

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	7
Предисловие	10
Введение	12
Глава 1. Краткие сведения о силовых трансформаторах	15
1.1. Эксплуатация силовых трансформаторов в системе энергетики Чувашской Республики ..	15
1.2. История и основные элементы силовых трансформаторов	18
1.3. Схемы регулируемых трансформаторов	28
1.4. Основные методы контроля силовых трансформаторов	32
1.5. Типы и разновидности переключающих устройств	34
1.6. Приводные механизмы переключающих устройств	56
1.7. Монтаж и наладка переключающих устройств без возбуждения	58
1.8. Правила приёмки, монтаж и наладка РПН	60
Глава 2. Автоматизация средств диагностики электрических цепей трансформаторов	64
2.1. Структура цифрового регистратора	64
2.2. Определение группы соединения обмоток трансформаторов	73
2.3. Определение омического сопротивления обмоток	83
2.4. Измерение тока и потерь холостого хода	100
2.5. Определение коэффициента трансформации обмоток силовых трансформаторов	106
2.6. Определение полного сопротивления короткого замыкания обмоток СТ	117
Глава 3. Традиционные методы диагностики регуляторов под нагрузкой	126
3.1. Испытание трансформаторного масла	126
3.2. Измерение давления контактов	127
3.3. Измерение крутящего момента	130
3.4. Измерение сопротивления элементов регуляторов под нагрузкой	130
3.5. Измерение коэффициента трансформации	132
3.6. Снятие круговых диаграмм переключающих устройств	133
3.7. Снятие осциллограмм токов в контактных системах быстродействующих РПН	144
Глава 4. Интродиагностика быстродействующих РПН с применением ЦР	154
4.1. Снятие осциллограмм токов РПН в режиме интродиагностики	154
4.2. Контроль токоограничивающих резисторов быстродействующих РПН	166
4.3. Интродиагностика РПН типа РНОА-110/1000	168
4.4. Интродиагностика РПН типа РНТА-У-35/200	173
4.5. Автоматизированный метод снятия круговой диаграммы переключающих устройств ..	180
Глава 5. Интродиагностика высоковольтных выключателей и аккумуляторных батарей ..	186
5.1. Общие положения	186
5.2. Ускоренный контроль высоковольтного выключателя без вскрытия бака	189

5.3. Определение собственного времени включения и отключения ВВ.....	205
5.4. Контроль аккумуляторных батарей на энергообъектах	212
Глава 6. Диагностика и контроль вентильных разрядников	217
6.1. Методы и технические устройства контроля вентильных разрядников	217
6.2. Автоматическое определение пробивного напряжения вентильных разрядников.....	222
Приложение 1. Технические характеристики силовых трансформаторов, выпускаемых ООО «Тольяттинский трансформатор»	226
Приложение 2. Величины токоограничивающих резисторов РПН	229
Приложение 3. Устройства регулирования напряжения: термины и определения	230
Приложение 4. Условные обозначения зарубежных РПН	232
Приложение 5. Технические данные переключающих устройств	233
Приложение 6. РПН с токоограничивающими резисторами	234
Приложение 7. Основные параметры РПН отечественного производства	236
Приложение 8. Технические данные приводов РПН	238
Приложение 9. Характерные неисправности приводных механизмов и переключающих устройств и методы их устранения	239
Приложение 10. Каналы напряжения и тока многофункционального цифрового регистратора	241
Приложение 11. Метрологические характеристики цифрового регистратора	242
Приложение 12. Основные нормы переключающих устройств для снятия круговой диаграммы	244
Приложение 13. Испытания контактора РПН силового трансформатора	247
Приложение 14. Протоколы интродиагностики высоковольтного электрооборудования	251
Список литературы	268
Предметный указатель	294

Список сокращений

SDV, SAV, SCV — регуляторы с токоограничивающим резистором немецкого производства

АВ — автоматический выключатель

АК — аккумуляторная батарея

АСКУЭ — автоматическая система коммерческого учёта электроэнергии

АСУ ТП — автоматическая система управления технологическими процессами

АЦП — аналого-цифровой преобразователь

БВД — блок ввода данных

БВДС — блок ввода дискретных сигналов

БДАС — блок дополнительных активных сопротивлений

БДН — блок датчиков напряжения

БДТ — блок датчиков тока

БДТ и Н — блок датчиков тока и напряжения

БЗЦР — блок запуска цифровой регистрации

БК — блок-контакты

БП — блок питания

БПАС — блок прецизионных активных сопротивлений

БПНТ — блок преобразования напряжения в ток

БСД и П — блок скорости движения и хода подвижных частей

БСК — батарея статистических конденсаторов

БЭП — блок энергонезависимой памяти

ВБ — вычислительный блок

ВВ — высоковольтный выключатель

ВН — высокое напряжение

ВПС — внешний подвижный стержень

ГОР — гальваническая оптоэлектронная развязка

ДЖ — диэлектрическая жидкость

ДН — делитель напряжения
ДУ — дистанционное управление
ДУПВ — датчик угла поворота вала
ЖКД — жидкокристаллический дисплей
ЗУ — зарядное устройство
ИДТ — измерительные датчики тока
ИНПТ — источник напряжения постоянного тока
ИОН — источник оперативного напряжения
ИРПН — источник регулируемого переменного напряжения
КЗ — короткое замыкание
КК — контакты контактора
КО — коммутирующий орган
КП — подвижный контакт
МК — микроконтроллер
НН — низкое напряжение
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство
ОПН — ограничитель перенапряжений
ОУ — операционные усилители
ПБВ — переключатель без возбуждения
ПК — персональный компьютер
ПМ — приводной механизм
ПН — переключатель нагрузки
ПС — порт связи
ПУ — переключающее устройство
РА — регулировочный автотрансформатор
РЗА — релейная защита и автоматика
РНОА — регулятор напряжения однофазный с активным резистором
РНТ — регулятор напряжения трёхфазный (реакторный)
РНТА — регулятор напряжения трёхфазный с токоограничивающими резисторами
РПН — регулятор под нагрузкой
РС — регулятор ступенчатый
СЗОП — средство защиты от перенапряжения
СЛ — сигнальные лампы
СН — среднее напряжение
СПП — система подавления помех
СТ — силовой трансформатор
СТА — силовой трёхфазный автотрансформатор
СТК — соединительный трёхпроводной кабель

- СЧК — соединительный четырёхпроводной кабель
СШК — соединительный шестипроводной кабель
СЭС — Северные электрические сети
ТИНПТ — трёхканальный источник напряжения постоянного тока
ТР — токоограничивающий резистор
УР — указатель равновесия
УТ — устройства телемеханики
ФИН — формирователь импульса напряжения
ХАРГ — хроматографический анализ
ХХ — холостой ход
ЦР — цифровой регистратор
ЦСП — цифровой сигнальный процессор
ЧКН — четырёхпроводной кабель напряжения
ЧКТ — четырёхпроводной кабель тока
ШК — пунктирующий контакт
ШТ — штанга полюса включателя
ЭВ — электромагнит включения
ЭДС — электродвижущая сила
ЭО — электромагнит отключения

Предисловие

Книга посвящена важной и актуальной проблеме диагностики изношенного высоковольтного электрооборудования энергосистем.

Качественный ремонт и применение современных методов эксплуатации, основанных на диагностике технического состояния электрических машин, коммутационной аппаратуры и средств защиты от перенапряжения, позволяют обеспечить бесперебойную работу всех отраслей народного хозяйства, уменьшить расходы на эксплуатацию и ремонт электрооборудования и продлить срок его службы.

За последнее время благодаря применению цифровых устройств произошли существенные изменения аппаратуры, предназначенной для испытаний, контроля и диагностики высоковольтного электрооборудования. По этой причине во многом утратили ценность изданная в 1985 г. книга И. Я. Яковсона «Наладка и эксплуатация переключающих устройств силовых трансформаторов» и выпущенный ОРГРЭС в 1997 г. «Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования» (разд. 2, 4, 7 и 10).

Цель настоящей книги — изложить прогрессивные методы и устройства диагностики мощных силовых трансформаторов (СТ), высоковольтных выключателей и разрядников 35...500 кВ с применением новой микропроцессорной техники.

В работе рассмотрены современные методы цифровой диагностики силового высоковольтного электрооборудования, проводимые с применением одного прибора — многоканального цифрового регистратора. Представлены разработанные автоматизированные средства для определения группы соединения обмоток СТ, а также для определения таких их характеристик, как потери холостого хода при малом однофазном возбуждении, коэффициент трансформации, полное сопротивление короткого замыкания и омическое сопротивление по постоянному току.

На конкретном примере опыта работы Чувашской энергосистемы приведены общие сведения о силовых трансформаторах, особенности их эксплуатации.

Рассмотрены вопросы обслуживания и оценка состояния переключающих устройств 35...220 кВ, установленных на силовых высоковольтных трансформаторах классов напряжения 35...750 кВ, эксплуатируемых в системе энергетики РАО

«ЕЭС России». Особое внимание уделено снятию осциллограмм токов в цепях контактных систем регуляторов под нагрузкой (РПН) таких типов, как РС, РНТА, РНОА, SDV, SAV и SCV.

Впервые приведён разработанный метод интродиагностики быстродействующих переключающих устройств, т. е. метод диагностики, проводимый без вскрытия баков РПН, что позволяет отказаться от трудоёмкого процесса слива и последующей заливки диэлектрической жидкости.

Показана возможность интродиагностики высоковольтных выключателей (в частности, масляных). Приведены конкретные примеры применения разработанной методики для интродиагностики коммутационных аппаратов, эксплуатируемых в энергосистеме Чувашской Республики. Примечательно, что данный метод позволяет исследовать состояние РПН и высоковольтных выключателей в любое время года. Показана возможность контроля аккумуляторных батарей с применением цифрового регистратора.

Описано автоматизированное устройство для определения пробивного напряжения вентильных разрядников с шунтирующими сопротивлениями. Данное измерение на практике часто применяется в тех случаях, когда исправность того или иного элемента разрядника вызывает определённые сомнения по результатам полученных термограмм тепловизионного контроля.

Автор признателен сотрудникам ООО «Инженерный центр» г. Чебоксары, соавторам научных публикаций С. Н. Баталыгину, Ю. А. Федорову и В. М. Шевцову за непосредственное участие в разработке методов цифровой диагностики высоковольтного электрооборудования, а также А. Н. Пулину и А. С. Панфилову за помощь в постановке многих экспериментов на действующем силовом электрооборудовании во время ремонтной компании на предприятиях энергетики Чувашской Республики, ОАО ТГК-5, ОАО ТГК-6 и Республики Татарстан.

Особую благодарность за ценные замечания при подготовке настоящей книги автор выражает рецензентам и доктору физико-математических наук, профессору, главному научному сотруднику ИПМ УрО РАН Геннадию Михайловичу Михееву.

Автор также выражает благодарность кандидату физико-математических наук, доценту Валентину Сергеевичу Идиатулину за помощь в проработке вопросов терминологии.

Автор

Введение

Хорошо известно, что высоковольтное электрооборудование (силовые трансформаторы, высоковольтные выключатели и средства защиты от перенапряжения) является важнейшим узлом распределительной сети. Самым дорогим элементом на любой подстанции является преобразователь напряжения — силовой трансформатор. Большинство этих преобразователей напряжения в течение многих лет работают при различных климатических условиях и подвергаются внешним и внутренним воздействиям электромагнитной и механической природы. Мировой опыт показывает, что экономический ущерб от случайной аварии мощного силового трансформатора, связанный только с остановкой промышленных предприятий из-за отсутствия питающего напряжения, исчисляется миллионами долларов, не говоря уже о весьма крупных затратах, необходимых для восстановления работоспособности дорогостоящего оборудования [1...3].

Статистические исследования [4], проведённые за рубежом, показывают, что вероятность отказа масляного трансформатора составляет 0.0062 аварии в год. Другими словами, это означает, что в энергосистеме, состоящей из 160 масляных трансформаторов, возможна, по крайней мере, одна авария в год. С другой стороны, характерной тенденцией современной электроэнергетики являются нарастающие степени изношенности основного силового электрооборудования и недостаточные темпы его обновления.

В последние два десятилетия в электроэнергетике широко применяется диагностика высоковольтного электрооборудования с помощью приборов, изготовленных на современной микроэлектронной базе. На их основе появилось множество приборов инфракрасной техники, различные модификации хроматографических устройств, множество разновидностей осциллографов и регистраторов, легко сопрягаемых с персональным компьютером, и т. д. [5...7].

При наладочных испытаниях электроприводов, генераторов, высоковольтных выключателей и другого оборудования осциллографы позволяют осуществлять визуальное наблюдение и запись переменных во времени электрических процессов или неэлектрических величин, преобразованных в электрические [8].

Обычно в качестве устройства для этих целей применяли многоканальные осциллографы типов Н11, Н13 и им подобные или магнитоэлектрические осциллографы со светолучевой записью на фотоленту [9]. Эти устройства обладали ря-

дом недостатков. К их числу относится неудобство при осциллографировании, заключающееся в трудности синхронизации запуска осциллографа с началом процесса регистрации измеряемых величин, что влекло за собой излишнюю трату фотобумаги или фотоленты. Другим недостатком является проявление изображения осциллограмм на фотобумаге в специально оборудованной лаборатории. К числу недостатков этих устройств относится также невозможность создания базы данных в электронном виде и ручная обработка осциллограмм. По этим причинам, а также для повышения метрологических характеристик обследования высоковольтного оборудования, одним из перспективных направлений ускоренной и автоматизированной диагностики является использование микропроцессорных устройств и цифровых методов обработки результатов измерений и испытаний, которые не нашли ещё широкого и повсеместного применения в практической деятельности инженерных служб в электроэнергетике [10].

Заметим, что важным и достаточно объективным методом диагностики высоковольтного оборудования является обследование под рабочим напряжением электрооборудования в инфракрасном диапазоне с помощью тепловизора. За последние десятилетия с помощью приборов инфракрасной техники в энергосистемах были обнаружены десятки тысяч развивающихся дефектов, тысяча из которых могла бы привести к крупным авариям и отказам.

Всё шире начинают использоваться методы и аппаратура для контроля частичных разрядов на силовых и измерительных трансформаторах, электродвигателях и генераторах. Электронно-оптические методы и цифровая аппаратура занимают особое место при контроле электроразрядных и тепловых процессов благодаря дистанционности и оперативности процесса измерения, а также высокой информативной способности.

Другим часто применяемым методом диагностики маслонаполненного электрооборудования является хроматографический метод определения растворённых газов в диэлектрической жидкости. Сегодня и здесь немислимо получение автоматизированных обработок измерений без цифровой техники.

Однако имеется целый ряд устройств, важных узлов силового высоковольтного электрооборудования, которые требуют новых методов и технических средств для оперативной диагностики и ускоренной обработки полученной измерительной информации. Современные методы и технические средства диагностики высоковольтных электрических аппаратов в энергосистемах не позволяют выявить работу отдельных элементов без вскрытия дорогостоящего электрооборудования (интродиагностика). В связи с этим затягивается время вывода в ремонт электрооборудования, утрачивается оперативность и увеличивается вероятность аварийных режимов. Поэтому разработка новых методов контроля (при которых измеряются различные данные и параметры, характеризующие состояние силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей и средств защиты от перенапряжения) и интродиагностики электрооборудования (без вскрытия баков высоковольтных аппаратов), при которых обрабатываются полученные данные с целью нахождения дефектов и прогнозирования возможных аварий, является, безусловно, актуальной задачей.

Нами разработан и внедрён в повседневную практику ряд методов интродиагностики и модификаций цифровых устройств на базе мобильного помехозащищённого микропроцессорного осциллографа (регистратора) динамических процессов для цифровой диагностики и контроля наиболее ответственных силовых элементов энергообъектов и их уязвимых узлов. К ним на электрических подстанциях относятся силовые трансформаторы, регуляторы напряжения под нагрузкой (РПН), высоковольтные выключатели, средства защиты электрооборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений (разрядники и ограничители), а также аккумуляторные батареи (Рис. В.1).



Рис. В.1. Область применения ЦР.

Освоение цифровых методов и новых микроэлектронных устройств для осуществления интродиагностики высоковольтных электрических аппаратов позволяет повысить точность измерений, сократить время проведения испытаний высоковольтного электрооборудования, автоматизировать обработку результатов, а также существенно облегчить работу оперативного персонала и формирование интегрированных баз данных диагностики электрооборудования энергетических компаний и отдельных предприятий.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

1.1. Эксплуатация силовых трансформаторов в системе энергетики Чувашской Республики

Количество трансформаторов 35...500 кВ в системе энергетики с каждым годом растёт. По состоянию на 2006 г. в эксплуатации в системе энергетики Чувашской Республики находится в общей сложности более 220 силовых трансформаторов: от 6 в классе 500 кВ до 158 в классе 110 кВ (Рис. 1.1) [11].

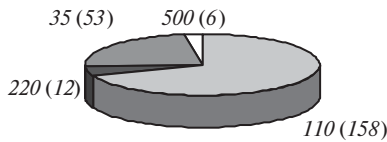


Рис. 1.1. Количество установленных трансформаторов в системе энергетики Чувашской Республики в зависимости от класса напряжения.

На Рис. 1.2 приведена диаграмма ввода в эксплуатацию трансформаторов по годам в Чувашской Республике. Из этого рисунка видно, что пик ввода силовых трансформаторов приходится на период с 1986 по 1990 г. За последние пять лет, с

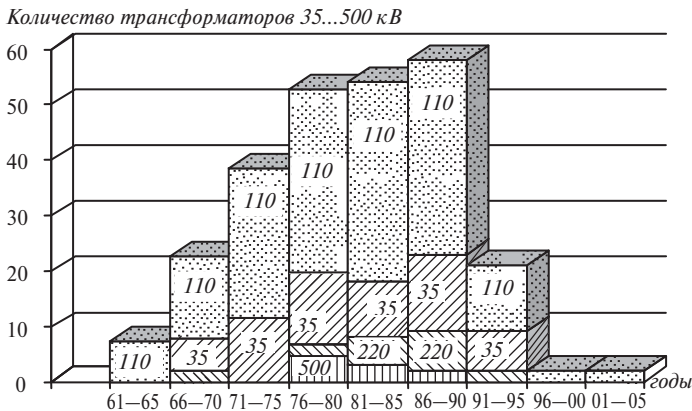


Рис. 1.2. Диаграмма ввода в эксплуатацию трансформаторов по годам.

2001 по 2005 г., частота ввода силовых трансформаторов составляет один трансформатор в год. На **Рис. 1.3** находится диаграмма, на которой показаны установленные мощности, введённые за период с 1961 по 2005 г. в системе энергетики Чувашии. По сумме установленной мощности пик приходится на период с 1976 по 1990 г.

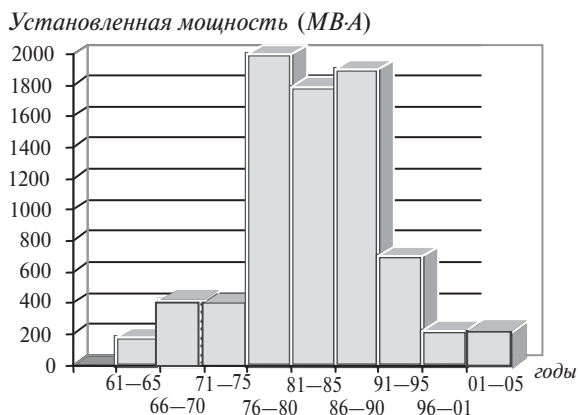


Рис. 1.3. Диаграмма силовых трансформаторов, вводимых в эксплуатацию по сумме установленной мощности.

На **Рис. 1.4** приведены данные суммарной установленной мощности трансформаторов для каждого предприятия в отдельности.

За сорок пять лет эксплуатации трансформаторов, наряду с ростом их количества и мощности, в системе имеются и потери, в основном приходящиеся на семидесятые — начало восьмидесятых годов [12]. Причины — заводской брак силовых трансформаторов, отсутствие надлежащей аппаратуры и методики их диагностики, недостаточный опыт эксплуатации оборудования со стороны оперативного и ремонтного персонала.

Фактические причины отказов (повреждаемость) трансформаторов в системе Чувашской Республики могут быть несколько иными по сравнению с официальной статистикой. Это объясняется тем, что статистические данные приводятся по составленным картам отказов сразу же после повреждения или отказа трансформаторов, тогда как чаще всего причина повреждения не может быть однозначно определена. Только при последующей разборке трансформатора, проводимой, как правило, через несколько недель после повреждения, можно определить истинные причины отказа СТ. Однако в большинстве случаев ранее составленные карты отказов не корректируются, а во многих случаях разборка трансформаторов (с целью выявления причины повреждения) не производится.

Анализ фактических отказов трансформаторов класса напряжения 110 кВ за последние 30 лет эксплуатации показывает, что самым слабым местом для трансформаторов 110 кВ являются переключающие устройства (**Рис. 1.5**). По данным

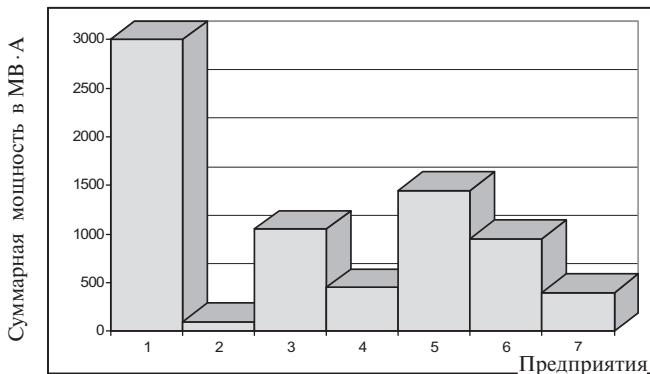


Рис. 1.4. Суммарная установленная мощность трансформаторов по предприятиям энергосистемы.

- 1 — Чебоксарская ГЭС; 2 — ТЭЦ-1; 3 — ТЭЦ-2; 4 — ТЭЦ-3;
 5 — Северные электрические сети (СЭС); 6 — Южные электрические сети (ЮЭС);
 7 — Алатырские электрические сети (АЭС).



Рис. 1.5. Анализ отказов силовых трансформаторов класса напряжения 110 кВ Чувашской энергосистемы.

N_i — количество отказов от i вида дефекта, где $i = 1...8$;
 N_o — общее количество отказов.

зарубежных литературных источников, частота отказов силовых трансформаторов из-за неполадок ПБВ и РПН составляет около 38% [1].

В настоящее время большая доля трансформаторов Чувашии функционирует более 30 лет. Трансформаторы, проработавшие более 25 лет, на сегодняшний день составляют около 65%, что намного усложняет работу энергетиков республики. Отсутствие средств на профилактическую работу обязывает специалистов энергосистемы усилить внимание к диагностике электрооборудования, повышению культуры её эксплуатации, совершенству мастерства работников системы при производстве ремонтных работ.

Накопленный опыт эксплуатации электрооборудования позволил энергетикам республики одними из первых в России определять необходимость проведения капитального ремонта по результатам диагностики оборудования, что даёт возможность экономить немалые материальные средства. Вопрос о необходимости капитального ремонта силового трансформатора решается после комплексного обследования.

Энергетики республики владеют современными методами и аппаратурой для диагностики высоковольтного электрооборудования. В частности, по результатам хроматографического анализа растворённых в масле газов, тепловизионного контроля, а также по результатам полученных осциллограмм токов в контактных системах РПН удалось выявить ряд серьёзных дефектов в электрооборудовании 35...500 кВ. Однако в настоящее время необходимо иметь не только полноценную диагностику, основанную на достижениях технического потенциала последних лет, но и мониторинг электрооборудования в процессе его работы. Особенно это актуально для трансформаторов класса 220...750 кВ, которые по сравнению с трансформаторами 110 кВ имеют мощности на порядок выше и где процессы развития дефектов весьма скоротечны. Но, к сожалению, на сегодняшний день ни одна энергосистема страны не имеет эффективно налаженной аппаратуры автоматического непрерывного контроля за состоянием силовых трансформаторов [1].

1.2. История и основные элементы силовых трансформаторов

Явление, лежащее в основе действия электрического трансформатора, было открыто английским физиком Майклом Фарадеем в 1831 г. при проведении им основополагающих исследований в области электричества. Спустя примерно 45 лет появились первые трансформаторы, содержавшие все основные элементы современных трансформаторов.

Современные трансформаторы превосходят своих предшественников, созданных к началу XIX столетия, по мощности в 500, а по напряжению в 15 раз; их масса в расчёте на единицу мощности снизилась приблизительно в 10 раз, а коэффициент полезного действия, как правило, превышает 99%.

Рассмотрим вкратце принцип работы силового трансформатора.

В трансформаторе обмотка из витков провода, которая подключена к источнику питания и которая порождает магнитное поле, называется первичной. Другая обмотка, в которой под действием этого поля возникает электродвижущая сила (ЭДС), называется вторичной. Индукция между первичной и вторичной обмотками взаимна, т. е. ток, протекающий во вторичной обмотке, индуцирует ЭДС в первичной точно так же, как первичная обмотка индуцирует ЭДС во вторичной обмотке. Более того, поскольку витки первичной обмотки охватывают свои собственные силовые линии, в них самих возникает ЭДС. Это явление, называемое самоиндукцией, наблюдается также и во вторичной обмотке. На явлении взаимной индукции и самоиндукции основано действие трансформатора. Для эффективной работы этого устройства необходимо, чтобы между его обмотками существовала почти идеальная индуктивная связь и каждая из них обладала высокой

самоиндукцией. Это означает, что почти все силовые линии магнитного поля, охватываемые первичной обмоткой, должны также охватываться и вторичной и что количество силовых линий, порождаемых каждой обмоткой при заданной скорости изменения силы тока, должно быть большим. Обоим этим условиям можно удовлетворить, намотав первичную и вторичную обмотки на железный сердечник так, как это сделал Фарадей в своих первых экспериментах. Железо увеличивает количество силовых линий магнитного поля приблизительно в 10 000 раз. О материалах, обладающих таким свойством, говорят, что они имеют высокую магнитную проницаемость. Кроме того, железный сердечник локализует поток магнитной индукции, благодаря чему обмотки трансформатора могут быть пространственно разделены и в то же время индуктивно связаны.

В идеальном трансформаторе все силовые линии проходят через все витки обеих обмоток, и, поскольку изменяющееся магнитное поле порождает одну и ту же ЭДС в каждом витке, суммарная ЭДС, индуцируемая в обмотке, пропорциональна полному числу её витков. Если в трансформаторе не происходит потери энергии, мощность в цепи вторичной обмотки должна быть равна мощности, подводимой к первичной обмотке. Другими словами, произведение напряжения и силы тока во вторичной обмотке должно быть равно произведению напряжения и тока в первичной. Таким образом, токи оказываются обратно пропорциональными отношению напряжений в двух обмотках, и, следовательно, отношение токов обратно пропорционально отношению числа витков в обмотках. Такой подсчёт мощности справедлив лишь в том случае, если токи и напряжения совпадают по фазе; условие высокой самоиндукции обеспечивает пренебрежимо малую величину токов, не совпадающих по фазе.

Для инженеров-электриков идеальный трансформатор представляет собой инструмент, аналогичный рычагу в механике, но вместо преобразований между силой и перемещением трансформатор выполняет преобразования между напряжениями и токами. Вместо отношения плеч силы количественной характеристикой трансформатора является отношение между числом витков в его обмотках. Конечно, идеального трансформатора не существует, однако практически реализованные устройства очень близки к нему.

Железный сердечник является неременной составной частью всех современных силовых трансформаторов, а медь благодаря своему низкому электрическому сопротивлению была и остаётся основным материалом, из которого изготавливают провода для обмоток.

Современный трансформатор мало отличается от трансформаторов начала XIX в. Он по-прежнему состоит из изолированных пластин и обмоток из медного провода (**Рис. 1.6**). Современные трансформаторы могут работать при напряжении 1150 кВ и мощности более 1 млн кВт, а продолжительность их эксплуатации колеблется от 25 до 50 лет.

Параметры, характеризующие идеальный трансформатор, в значительной степени зависят от свойств сердечника, и именно в этой области был достигнут наибольший прогресс. Важнейшее свойство материала, из которого изготавливают сердечники, — это магнитная проницаемость, магнитное насыщение, электрическое сопротивление и потери на гистерезис. Магнитную проницаемость можно

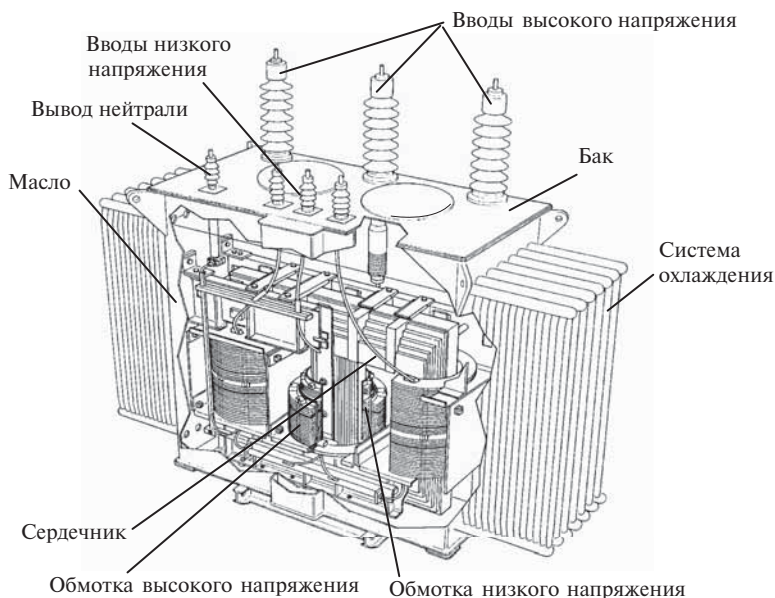


Рис. 1.6. Общий вид силового трансформатора.

представить как количество силовых линий, порождаемых в материале, находящемся во внешнем магнитном поле. Магнитное насыщение — это состояние магнитного материала, при котором его намагниченность достигает предельного значения. Эти два свойства определяют мощностные характеристики сердечника. Электрическое сопротивление материала сердечника важно постольку, поскольку оно позволяет снизить энергетические потери, обусловленные вихревыми токами.

Гистерезис или «эффект запоминания» в магнитных материалах уменьшает коэффициент полезного действия трансформатора. Вследствие взаимодействия между группами «намагниченных» атомов материал продолжает оставаться в намагниченном состоянии. Поэтому, когда напряженность внешнего магнитного поля временно уменьшается, материал реагирует не сразу. В трансформаторе эта задержка приводит к потере энергии на каждом цикле переменного тока.

На протяжении всей истории совершенствования сердечников основные цели, исследуемые инженерами, заключались в том, чтобы повысить магнитную проницаемость, точку насыщения и электрическое сопротивление материала и уменьшить энергетические потери на гистерезис. В этих исследованиях важную роль играет кривая, которая графически описывает соотношения между такими свойствами намагничиваемого материала, как магнитная проницаемость, магнитное насыщение и гистерезис. Эта кривая представляет собой график зависимости магнитной индукции B , или числа силовых линий, индуцируемых в материале, от функции изменяющейся напряженности магнитного поля H . Кривая, характерная для каждого цикла переменного тока, порождающего магнитное поле, имеет форму буквы S с сужающимися концами. Угол её наклона соответствует

величине магнитной проницаемости; точка, в которой кривая выравнивается в верхней части (точка M), соответствует точке магнитного насыщения, а площадь, ограниченная кривой $AMNM'A$, соответствует гистерезису (Рис. 1.7) [13].

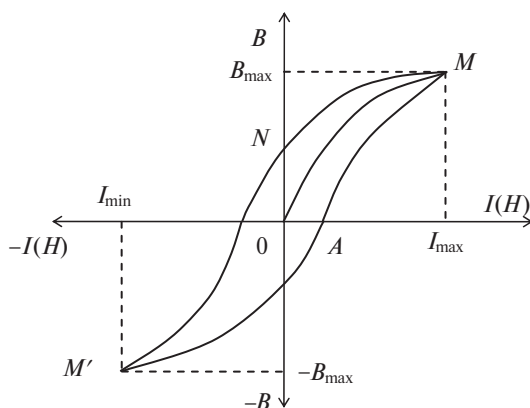


Рис. 1.7. Петля гистерезиса (зависимость индукции B от тока намагничивания I).

Исследователей всегда интересовал вопрос о том, как эти свойства соотносятся с физическими свойствами материала. Каждое свойство зависит от характера взаимодействия между атомами — элементарными магнитами. Это взаимодействие определяется кристаллической структурой железа и присутствием атомов других элементов — примесей. Наука об этих сложных взаимодействиях называется теорией магнитных доменов. Она помогает специалистам в их поисках более совершенных материалов для трансформатора.

Тонкие пластины из листовой стали, из которых состояли сердечники первых трансформаторов, характеризовались значительными потерями на гистерезис. Впоследствии потери постепенно начали снижаться за счёт тщательного подбора стали, поставляемой различными производителями, и к 1900 г. эти потери были уменьшены вдвое. Возникла также проблема, связанная со старением материала: чем дольше эксплуатировался трансформатор, тем выше становились потери на гистерезис.

С 1900 г. рабочие характеристики материала для сердечников были значительно улучшены.

В начале 1900-х годов английский исследователь-металлург Роберт А. Хедфилд провел серию экспериментов, чтобы установить, каким образом добавки других элементов влияют на свойства железа. В ряде публикаций Хедфилд и его коллеги указывали на перспективность использования кремнистой стали в качестве материала для сердечников. При добавлении кремния потери на гистерезис в железе уменьшались, магнитная проницаемость повышалась, эффект старения практически полностью исчезал, а электрическое сопротивление металла возрастало. Однако производство кремнистой стали натолкнулось на трудности, и прошло несколько лет, прежде чем компания Хедфилда поставила заказчикам свою первую тонну трансформаторной стали. В течение последующих 17 лет приме-

ние этого материала позволило электроэнергетической промышленности сэкономить около 340 млн долл. — по тем временам это была колоссальная сумма.

Следующий скачок в технологии производства сердечников был сделан в начале 1930-х годов, когда американский металлург Норман П. Госс, сотрудник компании «Голд Металл Процесс» (Cold Metall Process Company), установил, что при комбинированном воздействии проката и нагревания у кремнистой стали появляются незаурядные магнитные свойства в направлении прокатки. Эффект, физической сущности которого Госс тогда не понимал, заключался в том, что благодаря такой обработке главные оси частиц железа выстраивались в одном направлении, что приводило к коллективному магнитному взаимодействию. Если сердечник, изготовленный из такого материала, был соответствующим образом ориентирован в трансформаторе, магнитное насыщение увеличивалось на 50%, потери на гистерезис сокращались в 4 раза, а магнитная проницаемость возрастала в 5 раз.

Поскольку теперь металл нужно было специальным образом ориентировать в сердечнике, технологию производства сердечников также потребовалось изменить. Уже нельзя было просто штамповать *III*-образные пластины из сплошных стальных листов. Чтобы добиться оптимальных характеристик, нужно было вырезать каждую ножку *III* отдельно. До 1941 г. открытие Госса не нашло широкого применения в производстве, но в последующий период оно сыграло важную роль в дальнейшем усовершенствовании трансформаторов [14].

Уменьшение габаритов трансформатора главным образом было достигнуто с помощью более эффективных методов отвода тепла. В первое время масло, в которое погружали трансформаторы, циркулировало в них за счёт конвекции. В настоящее время для отвода тепла от масла применяются значительно более эффективные системы. Многие устройства охлаждаются при помощи вентиляторов и внешних радиаторов, через которые масло циркулирует посредством конвекции или использования специальных насосов.

Современный трансформатор — это сложное устройство, состоящее из большого числа элементов, определяемых его типом, назначением и мощностью. Технологический процесс сборки завершает производственный цикл изготовления трансформатора. Но прежде чем в сборочный цех или на сборочный участок поступят отдельные узлы и элементы его конструкций, они должны быть заранее изготовлены в других цехах или на участках производства.

Основными поступающими на сборку элементами силового трансформатора являются: магнитопровод, обмотки, детали изоляции, переключающие устройства для регулирования напряжения, бак, расширитель, вводы на все напряжения трансформатора, контрольные и защитные приборы и, естественно, масло, которое должно быть залито в трансформатор [15...22]. На **Рис. 1.8** показаны основные элементы конструкции современного трансформатора.

Бак

Бак масляного трансформатора представляет собой резервуар для масла, внутри которого устанавливается активная часть трансформатора. Бак является также опорной конструкцией, на которой устанавливаются все основные узлы

трансформатора (навесная система охлаждения, высоковольтные вводы совместно с трансформаторами тока, устройства регулирования напряжения, расширитель и т. д.). Форма и размеры баков в плане и по высоте определяются конфигурацией и размерами активной части трансформатора с учётом необходимости размещения вводов, переключателей, отводов и др.

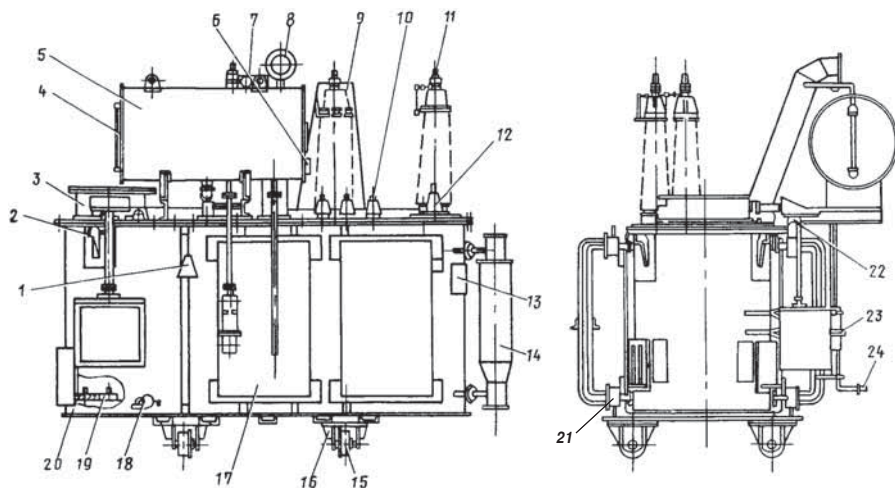


Рис. 1.8. Основные узлы и детали силового трансформатора.

1 — термосигнализатор; 2 — крюк для подъёма трансформатора; 3 — регулятор напряжения; 4 — маслоуказатель; 5 — расширитель; 6 — реле уровня масла; 7 — патрубок для соединения предохранительной трубы с расширителем; 8 — предохранительная труба; 9 — цилиндр для защиты ввода во время транспортировки; 10 — ввод НН; 11 — ввод ВН; 12 — ввод нейтрали; 13 — шиток изделия; 14 — фильтр термосифонный; 15 — каток; 16 — каретка; 17 — радиатор; 18 — пробка для взятия пробы масла; 19 — планка; 20 — бак трансформатора; 21 — задвижка для слива масла; 22 — газовое реле; 23 — воздухоосушитель; 24 — кран для доливки масла.

Требования к транспортабельности также значительно влияют на форму баков силового трансформатора, так как вместе с транспортёром он должен вписываться в соответствующий железнодорожный габарит. В целях максимального снижения грузоподъёмности подъёмных средств на подстанции современная конструкция бака в зависимости от веса активной части предусматривает для её выемки верхний или нижний разъём бака. При нижнем разъёме (как правило, у мощных трансформаторов) нет необходимости поднимать для осмотра активную часть. Для производства ремонтных работ на активной части достаточно поднять верхнюю съёмную часть (колокол), вес которой не превышает 10...15% полного веса трансформатора. Уплотнение разъёма обеспечивается одной или двумя параллельно расположенными резиновыми прокладками. Герметичность уплотнения достигается болтовым соединением.

Для передвижения в пределах подстанции по железнодорожным рельсам как в продольном, так и в поперечном направлении трансформаторы имеют переставные катки. На баке предусмотрены приспособления для подъёма его краном