако имеются указания [Л. 6], что хорошо очищенные трансформаторные масла в сочетании с обычными расширителями, снабженными воздухоосушителем, обеспечивают без специальной обработки срок службы примерно 30 лет.

Целлюлозная изоляция. Под воздействием ряда влияний — тепловых, химических и других — в изоляции идет процесс, ухудшающий ее характеристики, — старение. Существенно не влияя на электрические свойства, старение резко проявляется в изменении механических характеристик.

Для оценки состояния изоляции производится определение степени ее полимеризации.

Целлюлоза — натуральный полимер. Образует цепь примерно из 1 200—1 300 колец глюкозы, степень полимеризации 1 200 или 1 300.

Степень молекулярной полимеризации полимера есть среднее число одинаковых частей, образующих молекулу. При разложении цепи распадаются на более мелкие

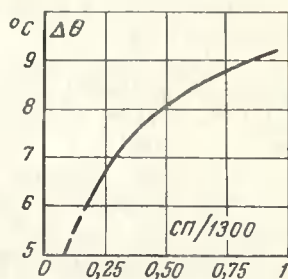


Рис. 1-10. Изменения приращения температуры $\Delta\theta$, обуславливающей удвоение скорости старения бумаги, в зависимости от достигаемой при этом степени старения, оцениваемой по относительной степени полимеризации СП/1 300 [Л. 15].

части. Средняя длина этих частей определяется степенью разложения.

При старении целлюлозы степень молекулярной полимеризации снижается от 1 200—1 300 примерно до 100. Это снижение средней длины цепей сопровождается образованием альдегидов и кетонов в местах разрыва цепочек, которые в свою очередь имеют тенденцию к превращению в кислоты.

Степень полимеризации удобно оценивать по вязкости разбавленного раствора полимера в подходящем растворителе. Для целлюлозы таким растворителем может быть гидрооксид купроэтилендиамина.

Измерение степени полимеризации, которое можно производить пробами массой в несколько граммов, при хорошей точности (2%) дает оценку состояния бумаги, начиная от новой и кончая той, которая подверглась сильному разрушению [Л. 15].

По данным [Л. 7 и 8], бумага в масле при температуре 90°С стареет до степени полимеризации 360 примерно за 50 лет, а до степени 150 — за 350 лет. При 100°С соответственно за 20 и 100 лет, а при 110°С — за 5 и 25 лет.

Следует указать, что ранее в большинстве работ оценка старения бумаги производилась на основании определения механических характеристик. В случае развивающегося старения бумаги такие характеристики скоро становятся ненадежными и дают существенный разброс величин, тогда как химические критерии старения бумаги позволяют оценивать любую наиболее глубокую степень разрушения бумаги, какая только встречается на практике [Л. 15].

Приведенные на рис. 1-9,а кривые получены на образцах бумаги, предварительно высушенных и отвакуумированных в течение 48 ч при температуре 70°С для масла и 115°С для бумаги. В [Л. 15] описан способ экстраполяции этих экспериментальных данных, с помощью которого получены кривые рис. 1-9,в. На этом рисунке различные прямые линии, относящиеся к различным степеням старения бумаги, не являются параллельными. Это свидетельствует о том, что закономерность, найденная Монтзингером, справедлива только для определенной степени старения бумаги. Другими словами, приращение температуры, при котором время, необходимое для достижения одной и той же степени полимеризации, сни-

жается вдвое, зависит от относительной величины полимеризации (рис. 1-10) [Л. 15].

Ниже приведены данные о продолжительности термического старения (в вакууме) бумаги с начальным содержанием влаги 0,3%, необходимой для достижения степени полимеризации, равной 150:

Температура, °С . . .	115	110	105	100	95	90	85	80
Продолжительность, лет	14	26	50	95	180	350	650	1 200

Эти данные, полученные авторами [Л. 15] путем экстраполяции результатов экспериментов, приведенных на рис. 9,а и в.

При степени полимеризации 360 прочность бумаги на разрыв снижается вдвое (рис. 1-11). Считается, что ис-

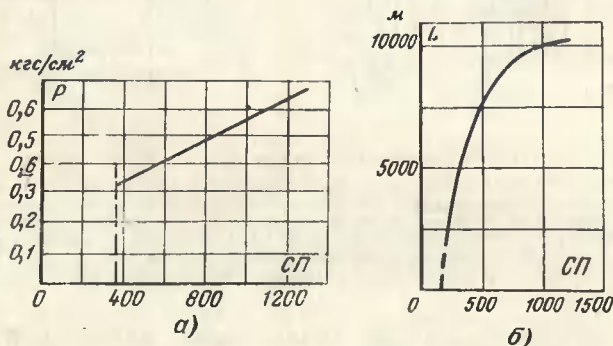


Рис. 1-11. Снижение механической прочности бумаги при ее старении.

а — зависимость прочности бумаги на разрыв P от степени ее полимеризации СП [Л. 7]. Пунктиром показано предельное значение СП (360), допустимое для изоляции трансформатора; б — зависимость между разрывной длиной L и степенью полимеризации СП бумаги [Л. 15].

пользование бумаги с меньшей степенью полимеризации нецелесообразно [Л. 1], хотя авторы [Л. 15] констатируют, что в конце эксплуатации трансформатора она достигает 100—200. Установлено, что при значениях степени полимеризации ниже 150 механические свойства бумаги уже не могут быть определены [Л. 15].

Влияние кислорода и воды на химическое разложение целлюлозы было очень тщательно исследовано многими авторами [Л. 12 13 и 15].

Действие кислорода. Содержащийся в масле растворенный кислород, воздействуя непосредственно на бумагу, ускоряет ее старение. Продукты окисления масла также влияют на старение бумаги, однако степень их воздействия представляет собой величину второго порядка по сравнению с прямым воздействием кислорода. Это подтверждается тем, что в открытых сосудах (со свобод-

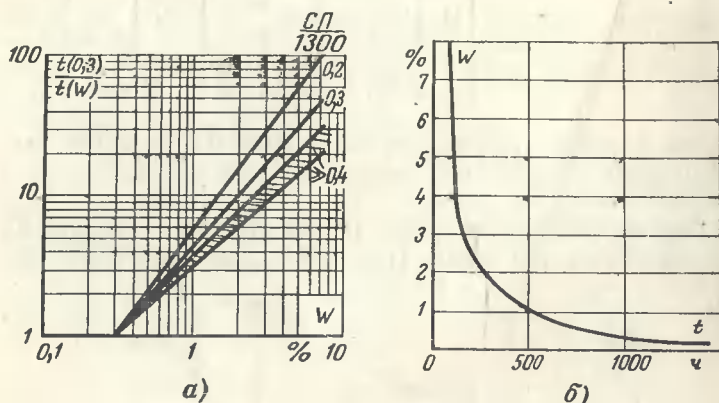


Рис. 1-12. Влияние влагосодержания бумаги W на ее старение.

a — скорость старения в зависимости от влажности. По оси ординат — отношение времени, потребного для достижения определенной степени старения бумаги, содержащей 0,3% влаги, ко времени, необходимому для такого же разрушения бумаги при влагосодержании W [Л. 15]; $б$ — время старения t , необходимое для уменьшения до нуля прочности бумаги на растяжение в зависимости от ее влагосодержания W (температура старения 120°C) [Л. 14].

ным доступом воздуха), содержащих масло и бумагу с влажностью 0,3—5%, старение бумаги протекает примерно в 2,5 раза быстрее, чем в герметично закрытых сосудах в вакууме (или в атмосфере азота) при таком же содержании влаги и температуре 90, 100 и 115°C [Л. 15].

Действие влаги. Влияние влаги на старение изоляции подчиняется простому закону: скорость разложения бумаги пропорциональна количеству содержащейся в ней воды. Этот приближенный закон справедлив при содержании влаги в бумаге от 0,3 до 7% и при относительно небольшой степени разрушения бумаги. При более сильном конечном разрушении бумаги влияние влаги становится более заметным (рис. 1-12) [Л. 15]. При содержании влаги 2% старение бумаги происходит быстрее в 6—16 раз, а при 4% — в 12—45 раз, чем при 0,3% [Л. 7].

Трудно назвать точную цифру остаточной влажности в новом трансформаторе, которая может быть допустима с точки зрения последующего старения целлюлозной изоляции. Влажность изоляции в эксплуатации вновь возрастает вследствие разных причин, главная из которых, по мнению авторов [Л. 1], состоит в том, что масло, находясь в контакте с воздухом в расширителе, медленно абсорбирует воду, которая затем абсорбируется из масла бумагой и картоном. Внешняя влага может также медленно диффундировать через защитные системы и соединения. Таким образом, после 10 лет работы трансформатор средней или большой мощности, имеющий расширитель, сообщающийся с окружающей атмосферой через силикагелевый осушитель, имеет влагосодержание твердой изоляции 3—5% (см. гл. 2). Трансформатор, лучше защищенный от окружающего воздуха, увлажняется медленнее и за тот же промежуток времени увлажняется примерно до 1%, если при выпуске с завода остаточная влажность составляла 0,5%. Малая величина остаточной влажности целлюлозной изоляции и масла трансформатора после сушки на заводе имеют поэтому тем большее значение, чем лучше трансформатор защищен от окружающей атмосферы. Если рассматривать только трансформаторы, снабженные расширителем с мембраной или эквивалентной системой защиты, то, по мнению авторов [Л. 1], влажность, равная 0,5%, представляет верхний предел остаточной влажности твердой изоляции нового трансформатора. Исходя из результатов исследования старения влажной целлюлозы [Л. 15] с учетом увлажнения во время эксплуатации, можно гарантировать надежную службу изоляционных материалов в течение времени, превышающего экономический срок службы трансформатора. При этом предполагается, что повышение влажности за счет теплового старения целлюлозы обычно очень мало — несколько десятых процента — и ею можно пренебречь, если рассматривать ее как дополнительный фактор старения. Повышение влажности в существенных размерах (несколько процентов) может иметь место при большом старении, когда оно идет очень быстро, что бывает при степени полимеризации менее 400 [Л. 15].

с. 1464678

Очень важно также, чтобы масло было обработано под надлежащим вакуумом и чтобы трансформатор был заполнен при остаточном давлении, которое рекомендует-

ся равным около 0,05 мм рт. ст., как приемлемый предел. Однако обоснования этой цифры в литературе не приводится. Естественно, что указанное давление возрастает, когда масло заливается в бак за счет относительно высокого давления паров наиболее летучих фракций.

Более подробно вопросы обработки изоляции трансформаторов изложены в гл. 4.

Стабильность формы обмотки [Л. 1]

Картон и бумага сжимаются, когда абсорбированная вследствие контакта с атмосферой влага начинает выделяться. Линейная усадка составляет примерно 0,5% при изменении влагосодержания на 1%. Эта величина справедлива для области нормальных значений влажности этих материалов, подверженных воздействию окружающего воздуха.

Очень важно то, что обмотки достигают стабильных форм и их изоляция имеет динамические модули эластичности, которые предварительно установлены для окончания обработки. Это является условием удовлетворительной прочности по отношению к усилиям короткого замыкания в трансформаторе при эксплуатации [Л. 16]. Поэтому обработка обмотки состоит из ряда процессов, включая сушку под давлением. Эти операции завершаются перед окончательной сушкой, обычно перед насадкой обмотки на магнитопровод. Опыт показывает, что остаточная влажность, которая может быть после этой операции, не должна превышать 1%. Несмотря на меры, принятые для устранения или замедления абсорбции влаги изоляцией во время насадки обмотки (здания с кондиционированным воздухом, опускание обмоток в масло), нельзя избежать повышения содержания влаги в ней в размерах до нескольких процентов к моменту начала окончательной сушки. Однако к тому, что уже было достигнуто в отношении механических свойств, эта операция ничего не добавляет. Все же необходимо вновь сжать обмотку перед окончательной пропиткой маслом.

1-3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВСЛЕДСТВИЕ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ И ГАЗСОДЕРЖАНИЯ

Изоляция повышенной влажности подвергается опасности повреждения прежде всего из-за: 1) увеличения диэлектрических потерь до величины, когда возникает тепловая нестабильность; 2) образования пузырей

водорода и кислорода вследствие электролиза воды, ионизации пузырей и последующего пробоя; 3) конденсации влаги в воздушном пространстве под крышкой в трансформаторах без расширителя [Л. 7].

Первый механизм пробоя возможен, но в практике такие случаи неизвестны. Однако показано, что 4,5% воды в целлюлозе, вероятно, достаточно, чтобы вызвать пробой при 90° С; более высокое содержание воды вызовет пробой при меньшей температуре (7% при 50° С; 8% при 20° С).

Второй механизм пробоя наблюдался в некоторых измерительных трансформаторах, где диэлектрик имел большую толщину и его трудно было высушить. Содержание воды, необходимое для того чтобы вызвать пробой, зависит от местных потерь и температуры. Местное содержание воды около 4,5% опасно при напряженности 90 кВ/см и температуре 65° С или более. Третий случай наблюдался несколько раз.

Электрический пробой трансформатора при нормальных рабочих условиях, по мнению авторов [Л. 7], мало вероятен, пока содержание воды в целлюлозе не превысит 4,5%. Однако влияние воды на электрическую прочность этим не ограничивается.

В условиях эксплуатации влага и газы могут перемещаться и достигать критических значений в наиболее напряженных местах. Поочередное нагревание и охлаждение трансформатора при определенных условиях опасно для его изоляции [Л. 14]. Например, трансформатор некоторое время работал при низкой температуре и значительное количество воды было абсорбировано твердой изоляцией. При резком повышении температуры вследствие повышения нагрузки произойдет перераспределение воды, которая будет переходить из бумаги в масло. При этом могут иметь место два явления.

1. Если *изоляция твердого типа*, вода не может быстро выделиться и бумага будет в состоянии местного перенасыщения. Возникает опасность теплового пробоя при высокой температуре.

2. Если *изоляция маслобарьерного типа* и толщина барьеров мала, то за короткое время значительное количество воды перейдет в масло, которое будет иметь высокое влагосодержание. При высокой температуре это может быть не слишком опасно, если масло не насыщено водой. Но если нагрузка уменьшилась и масло быстро

остыло, оно будет перенасыщено водой, образуется эмульсия. Такое состояние крайне опасно, поскольку электрическая прочность резко снижается. Можно подсчитать максимальный теоретический уровень воды в масле в таких условиях. Кроме того, в этом случае возможны местные увлажнения поверхности твердой изоляции (барьеров и др.), что также очень опасно.

Имеются сообщения об исследованиях, показывающих, что вода в обычном растворе (не перенасыщенном) в масле может переходить в эмульсию под влиянием сильного поля [Л. 17]. Водяные капли выстраиваются в линию и образуют мосты, поскольку вода по своей природе полярна. Из этого следует вывод, что вода даже в растворе является, быть может, в определенных условиях более вредной, чем прежде предполагалось.

В трансформаторном оборудовании сетей постоянного тока распределение напряжения происходит в зависимости от проводимости бумаги и масла, которая сильно изменяется под воздействием влаги. Поэтому крайне важно, чтобы такое оборудование оставалось сухим [Л. 14].

В случае повышенного содержания растворенного в масле газа при циркуляции масла из зон с высоким статическим давлением, вызванным столбом масла, в зоны с низким статическим давлением, а также из зон высокой температуры в зоны более низкой температуры из масла будет выделяться газ. Быстрое перемешивание масла насосами и возникновение кавитации может также вызвать газовыделение.

Более однозначно проявляются колебания давления и изменения температуры окружающего воздуха, особенно если они происходят быстро. Газ сначала образует мельчайшие пузырьки, резко понижая электрическую прочность масла. Затем образуются пузырьки, поднимающиеся вверх.

Аналогичные явления происходят при отключениях крупных трансформаторов, сопровождающихся интенсивным охлаждением масла. Однако опытные данные о степени опасности этого явления, полученные на готовых трансформаторах, в литературе не приведены.

Таким образом, при анализе содержания газов и влаги в изоляции недостаточно рассматривать средние величины. В условиях эксплуатации влага и газы могут перемещаться и достигать критических значений в наиболее напряженных местах [Л. 19 и 20].

1-4. ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ДОПУСТИМОЙ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТРАНСФОРМАТОРА В СЛУЧАЕ ПОДДЕРЖАНИЯ НЕВЫСОКОЙ ВЛАЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Кроме опасности электрического пробоя, наиболее важным следствием увлажнения является ускорение старения изоляции. Этот эффект кумулятивен.

С целью увеличения срока службы изоляции в 1960 г. была разработана бумага повышенной термостойкости. Трансформаторы, изоляция которых изготовлена из такой бумаги, допускают более высокую температуру. Некоторые сторонники применения такой бумаги считали, что этим путем легче можно добиться повышения допустимой температуры нагрева трансформаторов, нежели путем обеспечения эффективной защиты от увлажнения. Если все же снабдить трансформаторы действенной защитой от увлажнения, то можно заметно повысить допустимую температуру их нагрева.

Во Франции были произведены эксперименты на нескольких трансформаторах мощностью 20 *Мва*, которые работали с температурой на 20°С выше указанной в национальных стандартах [Л. 18].

Необходимым условием такого повышения температуры признано поддержание влагосодержания бумаги не более 0,2%. Это достижимо в системах, исключаящих контакт с атмосферным воздухом и имеющих осушитель.

Предполагается, что количество продуктов окисления, в том числе воды, не возрастает при более высокой температуре.

1-5. О СОСТОЯНИИ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ЗАВОДСКИХ ИСПЫТАНИЯХ И В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Испытания изоляции трансформаторов на заводах производят после ее тщательной обработки.

Однако при эксплуатации трансформатора в изоляцию попадают вода, газ, продукты старения масла. Таким образом, создаются условия, понижающие электрическую прочность изоляции. Этот процесс может быть очень медленным и зависит от режима нагрузки трансформатора и системы защиты. Чем лучше трансформатор высушен на заводе и чем лучше защищен от увлажнения в эксплуатации, тем дольше его изоляция будет иметь

удовлетворительное состояние. Уменьшение электрической прочности, являющееся следствием повышенного содержания влаги в изоляции, как видно из предыдущего, очень трудно оценить, поскольку существует сложное перераспределение воды в бумажной изоляции, а также между бумагой и маслом, при изменении нагрузки. При нагревании и охлаждении имеют место перенасыщения бумаги и масла водой. В условиях эксплуатации влага и газы могут перемещаться и достигать критических значений в наиболее напряженных местах.

Резкое изменение режима работы может вызвать газовыделение в трансформаторе, масло которого соприкасается с воздухом расширителя.

Чем же объяснить тот факт, что трансформаторы обладают все же высокой надежностью? Иногда обнаруживают, что трансформатор работал с большим количеством воды на дне бака. Объяснение этому возможно следующее: изоляционные расстояния, определяемые испытательными напряжениями, соответствовали опыту эксплуатации многих лет. Этот опыт подтверждает, что принятый первоначально запас прочности изоляции оказывался больше, чем снижение ее электрической прочности в эксплуатации вследствие увлажнения.

Существующие испытательные напряжения установлены не только в соответствии с имеющимися в эксплуатации защитными средствами от перенапряжений (разрядники и пр.), но и на основании опыта эксплуатации при определенных защитных устройствах (оборудовании) от увлажнения и др.

Таким образом, опыт эксплуатации подтверждает или не подтверждает допустимость ухудшения состояния изоляции, определяемую способом защиты, по сравнению с состоянием, имевшем место при заводских испытаниях.

Признано целесообразным испытывать трансформаторы в других условиях [Л. 19 и 20], так как привести изоляцию в состояние, соответствующее условиям эксплуатации, на заводе бывает практически невозможно.

Следовательно, технологическая обработка на заводе, уровни заводских испытательных напряжений и система защиты в эксплуатации как от перенапряжений, так и от увлажнения и насыщения газом тесно связаны между собой.

Из сказанного вытекает, что применение совершенной системы защиты изоляции от влаги и газа позволило бы

повысить надежность трансформатора или изъять излишние запасы в изоляции.

Две существующие в настоящее время тенденции следует рассмотреть с этих позиций.

1. *Снижение уровней испытательных напряжений.* Для его осуществления может оказаться необходимым усовершенствование защиты трансформаторов от увлажнения и насыщения газом, так как при этом возможно снижение запасов в изоляции. Во всяком случае, допустимость снижения уровня испытательных напряжений должна быть подтверждена опытом эксплуатации.

2. *Усовершенствование сушки и вакуумной обработки на заводе.* Такое усовершенствование без изменения конструкции трансформатора безусловно будет способствовать повышению его эксплуатационной надежности. Однако если усовершенствование заводской сушки осуществлено с одновременным облегчением изоляции, но не сопровождается усовершенствованием конструкции в части защиты от воздействий влаги и газа и не подтверждено опытом эксплуатации, то оно может привести к снижению надежности. Действительно, в эксплуатации с течением времени изоляция достигнет того же состояния, что и до изъятия запасов изоляции. В этом случае изоляция окажется ослабленной.

Условия эксплуатации в части воздействия влаги и воздуха должны обязательно учитываться при любом изменении изоляции, а также при проектировании новых типов трансформаторов, особенно высших классов напряжения.

По-видимому, необходимы значительные усилия, направленные на создание средств защиты, способных поддерживать состояние изоляции в эксплуатации в максимальной степени близким к достигнутому на заводах. Это позволило бы повысить надежность трансформаторов или изъять излишние запасы изоляции. По мнению автора, без такой защиты может оказаться невозможной надежная эксплуатация трансформаторов класса напряжения 750 кВ и выше.

1-6. ТРЕБОВАНИЯ К СТЕПЕНИ СУШКИ И ДЕГАЗАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ

Суммируя сказанное, заключаем: остаточное влагосодержание, которое может быть допустимо для целлюлозной изоляции трансформатора, обусловлено практи-

чески желанием избежать слишком быстрого старения и для нового трансформатора должно быть ограничено величиной 0,5% [Л. 1]. По другим данным, эта величина должна составлять менее 0,2% [Л. 19 и 20]. На сессии СИГРЭ 1966 г. назывались цифры менее 0,2—0,5% * [Л. 19 и 20]. Большая цифра применяется, по-видимому, к трансформаторам, защищенным простым силикагелевым осушителем, меньшая — для случая более совершенной защиты. Кроме того, считается, что влагосодержание до 1 [Л. 1] или до 3% [Л. 20] приемлемо с точки зрения электрической прочности (по мнению некоторых авторов, и с точки зрения старения) [Л. 19 и 20]. Вопрос осложняется неравномерным распределением влаги в большом объеме изоляции и большим временем установления равновесного состояния.

В отношении масла авторы [Л. 1] полагают, что допустимым является содержание воды 5 г/т. Эта величина должна быть замерена сразу же после заполнения трансформатора и соответствующей обработки всего объема масла. Если обратиться к кривым равновесного содержания воды в целлюлозной изоляции и масле (см. рис. 1-3), то можно заключить, что возможно некоторое уменьшение этой величины после перехода части воды из масла в целлюлозную изоляцию, в которой влагосодержание изменится незначительно.

Специальное внимание должно быть уделено фильтрации масла с целью удаления твердых включений, остаточное количество которых не должно превышать 0,5 г/т [Л. 1].

Конечное содержание газов в изоляции зависит от величины остаточного давления в процессах сушки и пропитки маслом. Величина применяемого остаточного давления находится в пределах 10⁻²—1 мм рт. ст. В [Л. 19 и 20] типичным принято давление 0,2 мм рт. ст. В [Л. 1] предлагается принять остаточное давление 0,05 мм рт. ст.

Приведенные значения остаточного давления достигаются перед началом заливки маслом и несколько снижаются в процессе заливки за счет наиболее летучих фракций масла.

* Данные цифры являются средними для всей изоляции трансформатора. В отдельных ее частях остаточное влагосодержание может быть несколько меньшим или большим.

Иногда остаточное давление и температуру перед заливкой снижают до 0,05 мм рт. ст. и 50°С специально для того, чтобы избежать испарения масла.

Минимальная длительность пропитки изоляции маслом определяется на основании опытной пропитки образцов деталей (см. гл. 4).

Приведенные выше цифры в зарубежной литературе, как правило, не связывают определенно с конкретными классами напряжений. По-видимому, предполагается, что этот вопрос решается исходя из экономических соображений.

Глава вторая

УХУДШЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

2-1. ОБЩИЕ ДАННЫЕ

Изоляцию современного трансформатора подвергают тщательной обработке, чтобы свести к минимуму опасность повреждения ее при электрических испытаниях. В таком состоянии изоляция испытывается. Очевидно, что в эксплуатации содержание и распределение влаги и газа будет другим. При анализе измерений содержания газов и влаги в изоляции недостаточно рассматривать средние величины. Как указывалось выше, в условиях эксплуатации влага и газы могут перемещаться и достигать критических значений в наиболее напряженных местах.

Во время эксплуатации в трансформаторах с первоначально хорошо обработанной изоляцией, снабженных расширителями и эффективно действующими силикагелевыми влагопоглотителями, содержание влаги в твердой изоляции не превышает 5% по массе изоляции, а в масле 25 г/т, если эти трансформаторы находились под достаточной нагрузкой [Л. 20].

Согласно [Л. 14] после нескольких лет работы целлюлозная изоляция трансформаторов, имеющих свободное дыхание через силикагелевый влагопоглотитель, увлажняется до 1,5—4,5%. Были отмечены случаи значительно больших величин влажности, вызвавших необходимость вывода трансформатора в ремонт.

Подробное исследование влажности трансформаторов, находящихся в эксплуатации, описано в [Л. 15]. Определение содержания влаги производилось в образцах бумаги, взятых из трансформаторов, если это бывало возможно, или в образцах сухой бумаги, погруженных в бак трансформатора и извлеченных оттуда спустя несколько месяцев (благодаря этому достигалось состояние равно-

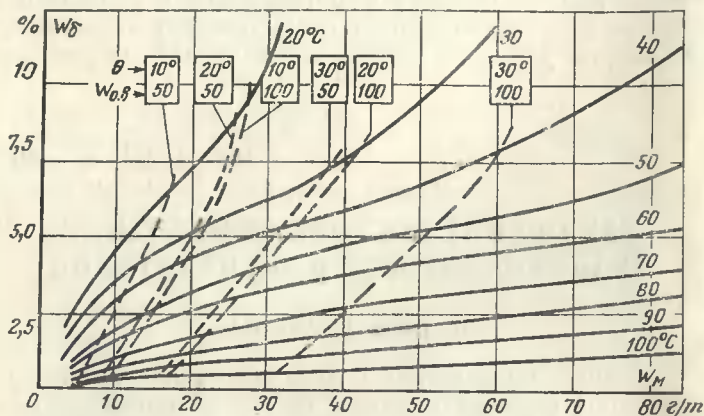


Рис. 2-1. Равновесное распределение влаги в сочетании воздух-масло-бумага в зависимости от ее содержания в масле и воздухе, окружающих бумагу.

$W_б$ — влагосодержание бумаги; $W_м$ — влагосодержание масла; T — температура масла (на кривых); θ — температура воздуха; $W_{о.в.}$ — относительная влажность воздуха [Л. 15].

весия между влажностью бумаги и масла). Влагосодержание, определенное последним методом, оказалось более высоким, чем в пробах бумаги, взятых из нагретых участков обмотки.

В бумажной изоляции силовых трансформаторов содержание влаги находится в пределах 0,8—4,7%; нижний предел относится к трансформаторам, снабженным азотной защитой, или к новым трансформаторам.

В бумажной изоляции распределительных трансформаторов мощностью 50—500 ква содержание влаги колебалось в пределах 1,6—10,6%. В изоляции измерительных трансформаторов, имеющих свободное дыхание и работающих при невысоких температурах, среднее значение влагосодержания составляло 7,4% (от 4,1 до 9,4%).

Значения содержания влаги, найденные упомянутыми выше методами, как указывается в [Л. 15], хорошо согласуются с равновесными значениями, показанными на рис. 2-1 (см. § 2-4).

В [Л. 15] приведены также результаты измерения степени полимеризации образцов изоляции, взятых из трансформаторов классов напряжения от 12 до 200 кВ, мощностью от 0,9 до 64 Мва, находившихся в эксплуатации или ремонте. Приведены данные по десяти трансформаторам, находившимся в эксплуатации в течение 25—38 лет. Степень полимеризации изоляции была 116—400 и только в одном трансформаторе 880.

На основании этих результатов авторы [Л. 15] констатируют, что в конце эксплуатации степень полимеризации бумаги становится равной примерно 100—200.

Этим же авторами было установлено, что наличие воздуха над поверхностью масла ускоряет старение бумаги примерно в 2,5 раза по сравнению с тем, которое наблюдается в вакууме или атмосфере азота [Л. 15].

Трансформаторы, у которых имеется непосредственный контакт масла с газом, в процессе эксплуатации постепенно достигают состояния полного насыщения газом.

Смогут ли трансформаторы, находящиеся в таких условиях (увлажнение и насыщение газом), выдержать классические электрические испытания, определяется запасами в изоляции и технологической обработкой, которой трансформатор подвергался на заводе перед испытаниями. Необходимо добиваться улучшения условий эксплуатации, особенно для крупных высоковольтных трансформаторов.

2-2. ИСТОЧНИКИ УВЛАЖНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ [Л. 7]

Все источники увлажнения изоляции трансформаторов в эксплуатации могут быть разделены на три группы: а) вода, остающаяся после заводского процесса сушки; б) вода, образующаяся в результате старения бумаги и масла; в) вода, проникающая в трансформатор в результате поглощения ее из сырого воздуха, входящего через несовершенные влагопоглотители, или других случайных причин.

Современные заводские процессы сушки оставляют в новом трансформаторе менее 0,5% воды (по массе изо-

ляции), т. е. весьма незначительное количество. Более важными являются источники, действующие в течение эксплуатации трансформатора.

Новая целлюлозная изоляция имеет степень полимеризации 1 200—1 300. При ее старении до степени полимеризации 400 образуется около 0,5% воды. По мере старения количество выделяющейся воды увеличивается: при степени полимеризации 150—2,5%, при 100—5%. Бумага со степенью полимеризации 360 имеет проч-

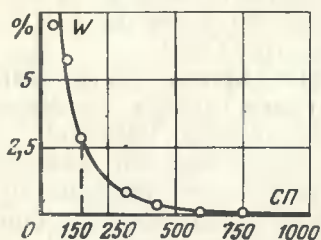


Рис. 2-2. Образование воды при термическом разложении бумаги [Л. 15].

ность на разрыв около половины первоначальной (см. рис. 1-11). Считается, что при меньшей степени полимеризации использование бумаги нецелесообразно, хотя Фабр и Пишон [Л. 15] констатируют, что в трансформаторе в конце срока службы степень полимеризации может достигать величины 100—200.

Отсюда следует, что вследствие старения бумаги образуется около 0,5—0,75% воды, в крайних случаях 2,5% (рис. 2-2). Практически, если трансформатор опасно увлажнился вследствие разложения бумаги, такой трансформатор слишком изношен, чтобы стоило сушить его.

При окислении масла наряду с кислотой, шламом и другими продуктами образуется также и вода. Соотношение этих продуктов зависит от качества масла и условий старения. Количество выделяющейся воды при кислотообразованием 1 мг КОН/г колеблется от 1 до 11 л на 4 500 л масла. Если трансформатор содержит 10 т бумаги и картона и 36 000 л масла, тогда окисление до 1 мг КОН/г даст от 9 до 90 л воды. Это количество воды увеличит влагосодержание бумаги от 0,1 до 1%.

Фактически невозможно предсказать скорость старения масла. Однако в эксплуатации редко бывает, чтобы масло приходилось заменять более часто, чем с интервалом в 10 лет, даже в распределительных трансформаторах, имеющих тяжелый режим работы [Л. 7]. Количество воды, выделяющейся при старении масла, хотя и значительно, но недостаточно велико, чтобы иметь серьезные последствия.

В полностью нагруженном трансформаторе целлюлоза состарится до степени полимеризации 360 в течение 20—30 лет и выделит за это время менее 1% воды. За это же время могут быть две смены масла. Старение масла увеличит содержание воды в бумаге на 1% дважды. Таким образом, общее содержание воды составит 3%.

Следовательно, основным источником увлажнения является окружающая атмосфера. Вместе с вдыхаемым воздухом вследствие несовершенства обычно применяемых силикагелевых осушителей в трансформатор вносится атмосферная влага, с течением времени увлажняющая трансформатор.

Ниже рассмотрены способы оценки распределения влаги в изоляции трансформаторов.

2-3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДЫ В ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА *

Обычно предполагают, что при данной температуре существует равновесие и степень насыщения воды в компонентах изоляции одинакова. Для большинства практических целей такое упрощение приемлемо, так как дает представление об общих тенденциях и состоянии равновесия при стационарном режиме работы трансформатора. При температуре 20°С в замкнутой системе, содержащей свежее масло, бумагу, воздух и воду при относительной влажности воздуха 60%, масло должно содержать воды 60% от 55 г/т, что составит 39 г/т **, а бумага 60% от 17%, что составит 10% воды.

Растворимость воды в масле и насыщение водой воздуха зависят от температуры, увеличиваясь с ее ростом. Количество воды, забираемой бумагой из воздуха, при данной относительной влажности не зависит от температуры (рис. 2-3).

Зависимость от температуры можно иллюстрировать следующим примером. Трансформатор работает при постоянной нагрузке и температуре масла 80°С. Расширитель сообщается с атмосферой через силикагелевый по-

* По вопросу влагообмена в эксплуатируемых трансформаторах см. также статьи В. В. Пучковского и Б. П. Глушкова в журнале «Электрические станции», 1958, № 10, 1960, № 3 и 1961, № 11.

** Приведенное здесь и ниже насыщающее влагосодержание масла, взятое из [Л. 7], несколько отличается от значений, даваемых кривой 1 на рис. 1-1.

глотитель. Масло в расширителе имеет температуру 40°C . Предположим, что содержание воды в бумаге 4% , т. е. четыре семнадцатых насыщающего значения. Масло также будет содержать четыре семнадцатых насыщающей величины при 80°C , т. е.

$$\frac{4}{17} \cdot 170 \approx 40 \text{ г/т.}$$

Масло в расширителе содержит то же количество воды, но при 40°C его насыщающее значение равно 85 г/т и поэтому степень насыщения равна $\frac{40}{85} \cdot 100 = 47\%$. Воз-

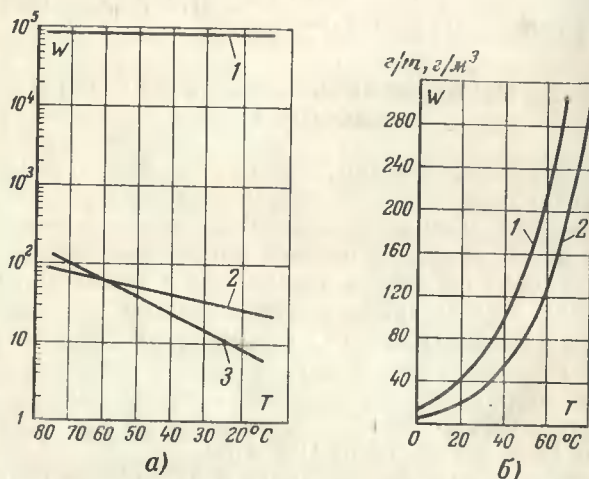


Рис. 2-3. Изменение влагосодержания с температурой.

а — содержание воды W в воздухе (г/м^3), в масле и бумаге (г/т) при 50% насыщения и разн. температуре T ; 1 — бумага; 2 — масло; 3 — воздух [Л. 7]. *б* — насыщающая влажность масла (1) и воздуха (2) в зависимости от температуры T [Л. 22].

дух в расширителе будет иметь относительную влажность 47% при 40°C . Воздух при этих условиях содержит воды около $20,5 \text{ г/м}^3$. Его точка росы около 23°C . Следовательно, в случае понижения температуры стенок расширителя ниже 23°C произойдет конденсация воды. Свежее масло насыщается водой в размере 40 г/т при 8°C . Если температура после отключения трансформатора будет ниже 8°C , то в масле появится вода в виде эмульсии. Если предположить, что температура 15°C , то сте-

пень насыщения была бы $\frac{40}{48} \cdot 100 = 83\%$, т. е. больше

имеющейся относительной влажности бумаги, которая составляла 23,5% (см. выше). В таком положении бумага забрала бы часть воды из масла и несколько высушила его. Переданное количество влаги зависит от относительных количеств бумаги и масла в трансформаторе. Если в трансформаторе 10 т бумаги и 25 т масла, то вначале бумага содержала бы 41 кг воды, а масло только 1 кг. При более низкой температуре и новом равновесии содержание воды в масле уменьшилось бы до $\frac{23,5}{100} \cdot 48 \text{ г/т} = 11 \text{ г/т}$, в результате передачи около 725 г

воды бумаге. Однако скорость перехода воды из масла к бумаге мала, и при отсутствии циркуляции масла для полного завершения перехода, вероятно, требуется около месяца.

2.4. РАВНОВЕСНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ВЛАГИ В СОЧЕТАНИИ ВОЗДУХ—МАСЛО—БУМАГА

Как масло, так и бумага в силовых трансформаторах при эксплуатации абсорбируют влагу — масло из атмосферы, бумага из масла. Стабильные соотношения между количествами влаги в них управляются физическими законами равновесия. Из этих законов могут быть сделаны определенные обобщения, относящиеся к трансформаторам со свободным дыханием, т. е. к трансформаторам, у которых пространство над поверхностью масла сообщается с атмосферой.

Равновесное влагосодержание изоляции трансформатора достигается только при стационарных условиях, т. е. постоянной нагрузке и постоянной окружающей температуре. Фактически же трансформатор работает при переменных условиях.

Обычно имеют место колебания в течение суток. Авторы [Л. 15] считают, что в этих условиях влажность изоляции определяется средней температурой трансформатора.

Знание равновесного содержания влаги позволяет иметь общее представление о направлении влагообмена и иметь приближенную оценку влагосодержания изоляции трансформатора.

Предположим, что бумага погружена в масло, которое находится в соприкосновении с влажным окружающим воздухом. Интересно знать, какова будет степень увлажнения масла и бумаги в данном сочетании при достижении равновесного состояния.

Авторы [Л. 15] приводят зависимость (см. рис. 2-1) влажности от температуры масла и состояния воздуха (температуры и относительной влажности).

На рис. 2-1 видно, что когда бумага находится в масле в контакте с воздухом, имеющим температуру $+20^{\circ}\text{C}$ и влажность 50% (или 10°C и относительную влажность 100%), содержание влаги в бумаге составит примерно 2% при температуре масла равной 60°C и снизится до значения менее 1% при температуре масла более 80°C . С другой стороны, когда масло находится при температуре 20°C , содержание влаги в бумаге достигает 8—9%.

Наличие масла не предохраняет бумагу от увлажнения. Оно просто замедляет достижение момента установления равновесия. Действительно, состояние воды, растворенной в масле, весьма близко к состоянию водяных паров в воздухе. Существует динамическое равновесие между содержанием воды в масле и в воздухе над поверхностью масла при одной и той же температуре.

Более краткое изложение закона равновесия таково: при одной и той же температуре относительная влажность (в состоянии равновесия) одинакова в масле и воздухе, который с ним соприкасается.

2-5. ИЗУЧЕНИЕ РАВНОВЕСНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВЛАГИ В ИЗОЛЯЦИИ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ [Л. 22]

Для атмосферных условий основной характеристикой является абсолютная влажность насыщенного воздуха (АВН). Она выражается в граммах на кубический метр и отнесена к температуре воздуха.

На рис. 2-3,б приведены характеристики влажности для масла и воздуха (кривая для масла на рис. 2-3,б совпадает с кривой 1 на рис. 1-1).

Зависимость для насыщающей воды в масле менее определена, чем для воздуха, так как она зависит и от качества масла.

Типичные величины для современного чистого трансформаторного масла приведены на рис. 2-3.

Условием равновесия является

$$\frac{W_m(z, m)}{W_n(z, m)} = \frac{AB}{ABH},$$

где W_m — количество воды в масле в данных условиях, г/г; AB — абсолютная влажность воздуха при тех же условиях; W_n — количество воды в масле в условиях насыщения; ABH определено выше.

Равновесное количество влаги в масле можно получить непосредственно по абсолютной влажности воздуха и насыщающим величинам (рис. 2-3, б). Преимуществом использования абсолютной, а не относительной влажности воздуха является то, что последняя изменяется в зависимости от температуры воздуха, тогда как абсолютная влажность воздуха есть величина практически постоянная в течение дня и ночи и составляет в Великобритании в среднем 11 г/м³ летом и 6,5 г/м³ зимой. Количество воды в масле в условиях равновесия при различных температурах масла можно получить с помощью приведенного выше соотношения, а зависимость приведена на рис. 2-4.

Далее рассмотрим условия равновесия влаги в твердой изоляции. Насыщающие значения здесь не являются величинами постоянными, однако для бумаги величина 15% может быть принята для практических целей (у других авторов 17%, см. выше). Тогда количество воды в бумаге в процентах

$$15 \frac{W_m}{W_n},$$

что и представлено на рис. 2-5. Допущение, которое было сделано выше, позволяет сделать только приблизительные обобщающие выводы.

Рисунки 2-4 и 2-5 построены на основе равновесия физических состояний. Маловероятно, что в большом трансформаторе в условиях изменяющейся температуры и влажности равновесие для изоляции в пространстве и времени когда-либо достигается, а тем более поддерживается. Поэтому, если результаты измерений в каком-либо месте точно совпадут с расчетными величинами, это следует считать простым совпадением. Тем не менее необходимо принимать во внимание тенденцию и общий характер этих кривых для практических целей. Они показывают, например, что если трансформатор в эксплуатации достаточно нагружен, изоляция автоматически будет

находиться в хороших условиях согласно современным нормам.

Оба соотношения и соответствующие кривые (рис. 2-4 и 2-5) показывают, что создаются неблагоприятные условия для изоляции трансформатора при его отключении. Температура масла при этом приближается к температуре окружающего воздуха. Из приведенных соотношений и рисунков видно,

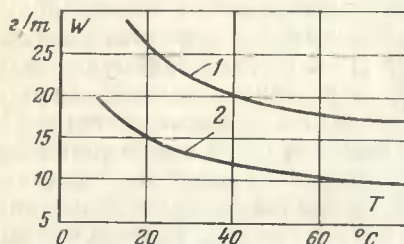


Рис. 2-4. Количество воды в масле W в условиях равновесия в зависимости от температуры T масла [Л. 22].

1 — для летних условий; 2 — для зимних условий (Великобритания).

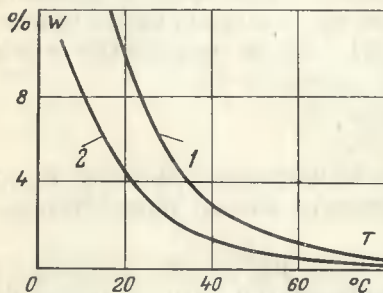


Рис. 2-5. Количество воды в бумаге W в условиях равновесия в зависимости от ее температуры T .

1 — для летних условий; 2 — для зимних условий [Л. 22]. (Великобритания).

но, что при этом может быть высокая влажность и масла, и изоляции.

Следует отметить, что при низкой окружающей температуре, скажем 10 $^{\circ}C$, большое и опасное количество воды может содержаться в изоляции обмотки, тогда как в масле количество воды относительно мало и не вызывает тревоги. Иными словами, определение количества воды в масле или его электрической прочности могут не дать представления об опасном содержании воды в изоляции.

Практическое применение теории. Изложенные выше принципы могут быть применены к трансформаторам в эксплуатации при типичных нагрузочных циклах и характерных для них температурах масла и окружающего воздуха. Экстремальные точки, суточные (день и ночь) и сезонные (лето и зима) рассмотрены отдельно.

Хотя равновесные условия никогда не достигаются, практические выводы можно сделать, усредняя дневные и ночные величины.

Рабочие температуры, принятые при последующих расчетах:

	Лето	Зима
Температура воздуха, °С	16	6
Температура верхних слоев масла, °С	45	30
Средняя температура обмотки, °С	55	40
Абсолютная влажность окружающего воздуха, г/м³	11	6,5

Температура верхних слоев масла использована для определения условий равновесия масла, а средняя температура обмотки — для определения равновесия изоляции. Получены следующие величины:

	Лето	Зима
Вода в масле, г/т	19	13
Вода в изоляции, %	1,6	1,9

Эти величины хорошо соответствуют опыту эксплуатации в течение многих лет. Результаты относятся к масляным трансформаторам со свободным дыханием.

В обычных конструкциях с расширителем поверхность масла соприкасается с воздухом, прошедшим через силикагель или осушитель воздуха.

Характеристики осушителей целиком определяются их конструкцией и обслуживанием. Их назначение состоит в том, чтобы уменьшить абсолютную влажность воздуха в расширителе. На рис. 2-6 показано возможное широкое изменение эффективности осушителя, что подчеркивает важность правильной конструкции и обслуживания.

Например, при 35°С осушитель согласно рис. 2-6 в крайних случаях может уменьшить летнюю величину влажности в расширителе с 11 до 0,5 г/м³ или даже увеличить ее до 16 г/м³. В последнем случае его действие вредно.

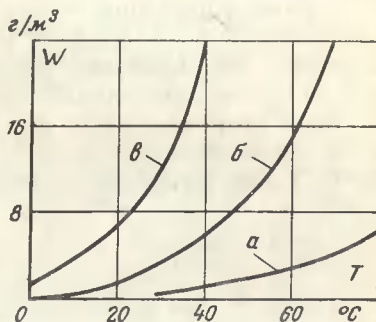


Рис. 2-6. Возможное изменение эффективности силикагелевого осушителя. Зависимость абсолютной влажности воздуха в расширителе W от температуры T .
 a — для сухого силикагеля; b — для силикагеля с цветом, начинающим меняться; v — для силикагеля, полностью изменившего цвет [Л. 22].

Имеется несколько указаний в литературе об измерении влагосодержания изоляции трансформаторов в эксплуатации при защите их силикагелевыми осушителями. Приводятся величины от 1 до 6,5% для изоляции и от 10 до 75 г/т для масла. Некоторые из этих трансформаторов были в эксплуатации много лет [Л. 23].

Подробное исследование приведено в [Л. 24]. Семьдесят больших силовых трансформаторов в США были взяты произвольно со сроком службы до 21 года, и в числе других замеров было произведено определение количества воды в масле. Все трансформаторы были или герметизированы, или имели расширитель, снабженный осушителем. Не было отмечено какой-либо разницы в характеристиках или ухудшения со временем. Содержание воды в масле, измеренное во время спада нагрузки и зимой, составило от 7 до 18 г/т, причем большинство измерений давали результаты до 12 г/т.

Увлажнение за время нахождения в резерве. Уже указывалось на уязвимость отключенных трансформаторов. Трансформаторы могут выводиться из работы по разным причинам, а также могут быть поставлены в резерв. Это часто бывает, когда однофазный трансформатор является резервным к трехфазной группе.

Весь трансформатор, его масло и обмотки охлаждаются до температуры окружающего воздуха, скажем до 20° С. Тогда, вычисляя, получаем:

	Лето	Зима
Вода в масле, г/т	25	15
Вода в изоляции, %	10	5,6

Конечно, эти величины являются крайне опасными, так как электрическая прочность изоляции обмотки резко уменьшается. Известен один случай, когда трансформатор высокого напряжения, будучи включенным в таких условиях, немедленно повредился. Было обнаружено, что витковая изоляция сильно увлажнена, однако масло имело высокую электрическую прочность, так как оно было хотя и с высоким содержанием воды, но достаточно чистое. Если же осушитель на расширителе правильно эксплуатируется, то он обеспечивает вполне надежную защиту и в подобных случаях.

Используя кривую *a* на рис. 2-6, получим:

	Лето	Зима
Вода в масле, г/т	3,1	3,4
Вода в изоляции, %	1,2	1,3

В вышеприведенном анализе величины соответствуют нормальным климатическим и нагрузочным условиям. Можно сделать заключение, что для трансформаторов, оборудованных осушителями на расширителе, характерны следующие величины: для воды в масле 10—25 г/т и для воды в бумаге 1,5—3% (при условии правильной эксплуатации осушителей).

Эти цифры ясно показывают, как механизм равновесия обеспечивает хорошее состояние масла и бумаги в течение долгой и непрерывной работы трансформаторов [Л. 23].

Тем не менее при изготовлении трансформатора перед прохождением стандартных электрических испытаний достигаются гораздо лучшие показатели как для масла, так и для бумаги. Надо полагать, что электрическая прочность, установленная этими испытаниями, должна быть несколько снижена, когда она рассматривается в эксплуатационных условиях.

2-6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ В ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЧКИ РОСЫ [Л. 25]

Пары воды в газе. Численное значение влажности может быть выражено точкой росы, относительной влажностью или абсолютной влажностью, т. е. в граммах воды на 1 м³ газа. Точка росы есть температура, при которой начинается конденсация водяных паров. Относительная влажность есть отношение количества водяных паров в данном газе к их насыщающему значению при той же температуре.

На рис. 2-7 и 2-8 приведена зависимость парциального давления водяных паров от температуры. Если в объеме газа V_g парциальное давление водяных паров составляет P_w (ат), то объем водяных паров при данной температуре и давлении равен:

$$P_w V_g. \quad (2-1)$$

Используя кривые на рис. 2-7 и 2-8, легко определить соотношение между относительной влажностью (ОВ), точкой росы и парциальным давлением. Например, требуется определить относительную влажность при температуре 30°С, если точка росы составляет 15°С. Из кри-

вых насыщающее парциальное давление при 30° С составляет 0,04 ат, а при 15° С — 0,017 ат. Тогда

$$OB = \frac{0,017}{0,04} \cdot 100 = 42,5\%.$$

Если известен вес водяных паров на литр газа при каком-то давлении и температуре, то по величинам OB и температуры может быть найден вес воды на единицу

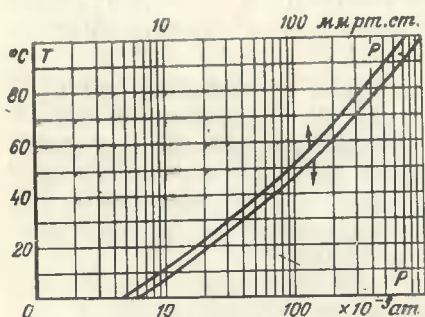


Рис. 2-7. Соотношение между температурой T (от 0 до 100° С) и парциальным давлением водяных паров P [Л. 25]. Для верхней кривой масштаб оси абсцисс сверху; для нижней — снизу.

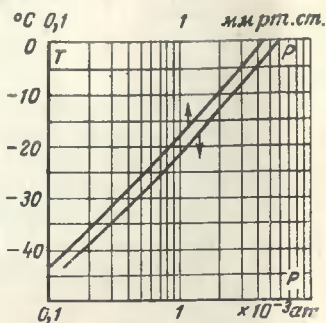


Рис. 2-8. Соотношение между температурой T (от —50 до 0° С) и парциальным давлением водяных паров P [Л. 25]. Масштабы для кривых такие же, как на рис. 2-7.

объема. При давлении 1 ат и температуре T масса воды на единицу объема (приведенный к нормальному давлению и температуре) будет равен:

$$p_s \cdot \frac{OB}{100} \cdot \frac{273}{273 + T} \cdot 0,8, \text{ г/л},$$

где OB — относительная влажность, %; p_s — насыщающее парциальное давление водяных паров по рис. 2-7 и 2-8.

Если газ, содержащий водяные пары, сжать или понизить температуру, или сделать то и другое, то может произойти конденсация влаги. Пусть воздух объемом V_g при температуре 50° С, $OB = 50\%$ при давлении 1 ат охлаждаем до 10° С и сжимаем до 2 ат. Тогда в исходных условиях количество водяных паров

$$\begin{aligned} & V_g p_s \frac{OB}{100} \cdot \frac{273}{273 + T} \cdot 0,8 = \\ & = V_g 0,12 \cdot 0,5 \frac{273}{323} \cdot 0,8 = 0,0404 V_g, \text{ г}. \end{aligned}$$

В изменившихся условиях, когда объем уменьшился в 2 раза:

$$\frac{1}{2} V_g 0,012 \cdot \frac{273}{283} \cdot 0,8 = 0,0046 V_g, \text{ г},$$

т. е. $0,036 V_g, \text{ г}$ паров сконденсируется.

Растворение воды в масле. Наиболее полное исследование вопроса растворимости воды в масле выполнено Кауфманом и др. [Л. 26], результаты этой работы суммированы в виде кривых на рис. 2-9. Если водяные пары рассматривать как газ, то его растворимость в свежем трансформаторном масле можно выразить законом Генри:

$$v_w = v_0 k_w p_{gw}, \quad (2-2)$$

где v_w и v_0 — объемы водяных паров и масла (относительные к нормальному давлению и температуре); k_w — буизеновский коэффициент для водяных паров в масле; p_{gw} — парциальное давление водяных паров в растворе в масле.

Буизеновский коэффициент в функции температуры дает кривая на рис. 2-10.

Количество воды, растворяющейся в масле (g/t), определяется по формуле

$$W_m = 895 p_{gw} k_w. \quad (2-3)$$

При температуре масла, отличной от температуры соприкасающегося с ним воздуха, растворимость определяется температурой масла. Так, если равновесие имело место при 30°C и $ОВ = 60\%$, а затем произошло охлаждение до 20°C , происходит насыщение масла и в нем образуется эмульсия воды.

Сказанное относится к свежему маслу. В старом масле, по мере его окисления, положение значительно усложняется. Фаллон [Л. 27] показал, что старое масло содержит в состоянии равновесия больше воды, чем новое при том же давлении и относительной влажности. Всю воду можно разделить на две части: а) связанная вода в виде альдегидов, алкалоидов и оксидных полярных групп, являющихся продуктами окисления масла; б) свободная вода.

Для упрощения далее рассматривается только свежее или почти свежее масло.

Вода, абсорбируемая изоляционными материалами. Целлюлозные материалы, используемые в трансформаторах: бумага, картон, дерево, очень гигроскопичны. Вода в таких материалах снижает их электрическую прочность, увеличивает $\lg \delta$ и отрицательно влияет на характеристики старения.

Неагретая сухая бумага, соприкасаясь с влажным воздухом, сильно абсорбирует влагу.

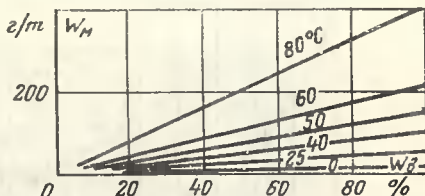


Рис. 2-9. Соотношение между количеством воды, растворенной в масле, W_m и относительной влажностью воздуха W_v (температура воздуха и масла одинакова, давление 760 мм рт. ст.) [Л. 25].

Абсорбционные характеристики бумаги в основном следуют зависимости, предложенной Френдлихом (но могут несколько изменяться в зависимости от типа бумаги и технологии ее изготовления). По Френдлиху, вес воды, абсорбируемой бумагой, в процентах выражается произведением

$$a p_w^n, \quad (2-4)$$

где p_w — парциальное давление водяных паров в воздухе, с которым соприкасается бумага; a — величина, являющаяся обратной

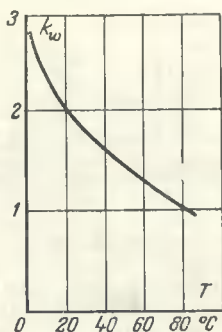


Рис. 2-10. Бунзеновский коэффициент для водяных паров в трансформаторном масле в зависимости от температуры T . Рассчитано по данным Кауфмана $k_w = 1,12 \frac{2}{T} (10^3 p_{gm})$ [Л. 25].

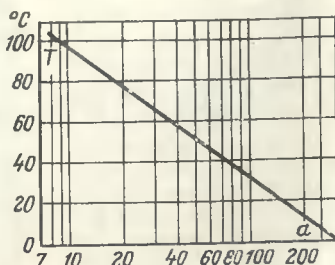


Рис. 2-11. Постоянная a в функции от температуры T в уравнении (2-4) [Л. 25].

функцией температуры (рис. 2-11); n — величина, зависящая от температуры.

На рис. 2-12 в логарифмическом масштабе изображены зависимости (2-4) при различной температуре. Эти кривые получены на основе

результатов работы Пайпера [Л. 28]. Ввиду трудностей пересчета при получении кривых (рис. 2-12) величина n имеет небольшую погрешность.

Авторы [Л. 29], исследовавшие абсорбцию бумаги при температуре от 100 до 150°С, показали, что имеет место некоторый гистерезис при умеренной влажности, проявляющийся в том, что ранее увлажненная бумага приходит в равновесие с атмосферой при более высокой влажности, чем сухая в этом же воздухе. Этот эффект исчезает после продолжительного нагревания при высокой температуре. Однако в приближительных расчетах гистерезисом можно пренебречь.

Приведенные кривые полезны для определения остающейся воды после сушки или для определения количества воды, которая должна быть удалена после того, как трансформатор длительное время стоял в цехе.

Время, необходимсе для того чтобы влага в изоляции пришла в равновесие с атмосферой, конечно, определить трудно. Кроме прочего, оно зависит и от отношения поверхности изоляции, нахо-

дящейся в соприкосновении с окружающей атмосферой, к объему изоляции.

Фабр [Л. 15] определил влажность бумаги в масле как функцию содержания воды в масле и температуры.

Его кривые хорошо согласуются с характеристиками на рис. 2-12, если по температуре воздуха и относительной влажности определить парциальное давление водяных паров в масле.

Это совпадение, хотя быть может и ограниченное, очень важно. Необходимы дополнительные исследования, чтобы проверить, верно ли это для всех масел, свежих и состарившихся.

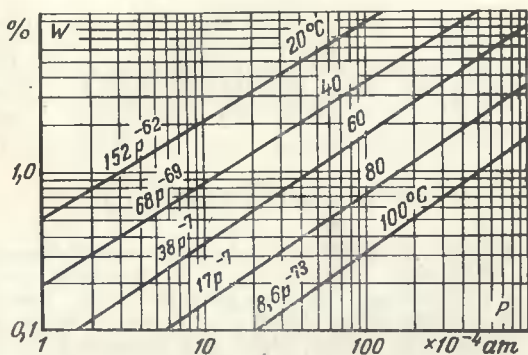


Рис. 2-12. Влажность бумаги (по Пайперу) W в зависимости от температуры и давления P [Л. 25].

Кроме того, бумага в электрическом поле может иметь несколько иные абсорбционные характеристики, что также должно быть исследовано. Пока же ввиду отсутствия достаточных сведений следует полагать, что пропитка маслом не изменяет абсорбционные свойства бумаги.

Таким образом, зная содержание водяных паров в воздухе (или газе), масле и бумаге, выраженное через парциальное давление, нетрудно определить их распределение в системе из трех сред в функции различных рабочих температур.

Влияние температуры на распределение влаги. Ниже приводится иллюстрация законов, о которых говорилось выше, и показывается преимущество использования парциального давления водяных паров.

В герметизированном трансформаторе с газовой подушкой над маслом с изменением рабочей температуры вода перераспределяется между газом, маслом и волокнистой изоляцией обмотки. Так, при длительной нагрузке с максимальной температурой передача будет происходить от бумажной изоляции через масло в газ. Время, необходимое для достижения равновесия, может быть очень большим. Если нагрузка была снята и охлаждение происходило относительно быстро по сравнению с временем достижения равновесия парциальных давлений в газе, масле и бумаге, то вода может конденсироваться в газовом пространстве и капать в масло.

Зная влагосодержание в воздухе или других газах, масле и бумаге, выраженное через парциальное давление насыщающих водяных паров в зависимости от температуры, легко определить его распределение в системе из трех сред в функции температуры. Общее влагосодержание изоляции трансформатора в литрах для начального состояния при температуре T_i можно представить в соответствии с уравнениями (2-1), (2-2) и (2-4) следующей формулой

$$\frac{w_p}{80} a_i p_{wi}^n + p_{gi} k_{wi} v_0 + p''_{wi} y_i v_0 \frac{273}{T_i + 273}, \text{ л.} \quad (2-5)$$

При изменившемся состоянии с конечной температурой T_f для установления равновесного влагораспределения между изолирующими средами необходима продолжительная работа трансформатора в неизменном режиме. Тогда парциальные давления паров воды в масле, газе и бумаге выравниваются и содержание влаги в них будет выражено соотношением

$$\frac{w_p}{80} a_f p_{gf}^n + p_{gf} k_{wf} v_0 + p_{gf} y_f v_0 \frac{273}{273 + T_f}, \text{ л.} \quad (2-6)$$

Здесь w_p — вес бумажной изоляции, г; a_i, a_f — коэффициент, соответствующий начальной температуре T_i и конечной температуре T_f ; p_{gi}, p_{gf} — парциальное давление водяных паров, растворенных в масле при начальной температуре T_i и конечной температуре T_f ; k_{wi}, k_{wf} — бунзеновский коэффициент для начальной температуры T_i и конечной температуры T_f ; v_0 — объем масла, л; p_{wi}, p''_{wi} — парциальное давление водяных паров, насыщающих бумагу и газ при начальной температуре T_i ; y_i, y_f — отношение объема газовой подушки к объему масла при температурах T_i и T_f .

Так как начальное и конечное количества водяных паров в герметизированном трансформаторе равны при разных температурах, то можно приравнять уравнения (2-5) и (2-6). Отсюда определим p_{gf} .

Пример. $p_{wi} = 0,016 \text{ ат}$; $a_i = 17$; $n = 0,7$ (эти цифры соответствуют содержанию остаточной влаги в бумаге около 1%).

$$w_p = 2 \cdot 10^6 \text{ г}; v_0 = 27 \text{ 000 л};$$

$$p_{gi} = p''_{wi} = 0,01 \text{ ат}; y_i = 0,15;$$

$$y_f = 0,1; k_{wi} = 2; k_{wf} = 1;$$

$$a_f = 12,5; n = 0,72; T_f = 80^\circ \text{ С.}$$

Начальное содержание воды в системе равно:

$$\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 0,016^{0,7}}{80} + 0,01 \cdot 2 \cdot 27 \text{ 000} + \\ + 0,01 \cdot 0,15 \frac{273}{293} \cdot 27 \text{ 000} = 33 \text{ 577,7 л.}$$

Конечное содержание воды

$$\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot p_{gf}^{0.7}}{80} + p_{gf} \cdot 1 \cdot 27 \, 000 + p_{gf} \cdot 0,1 \cdot 27 \, 000 \frac{273}{353} = 33 \, 577,7 \text{ л.}$$

Приравнивая, получаем:

$$12,65 p_{gf}^{0.7} + p_{gf} 0,8 = 1.$$

Приблизительно

$$p_{gf} = \frac{1}{12,65} \text{ и } p_{gf} = 0,028 \text{ ат, или } 21,7 \text{ мм рт. ст.}$$

Это соответствует насыщенной атмосфере при 24°C (см. рис. 2-7). Если температура газа станет ниже, то произойдет конденсация.

Масло при 80°C содержало водяных паров

$$p_{gf} k_{wf} v_0 = 286 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9 v_0.$$

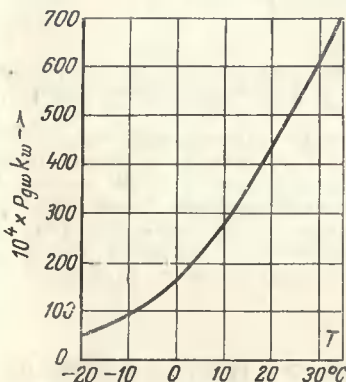


Рис. 2-13. Граница (температура T) изменения состояния воды в масле (получено с использованием бунзеновского коэффициента по данным Кауфмана). Выше кривой — насыщенное водой масло, ниже — ненасыщенное [Л. 25].

При быстром охлаждении, когда величина $p_g k_w$ будет равна или меньше, чем $257 \cdot 10^{-4}$, вода выделится в виде эмульсии. Из рис. 2-13 следует, что это произойдет при 8°C .

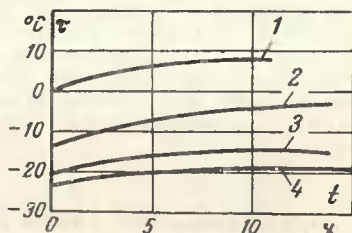


Рис. 2-14. Точка росы τ сухого газа, выпускаемого при снятии вакуума в камеру с трансформатором 30 Мва в зависимости от времени t , с момента выпуска сухого воздуха [Л. 25].

Этот пример показывает опасность снижения температуры трансформатора, изоляция которого увлажнена. При этом выделяется свободная вода, что крайне опасно (см. § 1-3).

Использование измерения точки росы для определения степени сушки изоляции. Как дополнительный метод оценки степени сушки, можно использовать определение точки росы воздуха, выпу-

иценного сухим в шкаф при снятии вакуума. Установление равновесия может быть ускорено с помощью вентиляторов. На рис. 2-14 показано несколько последовательно снятых кривых. Последняя дает точку росы при температуре около минус 20° С. Сушился трансформатор с количеством изоляции 2200 кг. Сушка осуществлялась под вакуумом. Температура в конденсаторе достигала минус 30° С, и практически вся вода из воздуха удалялась. Средняя температура изоляции составляла 80° С. В приведенной ниже таблице дано сравнение измеренного количества воды, удаленного между измерениями точки росы, с подсчитанным (по точке росы). После каждого измерения точки росы следовал цикл сушки.

Измеренная точка росы (рис. 2-14), °С	Парциальное давление водяных паров (рис. 2-7 и 2-8), ат	Вода, остающаяся в изоляции (рис. 2-12)	Уменьшение количества воды, % (по точке росы)	Измерено выделившейся воды, %
+8	$105 \cdot 10^{-4}$	0,74	—	—
—2,5	$47 \cdot 10^{-4}$	0,43	0,31	0,26
—15	$17 \cdot 10^{-4}$	0,22	0,21	0,13
—19	$12 \cdot 10^{-4}$	0,17	0,05	0,045

Результаты измерений показывают, что количества воды, определенные измерением точки росы и измеренные непосредственно, очень близки.

Метод определения остаточного влагосодержания по измерению точки росы будет давать правильный результат только тогда, когда при достижении равновесного состояния с газом изменение остаточного влагосодержания будет незначительно. Метод чувствителен даже при небольших значениях влагосодержания [Л. 25]. Метод точки росы можно использовать для проверки состояния изоляции трансформаторов, прибывающих на место установки без масла.

2-7. СОДЕРЖАНИЕ ГАЗОВ В МАСЛЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ [Л. 30]

В настоящее время имеется сравнительно мало данных о растворимости газов в трансформаторном масле. Однозначно установлена лишь прямая пропорциональность между количеством растворенного газа и его давлением над зеркалом масла в установившемся состоянии. Кроме того, известно, что с повышением температуры растворимость увеличивается. На рис. 1-5 и 2-15 приведены соответствующие данные, которые, однако, нельзя распространять на все масла. По-видимому, это связано с неодинаковым для всех масел поверхностным натяжением на границе масла с газом.

Различная растворимость разных газов в одном и том же масле приводит к тому, что состав газов в масле может оказаться совершенно иным, чем в газовом пространстве над маслом. Это положение остается справедливым также и в установившемся состоянии.

Согласно закону Генри растворимость в масле какого-либо газа, входящего в состав газовой смеси, относится к растворимости чистого газа, как парциальное давление этого газа к суммарному давлению всех газов над маслом.

Если, например, при давлении 736 мм рт. ст. и 25°С растворимость кислорода в масле составляет 15,9% (по объему), а азота 8,6% (по объему), то растворимость воздуха с содержанием 20% кислорода и 80% азота составит $0,2 \cdot 15,9 + 0,8 \cdot 8,6 = 10,1\%$ (по объему), что хорошо согласуется с результатами измерений. Ниже приведена растворимость газов в трансформаторном масле при 25°С и 736 мм рт. ст.

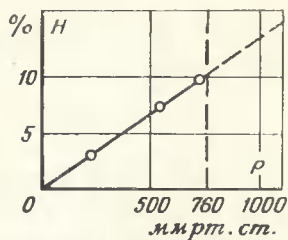


Рис. 2-15. Растворимость H воздуха в трансформаторном масле в зависимости от давления P [Л. 30].

Газ	Объем, %
Воздух	10,0
Азот чистый	8,56
Кислород чистый	15,92
Азот из воздуха	6,98
Кислород из воздуха	3,02
Окись углерода	9,0
Двуокись углерода	120,0

Закон действителен для газов, у которых в жидкой среде сохраняется газовый характер. Очевидно, что тяжелые углеводороды не сохраняют газовый характер, а конденсируются в масле.

Из сказанного следует, что состав газов, растворенных в масле, может сильно отличаться от состава газов над маслом до и после достижения состояния равновесия.

В настоящее время масло перед его заливкой в трансформатор высокого напряжения подвергают вакуумной обработке для его обезвоживания и дегазации. В большинстве случаев речь идет об удалении воздуха. Если затем, после снятия вакуума, масло в трансформаторе придет в соприкосновение с воздухом или азотом, то эти газы снова начнут диффундировать в масло. Скорость диффузии будет зависеть от того, насколько быстро происходит смена слоев масла, насыщенных газом, объемами масла с малым содержанием газов.

В трансформаторе, работающем с неизменной нагрузкой, дыхание будет незначительным и масло в нем будет насыщаться медленно.

Наоборот, трансформатор с регулярным дыханием, обусловленным большими суточными колебаниями нагрузки, будет очень быстро поглощать газы.

Об опасности такого состояния масла вследствие возможного выделения пузырьков газа благодаря возникновению кавитации при быстром перемешивании масла, а также благодаря изменению температуры и давления говорилось в § 1-3.

Здесь рассмотрим только числовой пример.

Пусть в трансформаторе содержится 54 000 л масла, которое вследствие непрерывного соприкосновения с воздухом насыщено им. Пусть первоначально температура масла составляла 40°С, а затем снизилась до 20°С. Тогда по приближенному расчету согласно рис. 1-5 из общего растворенного объема воздуха 5540 л освобождается около 190 л. Этот воздух сначала образует мелкие поднимающиеся пузырьки, которые под крышкой могут сформироваться в крупные пузыри. Аналогичный расчет может быть произведен для случая снижения давления (рис. 2-15). Определенное значение имеет нагрузка трансформатора в данный момент, а также его постоянная нагрева.

2-8. СТАРЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА. ВЛИЯНИЕ ЧИСТОТЫ ОЧИСТКИ МАСЛА

Практика эксплуатации трансформаторного масла. Обычно срок службы трансформаторного масла, гарантируемый его изготовителями, составляет 6—8 лет. В большинстве случаев срок службы масла до его очистки или смены составляет более 10 лет. При хорошей

эксплуатации, как показал опыт, срок службы масла достигает 20—25 лет, а для хорошо очищенных масел даже 30 лет [Л. 6] в трансформаторах с обычными расширителями. Неправильная эксплуатация может сократить срок службы масла до длительности, меньшей гарантированной.

Обычно в первые 6—8 лет кислотность масла не превышает 0,1 мг КОН/г масла при условии отсутствия проникновения влаги (при правильном уходе за силикагелевыми патронами). Через 8—10 лет кислотное число обычно достигает 0,5. Желательно произвести очистку масла и удалить с активной части шлам. Если этого не сделано, кислотное число возрастает до 1 мг в течение последующих 2—3 лет. Как только кислотное число достигло 1 мг, масло должно быть заменено. Окисление масла ускоряется вследствие соприкосновения со свободным воздухом при высокой температуре и наличия в масле влаги. Медь, свинец и другие металлы активной части и бака помогают процессу окисления, действуя как катализаторы. В трансформаторах, в которых нет соприкосновения масла с воздухом, кислотное число возрастает гораздо медленнее, чем в трансформаторах со свободным дыханием.

Все медные части в трансформаторе должны быть лужеными и обмотанными лентой. Бак и другие металлические части должны быть покрыты лаком хорошего качества. Влага является самым главным врагом трансформаторного масла. Должны быть приняты все меры для предотвращения попадания влаги в масло. Масло, имеющее кислотное число 1 мг, должно быть слито из трансформатора и отправлено для регенерации.

Влияние чистоты очистки масла [Л. 3]. На основе теории и эксперимента можно объяснить большинство характерных особенностей, сопровождающих как постепенное ухудшение масла, так и его пробой. Даже при напряженности электрического поля, не превышающей 1 кв/мм, может происходить быстрое или, напротив, чрезвычайно медленное ухудшение свойств масла. Если масло, вводимое в эксплуатацию, имеет высокую прочность, то с течением времени прочность постепенно снижается.

Уже небольшое содержание примесей приводит к уменьшению электрической прочности. Когда используется масло предельной чистоты, можно твердо счи-

тать, что размеры посторонних частиц не сильно превосходят размеры углеводородных молекул соответствующего масла. При предельно чистом масле, свободном от волокон, воздуха, кислот, мыл, смол и воды, электрическая прочность масла может достигать очень больших значений (до 150 кВ/мм). Вследствие быстрой коагуляции примесей практически невозможно бывает добиться электрической прочности, превосходящей 20 кВ/мм. Большая часть товарных масел имеет пробивную напряженность от 10 до 20 кВ/мм. Если из-за присутствия малых следов кислот, мыл и смол имеет место еще и медленная коагуляция, электрическая прочность может опуститься и ниже 10—20 кВ/мм. Вследствие старения масла электрическая прочность может быть еще меньшей.

Электрическое поле в изоляции должно быть как можно более однородным. Многие повреждения могут быть предупреждены тщательным разглаживанием морщин и складок на изоляции и электродах. В противном случае к таким местам повышенной концентрации электрического поля собираются разрушенные целлюлозные волокна и влага, а это ведет к пробое.

Пробой является результатом действия таких факторов, как волокна, мыла, смолы, вода и воздух, которые распределены в масле. Процесс старения связан с особыми характеристиками различных масел. При очистке масла не следует полностью удалять естественные ингибиторы. Если же это сделано, то быстрое ухудшение масла может быть предотвращено введением синтетических ингибиторов, хотя это и приводит к дополнительным расходам.

Глава третья

ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

3-1. КРИТЕРИИ ОКОНЧАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОЛЯЦИИ

Для установления окончания процесса сушки и дегазации обмоток и изоляционных конструкций большинство изготовителей используют комбинацию двух или более методов [Л. 19 и 20]. Но все они производят изме-

рения тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$). В большинстве случаев строятся кривые изменения тангенса дельта во времени и сушка считается законченной, когда эта кривая приближается к постоянному значению. Для характеристики состояния изоляции используются также измерения емкости обмоток трансформатора в зависимости от частоты (для непромасленного трансформатора эти значения различаются незначительно).

Иногда используется абсолютное значение тангенса дельта, но оно зависит от мощности, напряжения и конструкции трансформатора. Многие используют в качестве характерной величины интенсивность выделения влаги из трансформатора. Как критерий окончания сушки, приводится отсутствие выделения влаги в течение 3 ч или выделение 0,25 л в течение суток [Л. 19 и 20].

Остаточное давление, полученное в сушильном шкафу или баке трансформатора, иногда используется в качестве показателя степени сушки. По общему мнению, давление водяных паров не может быть больше остаточного давления, исходя из которого, можно определить увлажненность изоляции. Изменение сопротивления изоляции во времени также является полезным показателем.

На рис. 3-1 показаны результаты измерений в процессе сушки [Л. 1].

Имеются сведения о постоянных измерениях содержания влаги в образцах изоляции, взятых из трансформатора или специально прикрепленных к нему и подвергнутых такой же обработке.

Например, фирма Фуллер электрик (Великобритания) во время изготовления, сборки и испытаний активной части трансформатора определяет сухость изоляции по установленным в обмотке специальным образцам бумаги и картона. Эти образцы извлекаются из обмотки, и влагосодержание в них определяется методом Фишера. Было доказано, что эти образцы дают очень точную оценку степени увлажнения обмоток и изоляции. Содержание влаги у образцов, взятых из нижней части обмотки трансформатора 240 Мва, 275/132 кВ перед его отгрузкой, составляло в среднем 1,5%. После сочленения и монтажа на месте установки 1,7%. После сушки циркуляцией горячего масла 1,4%.

Следует, однако, обратить внимание на важность правильного выбора мест установки таких образцов, имея в виду, что внутренние части изоляции сушатся гораздо медленнее наружных. Во всяком случае метод может быть применим только к изоляции маслобарьерного типа.

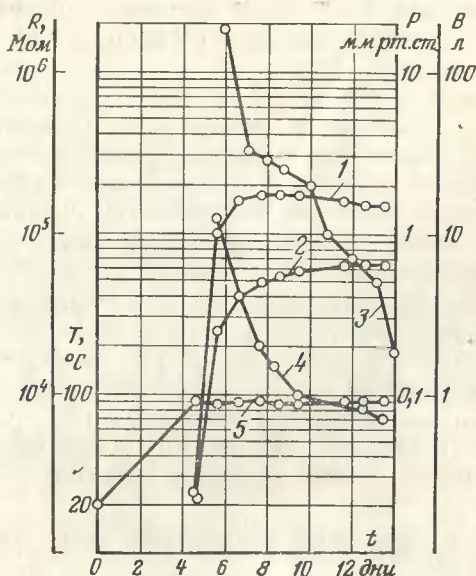


Рис. 3-1. Типичная диаграмма сушки.

1 и 2 — сопротивление изоляции обмоток ВН и НН R (Мом); 3 — количество выделившейся воды B (л); 4 — давление P (мм рт. ст.); 5 — температура T (°C) [Л. 1].

Все описанные выше методы имеют тот недостаток, что они характеризуют изоляцию в целом, не давая представления об отдельных ее элементах.

Удовлетворительная дегазация масла достигается за счет низкого остаточного давления в процессе сушки и пропитки. Типичным значением этого остаточного давления называют величины от 1 до 10^{-2} мм рт. ст. (гл. 1).

Наиболее показательным критерием для оценки качества сушки, дегазации и пропитки маслом являются измерения частичных разрядов при окончательных испытаниях трансформаторов. Особенно это показательно для современных трансформаторов, имеющих хорошо

скоординированную конструкцию изоляции. В то время как классические испытания импульсами и напряженном промышленной частоты дают ответ о годности или недостаточности изоляции, измерения частичных разрядов позволяют оценить качество технологической обработки и в конечном итоге запас прочности конструкции [Л. 19 и 20].

3-2. КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ *

Согласно статистическим данным одного из крупных энергообъединений Австрии нарушения изоляции обмоток составляют 67,5% всех аварий трансформаторов в эксплуатации [Л. 32]. Таким образом, контроль состояния изоляции очень важен. Для суждения о состоянии изоляции в эксплуатации наиболее широко применяются измерения $\operatorname{tg} \delta$, сопротивления изоляции и величины абсорбции. Измерения $\operatorname{tg} \delta$ позволяют судить о состоянии всей изоляции. Его величина однозначно связана с электрической прочностью изоляции на пробой и на перекрытие и охватывает сумму всех факторов, отрицательно влияющих на изоляцию, как обратимых (поглощение воды и газов, содержание волокон), так и необратимых (разрушение бумаги, окисление масла).

В некоторых случаях $\operatorname{tg} \delta$ определяют при напряжениях вплоть до номинального [Л. 32].

У новых трансформаторов имеет место лишь весьма слабая зависимость тангенса дельта от напряжения, вследствие чего его измерения можно производить при относительно низких напряжениях и нет необходимости доводить напряжение до номинального или выше, если есть уверенность, что изоляция хорошо обработана.

Все перечисленные выше измерения имеют тот недостаток, что их результаты зависят от соотношения твердой изоляции и масла, которое непостоянно для разных типов трансформаторов. Показано, например, что сопротивление бумажной изоляции при влагосодержании 5% составляет около одной тысячной его величины при влагосодержании 0,5%.

* См. также статью В. С. Воскресенского, Некоторые итоги опыта профилактических испытаний электрооборудования, «Электрические станции», 1967, № 6.

Для измерений сопротивления изоляции используют мегомметры на напряжение 1; 2,5 и 5 кв. Величина напряжения мало влияет на результаты измерения сопротивления. Кроме самой величины сопротивления изоляции, определяют отношение сопротивлений, измеренных спустя 15 сек, 1 мин и 10 мин. Между измерениями с длительностью 10 мин обычно делается перерыв 20 мин.

На основании опыта измерений сопротивления изоляции, по сообщению [Л. 21], выработаны общие предельные значения, допустимые для удовлетворительной эксплуатации. Два других метода требуют сравнения со значениями, полученными при заводских испытаниях.

В то же время некоторые из участников обсуждения, изложенного в [Л. 21], отдали предпочтение измерениям тангенса дельта, как обеспечивающим более надежные результаты. Сравнение с заводскими данными является необходимым для оценки допустимых предельных значений [Л. 21]. Там же указывается на трудности измерения дисперсии в условиях эксплуатации. Поэтому сделано заключение, что этот метод не имеет преимуществ перед измерением тангенса дельта. Указывается на возможность определения влагосодержания с помощью испытаний проб масла. Однако, по мнению авторов [Л. 21], последний метод имеет и существенные ограничения. Он применим только при высокой температуре трансформатора, после достижения равновесия влаги в бумаге и масле, о чем говорилось в гл. 1.

По рекомендации [Л. 32], окончательное заключение об увлажнении изоляции трансформатора может быть произведено испытанием проб бумаги или измерением сопротивления изоляции без масла.

В последнее время [Л. 21] наиболее чувствительным показателем состояния изоляции считают частичные разряды. С помощью измерения частичных разрядов можно контролировать не только качество технологической обработки на заводе, но и состояние изоляции в эксплуатации.

В некоторых случаях при ревизиях устанавливается степень старения бумажной изоляции с помощью определения средней степени полимеризации образцов изоляции, установленных при изготовлении трансформатора. В зависимости от результатов принимается решение о замене обмоток. Образцы следует устанавливать

в наиболее нагретой точке обмотки и так, чтобы их легко можно было удалить. Это сопряжено с большими практическими трудностями. Поэтому целесообразность применения этого метода сомнительна [Л. 21].

3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА МАСЛА

Если масло находится длительное время в эксплуатации, то содержание воды в нем увеличивается, изменяется также его состав в результате окисления. Старение масла сначала сказывается на его цвете и, кроме того, оно может быть установлено благодаря изменению химических, физических и электрических свойств. Существуют нормы для предельных значений тангенса дельта при 90°C , кислотного числа и числа омыляемости.

Однако применение этих методов требует много времени и, следовательно, неудобно для систематического контроля.

В качестве удобного текущего контроля следует рассматривать контроль электрической прочности масла. По мнению авторов [Л. 1], измерение электрической прочности масла при напряжении рабочей частоты является удовлетворительным, если при взятии пробы масла соблюдается необходимая предосторожность и используются методы испытаний, обеспечивающие хорошую воспроизводимость результатов. Необходимо около 12 пробоев на одном образце, а подъем напряжения нужно производить с постоянной скоростью (1—2 кВ/сек).

Маслопробойник, рекомендованный МЭК: диаметр шаров 12,5 мм, расстояние 2,5 мм, — может быть усовершенствован применением перемешивания масла на дне [Л. 16]. Критерием хорошего качества масла может служить величина пробивного напряжения, равная 70 кВ. Величина пробивного напряжения не позволяет судить о наличии того или иного включения, так как она является результатом воздействия многих факторов. Поэтому необходимо периодически производить измерение влагосодержания в масле, чтобы убедиться, что его величина не превышает, скажем, 5 г/т [Л. 1]. Для этой цели LCIE (Центральная лаборатория электротехнической промышленности Франции) рекомендован манометрический метод.

Вместе с тем следует критически относиться к результатам определения электрической прочности масла. Прочность масла в стандартном разряднике зависит от содержания в нем примесей (в том числе воды и газов). Между тем не все формы электродов и не все виды напряжений одинаково чувствительны к таким примесям [Л. 20].

Имеющиеся данные о закономерной связи между электрической прочностью масла в стандартных разряд-

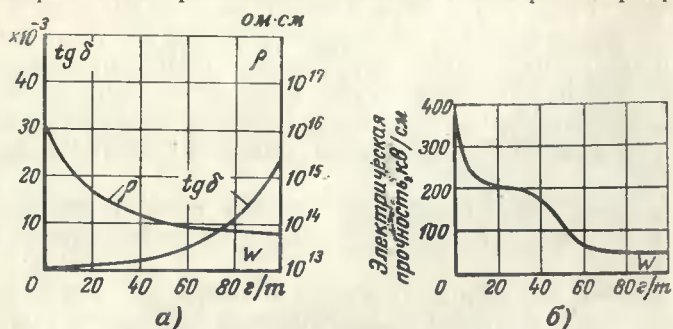


Рис. 3-2. Влияние содержания воды W на электрические свойства свежих масел при напряжении 50 гц и температуре 20° С.

а — тангенс дельта и удельное сопротивление; б — электрическая прочность [Л. 9].

никах и его другими характеристиками (содержание влаги, газов и др.) разноречивы. По мнению авторов [Л. 20], применяемые стандартные разрядники полезны в лабораторных условиях, но их ценность сомнительна при определении качества масла в трансформаторе.

Можно полагать, что разрядник с расстоянием между электродами 4—5 мм более чувствителен к качеству масла, чем с расстоянием 2,5 мм [Л. 20]. Поэтому качество масла, характеризуемое его прочностью в одном из типов применяемых разрядников, по мнению авторов [Л. 20], мало говорит о его влиянии на электрическую прочность трансформатора. Это зависит от конфигурации электродов и характера воздействий, лимитирующих прочность данной конструкции.

Особое внимание уделяется определению влагосодержания масла.

На рис. 3-2 показано изменение электрических характеристик в функции содержания воды [Л. 9]. Из этих кривых видно, что в диапазоне до 40 г/т тангенс дельта

мало изменяется и поэтому непригоден для суждения о степени высушенности свежих масел. В то же время электрическая прочность и удельное сопротивление применимы в качестве показателей степени высушенности масла [Л. 9].

В Великобритании применяется метод определения содержания воды в масле испытанием на потрескивание [Л. 7]. Чувствительность этого простого метода зависит от способа выполнения. Оно обнаруживает свободную или в виде эмульсии воду в масле в количестве более 55 г/т, а по некоторым данным от 25 г/т.

Наиболее совершенными методами прямого определения влагосодержания масла считаются методы Фишера и Рушелла [Л. 1], которые заключаются в том, что вода передается бумаге и определяется ее влагосодержание.

Наиболее широко применяется метод Фишера, с помощью которого можно получить влагосодержание масла в г/т [Л. 33]. Однако это преимущественно лабораторный метод, и чтобы результаты были достаточно точными, необходимо хорошо освоить технику определения. Если проба масла берется в эксплуатации, например во время сушки трансформатора циркулирующим маслом, маловероятно, что при этом можно избежать большой ошибки.

Некоторые фирмы разработали приборы для непрерывного определения влагосодержания в потоке масла. Прибор измеряет сопротивление или коэффициент мощности специального датчика, опускаемого в масло [Л. 34].

Какой бы метод ни применялся, следует помнить, что влагосодержание масла в трансформаторе непостоянно и изменяется в зависимости от температуры.

Результаты измерения влагосодержания масла могут также характеризовать сухость целлюлозной изоляции, которая обладает значительно большей способностью поглощать воду, чем масло. Так, в трансформаторе, работающем при 80°С, влагосодержание свежего масла 25 г/т соответствует содержанию 2,4% воды в целлюлозе. Если трансформатор длительно работал при 60°С, те же условия для масла дали бы в целлюлозе 3,3%, а при 40°С — 5% и так далее. Такая оценка (см. рис. 1-3) становится тем затруднительнее, чем ниже температура. Поэтому можно производить такую оценку только при температуре трансформатора (и пробы)

около 70° С (или выше) и только после длительной работы трансформатора при этой температуре, т. е. по достижении равновесия влагосодержания в масле и бумаге.

Для эксплуатации весьма важным является решение вопроса о том, подлежит ли длительно работавшее масло замене или возможна его регенерация.

Обычно применяемые химические методы испытания масла на старение имеют смысл лишь применительно к маслу без присадок. Если испытанию на старение подвергнуть масло с присадками, то последняя может скрыть низкое качество основного масла. Когда в процессе эксплуатации присадка будет израсходована, то тем быстрее наступит старение масла из-за его низкого качества.

От этого недостатка могут быть свободны физические методы, например описанный в [Л. 32]. С помощью этого метода определяется доля необратимых продуктов старения масла, характеризуемая коэффициентом старения. Этот коэффициент связан определенной зависимостью с содержанием шлама в масле. Он не зависит от содержания в масле воды, газов и волокон и применим также для масел с большим содержанием присадок. Его можно определить из частотной зависимости диэлектрической проницаемости. Он показывает общее содержание дипольных молекул также в материалах, представляющих собой смесь различных компонентов. Коэффициент старения рассчитывается из двух предельных значений проницаемости, измеренных при промышленной и световой частотах. Его можно сравнительно просто определить при помощи моста Шеринга на 50 гц и рефрактометра Аббе.

3-4. ЗНАЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ

Если производятся измерения влагосодержания масла при сушке, то следует помнить, что сами по себе эти измерения практически не имеют значения, если не известна зависимость влагосодержания от парциального давления водяных паров, растворенных в масле, для данного масла. Зависимость эта может быть определена только путем тщательного и трудоемкого лабораторного опыта. Чтобы проиллюстрировать его, предположим, что измерено влагосодержание неизвестного масла, равное

54 г/т. Масло А насыщается влагой 54 г/т при 25°С, тогда как масло Б, имеющее более высокое кислотное число, будет насыщено влагой 126 г/т при тех же 25°С. Если масло было типа А, то его влагосодержание 54 г/т соответствует воздействию на него атмосферы при 25°С с относительной влажностью 100%. Если же масло было типа Б, то такое же влагосодержание соответствует воздействию атмосферы при 25°С с относительной влажностью только около 54% (см. § 2-5).

Таким образом, следует сделать вывод, что измерения влагосодержания в большинстве практических случаев недостаточно, чтобы характеризовать сухость масла.

Измерение парциального давления водяных паров, растворенных в масле, имеет много большее значение. Этот метод описан в [Л. 35].

Предположим, что в неизвестном масле парциальное давление растворенных водяных паров составляет 4 мм рт. ст. Это должно указывать, что масло имеет сухость, соответствующую равновесию при 25°С с атмосферой, имеющей относительную влажность $\frac{4}{17} \cdot 100 =$

$= 23,7\%$ или имеющей точку росы около 0°С. Кроме того, из рис. 2-12 мы можем установить, что бумажная изоляция, пропитанная этим маслом и находящаяся в равновесии с ним, должна иметь остаточную влажность примерно 0,45% при 80°С.

3-5. АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ВОДЯНЫХ ПАРОВ, РАСТВОРЕННЫХ В МАСЛЕ [Л. 33]

Схематически аппаратура изображена на рис. 3-3. Эта система обеспечивает установление равновесного состояния в влагосодержании масла, протекающего под газовой подушкой, и газа, создающего эту подушку. Время установления равновесия сокращается циркуляцией газа через диффузоры. Проходя через них, газ образует в масле пузыри, увеличивая этим площадь соприкосновения газа с маслом. Точку росы определяют измерителем в циркуляционной линии для газа.

Газовая подушка в системе создается сухим азотом. Масло частично дегазировано, и если азот не включен,

то над маслом может быть небольшое разряжение и трудно отобрать пробу или создать циркуляцию газа.

При равновесии величину парциального давления можно получить из измерения точки росы [Л. 33]. Это будет величина парциального давления водяных паров, растворенных в потоке масла.

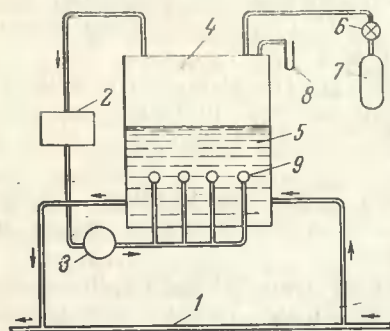


Рис. 3-3. Схема аппарата для измерения парциального давления водяных паров в линии масла.

1 — масляная линия; 2 — измеритель точки росы; 3 — насос; 4 — водяные пары в азоте; 5 — масло; 6 — регулятор давления; 7 — сухой азот; 8 — измерение давления; 9 — диффузоры [Л. 33].

Масло, частично или полностью дегазированное, будет медленно поглощать азот. Однако водяные пары остаются только в том же количестве, поскольку после первичной прочистки сухим азотом парциальное давление водяных паров в газовом пространстве будет равно или меньше парциального давления газа, растворенного в масле.

В устройстве, показанном на рис. 3-3, газ циркулирует с помощью насоса мембранного типа через измеритель точки росы и через масло. Небольшая ошибка будет

иметь место вследствие наличия некоторого содержания воды в масле, которое будет передано газу. Величина этой ошибки определена в [Л. 33] расчетами и составляет около 5%.

3-6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЧКИ РОСЫ В ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

На практике в США применяется более простая методика, чем описанная выше [Л. 36]. Эта методика применяется в основном для обнаружения свободной воды в трансформаторе.

Испытание пробы масла не всегда обнаруживает наличие свободной воды в трансформаторе, которая может скапливаться на дне или в других частях, например в охлаждающей системе.

Из 1423 обследованных трансформаторов в 69 была обнаружена свободная вода, несмотря на хорошую пробу масла. Возможно и такое положение, когда проба масла, насыщенного водой, взятая при низкой температуре, при более высокой температуре испытательного помещения оказывается далекой от насыщения.

Метод определения влажности путем измерения точки росы весьма чувствителен и свободен от указанных недостатков. Температура масла на поверхности соприкосновения с газом выше, чем у дна бака на поверхности соприкосновения со свободной водой, где масло находится в насыщенном состоянии. Однако все масло будет иметь одинаковую абсолютную влажность. Влагосодержание газа над маслом находится в равновесии с влагосодержанием масла. Влажность этого газа может быть определена измерением температуры точки росы и будет той же, что и всего масла. Если измеренная точка росы газа равна или превышает минимальную температуру в какой-либо точке трансформатора, это будет свидетельствовать о выделении воды. Результаты не зависят от относительной растворимости воды в различных сортах масла. Для измерений используется установка, в которой стандартный измеритель точки росы сочленен последовательно с индикатором горючих газов. Газ из трансформатора с помощью насоса прокачивается через установку со скоростью около $0,03 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Двадцать пять трансформаторов были проверены в эксплуатации, в шести из них была обнаружена вода. Считается, что опасность недопустимого увлажнения существует, если точка росы выше 5°C или выше минимальной возможной температуры (окружающей среды).

В установке дополнительно используется также стандартный измеритель содержания кислорода для проверки азотной защиты. Нормальное содержание кислорода редко превышает 5%. Содержание кислорода в количестве 10% и более указывает на повреждение в трансформаторе. В случае азотной защиты для нормальной работы индикатора горючих газов включается баллон с кислородом для доведения его содержания в приборе до 20%.

При температуре ниже 10°C чувствительность существующих измерителей точки росы снижается.

Проверка метода была произведена на специальной модели трансформатора.

3-7. ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ *

Для контроля влажности изоляции на заводе, при монтаже и в эксплуатации применяется измерение так называемой дисперсии.

Ниже приводится описание портативного прибора для измерения дисперсии, разработанного фирмой Парсонс (Великобритания)

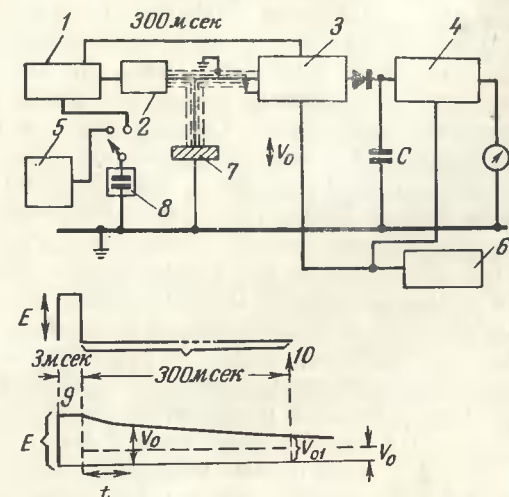


Рис. 3-4. Схема портативного измерителя дисперсии.

1 — генератор импульсов; 2 — диодная ключевая схема; 3 — вентильный вольтметр входной ступени; 4 — вентильный вольтметр выходной ступени; 5 — блок питания; 6 — блок питания вольтметров; 7 — испытуемый объект; 8 — конденсатор; 9 — заряжающий импульс; 10 — отсчет [Л. 37].

[Л. 37]. Емкость измеряемого объекта заряжается импульсом напряжения длительностью 3 мсек. Через 300 мсек снимается отсчет напряжения на емкости (рис. 3-4).

Дисперсия определяется так:

$$\frac{E - v_{01}}{v_{01}} \quad (\text{рис. 3-4}).$$

Измерения производятся с помощью портативного прибора, имеющего следующие преимущества: быстрота измерений, безопасность и большая точность измерений. В схеме прибора (рис. 3-4)

* Об аналогичных приборах, применяемых в СССР, см. статью Б. А. Алексеева «Применение емкостных методов контроля влажности изоляции при ремонте силовых трансформаторов» в сб. «Передовые методы ремонта трансформаторов», «Энергия», 1967.

применены транзисторы, печатные схемы и никель-кадмиевые аккумуляторы, не требующие доливки и не выделяющие газов. Зарядный импульс, равный 30 в, генерируется триггером с холодным катодом и прикладывается к диэлектрику через диодную ключевую схему, в которой использованы отобранные кремниевые диоды с обратной проводимостью 10^{11} ом⁻¹. Энергия импульса накапливается в течение 20—30 сек в конденсаторе. Ламповый вольтметр для отсчета напряжения на емкости диэлектрика включается специальным импульсом через 300 мсек после подачи импульса на испытуемый диэлектрик. Напряжение в этот момент фиксируется запоминающей схемой и после усиления подается на прибор со стрелочным отсчетом, проградуированный в процентах дисперсии. Влияние емкости соединительных проводов и самого прибора сводится к минимуму применением кабеля с двойным экраном. Внутренний экран подсоединен к катоду первой ступени вольтметра, а наружный экран заземлен.

Требуемые значения дисперсии сухого трансформатора определяются специальными опытами. Дисперсия трансформаторной изоляции зависит от температуры. Чем суше изоляция, тем меньше температурный коэффициент дисперсии.

3-8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ *

Ниже излагается практика фирмы Дженерал электрик (США). Ежегодно производятся следующие профилактические испытания трансформаторов в эксплуатации: 1) определение электрической прочности масла; 2) определение его кислотного числа, а также цвета; 3) измерение сопротивления изоляции; 4) определение коэффициента абсорбции; 5) измерение $\text{tg } \delta$ изоляции.

В случае необходимости производится более подробный анализ. Кроме того, 1 раз в 5 лет производится испытание изоляции приложенным и индуцированным напряжением. Ниже приводятся нормы для трансформаторного масла.

Измерения	Норма	Подлежит фильтрации	Подлежит замене
Электрическая прочность (по ASTM D-877) . . .	23 кВ	Меньше 22 кВ	Не указано
Кислотное число	0,4 (макс)	0,4—1,0	Больше 1,0
Цветной показатель . . .	3,5 (макс)	Больше 3,5	Не указано

* Практика, существующая в СССР, изложена в «Инструкции по контролю состояния изоляции перед вводом в эксплуатацию СН171-61» и в «Инструкции по эксплуатации трансформаторов».

Испытания электрической прочности производятся в стандартном маслопробойнике с электродами диаметром 25,4 мм и расстоянием между ними, равном 2,54 мм. Цветной показатель определяется путем сравнения цвета пробы масла со стандартным цветовым диском, позволяющим оценить цветовой показатель в пределах 0,5—8,0. Новое масло имеет показатель менее 1,0.

Сопротивление изоляции трансформатора определяется с помощью мегомметра напряжением 500 или 1000 в между обмоткой и заземленными всеми другими частями трансформатора. Отсчет производится через 1 мин. Коэффициент абсорбции определяется как отношение результата отсчета сопротивления изоляции через 10 мин (после приложения напряжения) к результату отсчета через 1 мин. Коэффициент должен быть равен 2,0 или более. Если он менее единицы, это значит, что изоляция либо увлажнена, либо масло загрязнено проводящими включениями и пр.

Тангенс дельта может быть измерен либо с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра, либо с помощью моста. Если тангенс дельта заметно превышает 2% (при 20°С), это вызывает опасение. Состояние изоляции трансформатора в эксплуатации рекомендуется проверять испытанием, приложенным и индуцированным напряжением. Величины напряжений — 65% соответствующих значений для нового трансформатора. Преимуществом таких испытаний является возможность выявить дефектную изоляцию, произвести ремонт и тем избежать аварийного отключения. Для производства таких испытаний используются передвижные установки.

Так, например, на трейлере смонтирована установка 220 ква, 300 кв и установка 225 ква, 690 в, 300 гц, что позволяет производить испытания трансформаторов до 50 Мва и 230 кв. Предполагается в будущем в составе таких передвижных установок иметь оборудование для измерения частичных разрядов.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (СУШКА И ДЕГАЗАЦИЯ) ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ

4-1. СПОСОБЫ СУШКИ

Наиболее эффективным является такой метод сушки, который позволяет достигнуть заданной степени высушенности за наиболее короткое время. Применяются следующие методы:

- 1) сочетание горячего воздуха с вакуумом;
- 2) сочетание тепла от паров сольвента с вакуумом (сушка в паровой фазе);
- 3) сочетание тепла от сухого горячего масла с вакуумом.

Сравнение длительности сушки разными методами затруднено. Приведенные длительности процессов сильно зависят от организации и оборудования, используемого на разных заводах.

Обычно одна из систем с более современным оборудованием и большей мощностью приходит на смену другой, более старой системе.

Длительность сушки вторым методом в 2—4 раза меньше, чем первым методом. Длительность сушки первым методом примерно в 3 раза меньше, чем третьим, если масло заливается большим объемом, и в 1,5 раза меньше, если вводится путем разбрызгивания [Л. 19 и 20].

При сравнении первого и второго методов, применявшихся на заводах, были сделаны следующие наблюдения.

1. Второй метод может позволить более высокую температуру сушки, чем первый метод. В первом методе бумажные материалы в контакте с воздухом могут иметь температуру от 90 до 120°С. Во втором методе эти материалы, находящиеся в контакте с парами растворителя при давлениях от 200 до 20 мм, можно нагревать до температуры, например 135°С, без опасности их старения.

2. Некоторые считают, что заведомо меньшая длительность второго метода является результатом более высокой температуры и более эффективного теплообме-

на, который был возможен при конденсации паров растворителя. Например, в одной лаборатории были проведены опыты, которые дали следующие соотношения между температурой и длительностью процесса:

Метод	1	2	3
Время, ч	2	1	1,5
Температура, °C	Не указана	130—135	100

В другом случае изготовитель, применявший оба метода, первый и второй, при одной и той же температуре (около 100°С) в течение 20 лет подтвердил, что скорость второго метода в 2 раза больше первого.

3. Во втором методе, по мнению авторов [Л. 19 и 20], прогрев и сушка идут параллельно. Глубокий вакуум—это фиксированное время дегазации. Ниже приводятся характерные результаты.

Количество изоляции трансформатора, кг	Максимальная температура обмотки, °C	Время прогрева парами сольвента, ч	Время выдержки под вакуумом, ч	Остаточное давление, мм рт. ст.
5 500	110	55	16	0,8
4 125	112	32	16	0,65
2 300	115	24	16	0,6
550	110	12	16	0,55

4. Типичное время полной сушки и пропитки маслом изоляции трансформатора 170 Мва вторым методом при температуре 125°С составляет 6 дней.

5. Второй метод имеет очевидные преимущества в случае повторной сушки пропитанных маслом трансформаторов. Этот метод особенно хорош для обмоток, которые подвергались сушке и пропитке маслом до сборки на магнитопроводе, для ремонтируемых трансформаторов и повторной сушки на месте установки.

Сравнение между первым и третьим методами можно сделать по данным сушки и повторного заполнения на месте установки. Сушка трансформатора 200 Мва горячим воздухом (первый метод) протекает в 3 раза быстрее, чем сушка горячим маслом (третий метод). Определенное количество горячего масла циркулировало в трансформаторе при помощи его собственных насосов системы охлаждения, а затем это масло прогонялось через маслоосушительную установку со скоростью 110 л/мин.

Комбинация первого и третьего методов (с распылением сухого масла) использовалась как на заводе, так и на местах установки для трансформаторов броневых типа. Первый метод применялся для сушки отдельных обмоток, а третий метод для окончательной сушки и заполнения маслом.

Для трансформаторов высокого напряжения малой мощности, имеющих минимальное количество охлаждающих каналов и громоздкую целлюлозную изоляцию, лучше подходит первый метод. Важно получить достаточно высокую температуру во внутренних слоях сложной изоляции. Это случай, когда приходится добиваться хотя бы небольшого температурного градиента между внутренними и наружными слоями изоляции путем нагрева обмотки током.

На интенсивность процессов сушки в настоящее время ограничения накладывает только целлюлозная изоляция. Широко применявшаяся ранее изоляция из бакелизированной бумаги механически повреждается из-за высокой скорости нагрева или резкого изменения давления. Повреждения вследствие неравномерного расширения изоляции могут ограничить скорость нагрева и подъема вакуума, но при современных методах сушки никто не испытывал таких затруднений. Можно считать, что при скорости сушки, дающей в час потерю до 1,6% веса сухой изоляции, нет опасности механического повреждения изоляции.

Скорость заполнения трансформатора маслом обычно не ограничивается, используется дегазированное горячее масло.

Для оценки минимальной необходимой скорости пропитки обмотки (опорные детали, прокладки) можно исходить из того, что лист электрокартона с объемной массой 1,2 и размерами $200 \times 200 \times 20$ мм, в который масло может впитываться только в торцов, для полной пропитки требует 400 ч при 90°C и 200 ч при 122°C [Л. 20].

В отношении прогрева обмоток пропусканием через них тока для ускорения сушки можно сказать следующее. Этот способ применяется редко. Типичный случай применения рассмотрен выше. Предпочтительно использование постоянного тока, так как по сравнению с переменным током требуется источник меньшей мощности и удобнее контролировать среднюю температуру обмотки.

Хотя способ не применяется, нагрев с помощью постоянного тока вполне осуществим. В течение многих лет постоянный ток использовался для нагрева обмоток перед испытаниями. Поддерживалось значение постоянного тока через обмотку высокого напряжения выше номинального (в масле); обмотка низкого напряжения обязательно замыкалась накоротко во избежание перенапряжений при случайном размыкании прогреваемого контура.

Высушенные или высушенные и пропитанные маслом обмотки иногда, до сборки трансформатора, находятся в течение некоторого времени на воздухе и при этом увлажняются. Если считать, что поглощение влаги происходит только путем диффузии, то скорость увлажнения можно рассчитать. Она зависит от температуры, давления и величины открытой поверхности (%) и пропорционально:

0,003 для пропитанной целлюлозы при 20° С и 760 мм рт. ст.;
 0,1 для непропитанной целлюлозы при 20° С и 760 мм рт. ст.;
 50,0 для непропитанной целлюлозы при 100° С и 1 мм рт. ст.

Это означает, что поглощение влаги при 20° С происходит по крайней мере в 30 раз быстрее непропитанными обмотками, чем пропитанными маслом. Ниже приведены некоторые опытные данные.

1. При относительной влажности окружающего воздуха 60% были получены следующие величины поглощения влаги (в процентах по массе изоляции):

Число дней	1	3	6	9	12
Непропитанная обмотка	2,3	4,3	5,6	6,2	6,4
Пропитанная обмотка	0,6	1,0	1,2	1,3	1,4

Из приведенных данных видно, что непропитанная изоляция поглощает за 1 день столько же влаги, сколько пропитанная за 3 недели.

2. По различным мнениям соотношение скоростей увлажнения изоляции колеблется от 4:1 до 20:1.

3. Скорость увлажнения непропитанных обмоток очень сильно зависит от первоначальной сушки и окружающих условий. Защита хорошо высушенных обмоток мешками из пластика значительно снижает скорость увлажнения.

Скорость повторной сушки обмоток, необходимой для удаления поглощенной влаги, зависит от примененного

процесса сушки. Если используется система с парами сольвента (второй метод), то время повторной сушки для пропитанной и непропитанной обмоток одинаково. Если применяется сушка горячим воздухом или под вакуумом (первый метод), то скорость сушки пропитанной изоляции в 3—5 раз меньше, чем непропитанной.

4-2. СУШКА ТРАНСФОРМАТОРОВ МЕТОДОМ СОЧЕТАНИЯ ГОРЯЧЕГО ВОЗДУХА С ВАКУУМОМ [Л. 1]

Обработка масла. Общая практика состоит в проведении двух операций. Первая заканчивается перед заполнением трансформатора и состоит из сушки, дегазации и фильтрации масла. Это масло заливается затем в трансформатор под вакуумом порядка 0,05 мм рт. ст. Активная часть не свободна от пыли и загрязняет масло, делая вторую обработку обязательной. Последняя осуществляется путем циркуляции масла через фильтр, подключаемый к трансформатору.

Для обеих стадий используются одни и те же установки. Имеются различные типы оборудования для обработки масла. Они включают фильтр-пресс, дегазационную установку и сушильную установку, в которой масло растекается тонкой пленкой и подвергается воздействию вакуума не менее 0,1 мм рт. ст. и, наконец, нагревательной установки, в которой масло подогревается до температуры около 50°С. Такое оборудование без труда обеспечивает остаточное содержание влаги в масле около 1 г/т. Обязательно следует уделять внимание восстановлению состава масла, так как наиболее летучие его фракции удаляются вакуумными насосами, в результате чего уменьшается его сопротивление старению.

Механическая стабилизация обмоток. В § 4-3 показано, что механическая стабилизация обмоток требует сушки с одновременным применением давления (до установки обмотки на трансформатор). Однако методы выполнения этой операции разные у разных изготовителей. Имеются различия, связанные с использованием вакуума или горячего воздуха для сушки, со способом применения давления и, наконец, с тем, заканчивается ли эта стабилизация до или после насадки обмотки на магнитопровод. Оценка результата такой обработки трудна, так как нет согласованных данных относительно

но величин механических параметров. Поэтому сейчас преждевременно предлагать контрольные методы и критерии для оценки качества этой операции, имея в виду, что каждый изготовитель имеет свой метод, установленный экспериментально по результатам, которые он желает получить.

Окончательная сушка и пропитка. Наиболее общий метод заключается в использовании вакуума после того, как активная часть была нагрета до температуры около 90°C с помощью обдува горячим воздухом. Эта операция обычно выполняется в печи, куда ставится активная часть без бака.

Цель сушки — это снижение остаточного содержания влаги в твердой изоляции до величины ниже $0,5\%$. Когда остаточное давление в печи достигнет $0,1\text{ мм рт. ст.}$ или менее (конец сушки), в первом приближении можно считать, что оно включает в себя давление водяных паров. Действительное давление водяных паров несколько ниже общего остаточного давления, но если принять его равным остаточному давлению, то это даст некоторое преувеличение в отношении влагосодержания твердой изоляции. На рис. 4-1 и 4-2 (см. также рис. 2-12) приведены условия равновесия воды в целлюлозной изоляции, находящейся в контакте с водяными парами, в зависимости от их давления при разных температурах.

Если желают получить, например, остаточное влагосодержание $0,3\%$ и если изоляция нагрета до 90°C , то, как следует из рис. 4-1, достаточно давление 10 мм рт. ст. Но это состояние равновесия достигается по прошествии очень большого времени, которое неприемлемо с точки зрения экономики. Процесс сушки может быть ускорен применением более высокого вакуума, скажем 1 мм рт. ст. или менее. Такое значение остаточного давления достигается только в конце сушки, давление приближается к этой величине асимптотически. Процесс сушки заканчивается до установления условий равновесия в печи. Это подчеркивает важность измерений, призванных показать, что желаемое состояние изоляции достигнуто (см. гл. 3).

На рис. 3-1 приведены данные, характеризующие режим сушки (длительность прогрева, динамику остаточного давления и др.). После окончания сушки активная часть перед помещением ее в бак подпрессовы-

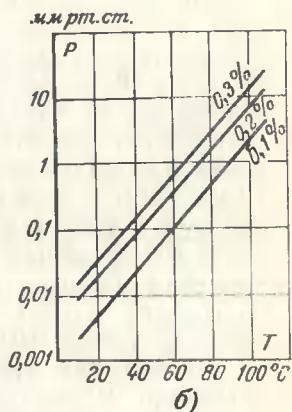
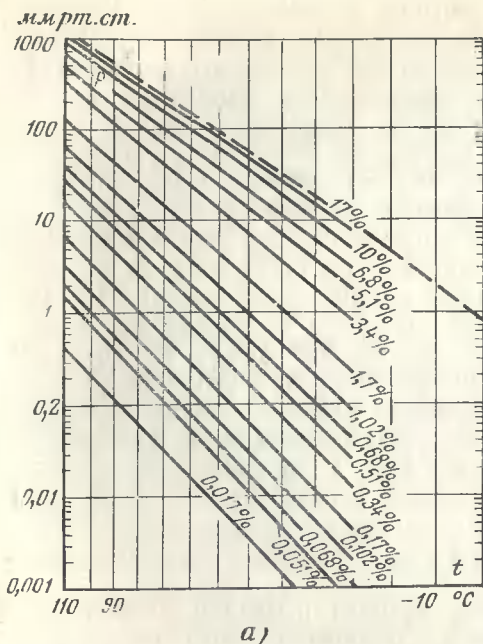


Рис. 4-1. Влагосодержание бумаги (указано на кривых) в зависимости от давления водяных паров и температуры. Пунктирная линия — давление насыщенных водяных паров:
а — из [Л. 37]; б — из [Л. 46].

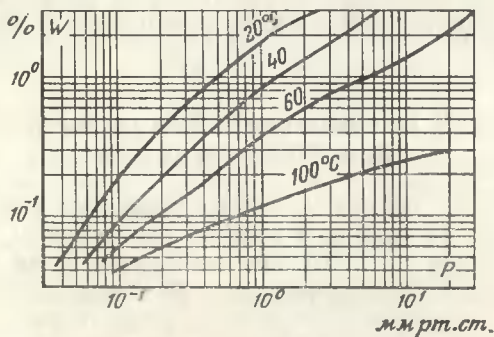


Рис. 4-2. Кривые равновесного влагосодержания целлюлозной изоляции в зависимости от давления водяных паров для разных температур [Л. 1].

вается. Это занимает обычно несколько часов. Увлажнение, происходящее за это время, снимается при вакуумировке в баке, где затем производится пропитка маслом при давлении, определяемом давлением паров наиболее летучих элементов. Предварительно в баке создается вакуум 0,05 мм рт. ст. Температура при пропитке составляет около 70°С. Пропитка может осуществляться и в печи, в которой производилась сушка.

Так как скорость, с которой при нагреве бумага теряет механические свойства, увеличивается с ростом температуры, температура сушки ограничивается 105°С. Если в сушильную печь загружена бумажная изоляция, находившаяся при 20°С длительное время на воздухе с относительной влажностью 57%, то в условиях равновесия парциальное давление водяных паров составит 10 мм рт. ст. и отсюда влагосодержание бумаги не может превысить 10% (см. рис. 4-1). Если изоляцию нагреть до 100°С, а общее давление в печи снизить в 10 раз, давление водяных паров снизится пропорционально и влагосодержание бумаги при достижении условий равновесия достигнет 0,07%.

Достижимая степень сухости изоляции зависит от установки. Время сушки, сокращение которого важно для производства, зависит от многих факторов: объема изоляции, толщины изоляции, скорости рассеивания, местной концентрации водяных паров, температуры, температурного градиента в изоляции, состояния изоляции (пропитана или нет). На практике теоретическое влагосодержание не достижимо ввиду асимптотического закона приближения равновесного значения во времени.

4-3. ХРАНЕНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ИЗОЛЯЦИИ И ЕЕ УСАДКА ПРИ СУШКЕ [Л. 19 и 20]

Основным преимуществом хранения целлюлозных материалов на складе в хорошо высушенном состоянии заключается в том, что при последующей их обработке и сушке они будут претерпевать меньшие изменения размеров. Так, кольцо из электрокартона толщиной 40 мм с содержанием влаги 5,8% сушилось под вакуумом в течение 1 мес., в результате чего содержание влаги снизилось до 1,8%. После 3,5 мес. пребывания в цехе содержание влаги увеличилось только до 2,6%.

Известно, что по мере сушки целлюлозной изоляции происходит ее усадка. Большинство изготовителей считает, что пропитка маслом не дает обратного эффекта, т. е. увеличения размеров. Отмечались случаи испытаний, когда высушенная целлюлоза давала усадку после пропитки маслом, если к ней прикладывалось давление.

1. Образцы различных целлюлозных материалов выдерживались при температуре 30°C и относительной влажности 85%. Затем стягивались пружинами и сушились под вакуумом в течение 430 ч при 110°C . После сушки измерялась усадка. Затем образцы пропитывались трансформаторным маслом при 60°C и хранились в масле под прежним давлением в течение нескольких дней. Усадка повторно замерялась. При принятых в опытах давлениях дальнейшая усадка после пропитки маслом составила приблизительно 10% усадки в течение процесса сушки. Ниже приведены данные для электрокартона.

Приложенное давление, кгс/см^2	Усадка после сушки, %	Дальнейшая усадка после пропитки маслом, %
40	8,2	0,5
60	8,6	0,7
90	9,5	0,8
100	9,8	0,7

2. Погружение электрокартона, находящегося под давлением, в горячее масло дало дальнейшую усадку, которая была мала по сравнению с усадкой, полученной в воздухе при том же давлении. Ниже даются величины усадки для различных сортов электрокартона при давлении 215 кгс/см^2 как в воздухе, так и после суточного погружения в трансформаторное масло с температурой 105°C . Все образцы предварительно доведены были до одинакового содержания влаги.

Электрокартон по английскому стандарту 231-1950	Усадка в воздухе, %	Усадка в масле, %	Суммарная усадка, %
Тип 2	8—12	3—5	11—17
Тип 3	6—10	4	10—14
Тип 4	4—15	2—3	6—18
Картон из чистого хлопка	5—7	2	7—9

Большинство изготовителей считает, что изменение размеров изоляции во время сушки зависит от приложенного давления вследствие удаления влаги из волокон. Можно привести следующие результаты измерений.

1. Разница между полным сжатием электрокартона типа 2 после трехдневной сушки и начальным сжатием является следствием удаления влаги. Измерения размеров, составившие при давлении $17,5 \text{ кгс/см}^2$ 3,4%, при 45 кгс/см^2 4,6% и при 238 кгс/см^2 7,5%, указывают, что они несомненно являются следствием удаления влаги, возрастающего с увеличением приложенного давления. Материалы хранились при 20°C , относительной влажности 55% и начальном содержании влаги 7,5% по массе изоляции.

2. Электрокартон выдерживался при температуре 30°C и относительной влажности 85% и затем подвергался сжатию. После сушки усадка вследствие удаления влаги составила 8,2% при давлении 40 кгс/см^2 , 8,6% при 60 кгс/см^2 , 9,5% при 90 кгс/см^2 и 9,8 при 120 кгс/см^2 .

Для диапазона давлений, в котором производилось сравнение, можно видеть, что за один и тот же период времени начальное давление 100 кгс/см^2 дает усадку, приблизительно на 2% большую, чем давление 40 кгс/см^2 .

4-4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО СУШКЕ МОДЕЛЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ [Л. 38]

Явления, происходящие при сушке изоляции, нуждаются в дальнейшем изучении. В зависимости от толщины изоляции, ее прогрева и внутренние слои могут оказаться менее высушенными, чем наружные.

Физические явления во время сушки. Все приведенные ниже результаты получены с применением способа сушки, включающего комбинацию тепла и вакуума.

В начале сушки целлюлозная изоляция трансформатора содержит количество воды, которое является функцией предыдущих условий, и это количество может отличаться даже для одинаковых элементов в зависимости от их расстояния до поверхности.

Под действием вакуума и тепла влага на внешней поверхности быстро испаряется. Во внутренних слоях в какой-то точке имеющих пустот, окруженной волокнами целлюлозы, вода, абсорбированная стенками, частично испаряется, пока в этой точке не установится равновесное давление при данной температуре и содержании влаги.

Следовательно, образуется разность давлений во внутренних и наружных слоях, вызывающая движение водяных паров. При высокой влажности этот поток преодолевает только сопротивление

каналов вдоль волокон, соединяющих пустоты. При низкой влажности абсорбционные явления на стенках каналов будут иметь преобладающее влияние. По мере уменьшения среднего влагосодержания, поток паров становится меньше. Более подробное описание происходящих явлений дано в [Л. 39]. При условии достаточной скорости откачки и достаточности сечения воздушных каналов между изоляцией сушка каждого элемента не зависит от сушки остальных элементов изоляции. Время сушки зависит только от скорости диффузии влаги из целлюлозы. Для каждого элемента она определяется абсорбционными характеристиками материала, его проницаемостью для потока водяных паров и длиной наибольшего пути, который должны пройти частицы влаги, чтобы достичь поверхности.

Когда трансформатор сушится, время вакуумировки одинаково для всех его элементов. Согласно сказанному выше конечное содержание влаги будет разным как для разных деталей, так и для разных слоев одной детали.

Поэтому необходимо знать время, требуемое в окончательной стадии обработки при имеющемся оборудовании, чтобы достичь удовлетворительной степени сушки внутренних слоев и наиболее важных элементов изоляции трансформаторов. Это удобно сделать с помощью моделей.

Изоляция провода и отводов. Эта изоляция выполнена из бумажной ленты. Сушка осуществляется только в радиальном направлении, если толщина изоляции неизменна. Этот тип изоляции может быть исследован с помощью цилиндрических моделей, намотанных той же лентой с таким же перекрытием и натяжением, но на металлической трубе. Радиальная толщина модели такая же, как в моделируемом элементе. Оба конца модели должны быть заделаны, чтобы влага удалялась только в радиальном направлении.

Бумажные цилиндры между обмотками. Они наматываются из листов бумаги. Если имеются промежуточные масляные каналы, цилиндр должен рассматриваться как соосный, состоящий из нескольких цилиндров, и режим сушки каждого из них должен быть изучен. Выход влаги при сушке происходит в двух направлениях, радиальном и аксиальном. Влага быстрее движется в аксиальном направлении, поскольку оно совпадает с направлением расположения волокон, но неизвестно, на сколько эта скорость больше, чем в радиальном направлении. В середине высоты цилиндра длины этих двух путей отличаются очень сильно и сушка происходит практически только в радиальном направлении. Безотносительно к эффекту кривизны, наибольший путь для влаги должен быть равен половине толщины цилиндра. Последними будут высушены участки цилиндра на средней его окружности посередине высоты.

Этот тип изоляции может быть исследован с помощью моделей, аналогичных предыдущим, но намотанных целым бумажным листом и имеющих толщину, равную половине толщины рассматриваемых цилиндров.

Детали из картона (цилиндры, угловые шайбы и т. д.). Трансформаторный картон, имеющий более высокую плотность и меньшую пористость, будет сушиться медленнее. Испытания, произведенные Вайдманом на картоне с плотностью 1,25, показали, что в плоскости листа, т. е. вдоль и поперек волокон, скорость

сушки примерно одинакова. Однако в направлении, перпендикулярном плоскости листа, она примерно в 10 раз меньше. Пусть в изоляции трансформатора имеется точка P , через которую проходит три взаимно перпендикулярные оси x , y , z . Пусть оси x и y имеют направление в плоскости листа, причем точка P имеет кратчайшее расстояние до поверхности испарения. Величины l_x , l_y , l_z есть минимальные расстояния от поверхности испарения вдоль трех осей.

С точки зрения сушки точка P будет вести себя так, как если бы сушка происходила только в одном направлении в плоскости волокон с эквивалентным расстоянием до поверхности, равном L , где L определяется равенством

$$\frac{1}{L} = \sqrt{\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} + \frac{1}{(10l_z)^2}},$$

а при отдаче влаги в направлении, перпендикулярном плоскости волокон, при эквивалентном расстоянии, равном $L/10$.

Для элементов, имеющих большие размеры вдоль плоскости листа и малую толщину (цилиндры, угловые шайбы и пр.), сушка происходит практически только в направлении, перпендикулярном плоскости листа.

В деталях, изготовленных путем склеивания листов, сушка осуществляется только в плоскости листа вследствие непроницаемости клея.

Для данной детали из картона будет высушена последней та точка в изоляции, которая имеет максимальное L .

Режим сушки может быть изучен на моделях из того же картона, имеющих нужную форму для осуществления сушки в одном направлении, максимальное расстояние до поверхности испарения, равной L , если сушка происходит в плоскости листа, или $L/10$, если в перпендикулярном направлении.

Определение времени сушки для типичных элементов изоляции. На основе приведенного выше рассмотрения авторами [Л. 38] были поставлены опыты на моделях с целью изучения режимов для точек, наиболее отдаленных от поверхностей, в некоторых типичных элементах изоляции.

Для проверки режимов сушки необходимо знание абсорбционных характеристик материала по отношению к водяным парам. Для бумаги эти характеристики были получены с помощью видоизмененного метода Эдвардса и приведены на рис. 4-3.

Модели были изготовлены путем намотки бумаги в виде ленты или листа на посеребренные медные трубы. Радиальная толщина моделей от 2 до 36 мм. Между слоями были заложены электроды, охранные кольца и экраны для измерения диэлектрических характеристик изоляции на различных расстояниях от испаряющей поверхности. Они были изготовлены из посеребренных медных решеток, имеющих толщину 0,1 мм. Чтобы контролировать местные температуры, были заложены железо-константановые термпары. Для осуществления сушки только в радиальном направлении торцы исследуемых бумажных цилиндров были залиты эпоксидной смолой.

Ниже приведено общее рассмотрение полученных результатов. Сушка продолжалась до достижения постоянных значений диэлектрических характеристик. Листы бумаги, высушенные при 120°C и помещенные в измерительное устройство с плоскими электродами, имели тангенс дельта при 10°C менее 0,002. В моделях из этой бу-

маги измеренные величины даже при очень малых толщинах были значительно выше. Это может быть объяснено сморщиванием внутренних слоев бумаги во время сушки, образованием волнистости и изменением давления. Сравнение же результатов исследования моделей с малой и большой толщиной изоляции показало, что в большинстве внутренних слоев в конечной точке диэлектрические характеристики примерно одинаковы. По-видимому, эти различия вызваны недостаточной однородностью бумаг и причинами, указанными выше. Поэтому, по мнению авторов [Л. 38], следует рассматривать при сравнении не абсолютные значения характеристик, а их изменение во времени. Так, удельное сопротивление становится постоянным позже, чем тангенс дельта. Как и ожидалось, в конечной точке сушки отмечается ухудшение характеристик слоев по мере удаления от наружной поверхности. Это хорошо видно на модели с пятью участками для измерений. Для наружных слоев стабильные значения характеристик достигаются значительно раньше, чем для внутренних. Окончательные величины характеристик для наружных слоев значительно лучше, чем для внутренних (рис. 4-4). Модели, намотанные лентой, улучшают характеристики в начале сушки быстрее, а в конце медленнее, чем модели, намотанные целым листом.

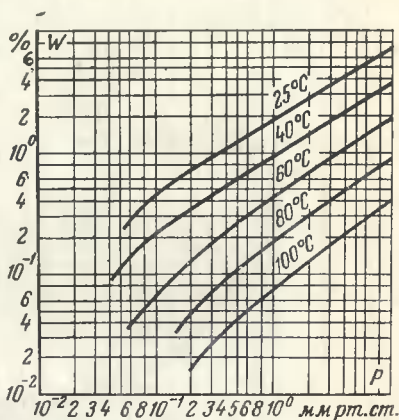


Рис. 4-3. Абсорбционные характеристики бумаги (получено с помощью видоизмененного метода Эдвардса) [Л. 38].

В большинстве случаев время, требуемое для достижения приемлемых характеристик, для моделей, намотанных лентой, короче, хотя и не на много — до 20%. Поэтому можно считать, что бумажные цилиндры, используемые в качестве изоляции между обмотками, будут сушиться быстрее, чем изоляция проводников при одинаковой их толщине, так как в цилиндрах наибольший путь, проходимый влагой, эквивалентен только половине толщины цилиндра, тогда как для изоляции проводников — всей ее толщине.

Внутренние слои моделей. Важны не абсолютные значения диэлектрических характеристик, а их изменение во времени. Время, необходимое для достижения определенных величин тангенса дельта в функции расстояния до поверхности испарения, приведено на рис. 4-5. В логарифмическом масштабе зависимость имеет вид серии параллельных прямых линий.

Необходимое время сушки может быть выражено аналитически уравнением

$$t = s^m e^{-k},$$

где t — время, ч, необходимое для достижения определенных значений тангенса дельта; s — радиальное расстояние между средней

окружностью рассматриваемого участка и поверхностью испарений, мм; m — коэффициент, средняя величина которого около 1,4; k — коэффициент, зависящий от величины тангенса дельта и определяемый по графику на рис. 4-6.

Абсорбция влаги. Испытания были произведены в вакууме при парциальном давлении водяных паров 20—22 мм рт. ст.

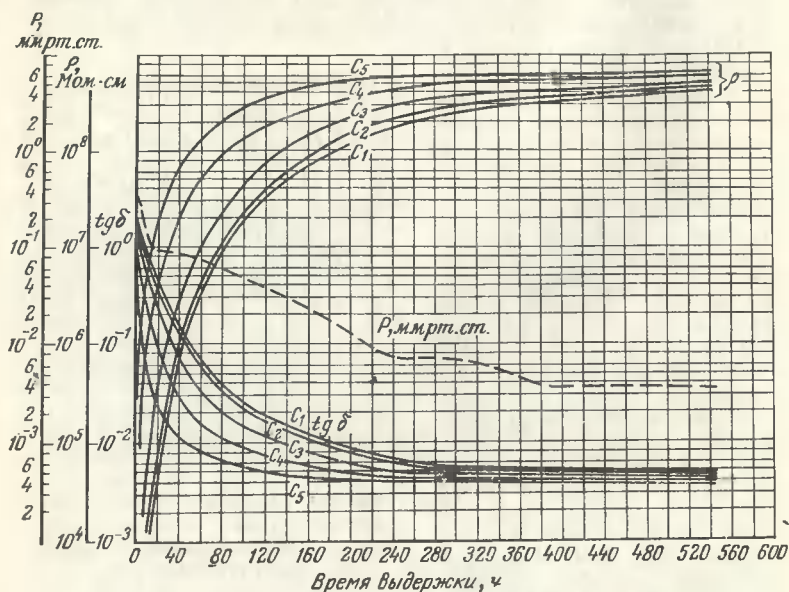


Рис. 4-4. Результаты первой сушки модели с общей толщиной изоляции 36 мм, намотанной целым листом с пятью участками для измерения характеристик (участки $C_1 \dots C_5$).

C_1 — первый внутренний слой [Л. 38].

В этих условиях абсорбция происходит быстрее, чем при атмосферном давлении при том же парциальном давлении водяных паров. Из рассмотрения результатов опытов на моделях авторы [Л. 38] делают следующие заключения: 1) абсорбция в наружных слоях происходит очень быстро и не зависит от общей толщины изоляции модели; 2) первые признаки абсорбции влаги (в моделях, намотанных целым листом) отмечаются через определенное время, которое с увеличением расстояния рассматриваемой точки от поверхности испарения также увеличивается. Эта зависимость (рис. 4-7) имеет вид прямой.

Эта же зависимость в аналитическом выражении

$$t = 0,934 d^{1,83},$$

где t — время (ч), необходимое для заметного изменения тангенса дельта на участке изоляции, расположенном на расстоянии d (мм) от поверхности.

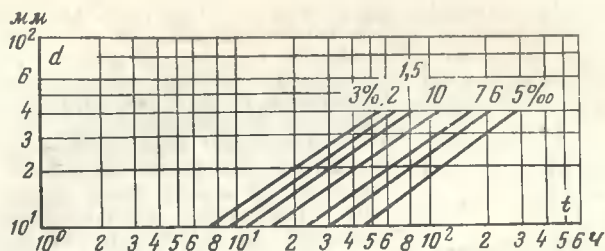


Рис. 4-5. Время сушки, необходимое для достижения определенных величин тангенса дельта в функции расстояния до поверхности испарения (модели намотаны лентой) [Л. 38].

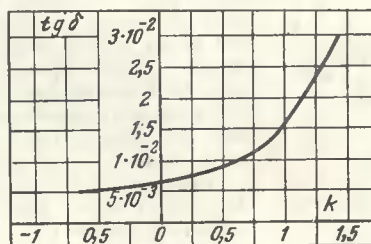


Рис. 4-6. Зависимость величины коэффициента k от изменения тангенса дельта [Л. 38].

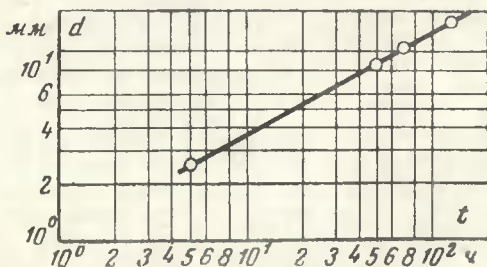


Рис. 4-7. Зависимость времени, необходимого для получения заметных изменений тангенса дельта, от расстояния до наружной поверхности (при увлажнении модели бумажной изоляции) [Л. 38].

За время абсорбции на модели с пятью участками замечено, что величина тангенса дельта большинства внутренних слоев вместо увеличения медленно уменьшалась, т. е. эти слои вели себя так, как если бы они, имея более высокое содержание влаги, медленно отдавали ее соседним слоям, имеющим меньшее содержание.

Изменение парциального давления водяных паров во внутренних слоях. О конечной стадии сушки, определяемой по измеренным стабилизировавшимся показателям диэлектрических характеристик, свидетельствующих о достижении равновесного содержания влаги в наиболее удаленных внутренних слоях, можно судить лишь косвенно. Действительное влагосодержание остается неизвестным.

На внутренней поверхности первого слоя бумаги в любой момент давление водяных паров соответствует содержанию влаги в этой точке. Зная абсорбционные кривые примененной бумаги и измерив парциальное давление водяных паров на внутренней поверхности изоляции модели, можно определить влажность первого слоя в функции времени.

Модель, намотанная целым листом, была изготовлена для этой цели (радиальная толщина 12 мм). Модель была намотана на посеребренной латунной трубке, имеющей несколько щелей. Эти щели соединены сборным каналом, сообщаемым с вакуумным прибором, помещенным снаружи сушильной камеры. Были установлены также термодары и электроды для измерения диэлектрических характеристик.

На рис. 4-8 представлено принципиальное устройство модели для измерения парциального давления водяных паров во внутреннем слое.

Модель была помещена в сушильную камеру, нагрета до $100 \pm 3^\circ \text{C}$ и затем был создан вакуум. Производились измерения диэлектрических характеристик и давления внутри камеры и внутри модели (общее давление и парциальное давление водяных паров, начиная

с абсолютного давления, равного 180 мм рт. ст.).

Как показали результаты измерений, начиная с давления 180 мм рт. ст. внутри изоляции, парциальное давление водяных паров практически одинаково с общим давлением.

Диэлектрические характеристики достигают постоянных значений при влагосодержании около 0,1%. Это совпадает с результатами других авторов.

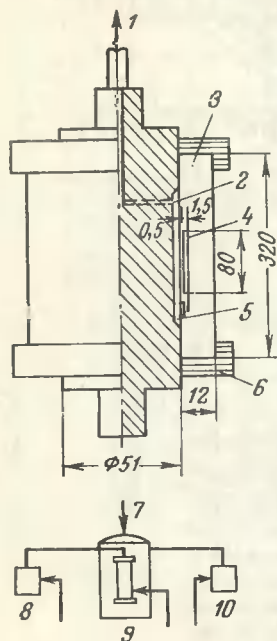


Рис. 4-8. Принципиальное устройство и общий вид модели для измерения парциального давления водяных паров во внутреннем слое.

1 — к вакуумному прибору; 2 — выходное отверстие сборного канала; 3 — бумага; 4 — электроды; 5 — щель; 6 — уплотняющие детали из эпоксида; 7 — сушильная камера; 8 — вакуумный прибор; 9 — модель; 10 — насосы [Л. 38].

4-5. СУШКА ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ЗАВОДАХ АЕИ в ВИТЕНШО (ВЕЛИКОБРИТАНИЯ) [Л. 40]

Содержание воды в бумаге и картоне в условиях равновесия с обычной заводской атмосферой составляет около 7—10%. Сушкой уменьшают это содержание до 0,1%. Чтобы избежать разложения бумаги, температура при сушке должна не превышать 105°С. На рис. 4-1 приведено влагосодержание бумаги в зависимости от температуры и давления. Для достижения влагосодержания 0,1% необходимо давление 3 мм рт. ст. Однако для компенсации перепада давления в изоляции создается вакуум в 10 раз больший.

Применяются два способа вакуумной сушки больших силовых трансформаторов. Первый состоит в том, что трансформатор в собственном баке помещается в вакуумную печь, другой — в том, что трансформатор также в баке помещается в камеру с горячим сухим воздухом, но вакуум создается только в баке трансформатора. Вакуум создается сначала ротационным насосом, но так как производительность насосов этого типа уменьшается по мере уменьшения давления, то дополнительно должен использоваться механический дроссельный насос. Испарительный насос иногда используется вместо дроссельного или в дополнение к нему. Конденсатор устанавливается так, чтобы избежать попадания большого количества влаги в ротационный насос. На рис. 4-9 показан порядок включения насосов, а также их характеристики.

Хотя давление около 0,1—0,3 мм рт. ст. при 105°С должно создать остаточное содержание влаги в целлю-

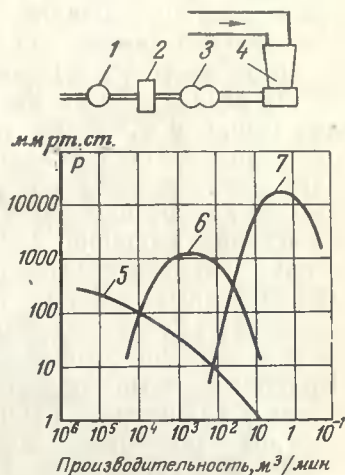


Рис. 4-9. Порядок включения насосов.

1 — ротационный насос; 2 — конденсатор; 3 — механический дроссельный насос; 4 — испарительный дроссельный насос (стрелкой указано направление откачки из трансформаторов); характеристики: 5 — ротационного; 6 — механического дроссельного; 7 — испарительного дроссельного насосов [Л. 40].

лозе около 0,1%, все же считается необходимым уменьшить давление до величины менее 0,05 мм рт. ст., чтобы обеспечить удовлетворительную пропитку. Масло для пропитки поступает на завод, имея содержание воды от 25 до 40 г/т и газосодержание около 8%. Эти цифры уменьшаются обработкой масла на заводе соответственно до 10 г/т и 2%.

Такое масло легко абсорбирует остаточную влагу и газ из твердой изоляции. Перед пропиткой температура в сушильной камере или баке трансформатора снижается до 50°С, чтобы избежать испарения масла.

На заводах АЕИ в Витеншо введена новая установка для сушки и пропитки трансформаторов высокого напряжения. Активная часть после сборки перед опусканием в бак помещается в печь с циркулирующим горячим воздухом, после чего может производиться подтяжка усевшей изоляции. Затем активная часть монтируется в бак и трансформатор ставится в печь. Используются два масляных вентиля трансформатора для пропуска через бак сухого горячего воздуха для обдува обмотки. Этот воздух готовится в компрессорном осушителе Римера, который состоит из двух сосудов с активированным алюминием, работающих поочередно. В один из сосудов поступает воздух под давлением около 7 кгс/см² и сушится до влагосодержания 1 г/м³ в пересчете на атмосферное давление. Сухой воздух нагревается до 105°С и продувается через трансформатор. Это снижает влагосодержание твердой изоляции до 0,5% и нагревает трансформатор до температуры, требуемой для вакуумной сушки. Этим значительно уменьшается количество водяных паров, прокачиваемых через вакуумные насосы.

Новая вакуумная установка производства АЕИ состоит из ротационного насоса, механического дросельного насоса и шести испарительных насосов производительностью 7, 35 и 400 м³/мин соответственно. В конце сушки давление повышается до 0,05 мм рт. ст. и производится пропитка маслом.

Масло перед пропиткой подается из хранилища через фильтры и распыляется в специальный бак, в котором поддерживается температура 60°С и давление 0,5 мм рт. ст. Отсюда по мере надобности масло берется в производство. Однако для мощных трансформаторов высокого напряжения необходима еще одна стадия.

Масло пропускают через компактную дегазационную установку, работающую при температуре 50°C и давлении $0,07\text{ мм рт. ст.}$ При этом наиболее летучие компоненты масла испаряются, но затем вновь конденсируются и возвращаются в масло после дегазационных колонн. Масло медленно заливается в бак до тех пор, пока не покроется вся изоляция. Вакуум снимается в течение нескольких дней.

4-6. СУШКА ТРАНСФОРМАТОРОВ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ 220—500 кВ ФИРМОЙ САВУАЗЬЕН (1960 г.)

Процесс сушки делится на два этапа. Первый этап включает продувку печи с активной частью горячим воздухом при температуре $105\text{—}110^{\circ}\text{C}$. Периодически в печи создается вакуум, причем каждый раз более глубокий, чем в предыдущий. Продолжительность первого этапа около 5 суток для трансформаторов 220 кВ и около 6 суток для 500 кВ. Сокращение этого этапа для трансформаторов 220 кВ по сравнению с трансформаторами 500 кВ возможно на один цикл *продувка — вакуум*. Других критериев окончания этого этапа не имеется. Во втором этапе в шкафу создается глубокий вакуум, остаточное давление несколько десятых долей миллиметра ртутного столба.

В последние сутки сушки производятся два замера сопротивления изоляции со сдвигом во времени порядка 10—14 ч. На время замера сопротивления остаточное давление в шкафу поднимается до величины $2,5\text{—}4\text{ мм рт. ст.}$ Критериями окончания сушки являются: 1) время сушки, равное 9—10 суткам для трансформаторов 220 кВ и 11—12 суток — для 500 кВ; 2) равенство сопротивления изоляции активной части в двух последних замерах; 3) отсутствие колебаний в значении остаточного давления в печи при достаточно низком абсолютном значении; 4) отсутствие воды в конденсаторе.

После сушки активная часть выходит из печи для прессовки обмотки и общей отделки. Эта операция длится, как правило, не более 2 дней. Активную часть на ночь помещают в шкаф, где на это время создается остаточное давление порядка $2\text{—}3\text{ мм рт. ст.}$ Помещение активной части в шкаф на ночь объясняется односменной работой завода. После прессовки обмоток и отделки

активную часть, установленную в собственном баке, помещают в тот же шкаф для пропитки маслом. Пропитка производится под вакуумом. Масло перед пропиткой прогревается в специальных подогревателях до температуры около 70°C . Бак нормально уплотняется за исключением нескольких люков на верхней части крышки, остающихся полностью открытыми. Бак заполняется маслом до уровня, обеспечивающего полное закрытие верхней ярмовой изоляции. Наполнение осуществляется снизу со скоростью не более $3\text{--}3,5\text{ т}$ в час. Критериями окончания пропитки являются: 1) пребывание активной части в масле при отсутствии выделения пузырей воздуха в течение около 48 ч; 2) получение предполагаемых величин сопротивления изоляции.

После пропитки производится стабилизация изоляции, длительность которой для трансформаторов 400—500 кВ составляет 7 суток (от выхода из печи до первого приложения напряжения при испытаниях). При этом от момента доливки масла до конца стабилизации должно быть не менее 2 суток.

4.7. СУШКА ТРАНСФОРМАТОРОВ В СОБСТВЕННЫХ БАКАХ НА ЗАВОДЕ

Этот метод сушки пригоден для трансформаторов, баки которых рассчитаны на полный вакуум.

Ниже приводится описание метода сушки трансформаторов в собственных баках, применяемого фирмой Савуазьен.

Активная часть помещается в собственный бак, нагрев ее осуществляют путем продувания через бак воздуха, подогретого до температуры $105\text{--}110^{\circ}\text{C}$. Контроль температуры обмоток осуществляется по сопротивлению, а магнитопровода — с помощью специально заложенных термодатчиков. Бак, в котором производится сушка, не имеет никакой временной теплоизоляции. При прогреве активной части до 105°C подача горячего воздуха прекращается и в баке создается вакуум (остаточное давление $1\text{--}3\text{ мм рт. ст.}$).

В процессе сушки постоянно, через определенные интервалы времени, измеряются сопротивление изоляции обмоток и температура активной части, а в отрезки времени, когда в баке вакуум, контролируется выделение конденсата. При снижении температуры активной части до 70°C вакуум снимается и вновь производится подо-

грев ее до температуры 105°C путем продувания через бак горячего воздуха с температурой $105\text{—}110^{\circ}\text{C}$. Далее процесс повторяется. Считается, что при данном методе сушки активных частей трансформаторов оптимальный минимум температуры составляет 70°C .

Снижение температуры активной части после прекращения подачи горячего воздуха до допустимого минимального значения 70°C при сушке в собственном баке активной части трехфазного трансформатора мощностью 150 Мва, четырехобмоточного, с высшим напряжением 150 кв произошло за 4 ч. Критерии окончания сушки те же, что при сушке в специальных печах.

Пропитка активной части маслом производится также в своем баке. Процесс сушки активных частей мощных трансформаторов в специальных печах на фирме Савуазьен длится от 10 до 14 суток. При сушке в собственных баках этот процесс сокращается приблизительно на 2—3 суток.

4-8. НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ФИРМЫ ДЖЕНЕРАЛ ЭЛЕКТРИК (США) ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МАСЛА [Л. 41]

В 1964 г. в Питсфилде установлено новое оборудование, способное фильтровать и дегазировать трансформаторное масло, производительностью $60\text{ м}^3/\text{ч}$. Ежедневно заводу требуется около 550 м^3 очищенного масла, так как в процессе производства каждый трансформатор трижды должен заполняться маслом. В среднем на заводе имеется обычно около 1000 м^3 масла.

Новая установка позволяет удалять путем фильтрации механические примеси размерами более 1 мкм . Хорошо известно, что вода является одной из наиболее нежелательных примесей в масле. До последнего времени для удаления воды и воздуха использовалась установка с абсолютным остаточным давлением от 2 до 4 мм рт. ст.

В процессе удаления воды и воздуха с помощью новой установки масло вакуумируется при остаточном давлении от $0,01$ до $0,7\text{ мм рт. ст.}$ Величина остаточного давления зависит от первоначального и требуемого содержания в масле воды и воздуха. Такая обработка обеспечивает содержание воды менее 5 г/т и газосодержание менее $0,3\%$. Поступающее на установку масло через фильтр-прессы подается в бак для хранения. Из этого бака через деаэратор производительностью $60\text{ м}^3/\text{ч}$ оно поступает в два горизонтальных бака, где хранится под вакуумом.

В результате, главным образом, усовершенствования обработки масла в течение последних 10 лет фирме удалось примерно на 45% увеличить минимально допустимую электрическую прочность масла на заводах. Достигнутая на заводе электрическая прочность должна поддерживаться и в эксплуатации. Поэтому на месте установки трансформатор предписывают заливать высококачественным маслом, имеющим прочность не менее 30 кв , определенную согласно ASTM.

4-9. СУШКА ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРОВОЙ ФАЗЫ (ФИРМА ВЕСТИНГАУЗ ЭЛЕКТРИК, США)

Анализ процессов сушки позволяет сделать вывод о преимуществах сушки с нагревом парами.

1. Использование насыщенных или слегка перенасыщенных паров в качестве нагревающей среды позволяет быстрее прогреть изоляцию, особенно внутренние ее части, так как на нагревание идет не только тепло самих паров, но и теплота, выделяющаяся при их конденсации.

2. Так как нагрев осуществляется парами органической жидкости, не происходит окисления изоляции. Поэтому можно использовать более высокие температуры без опасения порчи изоляции.

3. Все операции — прогрев, сушка и пропитка маслом — могут производиться в одной камере.

4. Жидкость, используемая для создания паров, прогревающих изоляцию, является совместимой с трансформаторным маслом и никаких осложнений не вызывает.

Сушка состоит из четырех этапов: 1) вакуумировка; 2) нагревание парами органической жидкости под вакуумом; 3) сушка под высоким вакуумом; 4) пропитка маслом под вакуумом. Простейший способ создания паров — кипение раствора, небольшое количество которого находится на дне камеры. Подогрев осуществляется в такой степени, чтобы была хорошая циркуляция паров в камере. Избыток паров теплоносителя, а также водяные пары удаляются из камеры через вакуумную линию и затем конденсируются и разделяются. В качестве теплоносителя выбран керосин (в других источниках указан другой теплоноситель — «подобный керосину» и петролейный эфир) [Л. 42]. На выбор влияют несколько причин. Необходимо чтобы раствор теплоносителя кипел при абсолютном давлении, которое значительно ниже давления паров воды при этой температуре, что обеспечивает удаление влаги из изоляции. В то же время давление паров должно быть достаточно высоко, чтобы в изоляции не оставалось больших следов раствора в конце сушки. Раствор должен быть совместим с маслом как электрически, так и химически, т. е. чтобы наличие небольшого количества раствора не вредило изоляции и маслу.

Кроме того, должны приниматься во внимание его стоимость и химическая стабильность.

После достижения требуемой температуры во всей толще изоляции раствор удаляется из бака и начинаются следующие стадии — сушка под глубоким вакуумом и пропитка.

Для сопоставления скорости сушки разными методами опыты производились на моделях, толщина изоляции которых была такой же, как и в трансформаторах.

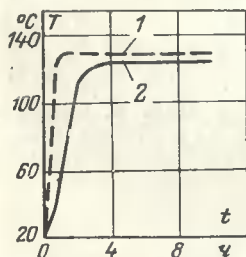


Рис. 4-10. Нагрев трансформатора в паровой фазе. 1 — температура паров; 2 — кривая нагрева изоляции трансформатора 20 Мва [Л. 42].

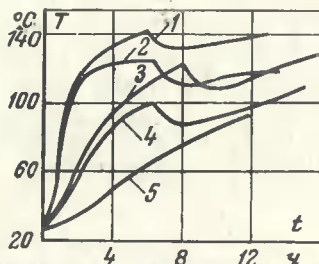


Рис. 4-11. Сопоставление скорости нагрева изоляции моделей трансформатора.

1 — нагрев парами при температуре 150° С с последующим созданием вакуума; 2 — нагрев парами при температуре 130° С с последующим созданием вакуума; 3 — нагрев сухим воздухом при температуре 150° С с последующим созданием вакуума; 4 — то же при температуре 130° С; 5 — вакуумный прогрев при 130° [Л. 42].

Одновременной сушкой трансформатора и модели двумя методами (в паровой фазе и с подогревом горячим воздухом) была показана идентичность моделей трансформаторам. Нагрев в паровой фазе позволяет за короткое время прогреть изоляцию до температуры, которая ниже температуры паров не более чем на 5° С (рис. 4-10). Время, требующееся для этого, вдвое меньше, чем время прогрева горячим воздухом. Еще большие преимущества имеет этот метод перед вакуумным прогревом (рис. 4-11), поскольку в паровой фазе быстрее происходит передача тепла, быстрее и полнее удаляется влага. В то же время равномерность прогрева изоляции в паровой фазе лучше и меньше опасность оставления влаги в толще изоляции.

Обычно при сушке трансформатора с подогревом горячим воздухом температура в шкафу не должна пре-

вышать 115°С. Но даже при такой температуре часто бывает заметное потемнение и хрупкость изоляции наружных поверхностей конструкции.

При сушке в паровой фазе было определено, что в результате нагрева при температуре 120°С в течение 120 ч не было заметного уменьшения физических свойств целлюлозной изоляции. Если такой цикл осуществить при подогреве горячим воздухом, то прочность бумаги на разрыв уменьшится по крайней мере на 25%. Возможность прогрева при паровой фазе до 150°С позволяет при остаточном давлении 1 мм рт. ст. достигнуть такой степени влагоудаления, которая достигалась ранее только при сушке конденсаторов. Фирма Вестингауз электрик имеет две установки для сушки в паровой фазе. Одна из них, предназначенная для сушки самых крупных трансформаторов, эксплуатируется с 1964 г. [Л. 42].

4-10. НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО ПРИМЕНЯЕМЫМ ЗА РУБЕЖОМ МЕТОДАМ СУШКИ

Сопоставление методов сушки, применяющихся за рубежом, приведено в § 4-1. Ниже излагаются только общие замечания, которые следует сделать после ознакомления с описанными выше методами.

За рубежом, по-видимому, редко используется применяющийся на отечественных заводах метод прогрева в воздухе с помощью внешнего обогрева в сушильной печи. Основными недостатками этого метода являются следующие: 1) неравномерность прогрева изоляции ввиду отсутствия циркуляции воздуха; 2) перенасыщенность воздуха водяными парами в стадии прогрева, вследствие чего может происходить интенсивная коррозия стали; ржавчина, разносимая маслом, может стать причиной электрического пробоя изоляции; 3) требуется значительно большая производительность вакуумных насосов ввиду наличия большого количества водяных паров; 4) более интенсивное старение изоляции в процессе сушки.

При недостаточной сушке изоляции перед сборкой активной части недостатки метода возрастают. Однако следует отметить, что насыщенность воздуха водяными парами в стадии прогрева может быть снижена путем применения организованных подсосов воздуха. По дан-

ным ВНИИЭ это также уменьшает длительность сушки*.

Отмечается большая длительность сушки за рубежом, но объясняется она не недостатками применяющихся там методов, а значительно лучшим качеством сушки. Установившиеся значения контролируемых параметров достигаются за большее время ввиду большой длительности прогрева и много меньшего значения остаточного давления во время сушки.

Получаемые абсолютные значения электрических характеристик изоляции более высокие, так, например, согласно рис. 3-1 [Л. 1] сопротивление изоляции в конце сушки составляло для обмотки НН более 60 000 *Мом*, а для обмотки ВН более 100 000 *Мом*. Это примерно на порядок выше, чем при сушке трансформаторов класса напряжения 500 *кв* на отечественных заводах.

Общая длительность сушки методом сочетания горячего воздуха с вакуумом составляет обычно около 12 суток (см. рис. 3-1), причем примерно половину этого времени занимает прогрев изоляции. Скорость прогрева можно значительно увеличить введением подогрева обмоток постоянным током и подогрева стенок сушильной камеры. При этих условиях метод может быть рекомендован для применения на отечественных заводах. Следует иметь в виду, что при этом методе можно достичь меньшего остаточного давления, а следовательно, лучшей сушки при меньшей производительности вакуумных насосов ввиду меньшего содержания водяных паров. Метод сушки в паровой фазе следует считать весьма перспективным. Необходимо на отечественных заводах поставить работы по изучению и внедрению этого метода, позволяющего в несколько раз сократить время сушки не только за счет сокращения времени прогрева, но и вследствие возможности значительного повышения температуры сушки.

Заслуживает внимания сушка сочетанием горячего воздуха с вакуумом, проводимая в собственных баках крупных трансформаторов.

Следует также рассмотреть возможность внедрения на отечественных заводах предварительной механической

* Об этом см. статью Н. Б. Леонидовой «Методы сушки силовых трансформаторов» в сб. «Передовые методы ремонта трансформаторов», «Энергия», 1967.

стабилизации обмоток с сушкой их до влагосодержания около 1% перед насадкой на магнитопровод.

Применяемые за рубежом остаточные давления при сушке находятся в пределах от 10^{-2} до 1 мм рт. ст. Этот показатель характеризует достигаемую за рубежом степень сушки.

Пропитка изоляции осуществляется обычно при остаточном давлении перед пропиткой не ниже 0,05 мм рт. ст. и температуре не выше 50—70° С. Эти ограничения объясняются желанием избежать слишком интенсивного, испарения масла. Длительность пропитки определяется опытным путем.

Глава пятая

СУШКА ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ *

5-1. ОБЩИЕ ДАННЫЕ

Отсутствие необходимого вакуумного оборудования, а также конструкция бака трансформатора, не рассчитанного на создание в нем достаточно глубокого вакуума, вынуждают в эксплуатации обращаться к методам сушки трансформаторов без вакуума. Большинство этих методов предусматривает удаление влаги из масла, которое является промежуточным носителем влаги. Следовательно, все эти методы по своему принципу требуют длительного времени для сушки, так как передача воды от целлюлозы к маслу весьма затруднена. Наиболее распространен метод циркуляции масла через вакуумную сушильную установку [Л. 1]. Между тем свыше 90% воды в трансформаторе содержится в твердой изоляции. Например, при сушке трансформаторов класса напряжения 132 кв вода выделялась со скоростью 3 л в день. После удаления 11—23 л скорость становилась очень маленькой, а процесс малопродуктивным. На этой стадии масло сухое и содержит 5—10 г воды на 1 т; наружные поверхности целлюлозы сухие, а сопротивление изоляции обмотки повысилось. Теперь скорость удаления

* См. также статью Н. Б. Леонидовой «Методы сушки силовых трансформаторов» в сб. «Передовые методы ремонта трансформаторов», «Энергия», 1967.

зависит от диффузии в целлюлозе. Указанное выше удаление воды позволило уменьшить ее содержание в целлюлозе всего на 0,25%, т. е. после нескольких недель сушки трансформатор остается почти таким же сырым и после отключения установки содержание воды в масле и сопротивление изоляции быстро возвращаются к почти первоначальному состоянию. Необходимо много раз повторять процесс, чтобы добиться уменьшения общего количества воды. С увеличением температуры скорость диффузии влаги в масле увеличивается.

Известно, что высушить пропитанную изоляцию более трудно, чем непропитанную. Одна из причин этого заключается в том, что силы поверхностного натяжения масла в порах бумажной изоляции компенсируют давление водяных паров. Следовательно, эффективный вакуум на изоляции уменьшен [Л. 33]. Ниже приводится описание некоторых таких способов сушки. Описываемые методы малопроизводительны, но оборудование для их осуществления дешево и сушку можно осуществлять в течение месяцев во время эксплуатации трансформатора*.

5-2. РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ СУШКИ МАСЛА И ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТОДОМ ЦИРКУЛЯЦИИ МАСЛА [Л. 33]

Наиболее часто применяющимся методом сушки, особенно когда бак трансформатора не рассчитан на вакуум, является метод циркуляции масла в замкнутой системе (трансформатор и установка для его дегазации и нагревания) [Л. 33]. Обычно это требует большого времени, так как масло является здесь промежуточным носителем влаги. Полезно иметь примерные данные о времени, необходимом для такой сушки.

В обычных дегазаторах масло разбрызгивается или растекается по большой поверхности. Поэтому при выводе формул делается допущение, что существует равновесие между парциальным давлением газа и водяных паров в вакуумном баке и масле. Тогда выражение для расчета требуемого времени сушки масла объемом V_t будет:

$$t_f = \frac{V_t}{v_0 \left(1 - \frac{k_w}{k_w + y} \right)} \ln \left(\frac{p_{gwt}}{p_{gwf}} \right), \quad (5-1)$$

где v_0 — скорость потока масла; k_w — бунзеновский коэффициент для водяных паров в масле при данной температуре; $y = v_a/v_0$ —

* В СССР сушка трансформаторов в масле не применяется с 1945 г., когда она была запрещена НКЭС СССР, поскольку оказывалась очень продолжительной и приводила к порче масла.

отношение производительности вакуумного насоса к скорости потока масла; p_{gwi} — парциальное давление водяных паров в растворе в линии к дегазатору; p_{gwf} — требуемое парциальное давление, до которого сушится масло.

Когда отношение v_a/v_0 равно бесконечности, масло, выходящее из дегазатора, совершенно сухое и

$$t_f = \frac{V_t}{v_0} \ln \left(\frac{p_{gwi}}{p_{gwf}} \right). \quad (5-2)$$

Если $v_a=0$, то $t_f=\infty$.

Пример. Предположим, требуется высушить 45,4 м³ масла до одной десятой его первоначального влагосодержания ($p_{gwi}/p_{gwf}=10$). В замкнутой системе дегазатора масло циркулирует со скоростью 1,2 м³/ч, производительность насоса 300 м³/ч, k_w принят равным 1 при 80°С. Тогда согласно формуле (5-1)

$$t_f = \frac{45,4 \ln 10}{1,2 \left(1 - \frac{1}{1+250} \right)} = 87 \text{ ч.}$$

Такой же расчет может быть сделан для определения времени, необходимого для уменьшения количества растворенного воздуха.

Выяснив требуемое время для сушки и дегазации одного масла, необходимо установить время сушки всей изоляции трансформатора в эксплуатации методом циркуляции масла в замкнутой системе с дегазатором и нагревателем. Это можно сделать при следующем допущении: в любой момент влага, содержащаяся в бумажной изоляции, находится в равновесии с влагой масла. Это близко к истине, поскольку количество воды в масле мало по сравнению с ее содержанием в бумажной изоляции, а время сушки достаточно длительно.

Затем устанавливается эквивалентный объем масла, исходя из первоначального содержания воды в бумаге.

Определяется p_{gwi} из рис. 2-12 по первоначальному процентному влагосодержанию и предполагаемой температуре сушки. Сделаем то же для p_{gwf} по требуемой конечной степени сухости. k_w должно соответствовать температуре сушки.

Эквивалентный объем масла для бумаги и масла, как показано в [Л. 33], может быть определен из следующего выражения:

$$V_{\text{экв}} = \left(\frac{w_p \cdot W_6}{80} + \frac{W_m V_t}{0,8 \cdot 10^6} \right) \frac{1}{p_{gwi} k_w}, \text{ л}, \quad (5-3)$$

где w_p — вес бумаги, г; W_6 — остаточное влагосодержание бумаги, %; W_m — влагосодержание масла, г/т; V_t — объем масла, л.

Пример. Требуется высушить трансформатор, содержащий 2 т бумаги, влагосодержание которой составляет 3%. Объем масла 27 000 л, его влагосодержание 10 г/т. Температура сушки 80°С ($k_w=1$). Требуется вывести влагосодержание твердой изоляции до 0,5%. Примем $v_a=30$ м³/ч и $v_0=4540$ л/ч. Согласно формуле (5-3)

$$V_{\text{экв}} = \left(\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 3}{80} + \frac{10 \cdot 27\,000}{0,8 \cdot 10^6} \right) \frac{1}{800 \cdot 10^{-4} \cdot 1} = 9,4 \cdot 10^6 \text{ л}$$

($800 \cdot 10^{-4}$ соответствует 3% остаточной влаги при 80°С согласно рис. 2-12).

Тогда

$$t_f = \frac{9,4 \cdot 10^5}{4540 \left(1 - \frac{1}{1+6,6}\right)} \ln \left(\frac{800 \cdot 10^{-4}}{60 \cdot 10^{-4}} \right),$$

где $60 \cdot 10^{-4}$ взято из рис. 2-12 и является парциальным давлением водяных паров, соответствующим 0,5% остаточной влаги в бумаге при 80°C :

$$t_f = 240 \cdot 2,6 = 625 \text{ ч, или около 26 дней.}$$

Следует отметить, что полученное в этом примере [Л. 33] время сушки противоречит данным [Л. 7], согласно которым сушка идет быстро только в начальный период, а затем замедляется.

При выводе формулы (5-1) предполагалось существование равновесия между парциальным давлением водяных паров, растворенных в масле, и парциальным давлением водяных паров в вакуумной камере. Для некоторых дегазационных устройств вследствие недостаточной поверхности масла в вакуумной камере это далеко от действительности. Для учета этого несоответствия в расчет можно ввести поправочный коэффициент.

Предположим, что эффективность дегазационной установки такова, что парциальное давление водяных паров, растворенных в выходящем масле, в $1/\eta$ раз больше, чем было бы при полном равновесии.

Можно показать, что в этом случае

$$t_f = \frac{V_t}{v_0 \left[1 - \frac{k_w}{\eta(k_w + y)} \right]} \ln \frac{p_{gw t}}{p_{gw f}}. \quad (5-4)$$

Коэффициент η может быть определен экспериментально из измерения влагосодержания входящего и выходящего из дегазатора масла во время его работы. Так как влагосодержание пропорционально парциальному давлению водяных паров, растворенных при данной температуре,

$$\eta = \frac{W_{\text{м. вх}}}{W_{\text{м. вых}}} \frac{k_w}{k_w + y}. \quad (5-5)$$

Принимая $\eta = 0,5$ для последнего примера, получим $t_f = 760 \text{ ч}$.

5-3. СУШКА МЕТОДОМ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ВАКУУМА

Этот метод был дегаально описан Гартманом [Л. 43]. Длительный опыт показал, что он дает удовлетворительные результаты. Порядок операций при сушке следующий.

1. Поднимается вакуум в баке и производится заполнение горячим маслом. Если бак уже заполнен, то производят нагрев масла в уже наполненном трансформаторе.

2. После того как сердечник и обмотки достигли желаемой температуры, поднимают вакуум и производят сушку масла постоянно поддерживаемым вакуумом.

3. Если необходимо, производят повторный нагрев масла и вакуумный процесс.

Преимуществами этого метода являются: 1) очень быстрый нагрев изоляции горячим маслом; 2) вакуум может поддерживаться постоянно; 3) масло, являющееся источником тепла, подвергается в то же время воздействию полного вакуума. Одним из существенных недостатков является необходимость иметь вспомогательный бак для сухого масла. Вместо этого бака можно использовать эластичный мешок. Такой контейнер на 20 т масла весит около 200 кг.

5-4. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ОСУШИТЕЛЬ [Л. 7]

Масло из трансформатора охлаждается до необходимой температуры с помощью дополнительного охла-

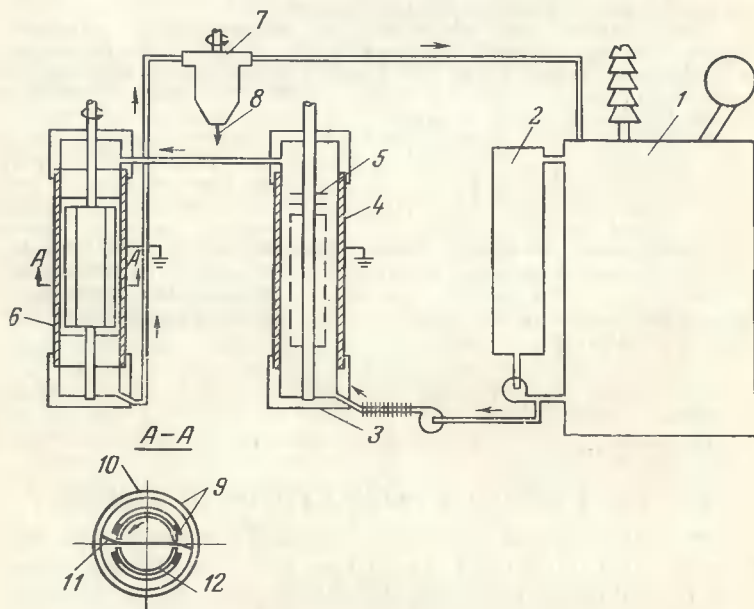


Рис. 5-1. Электростатический осушитель.

1 — трансформатор; 2 — охладитель; 3 — дополнительный охладитель; 4 — коагулятор; 5 — иглы; 6 — выделитель; 7 — фильтр; 8 — выход воды; 9 — металлические электроды; 10 — стекло; 11 — лопасть; 12 — ротор [Л. 7].

дителя (рис. 5-1). Если количество воды превышает растворимость ее при выбранной температуре, то вода выделится в виде эмульсии. Такое масло проходит за-

тем через коагулятор, где оно протекает мимо игловых электродов, на которые подается пульсирующее напряжение $20 \text{ кВ}_{\text{макс}}$, полученное полупериодным выпрямлением напряжения 50 гц . В расходящемся поле частицы сильно ионизируются и сцепляются, увеличиваясь в размерах от 10 до 150 мкм . В таком состоянии масло протекает через выделитель, где частицы двигаются в относительно равномерном поле и осаждаются на электроде, покрытом стеклом. Стеклопленочная поверхность покрывается водяной пленкой и водяные капли больше не прилипают к ней. Поэтому поверхность непрерывно вытирается вращающимися полиленовыми лопастями. Это удаляет как большие капли, так и вещества, состоящие из воды, густой грязи и волокон. Эти большие частицы подхватываются потоками масла и удаляются с помощью фильтра. Содержание воды в масле будет уменьшено до состояния насыщения при температуре, до которой произведено охлаждение.

Рисунок 5-2 иллюстрирует возможности электростатического осушителя, которые зависят от температуры работающего трансформатора. Для оценки приведена

кривая влажности бумаги в зависимости от температуры, при которой бумага имеет уменьшенную вдвое электрическую прочность по сравнению с сухой.

Из рис. 5-2 видно, что электрическая прочность была бы обеспечена выше 50% , если при рабочей температуре 55°C масло охлаждать до 10°C , а при 40°C — до 5°C .

Модель такого устройства испытана в лаборатории.

Возможности электростатического осушителя ограничены. При температуре масла в осушителе 5°C , а в трансформаторе 95°C изоляцию можно высушить до влагосодержания около $2,5\text{—}3\%$.

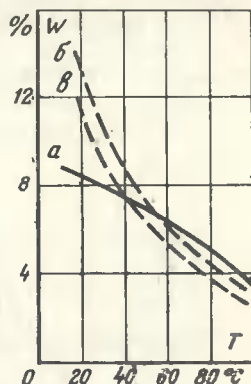


Рис. 5-2. Эффект электростатического осушителя, работающего при охлаждении масла.

а — содержание воды в бумаге, не имеющей электрическую прочность при напряжении 50 гц вдвое меньшую, чем сухая бумага; б — содержание влаги в бумаге в зависимости от рабочей температуры трансформатора, которое можно достичь с помощью осушителя, если масло в нем охладить до 10°C ; в — то же до 5°C [Л. 7].

5-5. СУШКА С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСУШИТЕЛЯ [Л. 14]

В эксплуатации было испытано действие термоэлектрического осушителя (описание осушителя см. гл. 6) с целью определения возможности сушки увлажненных трансформаторов. Трансформатор 60 Мва, 132 кВ, содержащий 38,6 м³ масла, находился в эксплуатации в течение 10 лет и был снабжен силикагелевым дыхательным патроном, который хорошо обслуживался.

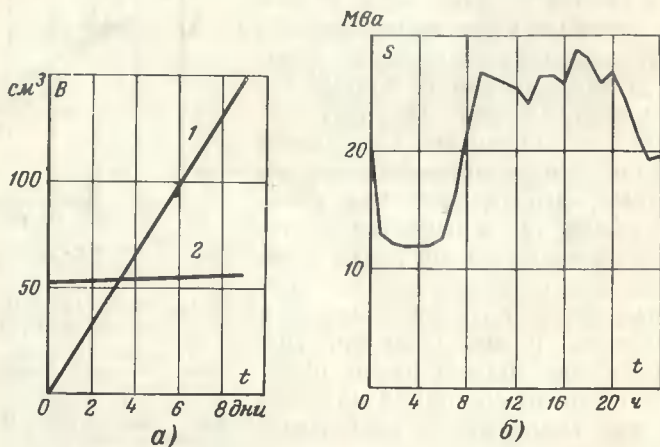


Рис. 5-3. Сушка трансформатора мощностью 60 Мва в эксплуатации с помощью термоэлектрического осушителя.

а — выделение воды (1) из изоляции и масла трансформатора и измерения точки росы воздуха в расширителе (2) в зависимости от времени сушки (на уровне примерно -20°C); *б* — суточный график нагрузки сушившегося трансформатора [Л. 14].

Однако к моменту подключения термоэлектрического осушителя влагосодержание масла составляло 40 г/т. Количество воды, выделявшейся осушителем, замерялось. Чтобы не происходило дополнительного увлажнения во время испытания, вдыхаемый трансформатором воздух в течение испытаний осушался с помощью патрона, содержавшего большое количество силикагеля.

На рис. 5-3 приведен график выделения воды во время испытаний. Точка росы воздуха в расширителе при этом практически не изменялась. Скорость выделения воды длительное время оставалась постоянной, что объясняется большим влагосодержанием изоляции.

Суточный график нагрузки трансформатора приведен на том же рис. 5-3. Кривые рис. 5-4 показывают теоретическую степень сухости в конечной точке в функции окружающей температуры. Расчет произведен в предположении, что давление водяных паров в воздухе (в расширителе), в масле и бумаге находится в равновесии с давле-

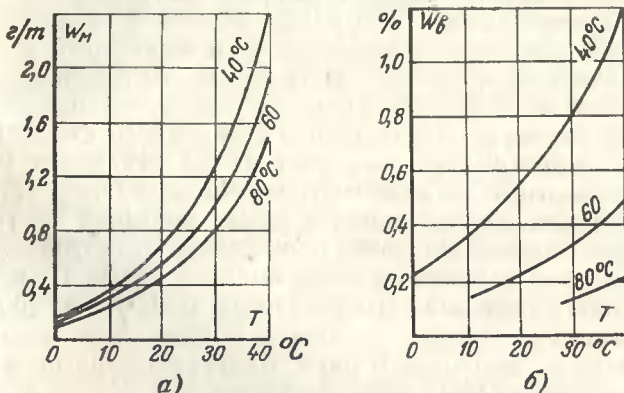


Рис. 5-4. Теоретическое конечное влагосодержание в функции температуры окружающей среды при работе термоэлектрического осушителя.

а — кривые для масла, с указанием температуры масла; б — то же для бумаги [Л. 14].

нием водяных паров в воздухе, выходящем из термоэлектрического осушителя. Термоэлектрический осушитель первоначально был предназначен для использования на новых трансформаторах высокого напряжения, содержащих до 113 м³ масла, для защиты масла от увлажнения. Из результатов испытаний следует, что он может быть использован и для сушки увлажненных трансформаторов.

5-6. СУШКА ЦИРКУЛЯЦИЕЙ МАСЛА ЧЕРЕЗ АКТИВИРОВАННЫЙ АЛЮМИНИЙ

Фирмой Паблик сервис электрик энд газ (США) в течение 6 лет (с 1961 по 1966 гг.) около 60 трансформаторов и маслонаполненных реакторов были успешно высушены в эксплуатации путем длительной принудительной циркуляции масла через баки с активированным алюминием [Л. 44].

Трансформаторы, высушенные в эксплуатации путем обработки масла активированным алюминием, имели свободное дыхание, а масло в них за время эксплуатации не заменялось. Мощность трансформаторов от 667 до 18 500 *кв*а, напряжение от 26 до 138 *кв*, трансформаторы имели естественное охлаждение и расширитель. Средний возраст трансформаторов составлял 40 лет. Время сушки составляло от 6 до 24 мес. в зависимости от количества влаги в изоляции. В течение этого времени нагрузка станции не снижалась. Активированный алюминий абсорбирует воду из масла, находящегося с ним в контакте. Относительно сухое масло сушит изоляцию. Система осушения состоит из стального бака (0,9 м высотой, 0,6 м диаметром), содержащего 227 кг активированного алюминия, насоса, вентиля и труб. Для предотвращения попадания алюминия в трансформатор на входе и выходе бака имеются сетки. Производительность насоса 19 л/мин. После окончания сборки установки из системы удаляется воздух через вентиль в крышке осушительного бака. Запускается насос и некоторое время работает при отключенном от сети трансформаторе, чтобы удалить весь задержавшийся воздух. Затем трансформатор включается под напряжение. Масло для эффективной очистки и осушения должно быть горячим. Активированный алюминий в баке заменяется через 3 мес. после включения и затем через каждые 6 мес. Общее снижение стоимости сушки при описанном методе по сравнению с вакуумным составило до 25%.

5-7. СУШКА С ПОМОЩЬЮ ХОЛОДИЛЬНИКА

Сущность метода состоит в нагревании обмоток до 70°С в герметизированном собственном баке без масла путем пропускания через каждую обмотку постоянного тока. Выделяющаяся влага конденсируется в конденсаторе, охлаждаемом с помощью сухого льда [Л. 45].

Конденсатор состоит из двух баков, один внутри другого. Наружный бак герметизирован. Внутренний бак сверху имеет открывающуюся крышку для загрузки сухого льда и спирта. Спирт улучшает теплопередачу. Иней образуется на наружной поверхности внутреннего бака при прохождении паров из трансформатора.

Опыт показал, что метод эффективен, хотя продолжительность сушки в 3 раза больше вакуумной.

Заполнение конденсатора сухим льдом производится 2 раза в день. Для трансформатора 1 667 *кв* потребовалось 180 *кг* льда в первый день, 90 *кг* ежедневно за три последующие дня и 45 *кг* в пятый день.

Трансформатор должен находиться под небольшим избыточным давлением, около 6 700 *н/м²*, в течение всего периода сушки, чтобы избежать подсосов. Существенным достоинством метода является то, что сушка производится с циркуляцией воздуха в замкнутом объеме. Это позволяет контролировать количество удаленной из изоляции влаги. Основное преимущество метода — его простота. Нагрев производится там, где это наиболее необходимо при сушке. Нагрев постоянным током позволяет постоянно контролировать величину сопротивления и, следовательно, температуру обмоток. Недостаток метода — повышенная пожароопасность.

5-8. ПОДГОТОВКА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ 500 *кв*

Ниже описывается подготовка масла для заливки трансформаторов и реакторов 500 *кв* при монтаже подстанции в долине Теннесси (США) [Л. 46]. Трансформаторы однофазные, трехобмоточные 500/161/13,2 *кв* (звезда, звезда, треугольник), каждый мощностью 240 *Мва* при естественном охлаждении, а две ступени форсированного позволяют получить максимальную мощность 400 *Мва* или 1 200 *Мва* в группе. Однофазные реакторы мощностью 33,3 *Мва* каждый (фирма Элин). Одна группа трансформаторов изготовлена фирмой ASEA, одна — фирмой Вестингауз, две — фирмой Элин (филиал в США).

Требования фирм к состоянию масла в трансформаторах различны.

Европейские способы обработки масла перед заполнением трансформаторов отличаются от американских. Обычно используются специальные установки для обработки масла. Эти установки состоят из фильтров для удаления механических примесей, нагревателей, в которых масло нагревается до 50—60°С, и вакуумных камер, в которых горячее масло разбрызгивается для

удаления влаги и газа. Степень удаления газа определяется величиной вакуума в камерах. После того как масло достигло желаемого состояния, оно подается снизу в трансформатор. Такая заливка предотвращает поглощение газа маслом в трансформаторе.

Американский способ состоит в том, что масло разбрызгивается в верхней части бака трансформатора, в котором поддерживается насколько возможно глубокий вакуум. Обычно масло очищается от воды с помощью фильтров, а также с помощью вакуума при разбрызгивании в трансформаторе. Этот метод был применен для трансформаторов 161 кв и первых трансформаторов 500 кв.

Применялась установка, смонтированная на трейлере, производительностью 4 100 л/ч, которая может уменьшить влагосодержание масла от 20 до 5—10 г/т и содержание газа от 10 до 1% за одно прохождение масла через установку.

Другая установка имела производительность от 5 500 до 11 000 л/ч. В тех случаях, когда масло за одно прохождение через установку не доводилось до требуемого состояния, оно подавалось в специальный бак и после повторного прохождения через установку—в трансформатор. Проверялись влагосодержание и электрическая прочность масла методами NEMA и VDE, а также содержание газа и угол диэлектрических потерь. Проверка производилась отбором проб (из транспортных цистерн, из хранилищ, в процессе обработки и из трансформатора после его заливки).

Требования фирм к маслу после заливки были следующими:

	Влагосодержание, г/т	Растворенные газы, %
Вестингауз	Менее 20	Не указано
ASEA	10	0,1
Элин	Менее 5	0,25

В каждом трансформаторе или реакторе после заливки получены следующие характеристики масла:

		Влагосодержание, г/т	Растворенные газы, %
Вестингауз	Трансформаторы (3 шт.)	Менее 5; 7; 8	1,7; 1; 1,4
ASEA	Трансформаторы (3 шт.)	7; 6; 8	1,4; 0,8; 2,0
Элин	Трансформаторы (6 шт.)	0,8; 1,0; 1,0; } 1,8; 1,4; 0,9 }	Не указано
Элин	Реакторы (6 шт.)	0,5; 0,5; 0,6; 0,5; 1,1; 1,3	Менее 5; 5; 6; 8; 5; 5

Из этих данных следует, что в отдельных случаях требуемые фирмами показатели не достигнуты из-за недостаточной эффективности примененных установок для обработки масла.

Влагосодержание определялось методом Фишера (по-видимому, усовершенствованным), а содержание газа — с помощью специального оборудования канадской фирмы Боузер. Масло в состоянии поставки имело влагосодержание от 17 до 50 г/т и содержание растворенных газов 11—12%.

Глава шестая

ЗАЩИТА ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ УВЛАЖНЕНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

6-1. СУЩЕСТВУЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ УВЛАЖНЕНИЯ

Целью защиты изоляции трансформаторов является поддержание масла и целлюлозной изоляции в хорошем состоянии и предотвращение их разложения. Для этого необходимо избежать проникновения влаги из атмосферы в трансформатор и не допускать контакта масла с кислородом. Большинство используемых систем для защиты от увлажнения состоит из силикагелевого осушителя, установленного на расширителе.

В Европе эта система применяется почти повсеместно вплоть до высших классов напряжения. Она проста и дешева, но имеет недостатки. Сомнительно, чтобы содержание влаги, достигнутое на заводе, могло долго поддерживаться с помощью этой системы. Недостаток обслуживания частично способствовал этому. Кроме того, количество силикагеля часто определяется довольно произвольно, хотя вообще оно зависит от количества масла. Мало учитывались индивидуальные особенности: периодическая нагрузка, окружающая влажность и уменьшение эффективности с увеличением температуры. Например, в Индии необходимо увеличить ежемесячный заряд силикагеля. Недостатком такой системы также является соприкосновение воздуха с маслом. При высокой температуре масла наличие кислорода в воздухе вызывает интенсивное окисление масла. Окисление может быть уменьшено таким устройством расширите-

ля, при котором масло в нем не будет горячим, а его поверхность соприкосновения с воздухом минимальной.

Первоначально дегазированное масло постепенно насыщается воздухом, что крайне нежелательно для трансформаторов высших классов напряжения.

Для небольших трансформаторов применяются системы полной герметизации. Большим недостатком такой системы является возможность существенного повышения давления в баке при повышении температуры трансформатора. Это вызывает необходимость повышения прочности бака. При изменении температуры и давления внутри бака в масле выделяются пузыри газа. В некоторых исполнениях нельзя удалить из масла воду, образовавшуюся вследствие старения бумаги и окисления масла. Со временем количество такой воды увеличивается. Насколько это важно, существуют разные мнения. Поэтому применение описанных систем ограничено мелкими трансформаторами.

В США широко распространена система азотной защиты, которая применяется для трансформаторов вплоть до высших классов напряжения. Пространство над маслом в баке или расширителе заполняется сухим азотом. Согласно данным Инглиш электрик при избыточном давлении более 0,07 ат свободный азот выделяется из масла под воздействием высокой напряженности электрического поля. Поэтому трансформаторы высоких классов напряжения, оборудованные азотной защитой, должны снабжаться устройствами, регулирующими давление азота при изменении нагрузки трансформатора. Использование регулирующей давление аппаратуры себя не оправдало ввиду ее относительной сложности. Удачным решением является применение эластичных мешков, заполняемых азотом. С их помощью давление азота поддерживается практически равным атмосферному. Такая система применяется на трансформаторах напряжением вплоть до 500 кв.

Азотная защита хорошо предохраняет изоляцию трансформатора от увлажнения (за исключением влаги, выделяющейся в трансформаторе при старении изоляции) и от окисления. Однако остается опасность насыщения масла азотом со всеми описанными в § 1-3 отрицательными последствиями.

Свободными от указанного недостатка являются системы герметизации с помощью гибких мембран или

эластичных расширителей (без газовой подушки). В этих системах устраняется соприкосновение масла с воздухом, но остается возможность небольшого увлажнения за счет старения. Однако сами мембраны пока что не считаются вполне надежными [Л. 17].

Термоэлектрический осушитель [Л. 17] по существу пригоден даже для сушки трансформаторов. Недостатком этой системы является наличие контакта воздуха и масла. Однако отрицательный эффект этого контакта ослаблен низкой температурой воздуха в расширителе.

И, наконец, применяются силикагелевые и молекулярные фильтры в масле. Они могут обеспечить поддержание низкого влагосодержания масла, но требуют постоянного ухода. Некоторые специалисты все же стараются избегать соприкосновения силикагеля с маслом [Л. 17].

Эффективность любой системы защиты может быть обеспечена только качественными уплотнениями трансформатора (иначе через них могут проникать вода и воздух). Это обстоятельство весьма важное и на него следует постоянно обращать внимание.

6-2. РАСШИРИТЕЛИ С ВОЗДУХООСУШИТЕЛЯМИ

В настоящее время нет достаточных сравнительных данных об увлажнении масла и изоляции в процессе эксплуатации трансформаторов с обычным расширителем и расширителем, снабженным воздухоосушителем. По мнению автора [Л. 20], до получения новых обоснованных данных обычный расширитель с силикагелевым патроном следует рассматривать как полностью удовлетворяющий требованиям даже для трансформаторов на сверхвысокие напряжения.

Нет также сколько-нибудь полных данных о необходимых размерах силикагелевого воздухоосушителя с учетом таких факторов, как вес масла, характер графика нагрузки, климатических условий. Однако, по мнению автора [Л. 20], важно иметь в виду, что основная функция воздухоосушителя заключается в том, чтобы снизить содержание влаги до значения, при котором исключается ее конденсация внутри расширителя.

В Европе широко применяются достаточно эффективные влагопоглотители [Л. 22, 23, 47]. Однако в последнее время появились сомнения в их эффективности

[Л. 1 и 48]. Предпринимались меры, чтобы повысить их эффективность [Л. 48 и 49]. Имеются два обстоятельства, на которые следует обратить внимание. Первое — это простота устройства при достаточно высокой эффективности, что и обеспечило такое широкое его применение. Второе — необходимость постоянного внимания в эксплуатации, своевременная замена силикагеля. При этом условии эффективность устройства становится высокой. В § 6-3 описано возможное усовершенствование силикагелевого влагопоглотителя.

6-3. ВОЗДУШНЫЙ ВЛАГОПОГЛОТИТЕЛЬ С КЛАПАНАМИ [Л. 50]

Разработка влагопоглотителя с клапанами. Сомнения в эффективности обычных силикагелевых влагопоглотителей возникли тогда, когда было обнаружено, что синий цвет силикагеля во влагопоглотителях переходит в красный на обоих концах. Это говорило о том, что воздух, выходящий из расширителя, влажный. В результате исследований было обнаружено, что выходящий из расширителя воздух оказался более влажным, чем входящий. Поэтому было решено выпускать воздух из расширителя, минуя влагопоглотитель, чтобы не увлажнять силикагель. Для этой цели используются гидростатические затворы. Такой влагопоглотитель с клапанами по внешнему виду мало отличается от обычного.

Определение эффективности влагопоглотителя. Произведены сравнительные испытания обычных воздушных влагопоглотителей и влагопоглотителей с клапанами. Все они имели диаметр 80 мм и длину 180 мм. Поток воздуха в обоих направлениях составлял около 0,5 дм³/мин. Температура изменялась от 18 до 24°С, а относительная влажность воздуха от 55 до 66%. Влагосодержание воздуха, выходящего из трансформатора, поддерживалось равным 1 г/м³ (точка росы минус 20°С). Суточный цикл был следующим: 6 ч воздух входил в трансформатор, 6 ч пауза, 6 ч воздух выходил и 6 ч пауза. Соответствующий цикл влагопоглотителя с клапанами: 6 ч воздух входил в трансформатор и 18 ч пауза.

При этих испытаниях определялась точка росы воздуха, прошедшего влагопоглотитель. Результаты приведены на рис. 6-1. В начале испытания точка росы составляла минус 50°С в соответствии с данными заводов-изготовителей. Для влагопоглотителя с клапанами (кривая б) точка росы поднялась за 50 суток до минус 40°С. За это время силикагель изменил свой цвет с синего на красный. Возрастание точки росы при обычном влагопоглотителе происходило много быстрее (кривая а). Точка росы поднялась почти до ми-

нус 20°C за 50 суток и стала такой же, как для наружного воздуха (кривая *б*). Пожалуй, более важным является характер изменения цвета: синий во влагопоглотителе с клапанами перешел в красный в узкой полосе; в обычном влагопоглотителе он стал бледно-синим на большом протяжении у концов влагопоглотителя. Пятью днями позже два бледно-синих участка соединились и влагопоглотитель прекратил удалять влагу из проходящего воздуха.

Влагосодержание воздуха в расширителе. Как показано выше, воздух, поступающий в трансформатор, снабженный влагопоглотителем с клапанами, имеет точку росы от минус 50 до минус 40°C . Его абсолютная влажность составляет соответственно около $0,1 \text{ г/м}^3$. В расширителе воздух поглощает влагу из масла в количестве, пропорциональном влагосодержанию масла. Последнее зависит от температуры и содержания влаги в бумаге трансформатора. В литературе имеются исчерпывающие сведения о равновесии между влагой в воздухе, масле и бумаге [Л. 15, 26 и 28]. Меньше сведений о скорости перехода влаги от обмоток в масло и из масла в воздух расширителя.

Для воспроизведения условий, имеющих место в трансформаторе, расширитель и воздушный влагопоглотитель с клапанами снабжались баками, содержащими 100 кг трансформаторного масла и 10 кг бумаги. Масло на дне бака подогревалось от комнатной температуры (23°C) до 50 или 75°C . Влагосодержание бумаги в опытах составляло 1,3; 4,2 и 5,2%. Влажность масла измерялась методом Фишера, а точка росы воздуха в расширителе с помощью зеркала для определения точки росы. Результаты приведены на рис. 6-2, где кривые *а* и *б* показывают изменение влагосодержания воздуха в расширителе после нагревания в зависимости от влажности бумажной изоляции. Вертикальные линии на графике показывают область, в которой может изменяться равновесное влагосодержание воздуха согласно кривым Пайпера [Л. 28]. Сплошные линии соответствуют кривой *а*, пунктирные — кривой *б*. Таким образом, кривые показывают, какое количество влаги выносятся воздухом из расширителя. Влажность воздуха в расширителе уве-

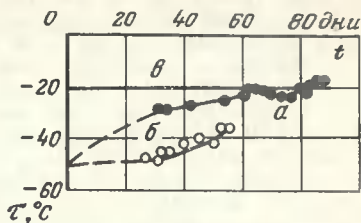


Рис. 6-1. Точка росы (τ) воздуха, прошедшего через влагопоглотитель.

а — обычный влагопоглотитель; *б* — влагопоглотитель с клапанами; θ — наружный воздух [Л. 50].

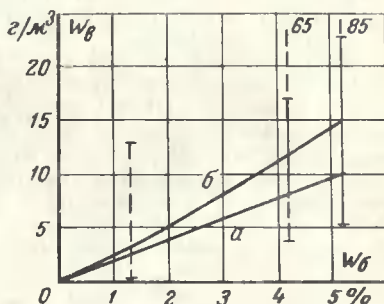


Рис. 6-2. Влажность воздуха в расширителе в функции от влагосодержания бумажной изоляции.

а — для цикла 16 ч при 23°C плюс 8 ч при 50°C ; *б* — для цикла 16 ч при 23°C плюс 8 ч при 75°C [Л. 50].

личивается на 40%, если вторая труба встраивается между расширителем и баком.

Теоретическое рассмотрение. Рассмотрим, сколько влаги может быть удалено из трансформатора, снабженного воздушным влагопоглотителем с клапанами, и какова будет после этого влажность изоляции трансформатора.

Если трансформатор работает при окружающей температуре 20°С и средние значения изменения температуры его твердой изоляции составляют 25 и 50°С, то могут быть использованы результаты описанных выше испытаний. Увеличение объема масла с изменением температуры составляет приблизительно 8% на 100°С, так что тонна масла вызывает приток 13 м³ воздуха в год в первом случае и 20 м³ — во втором. Расширение воздуха благодаря увеличению температуры также было приблизительно учтено. Если предположить, что количество бумаги и масла, содержащихся в трансформаторе, находится в соотношении 1:10, скорость удаления влаги в соответствии с рис. 6-2 будет:

$$\frac{dW}{dt} = -kW, \text{ т. е. } W = W_0 e^{-kt}, \quad (6-1)$$

где t — время; W — влажность бумаги в момент t ; W_0 — влага в состоянии поставки; k — постоянная.

Когда температурный цикл составляет 16 ч при 23°С плюс 8 ч при 50°С, то $k \approx 0,02/\text{год}$. В случае цикла 16 ч при 23°С плюс 8 ч при 75°С, $k \approx 0,05/\text{год}$.

Внутри трансформатора вода образуется вследствие старения масла и бумаги. Термическое старение бумаги было исследовано Фабром и Пичоном [Л. 15], которые нашли, что влажность бумаги увеличивается примерно на 1%, когда ее степень полимеризации уменьшается от 1200 (состояние поставки) до 300.

Учитывая, что старение бумаги прямо пропорционально ее влагосодержанию W и что кислотное число масла возрастает на 1 мг КОН/г при образовании 320 г воды в тонне масла, скорость влагообразования в изоляционных материалах можно выразить так:

$$\frac{dW}{dt} = cW, \text{ т. е. } W = W_0 e^{ct}, \quad (6-2)$$

где c — постоянная.

Объединяя уравнения (6-1) и (6-2), получаем:

$$W = W_0 e^{(c-k)t}. \quad (6-3)$$

Эта формула использована ниже для подсчета влажности для случаев изменения температуры на 25°С. На рис. 6-3 показано влагосодержание твердой изоляции в функции времени для следующих примеров.

Пример I. Среднее суточное изменение температуры в твердой изоляции 25°С, а ее начальное влагосодержание 0,5%. Далее полагаем, что твердая изоляция достигнет степени полимеризации 300, а масло кислотного числа 1 мг КОН/г за 30 лет, так что коэффициент c равен примерно 0,04/год.

При этих условиях по кривым I рис. 6-3 следует, что воздушный влагопоглотитель с клапанами может поддерживать влажность

бумажной изоляции ниже 1%, если колебания суточной температуры больше чем 25°С.

Пример II. Условия те же, что и примере I, но начальное влагосодержание твердой изоляции составляет 2,5%, так что упомянутая степень полимеризации и кислотное число будут достигнуты за 20 лет (рис. 6-3 кривые II).

Как видно из кривой IIa, когда температура изменяется на 25°С, вся вода, образовавшаяся в трансформаторе, удаляется с воздухом и влагосодержание изоляции не возрастает. Если изменения температуры больше или меньше, влагосодержание изоляции будет уменьшаться или возрастать.

Кривые в обоих примерах показывают влагосодержание твердой изоляции, когда вся образовавшаяся вода остается в изоляции. Это случается при использовании обычного влагопоглотителя. Если влагопоглотитель имеет несоответствующие размеры или в течение некоторого времени не обслуживался, может быть даже такое положение, при котором влага будет вноситься в трансформатор с воздухом и скорость нарастания влажности будет больше, чем показывает кривая в. При обычном влагопоглотителе влагосодержание изоляции будет меньшим, чем показывает кривая в, пока более половины силикагеля остается синим.

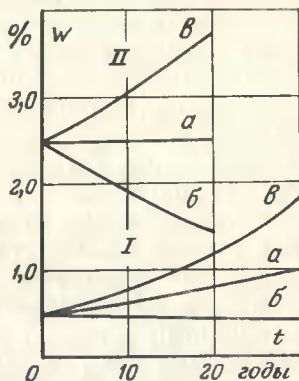


Рис. 6-3. Влагосодержание твердой изоляции W во времени в примерах I и II.

a — для суточного изменения температуры, равного 25°С; $б$ — то же для 50°С; $в$ — вся вода, образовавшаяся в результате старения, остается в трансформаторе [Л. 50].

Испытания в эксплуатации. Были испытаны однофазные трансформаторы 220 кв, 60 Мва с установленными на них воздушными влагопоглотителями. Измерения абсорбции и влагосодержания масла показали, что влагосодержание твердой изоляции в равновесном состоянии составляло 3—3,2%. Каждый трансформатор содержал 28,5 т масла. Поскольку трансформаторы однофазные, все они находились в одинаковых нагрузочных условиях, что важно для сопоставления старых и новых влагопоглотителей.

Фиксировались влажность и температура окружающего воздуха, а также температура масла в трансформаторе. Влажность воздуха, прошедшего через влагопоглотитель в расширитель, определялась измерением точки росы хлоридлитиевыми датчиками, помещенными в расширитель непосредственно около влагопоглотителя.

Определялось также количество влаги, удаленной с

выходящим воздухом. С этой целью к выходному отверстию влагопоглотителя с вентилями был присоединен осушитель.

Как показали результаты, полученные для двух периодов времени при влагопоглотителях, работавших в течение 3 мес., воздух, входящий в трансформатор через обычный влагопоглотитель, был более влажный, чем у трансформатора, снабженного влагопоглотителем с клапанами. Измерения показали также, что с течением времени разница во влажности входящего воздуха возрастает. Это происходило вследствие увлажнения силикагеля во влагопоглотителе обычного типа со стороны расширителя.

В то же время во влагопоглотителе обычного типа имеет место самовосстановление силикагеля при *выдыхании*. Это приводит к тому, что его эффективный срок службы в 1,5—2 раза больше, чем влагопоглотителя с клапанами (судя по изменению цвета силикагеля с синего на красный). Однако это не может рассматриваться как преимущество, поскольку во влагопоглотителе обычного типа имеет место более высокое влагосодержание его части со стороны расширителя и, таким образом, повышенная влажность воздуха в расширителе.

Представляется, что с помощью влагопоглотителя можно приблизительно определить влагосодержание твердой изоляции при условии наличия следующих данных: средней температуры окружающего воздуха, средней температуры масла в трансформаторе, изменения максимальной и средней температуры масла в трансформаторе, средней температуры масла в расширителе и времени, за которое силикагель изменил цвет. Период наблюдения может быть уменьшен, если установить влагопоглотитель большой длины и малого диаметра, который будет более чувствителен к изменению влагосодержания выходящего воздуха. Это позволит легче определить соотношение между изменением цвета силикагеля и влагосодержанием проходящего через влагопоглотитель воздуха при различной температуре.

Таким образом, если объем влагопоглотителя недостаточен и его обслуживание неудовлетворительно, влагопоглотитель обычного типа может пропускать влагу с наружным воздухом. Воздушный влагопоглотитель с клапанами требует более частой замены силикагеля, чем эквивалентный влагопоглотитель обычного типа.

Изменение цвета силикагеля во влагопоглотителе с клапанами происходит только вблизи наружного конца. Его осушающее действие больше, чем у влагопоглотителя обычного типа, так как входящий в трансформатор воздух всегда проходит через сухие слои силикагеля.

Выходящий из трансформатора воздух выносит часть влаги, образованной в результате старения изоляции трансформатора. Количество выносимой влаги зависит от колебаний нагрузки и от температуры окружающей среды.

Для поддержания достаточной сухости изоляции в эксплуатации очень важно иметь возможно низкую исходную влажность изоляции трансформатора при выпуске с завода.

6-4. АВТОМАТИЧЕСКИЙ ОСУШИТЕЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ [Л. 17]

Осушитель имеет устройство охладителя воздуха, в котором для охлаждения используется принцип поверхностного эффекта термоэлектрических элементов.

Устройство (рис. 6-4 и 6-5) образует вместе с воздушным пространством в расширителе замкнутую цепь для воздуха (рис. 6-6) и создает низкое парциальное давление водяных паров в воздухе, соприкасающемся с маслом.

Если парциальное давление водяных паров в воздухе будет меньше, чем в масле и бумаге, то будет происходить их осушение, так как все парциальные давления будут стремиться выравниваться.

Принцип действия осушителя очень прост. Воздух из расширителя проходит вниз по охлаждающему каналу и возвращается в расширитель охлажденным. Для получения низких температур в канале применены термоэлектрические элементы, работающие на основе эффекта Пельтье. В охлаждающем канале имеются ребра, предназначенные для создания небольшой турбулентности, температура в канале минус 20°C и меньше. В результате влага из воздуха осаждается на ребрах в виде изморози и льда. Воздух, возвращающийся в расширитель, имеет температуру, равную температуре стенок нижней части канала, т. е. минус 20°C и ниже. Изморозь и лед на стенках периодически удаляются нагреванием канала до 10°C , что осуществляется авто-

матически. Вода собирается в нижней части канала и стекает наружу по отводящей трубке. Нагревание осуществляется путем переключения на обратное направление тока, питающего термоэлементы. Во время пере-

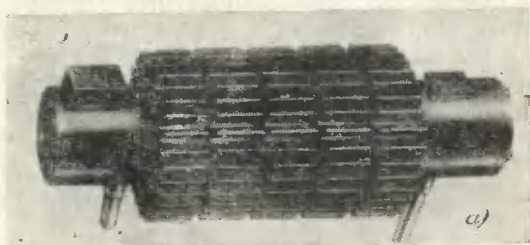


Рис. 6-4. Автоматический термоэлектрический осушитель.

а — общий вид (рабочее положение см. на рис. 6-6); *б* — сегмент термоэлектрического осушителя, показано устройство термоэлементов и центрального канала для воздуха [Л. 17].

ода охлаждения остаток воды в отводящей трубке замерзает и плотно ее закрывает. Период нагревания длится около 7 мин и повторяется 1 раз в 12 или 24 ч в зависимости от условий. Сообщение с внешней атмосферой при изменении нагрузки происходит через охлаждающий канал, где поступающий в расширитель воздух осушается. Постоянная циркуляция воздуха из расширителя через охлаждающий канал обеспечивается термосифонным потоком.

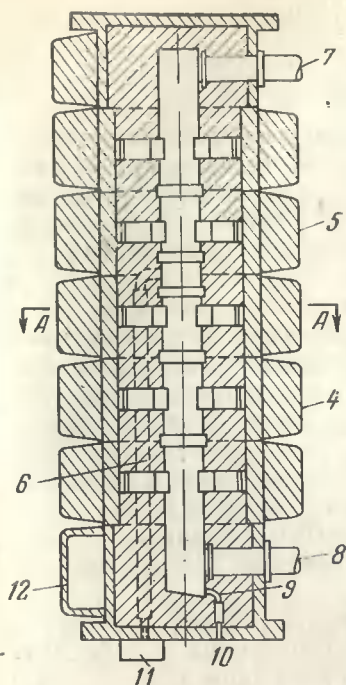


Рис. 6-5. Сечение автоматического термоэлектрического осушителя.

1 — охлаждаемый воздушный канал; 2 — термоизоляция; 3 — проводники; 4 — термоэлементы; 5 — охлаждающие ребра; 6 — дыхательная трубка; 7 — вход; 8 — выход; 9 — отводящая трубка; 10 — сток воды; 11 — масляный затвор; 12 — клеммная коробка [Л. 17].

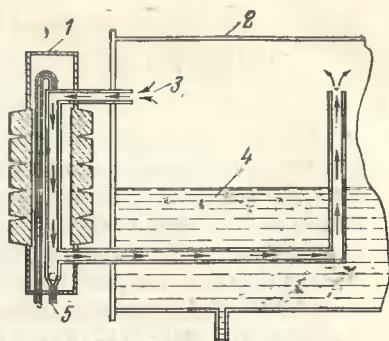


Рис. 6-6. Схема движения воздуха в расширителе и термоэлектрическом осушителе.

1 — осушитель; 2 — расширитель; 3 — воздух; 4 — масло; 5 — выпуск воды [Л. 17].

Хотя осушитель спроектирован для целей предохранения изоляции от увлажнения, он может быть использован и для осушения изоляции трансформатора, работавшего несколько лет и опасно увлажнившегося (см. гл. 5). В таких случаях скорость удаления воды может быть увеличена при помощи дополнительной трубы между расширителем и баком, чтобы ускорить обмен масла между ними.

Для трансформатора с объемом масла около 45 500 л требуется мощность около 100 ватт для питания осушителя постоянным током. Временный перерыв питания не опасен, так как поступившая из атмосферы влага быстро будет удалена после восстановления питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Требования к сушке и дегазации изоляции трансформаторов

1. Целью технологической обработки изоляции трансформаторов является придание ей достаточной электрической прочности, стремление уменьшить скорость старения в течение срока службы, а также гарантировать способность обмоток противостоять динамическим воздействиям в эксплуатации.

2. Электрическая прочность свежего масла, не содержащего твердые частицы, слабо зависит от количества растворенной в нем воды (до точки насыщения). При содержании воды свыше 5 г/т электрическая прочность уменьшается все более по мере увеличения загрязнения масла твердыми частицами. При температуре 25°С прочность масла снижается более чем вдвое в случае наличия в масле твердых частиц в количестве около 50 г/т при изменении его влагосодержания от 5 до 40 г/т (шаровые электроды диаметром 12,5 мм при расстоянии 3 мм).

3. Растворимость воды в масле сильно зависит от содержания ароматических углеводородов и температуры. Так, увеличение в масле содержания ароматических углеводородов от 6 до 30% увеличивает насыщающее влагосодержание при 20°С примерно от 42 до 210 г/т. В масле, содержащем 6% ароматических углеводородов, при возрастании температуры от 10 до 80°С насыщающее влагосодержание возрастает примерно от 30 до 400 г/т.

4. Равновесное влагосодержание целлюлозной изоляции и масла сильно зависит от температуры. Так, влагосодержание свежего масла, равное 30 г/т при 20°С, соответствует влагосодержанию бумаги 11%, а при 80°С всего около 1,5%. Отсюда следует, что влагосодержание масла при низкой температуре (20°С и ниже) не характеризует влажность изоляции трансформатора, так как малое влагосодержание масла в равновесных условиях соответствует очень большой влажности целлюлозной изоляции.

5. Выше точки насыщения вода содержится в масле в виде эмульсии, т. е. в форме очень мелких капель. Эти капли имеют тенденцию осаждаться на твердых включениях, имеющихся в масле.

6. Растворимость воздуха в масле растет с увеличением температуры. Так, при давлении 735 мм рт. ст. и изменении температуры от 25 до 115°С происходит увеличение растворимости по объему от 10 до 11,4%. Электрическая прочность масла, содержащего газ в растворе, снижается на 20—30%, если газы не образуют пузырьков. Выделение пузырьков может происходить вблизи насыщающего значения вследствие изменения температуры при воздействии сильного электрического поля или очень большой скорости потока масла. В этом случае снижение электрической прочности становится более резким. Однако эти явления в готовых трансформаторах изучены еще недостаточно.

7. Скорость абсорбции газов маслом в трансформаторе, снабженном расширителем, в большой мере зависит от конструкции трансформатора. Хотя скорость абсорбции и мала, но ею нельзя пренебречь.

8. Электрическая прочность электрокартона на пробой при напряжении 50 гц и температуре 20°С до влагосодержания около 3% снижается медленно, а при большем влагосодержании — быстрее. При влагосодержании 7% прочность снижается примерно на 20%. Снижение импульсной прочности (волна 1,5/40 мксек) более равномерно и достигает 30% при влагосодержании 7%.

Напряжение поверхностного перекрытия при равномерном увлажнении до 7% снижается незначительно.

9. Недостаточно рассматривать средние величины влажности в трансформаторе. При резком снижении температуры насыщенного масла из него происходит выделение свободной воды в виде эмульсии с последующим осаждением воды на изоляции. В местах наибольшей напряженности поля может происходить концентрация влаги. Это крайне опасно.

10. Напряжение начала возникновения частичных разрядов в бумажной изоляции значительно снижается при увеличении влагосодержания.

11. Целлюлоза в насыщенном воздухом масле старится примерно в 2 раза быстрее, чем в дегазированном. Скорость термического старения целлюлозы примерно пропорциональна ее влагосодержанию. При влагосодержании 2% старение происходит быстрее в 6—16 раз, а при 4% — в 12—45 раз, чем при 0,3%.

12. Существующие испытательные напряжения и запасы по электрической прочности в изоляции соответствуют длительному опыту эксплуатации. В случае их снижения требуется улучшение эксплуатации, создание условий, обеспечивающих сохранение первоначального состояния изоляции в течение всего срока службы. Условия эксплуатации в части воздействия влаги и воздуха должны учитываться при любом изменении изоляции, а также при проектировании новых типов трансформаторов, особенно высших классов напряжения.

13. Целесообразно, чтобы при выпуске с завода технологическая обработка обеспечивала влагосодержание твердой изоляции тем меньшее, чем лучше защищен трансформатор в эксплуатации. Для трансформаторов, снабженных расширителем и силикагелевым осушителем, по мнению автора, влажность твердой изоляции при выпуске с завода должна быть не более 0,5%. Для трансформаторов с более совершенной защитой не более 0,2%.

Масло, предназначенное для заливки трансформатора, должно иметь влагосодержание не более 5 г/т. Содержание твердых частиц в масле не должно превышать 0,5 г/т.

14. Минимальная длительность пропитки изоляции трансформатора маслом определяется на основании опытной пропитки образцов деталей.

Конечное содержание газов в изоляции зависит от величины остаточного давления в процессах сушки и пропитки. Величина применяемого остаточного давления при сушке находится в пределах 10^{-2} —1 мм рт. ст. Наиболее часто применяется остаточное давление 0,2 мм рт. ст. После начала заливки это давление несколько повышается за счет наиболее летучих фракций масла. Чтобы избежать испарения масла, остаточное давление перед пропиткой иногда повышают до 0,05 мм рт. ст., а температуру снижают до 50—70° С.

2. Состояние изоляции трансформаторов в эксплуатации

15. После нескольких лет эксплуатации целлюлозная изоляция постоянно нагруженных трансформаторов, имеющих свободное дыхание через силикагелевый влагопоглотитель, приобретает влажность от 1,5 до 5%,

а иногда и значительно большую. Масло постепенно насыщается воздухом. Насыщение влагой и воздухом происходит быстрее в случае переменного режима нагрузки трансформатора.

16. Основным источником увлажнения трансформатора является окружающая атмосфера вследствие несовершенства обычно применяемых силикагелевых осушителей. За счет старения бумаги за весь срок службы ее влагосодержание повысится на 0,5—0,75% (в крайних случаях не более 2,5%). За счет старения масла до его замены около 1%.

17. Если дегазированное масло трансформатора соприкасается с воздухом или азотом, то эти газы снова начинают диффундировать в масло. Скорость диффузии целиком будет зависеть от того, насколько быстро происходит смена верхних слоев масла, насыщенных газом, маслом из бака, имеющим малое содержание газов. В трансформаторе, работающем при неизменной нагрузке, дыхание будет незначительным и масло в нем будет насыщаться медленнее.

Окисление масла кислородом воздуха и насыщение масла газом значительно замедляются при снижении температуры масла в расширителе и уменьшении поверхности соприкосновения масла и воздуха.

18. Соприкосновение масла с кислородом воздуха значительно ускоряет его старение. Однако срок службы трансформаторного масла до его очистки или смены составляет за рубежом более 10 лет. Хорошо очищенные масла в трансформаторах с расширителем, снабженным хорошо обслуживаемым силикагелевым воздухоосушителем, могут иметь срок службы примерно до 30 лет.

19. Масло в крупном трансформаторе при циркуляции из зон с высоким статическим давлением перемещается в зоны с низким статическим давлением, а также из зон высокой температуры в зоны более низкой температуры, что может вызвать газовыделение из насыщенного масла. Быстрое перемешивание масла насосами и возникновение кавитации также может вызвать газовыделение. Более однозначно проявляются колебания давления и изменение температуры окружающего воздуха, особенно если они происходят быстро. Такую опасность следует иметь в виду, но опытные данные о степени опасности этого явления, полученные на готовых трансформаторах, в литературе отсутствуют.

20. Причиной снижения электрической прочности масла является наличие в нем примесей (вода, механические примеси) и продуктов старения. В местах повышенной концентрации электрического поля собираются разрушенные целлюлозные волокна, влага, что может приводить к пробое.

3. Измерения для определения состояния изоляции трансформаторов

21. Для установления окончания процесса сушки и дегазации большинство изготовителей используют два метода или более. Применяются следующие методы: определение изменений во времени тангенса дельта, измерение емкости обмоток в зависимости от частоты, определение интенсивности выделения влаги, измерение абсолютного значения остаточного давления в сушильном шкафу, измерение сопротивления изоляции, измерение содержания влаги в образцах, взятых из трансформатора. Требуемые абсолютные значения измеряемых величин определяются опытом (градуировкой). При окончательных испытаниях измерение уровня частичных разрядов является наиболее показательным критерием качества обработки изоляции.

22. Для определения состояния изоляции в эксплуатации используются в основном три метода: измерение сопротивления изоляции, измерение тангенса дельта и определение абсорбции. Предпочтение отдается в некоторых случаях первому, в других второму методу. Иногда используются предельные допустимые значения сопротивления изоляции. В большинстве случаев производится сравнение с результатами измерений на заводе.

23. Наиболее универсальным способом определения состояния масла является определение его электрической прочности. Разрядник с расстоянием между сферическими электродами 4—5 мм более чувствителен к качеству масла, чем с расстоянием 2,5 мм.

Для определения степени высушенности трансформаторного масла наиболее удобными являются измерения его электрической прочности и удельного сопротивления.

24. Измерение влагосодержания масла в большинстве случаев недостаточно, чтобы характеризовать сухость масла, так как его насыщающее значение зависит

от кислотного числа. Много большее значение имеет измерение парциального давления водяных паров, растворенных в масле.

4. Сушка и дегазация изоляции трансформаторов

25. Наименьшей длительностью сушки обладает метод сушки в паровой фазе. Длительность сушки этим методом в 2—4 раза меньше, чем методом сочетания горячего воздуха с вакуумом. Применяется также метод сочетания тепла от сухого горячего масла с вакуумом, который требует в 1,5—3 раза больше времени, чем метод горячего воздуха.

26. Наиболее широко за рубежом, особенно в Европе, распространен метод сушки сочетанием горячего воздуха с вакуумом. Сушка мощных трансформаторов высокого напряжения этим методом продолжается обычно около 10—14 суток.

Метод сушки в паровой фазе применяется в США и Канаде.

27. Величина остаточного давления при сушке обычно составляет от 10^{-2} до 1 мм рт. ст. После окончания сушки производится подпрессовка изоляции. Затем активная часть помещается в собственный бак. Производится подсушка изоляции, а затем подпитка маслом. При этом бак может помещаться в печь. Перед пропиткой остаточное давление повышается до величины около 0,05 мм рт. ст., а температура снижается до 50—70°С, чтобы избежать испарения масла. Длительность пропитки определяется опытным путем.

28. Требования механической стабилизации обмоток делают необходимой предварительную сушку обмоток. Линейная усадка изоляции составляет при сушке примерно 0,5% при изменении ее влажности на 1%. Перед насадкой на магнитопровод остаточная влажность не должна превышать 1%.

29. Заливка трансформаторов маслом производится под вакуумом порядка 0,05 мм рт. ст. Масло предварительно сушится и фильтруется. Однако трансформатор не свободен от пыли, которая загрязняет масло. Поэтому необходима повторная обработка масла, которая осуществляется с помощью установки, подключенной к трансформатору.

30. Остаточное влагосодержание 0,3% может быть достигнуто сушкой при 90°С и остаточном давлении

10 мм рт. ст. по достижении условий равновесия, т. е. по истечении очень длительного времени. Ускорение сушки в зарубежной практике достигается применением более глубокого вакуума, ниже 1 мм рт. ст., который достигается только в конце сушки.

31. Влага распределена в изоляции неравномерно, неравномерно происходит и удаление ее. В конечной стадии сушки изоляции отмечалось ухудшение характеристик слоев по мере удаления от наружной поверхности. Для наружных слоев постоянные значения характеристик достигаются значительно раньше, чем для внутренних. Окончательные величины для наружных слоев значительно лучше.

Время сушки внутренних слоев элементов изоляции трансформатора может быть определено с помощью моделей или опытной сушки трансформатора. На основании этих опытов определяются конечные показатели процесса.

32. Преимуществом сушки методом сочетания горячего воздуха с вакуумом является относительно высокая скорость прогрева.

Следует иметь в виду, что при этом методе можно достичь меньшего остаточного давления, а следовательно, лучшей сушки при меньшей производительности вакуумных насосов ввиду меньшего содержания водяных паров.

Общая длительность сушки методом сочетания горячего воздуха с вакуумом составляет обычно около 12 суток, причем примерно половину этого времени занимает прогрев изоляции. Скорость прогрева, по мнению автора, можно значительно увеличить введением подогрева обмоток постоянным током и подогрева стенок сушильной камеры. При этих условиях метод может быть рекомендован для применения на отечественных заводах.

Заслуживает внимания сушка сочетанием горячего воздуха с вакуумом, проводимая в собственных баках крупных трансформаторов.

33. Метод сушки в паровой фазе особенно предпочтителен, если сушатся обмотки, ранее пропитывавшиеся маслом. В этом случае время повторной сушки не превышает времени первой. Повторная сушка методом горячего воздуха изоляции, пропитанной маслом, но увлажнившейся, в 3—5 раз длительнее, чем первая.

34. Получаемые при сушке трансформаторов абсолютные значения электрических характеристик изоляции более высокие, чем на отечественных заводах. Сопротивление изоляции трансформаторов класса напряжения 220 кВ на порядок и более выше, чем при сушке трансформаторов класса напряжения 500 кВ на отечественных заводах.

35. Метод сушки в паровой фазе следует считать весьма перспективным. По мнению автора, следует поставить работы по изучению на отечественных заводах этого метода, позволяющего в несколько раз сократить время сушки не только за счет сокращения времени прогрева, но и вследствие возможности повышения температуры сушки.

36. Следует также рассмотреть возможность внедрения на отечественных заводах предварительной механической стабилизации обмоток с сушкой их до влагосодержания около 1% перед насадкой на магнитопровод.

37. Пропитанная маслом изоляция увлажняется гораздо медленнее, чем непропитанная. Так, при влажности окружающего воздуха 60% непропитанная изоляция поглощает за 1 день столько же влаги, сколько пропитанная за 3 недели. Соотношение скоростей колеблется от 4:1 до 20:1.

38. Целлюлозные материалы должны храниться на складе в сухом состоянии, чтобы при обработке и сушке они претерпевали меньшее изменение размеров.

39. По мере сушки целлюлозная изоляция дает усадку, которая зависит от приложенного к ней давления. Следовательно, и степень сушки зависит от приложенного давления (сжимающего усилия). Так, после трехдневной сушки изменение размеров изоляции составило 3,4% при давлении 17,5 кгс/см² и 7,5% при 238 кгс/см². Если к изоляции приложено давление, то пропитка маслом дает дополнительную усадку, составляющую примерно 10% первоначальной и более в зависимости от давления.

5. Сушка изоляции трансформаторов в эксплуатации

40. Большинство применяющихся за рубежом методов сушки в эксплуатации предусматривает удаление влаги из масла, которое является промежуточным носителем влаги. Все эти методы по своему принципу требу-

ют длительного времени для сушки, так как передача воды от целлюлозы к маслу затруднена. Наиболее распространен метод циркуляции масла через вакуумную сушильную установку. Время, необходимое для такой сушки, может быть рассчитано, а знание параметров, управляющих процессом, может позволить ускорить сушку. Эти методы малопродуктивны, но оборудование для их осуществления дешево и сушка может осуществляться в течение месяцев во время работы трансформатора. В СССР эти методы не применяются из-за малой их производительности.

41. Если из-за сильного старения масла в трансформаторе требуется его замена, то следует иметь в виду, что большое количество продуктов старения отложилось на бумажной изоляции. Поэтому смена масла достигает цели лишь в случае, если трансформатор одновременно очищают от продуктов старения.

6. Защита изоляции трансформаторов от увлажнения в эксплуатации

42. В настоящее время еще нет практически приемлемого способа защиты изоляции трансформаторов высших классов напряжения от увлажнения в эксплуатации, который полностью удовлетворял бы всем требованиям, а именно: позволил бы поддерживать первоначальное состояние изоляции как в отношении содержания влаги, так и газа. Наиболее приемлемыми в этом отношении, по мнению автора, следует считать системы с эластичными мембранами и подобные им устройства, дополненные размещенными в масле адсорбентами для поглощения продуктов окисления масла.

Такие защитные системы рекомендуются для применения в трансформаторах классов напряжения 330 кВ и выше, а также для трансформаторов классов 110 и 220 кВ большой мощности (200 МВА и более).

При удачном конструктивном решении (материал мембран, надежность всех уплотнений трансформатора, удаление продуктов окисления масла) система может быть применена и на трансформаторах более низких классов напряжения.

Здесь и ниже рекомендации по применению для классов напряжения являются условными. В зависимости от конструкции устройства данной системы и самого

трансформатора границы применения той или иной системы защиты могут быть перемещены.

43. Термоэлектрический осушитель способен поддерживать очень низкое влагосодержание. Недостатком этой системы является наличие контакта масла и воздуха. Однако отрицательный эффект этого контакта ослаблен низкой температурой воздуха в расширителе.

44. Наиболее простой системой является защита с помощью силикагелевого осушителя.

Эффективность силикагелевого осушителя может быть значительно увеличена, например, устройством клапанов, служащих для выхода воздуха из трансформатора не через осушитель.

Недостатком силикагелевого осушителя является необходимость постоянного ухода и, следовательно, относительно большие эксплуатационные расходы.

Для мощных трансформаторов силикагелевый осушитель дополняется силикагелевым адсорбером в масле.

Система может быть рекомендована для трансформаторов классов напряжения до 220 кВ включительно.

45. Система защиты масла азотом при эластичных расширителях является надежным средством защиты трансформаторов от увлажнения и окисления. Однако она не защищает трансформатор от насыщения масла азотом, что ограничивает возможности усовершенствования изоляции трансформаторов, так как не позволяет использовать преимущества дегазированного масла.

Не рекомендуется применение систем защиты азотом под давлением.

Вопрос насыщения масла газом, в том числе в системах азотной защиты, исследован в настоящее время недостаточно. Требуется проведение работ в этой области, особенно в связи с изготовлением трансформаторов класса напряжения 750 кВ и выше.

46. Особое внимание должно быть уделено надежности всех уплотнений в трансформаторе.

47. Рекомендуется применение для мелких трансформаторов систем полной герметизации. Особенностью такой системы является возможность повышения давления в баке при повышении температуры. При последующем снижении температуры возможно выделение пузырей газа в масле.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О РАСТВОРИМОСТИ ГАЗОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ И СОДЕРЖАНИИ В НЕМ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Растворимость газов

Помимо газов, поглощенных маслом в результате соприкосновения его поверхности в расширителе с воздухом или азотом, в масле могут содержаться и другие газы, являющиеся продуктами ускоренного старения изоляции из-за ее чрезмерного нагрева, а также продукты разложения под действием частичных разрядов и других отклоняющихся от нормы процессов.

При термическом разложении масла образуются низкомолекулярные углеводороды, главным образом метан, этан, этилен, которые хорошо растворяются в масле, и водород. При термическом разложении пропитанной маслом бумаги образуются главным образом углекислый газ и в меньшей степени окись углерода, а также водород. Под воздействием частичных разрядов в целлюлозной изоляции и масле образуется водород, а также метан, окись углерода и углекислый газ.

Статическое равновесие. Растворимость (по объему) рассмотренных выше и других газов в трансформаторном масле в состоянии статического равновесия при 760 мм рт. ст. и 25°С составляет:

Водород (H ₂)	7%
Азот (N ₂)	8,6%
Окись углерода (CO)	9%
Аргон (Ar)	15%
Кислород (O ₂)	16%
Метан (CH ₄)	30%
Углекислый газ (CO ₂)	120%
Этан (C ₂ H ₆)	280%
Этилен (C ₂ H ₄)	280%
Ацетилен (C ₂ H ₂)	400%
Пропилен (C ₃ H ₆)	1200%
Пропан (C ₃ H ₈)	1900%

Состав воздуха, растворенного в масле (по объему): азот — примерно 70%, кислород (включая аргон) — примерно 30% и углекислый газ — около 0,3%.

Растворимость газов в масле пропорциональна внешнему давлению газа и в пределах температуры 20—100°С является линейной функцией температуры (гл. 1 и 2). Для воздуха она увеличивается примерно на 0,12% (по объему) на каждые 10°С увеличения температуры. На растворимость влияет также вязкость. Для масел с малой вязкостью она выше, чем для масел с большой вязкостью.

Динамическое равновесие. Скорость диффузии газов в спокойное масло мала. На распределение газов по всему объему масла трансформатора влияет движение масла благодаря температурным изменениям. Скорость абсорбции газа может быть значительно ускорена механической вибрацией. Когда масло подвергается

воздействию ультразвуком, насыщающее значение много ниже, чем при статических условиях. При этом имеет место динамическое равновесие между абсорбцией газа посредством диффузии и газовой выделением благодаря механическим вибрациям. Насыщающее значение уменьшается по мере увеличения интенсивности механических вибраций и уменьшения температуры. Если такие изменения происходят в системе, близкой к насыщению, масло становится переиасыщенным и из него начинает выделяться газ.

Обменные явления в пузырях газа. Состояние равновесия для воздуха, растворенного в масле, нарушается из-за наличия газовых пузырей, возникающих при разложении изоляционных материалов. Газовый обмен происходит вследствие того, что вновь образующиеся газы частично растворяются, а азот и кислород переходят из масла в пузыри. Такой газовый обмен продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто новое состояние равновесия, определяемое парциальными давлениями индивидуальных газов и их растворимостями. На практике в случае повреждения трансформатора газы, образующиеся вследствие разложения изоляции и обладающие низкими растворимостями в масле, появятся в газовом реле в относительно большем количестве, тогда как газы с более высокими растворимостями, перейдут в масло. Если повреждение развивается медленно с длительным, но слабым газовойделением, может установиться состояние, в котором в дополнение к увеличенному общему содержанию газа аномалия газового состава в масле остается практически неизменной в течение длительного периода. При этом содержание газа уменьшается по мере удаления от источника выделения газа к поверхности масла, так как отсутствует соответствующее парциальное давление в наружной атмосфере для газов, образовавшихся в результате дефекта внутри трансформатора.

Дополнительные изменения газового состава в масле могут также быть вызваны химическими процессами, связанными с некоторыми повреждениями. Например, кислород поглощается при окислении углерода масла в сильно перегретых точках. Это может вызвать уменьшение содержания кислорода, так как масло препятствует его поступлению. Часть водорода, образующаяся при частичных разрядах в изоляции, реагирует с кислородом, создавая гидрат перекиси (гидропероксид), а часть поглощается ароматическими углеводородами. С другой стороны, водород может дополнительно появиться в результате ионизации газовых пузырей, проходящих через районы с высокой напряженностью электрического поля [Л. 51].

Источники твердых частиц

Существуют два основных источника появления в масле твердых частиц: волокна, из которых состоит целлюлозная изоляция, и пыль, накапливающаяся на изоляции в течение нескольких недель изготовления большого силового трансформатора.

При заполнении трансформатора маслом пыль и волокна переходят с изоляции в масло и остаются в нем во взвешенном состоянии или осаждаются на выступах и дне, переходя вновь во взвешенное состояние благодаря конвекции или воздействию электрического поля. Было отмечено, что дополнительное загрязнение масла в трансформаторе происходит под воздействием электрического поля

во время измерения потерь или испытаний изоляции. Тепловые испытания также сопровождаются этим явлением. Проверка содержания частиц в масле, взятом из нижней части бака трансформатора, который не был подсоединен к фильтру, показала следующее их содержание в 1 000 л:

$1,2 \cdot 10^6$ — сразу после заполнения;

$4,4 \cdot 10^6$ — после одноминутного испытания изоляции;

$6,6 \cdot 10^6$ — после периода циркуляции масла с большой скоростью.

Было определено, что загрязнение почти целиком состояло из неметаллических частиц. Изучение под микроскопом показало присутствие частиц бумаги, картона и большого количества волокон.

Подсчет частиц показал определенное соотношение между количеством частиц в масле и его пробивной прочностью. Три литра масла были отобраны из трансформаторов для подсчета количества частиц размерами от 25 до 250 мкм. Образцы наиболее загрязненного масла имели $13,2 \cdot 10^6$ частиц на 1 000 л (определено экстраполяцией), наименее загрязненного — $0,066 \cdot 10^6$. Соответствующие им пробивные напряжения сферических электродов с расстоянием 2 мм составили 30 и 65 кВ [Л. 52].

ЛИТЕРАТУРА

1. Bingelli J., Froidevaux J., Kratzer R., The treatment of transformers. Quality and completion criteria of the process, CIGRE, 1966, 110.

2. Strigel R., Elektrische Stossfestigkeit, Zweite Auflage, 1955, Springer-Verlag, Berlin.

3. Norris E. T., Mech. M. I., High-voltage power-transformer insulation, Proceeding IEE, vol. 110, № 2, February 1963, p. 428.

4. Fallou B., Thibault M., Quelques notions relatives a l'humidification des huiles isolantes usagees, Bull. Inform. du L. C. I. E., № 35, April 1963, p. 330.

5. Skowronski J. I., Study of suitable methods for determining the dielectric strenght of insulating oils, CIGRE, 1962, 131.

6. Rabus W., Transformatoren, ETZ., 1965, A 86, № 13, p. 436—444.

7. Stannett A. W., Problems of water in transformers, Electr. Times, 1965, 147, № 12.

8. Stannett A. W., Problems of water in power transformers, The New Zealand electrical Journal, 1966, 25 June, p. 163—166.

9. Gsodam H., Dielektrische Messungen an Isolierstoffen des Transformatoren und Isolationsprüfung von Transformatoren vor der Inbetriebnahme, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1966, Bd 83, № 6, S. 374—381.

10. Allan D. J., Heighes J., Routine factory measurement of internal discharge, Electrical Review, 1965, vol. 176, № 24, p. 902—905.

11. Kogan P., Behaviour of moisture in oil-impregnated paper under electric stress, Proceedings IEE, vol. 110, № 12, December 1963, p. 2257—2266.

12. Knosp R., Fallan E., Etude du papier impregne d'huile, Bull. Inform. du LCIE, № 30, June 1961.

13. Fabre M. J., Les lois de degradation du papier impregne d'huile dans les transformateurs, Bull. SFE, № 103, Juillet 1959, p. 409.

14. Franklin E. B., A new device for the preservation of dryness in transformer insulation, Engng J. (Canada), 1967, vol. 50, № 11, p. 19—22.

15. Fabre J., Pichon A., Deteriorating processes and products of paper in oil, Application to transformers, CIGRE, 1960, 137.

16. Delhaye J., Paume A., Gallay M., Viale F., Recent progress in insulation for large transformers, CIGRE, 1964, 111.

17. Franklin E. B., Automatic insulation dryer for power transformers, Electrical Times, 3 March 1966, p. 315—318.

18. Alarn L., Salgues F., Le transformateur a grand echauffement, Review Generale l'Electricite, October 1965, p. 827—831.

19. Norris E. T., Report of the work of the study committee on transformers (№ 12), CIGRE, 1966, № 142.

20. Hethorington W. L., Keil C., Drying and oil impregnation of transformer winding, CIGRE, 1966, № 142, Appendix 11.

21. Harper G. B., Detection and diagnosis of deterioration and fault in power transformers, CIGRE, 1968, № 12.01, Appendix 3.

22. Norris E. T., Power transformer insulation in service, Electrical Review, 1966, vol. 178, № 18, p. 672—674.

23. Norris E. T., High voltage power transformer insulation, Proc. IEE, Febr. 1963, vol. 110, № 2, p. 428, 439.

24. Deghan W. J. and Shimanski E. J., A field survey of transformer oil quality, Trans. AIEE, 1956, part 1, p. 575.

25. Franklin E. B., Distribution of water in transformer insulation, part 1, Theory and calculation, Electr. Times, 1965, vol. 147, № 21, p. 787—791.

26. Kaufman R. B., Shimanski E. J., Macfaydyen K. W., Gas and moisture equilibrium in transformer oil, Communication and Electronics, № 19, July 1955, p. 312—318.

27. Fallou B., Thibault M., Quelques notions relative a l'humidification des huiles isolantes usagees, Revue Generale de s'Electricite, April 1963, p. 242—247.

28. Piper J. D., Moisture equilibrium between gas space and fibrous materials enclosed in electric equipment, Trans. AIEE, vol. 65, 1946, part III, p. 791—797.

29. Houtz C. C., McLean D. A., Absorption of water by papers at high temperature, Bell. Telephone Publication.

30. Potthoff K., Betriebsverhalten von Grosstransformatoren, das Gas im Öl, AEG-Mitt., 1967, Bd 57, № 1, 16—19.

31. Kok J. A., Der elektrische Durchschlag in flüssigen Isolierstoffen, Eindhoven, 1963.

32. Leschanz A., Messverfahren und Messergebnisse bei der Isolationsüberwachung von Transformatoren, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1966, Bd 83, № 7, s. 410—422.

33. Franklin E. B., Distribution of water in transformer insulation, Part 2. Drying in the field, Electrical Times, 3 June, 1965, p. 839—842.

34. Bearers M. F., Shimanski E. J., Timpane E. F., A continuous flow moisture detector, Communications and Electronics, № 19, July 1955, p. 361—367.

35. Stannet A. W., The measurement of water in power transformers, Proc. IEE, 1962, 109 A, Supplement 3, p. 80.

36. Foster W. C., Significance of dew point measurements in sealed liquid field transformers, Proc. 7th Electr. Insulat. Conf., Chicago, 1967, New York, N. Y., IEEE, 1967.

37. Berger B., Dobie A., Clark D. E., Anderson J. R., Taylor E. D., Monitoring dryness in power transformers, Part I,

Portable dispersion meter developed, *Electrical Times*, 17 February 1966, p. 239—242.

38. Beer G., Gasparini G., Osimo F., Rossi F., Experimental data on the drying-out of insulation samples and test coil for transformers, *CIGRE*, 1966, № 135.

39. Moser H. P., Trocknung und Entgasung der in Hochspannungs—Leistungstransformatoren verwendeten Isolierstoffe, *ETZ*, 1960, Bd A. 81, H. 1, S. 41—47.

40. Heighes J., High-voltage transformer insulation and its processing, *AEI Engng*, 1966, vol. 6, № 2, p. 84—87.

41. Neiderjohn R. K., New oil-processing facility improves transformers quality, *Electr. Light and Power*, 1965, vol. 43, № 12, p. 84—87.

42. Feather L. E., Drying and oil impregnation of power transformer insulation, *Proc. 6th Electr. Insulat. Conf.*, 1965, New York, N. Y., IEEE, 1965, p. 65—69.

43. Hartmann H., Vakuumanwendung bei der Inbetriebnahme und Reparatur von Hochspannungstransformatoren, *Bull. SEV*, 52, 1961, 18, 23 September.

44. Engstrom C. D., In-service transformer drying slashes costs 85 percent, *Electr. Light and Power*, 1967, vol. 45, № 10, p. 108—109.

45. Hubert F. J., Yackey K. D., A nonvacuum method of field-drying transformers. Paper IEEE, Winter Power Meeting, New York, N. Y., Jan. 29, Febr. 3, 1967, IEEE Paper, 1967, № 31.

46. Thompson W. W., Taylor R. O., Oil conditioning straddles variety of specifications, *Electr. World*, 1967, vol. 167, № 18, p. 72—74.

47. Schoven K. H., Norwegian practice in choice specification and control of transformer accessories, *CIGRE*, 1966, № 105.

48. Brown W. J., Keer H. W., Singer D. E., Walshe L. C., Accessories and parts for transformers, *CIGRE*, 1966, № 101.

49. *CIGRE Proceedings of the 21st Meeting*, Paris 8, 18 June 1966, vol. 1, Group 12.

50. Setälä O., Ostman N., Hyyryläinen S., Using dehydrating breathers to protect oil-filled transformers against moisture, *Säntö Electricity in Finland*, 1967, № 2, p. 47—51.

51. Müller R., Potthoff K., Goldner K., The analysis of gases dissolved in the oil as means of monitoring transformers and detecting incipient faults, *CIGRE*, 1970, № 12, 02.

52. Clothier N. D., Lawrence R., Denham I. A., Solid particle impurities in power transformers, *Electr. Rev.*, 1970, 186, № 18, p. 648—650.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава первая	
Качество технологической обработки изоляции и его влияние на электрические и другие характеристики трансформаторов	
1-1. Общие данные	5
1-2. Влияние остаточной влаги и газа на качество изоляции трансформаторов	6
1-3. Электрический пробой изоляции вследствие повышенной влажности и газосодержания	18
1-4. Возможность повышения допустимой рабочей температуры трансформатора в случае поддержания невысокой влажности изоляции	21
1-5. О состоянии изоляции при заводских испытаниях и в эксплуатации	21
1-6. Требования к степени сушки и дегазации изоляции	23
Глава вторая	
Ухудшение состояния изоляции трансформаторов в эксплуатации	
2-1. Общие данные	25
2-2. Источники увлажнения изоляции трансформаторов	27
2-3. Распределение воды в изоляции трансформатора	29
2-4. Равновесное содержание влаги в сочетании воздух — масло — бумага	31
2-5. Изучение равновесного содержания влаги в изоляции и его практическое значение	32
2-6. Определение распределения влаги в изоляции трансформаторов с помощью измерения точки росы	37
2-7. Содержание газов в масле трансформаторов в эксплуатации	44
2-8. Старение трансформаторного масла. Влияние чистоты очистки масла	46
Глава третья	
Измерения для определения состояния изоляции трансформаторов	
3-1. Критерии окончания технологической обработки изоляции	48
3-2. Контроль состояния изоляции в эксплуатации	51
3-3. Определение качества масла	53
3-4. Значение измерения влагосодержания	56
3-5. Аппаратура для измерения парциального давления водяных паров, растворенных в масле	57
126	

3-6. Определение влагосодержания с помощью измерения точки росы в герметизированных трансформаторах . . .	58
3-7. Прибор для контроля влажности изоляции силовых трансформаторов . . .	60
3-8. Электрические испытания, характеризующие состояния изоляции в эксплуатации	61

Глава четвертая

Технологическая обработка (сушка и дегазация) изоляции трансформаторов и определение ее эффективности

4-1. Способы сушки	63
4-2. Сушка трансформаторов методом сочетания горячего воздуха с вакуумом	67
4-3. Хранение целлюлозной изоляции и ее усадка при сушке	70
4-4. Экспериментальные данные по сушке моделей изоляции трансформаторов	72
4-5. Сушка трансформаторов на заводах АЕИ в Витеншо (Великобритания)	79
4-6. Сушка трансформаторов классов напряжения 220—500 кВ фирмой Савуазьен (1960 г.)	81
4-7. Сушка трансформаторов в собственных баках на заводе	82
4-8. Новое оборудование фирмы Джeneral электрик (США) для приготовления масла	83
4-9. Сушка изоляции силовых трансформаторов с применением паровой фазы (фирма Вестингауз электрик, США)	84
4-10. Некоторые замечания по применяемым за рубежом методам сушки	86

Глава пятая

Сушка изоляции трансформаторов в эксплуатации

5-1. Общие данные	88
5-2. Расчет времени сушки масла и изоляции трансформаторов в эксплуатации методом циркуляции масла	89
5-3. Сушка методом промежуточного вакуума	91
5-4. Электростатический осушитель	92
5-5. Сушка с помощью термоэлектрического осушителя	94
5-6. Сушка циркуляцией масла через активированный алюминий	95
5-7. Сушка с помощью холодильника	96
5-8. Подготовка трансформаторного масла для оборудования 500 кВ	97

Глава шестая

Защита изоляции трансформаторов от увлажнения в эксплуатации

6-1. Существующее оборудование для защиты от увлажнения	99
6-2. Расширители с воздухоосушителями	101
6-3. Воздушный влагопоглотитель с клапанами	102
6-4. Автоматический осушитель изоляции для силовых трансформаторов	107
Заключенне	110
<i>Приложение</i>	120
<i>Литература</i>	123
	127

Сергей Дмитриевич Лизунов
**СУШКА И ДЕГАЗАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ
ТРАНСФОРМАТОРОВ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Редактор *Е. В. Веремей*
Технический редактор *Н. В. Сергеев*
Корректор *З. Б. Шлайфер*

Сдано в набор 31/VIII 1970 г.
Подписано к печати 19/I 1971 г. Т-03013
Формат 84×108^{1/2}/₃₂ Бумага типографская № 1
Усл. печ. л. 6,72 Уч.-изд. л. 7,41
Тираж 9 000 экз. Цена 39 коп. Зак. 1356

Издательство „Энергия“. Москва, М-114,
Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Шлюзовая наб., 10.

Цена 39 коп.