

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

AB — автоматический выключатель

AK — 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].

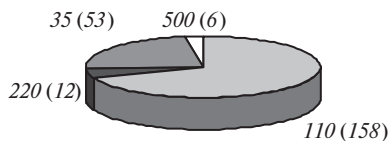


Рис. 1.1. Количество установленных трансформаторов в системе энергетики Чувашской Республики в зависимости от класса напряжения.

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

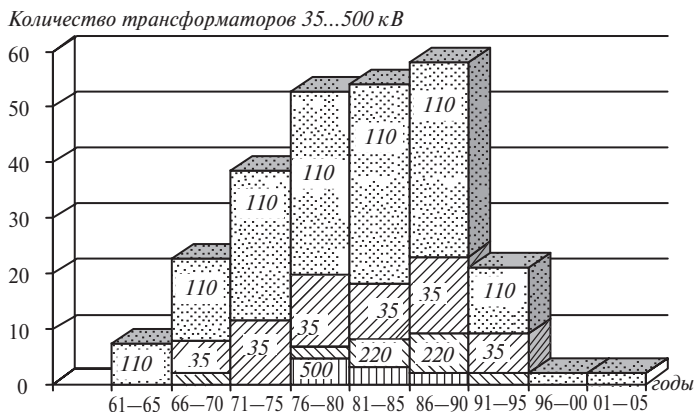


Рис. 1.2. Диаграмма ввода в эксплуатацию трансформаторов по годам.

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

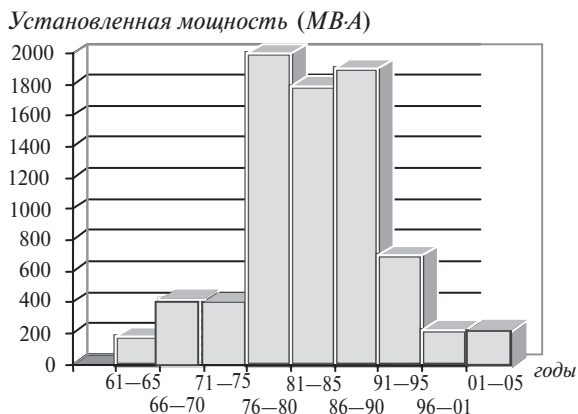


Рис. 1.3. Диаграмма силовых трансформаторов, вводимых в эксплуатацию по сумме установленной мощности.

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

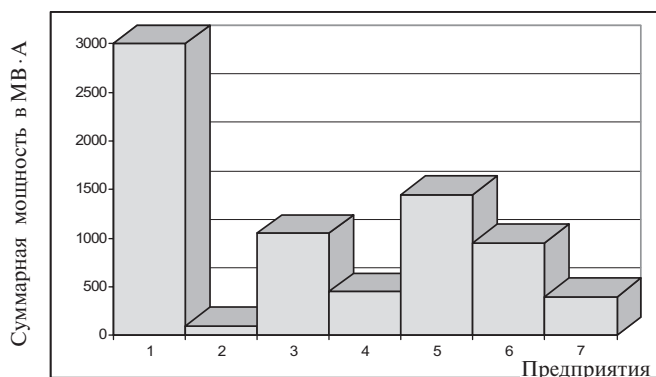


Рис. 1.4. Суммарная установленная мощность трансформаторов по предприятиям энергосистемы.

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).

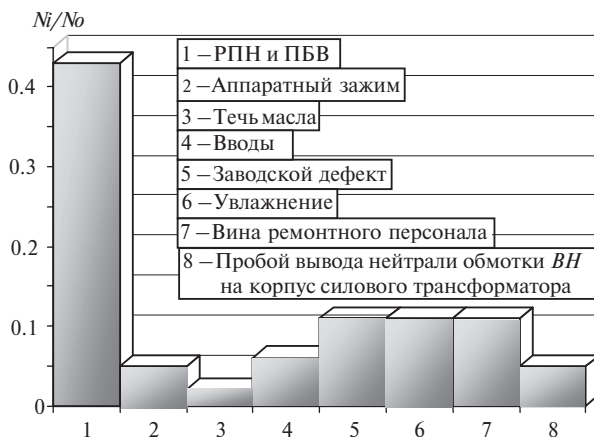


Рис. 1.5. Анализ отказов силовых трансформаторов класса напряжения 110 кВ Чувашской энергосистемы.

N_i — количество отказов от i вида дефекта, где $i = 1...8$;
 N_0 — 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.