

УДК 621.314.21(03)

ББК 31.261.8

С36

*Книга издается при финансовой поддержке Всероссийского электротехнического института*

Авторы и составители: Г. Н. Александров<sup>8</sup>, В. Ш. Аншин<sup>1</sup>, А. Е. Воронов<sup>1</sup>, Л. Л. Глазунова<sup>2</sup>, И. С. Диханов<sup>3</sup>, С. Д. Кассихин<sup>5</sup>, Л. В. Лейтес<sup>2</sup>, С. Д. Лизунов<sup>1</sup>, А. К. Лоханин<sup>2</sup>, А. И. Лурье<sup>2</sup>, Г. А. Маликова<sup>1</sup>, Т. И. Морозова<sup>2</sup>, Ю. С. Пинталь<sup>6</sup>, В. В. Порудоминский<sup>1</sup>, В. В. Соколов<sup>4</sup>, Ю. П. Строганов<sup>1</sup>, В. И. Тищенко<sup>1</sup>, Я. Л. Фишлер<sup>7</sup>, Л. Н. Шифрин<sup>1</sup>, Г. Я. Шнейдер<sup>1</sup>

**ПРИМЕЧАНИЕ:**

1 — ОАО «Электрозавод», 2 — ВЭИ, 3 — ВИТ, 4 — НИЦ «Запорожсервис», 5 — ЗАО «Изолятор», 6 — МЭИ (Технический университет), 7 — Уралэлектротяжмаш, 8 — С.П.б. ГПУ.

**Силовые трансформаторы.** Справочная книга / Под ред. С36 С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. — 616 с.

ISBN 5-98073-004-4

В книге изложены основные практические вопросы современных высоковольтных трансформаторов. Авторы подготовили и систематизировали материал справочной книги, основываясь на собственном многолетнем опыте и многочисленных публикациях в отечественной и зарубежной периодической литературе.

Книга рассчитана на специалистов в области электроэнергетического оборудования, инженерно-технических работников трансформаторных заводов, персонала энергетических систем, связанного с эксплуатацией трансформаторов, а также может быть использована как пособие для студентов энергетических вузов.

ISBN 5-98073-004-4

© ГУП «Всероссийский электротехнический институт», 2004

## СОДЕРЖАНИЕ

<p>Предисловие ..... 15</p> <p>Глава первая. <b>Охлаждение</b> ..... 16</p> <p>1. Потери в трансформаторе ..... 16</p> <p>    1.1. Составляющие потерь ..... 16</p> <p>    1.2. Потери короткого замыкания ..... 16</p> <p>    1.3. Потери холостого хода ..... 16</p> <p>2. Нормы нагрева ..... 16</p> <p>    2.1. Основные принципы установления норм нагрева трансформаторов ..... 16</p> <p>    2.2. Условия окружающей среды ..... 17</p> <p>    2.3. Изоляционные материалы, применяемые в трансформаторостроении и нормы нагрева трансформаторов ..... 17</p> <p>    2.4. Стандарты, нормирующие требования, связанные с нагревом и охлаждением трансформаторов ..... 18</p> <p>3. Системы охлаждения трансформаторов ..... 18</p> <p>    3.1. Обозначение систем охлаждения ..... 18</p> <p>    3.2. Естественная циркуляция масла и воздуха (система М) ..... 18</p> <p>    3.3. Естественная циркуляция масла и принудительная циркуляция воздуха (система Д) ..... 19</p> <p>    3.4. Принудительная циркуляция масла и воздуха (система ДЦ) ..... 19</p> <p>    3.5. Система с направленной циркуляцией масла в обмотках (система НДЦ) ..... 20</p> <p>    3.6. Система с принудительной циркуляцией масла и воды (система Ц) ..... 21</p> <p>4. Процессы теплопередачи и тепловые расчеты ..... 21</p> <p>    4.1. Общее понятие о теплообмене, простейшая модель процессов теплопередачи ..... 21</p> <p>    4.2. Реальные условия теплопередачи в обмотках и магнитопроводе ..... 24</p> <p>    4.3. Особенности передачи тепла при принудительной циркуляции масла и воздуха и направленной циркуляции масла ..... 25</p> <p>    4.4. Нестационарные (переходные) процессы нагрева и охлаждения ..... 26</p>	<p>    4.5. Тепловой расчет обмоток и магнитопровода ..... 29</p> <p>        4.5.1. Основные принципы расчета ..... 29</p> <p>        4.5.2. Краткая характеристика обмоток ..... 29</p> <p>        4.5.3. Тепловой расчет катушечных обмоток ..... 30</p> <p>        4.5.4. Тепловой расчет цилиндрических обмоток ..... 31</p> <p>        4.5.5. Тепловой расчет магнитной системы ..... 31</p> <p>4.6. Наружное охлаждение и вопросы выбора систем охлаждения ..... 31</p> <p>    Литература к главе I ..... 32</p> <p>Глава вторая. <b>Нагрузочная способность</b> ..... 33</p> <p>1. Общие положения ..... 33</p> <p>2. Определения ..... 33</p> <p>    2.1. Распределительный трансформатор ..... 33</p> <p>    2.2. Силовой трансформатор средней мощности ..... 33</p> <p>    2.3. Большой силовой трансформатор ..... 34</p> <p>    2.4. Режим циклических нагрузок ..... 34</p> <p>    2.5. Кратковременная аварийная нагрузка ..... 34</p> <p>3. Основные ограничения и воздействия режимов нагрузок, превышающих номинальные значения ..... 34</p> <p>    3.1. Последствия воздействия нагрузки выше номинальной ..... 34</p> <p>    3.2. Предельные значения тока и температуры ..... 36</p> <p>    3.3. Специальные ограничения ..... 36</p> <p>        3.3.1. Распределительные трансформаторы (мощностью до 2500 кВ·А) ..... 36</p> <p>        3.3.2. Трансформаторы средней мощности ..... 37</p> <p>        3.3.3. Большие трансформаторы ..... 37</p> <p>4. Определение температуры ..... 38</p> <p>    4.1. Непосредственное измерение температуры наиболее нагретой точки ..... 38</p> <p>    4.2. Расчетные тепловые характеристики ..... 38</p>
--	--

5.	Старение изоляции . . . . .	40	3.1.	Принципы выполнения устройств РПН . . . . .	57
5.1.	Закон теплового старения . . . . .	40	3.2.	Основные схемы устройств РПН . . . . .	58
5.2.	Относительная скорость теплового старения . . . . .	40	4.	Схемы трансформаторов с РПН . . . . .	64
5.3.	Расчет уменьшения срока службы . . . . .	41	4.1.	Трансформаторы со встроенным регулированием напряжения . . . . .	64
6.	Окружающая температура (температура окружающей среды) . . . . .	41	4.2.	Автотрансформаторы со встроенным регулированием напряжения и линейные регулировочные трансформаторы . . . . .	65
6.1.	Средневзвешенная (эквивалентная) окружающая температура $\theta_E$ . . . . .	42	5.	Типы и элементы конструкции устройств РПН . . . . .	66
6.2.	Окружающая температура для расчета температуры наиболее нагретой точки . . . . .	42	5.1.	Классификация устройств РПН . . . . .	66
6.3.	Непрерывно меняющаяся окружающая температура . . . . .	42	5.2.	Контакты устройств РПН и условия их работы . . . . .	67
6.4.	Поправки окружающей температуры для трансформаторов, установленных в помещениях . . . . .	42	5.3.	Электрические приводные механизмы переключающих устройств . . . . .	68
7.	Графики и таблицы допустимых нагрузок . . . . .	43	5.4.	Компоновка переключающих устройств на трансформаторе . . . . .	69
7.1.	Принятые допущения . . . . .	43	6.	Автоматический контроль напряжения на трансформаторах . . . . .	70
7.2.	Метод преобразования фактического графика нагрузки в эквивалентный двухступенчатый график . . . . .	44	7.	Особенности испытаний и эксплуатации регулируемых трансформаторов . . . . .	70
7.2.1.	График нагрузки с одним максимумом . . . . .	44	7.1.	Испытания регулируемых трансформаторов и переключающих устройств . . . . .	70
7.2.2.	График нагрузки с двумя максимумами равной амплитуды, но различной продолжительности . . . . .	44	7.2.	Общие вопросы эксплуатации и контроль износа переключающих устройств . . . . .	71
7.2.3.	Графики нагрузки с последовательными максимумами . . . . .	44	8.	Обзор современного состояния и перспективы развития переключающих устройств . . . . .	72
7.3.	Нормальная продолжительная нагрузка . . . . .	44	8.1.	Производство переключающих устройств в Российской Федерации и странах СНГ . . . . .	72
7.4.	Нормальный циклический нагрузочный режим . . . . .	44	8.2.	Производство переключающих устройств в других странах . . . . .	72
7.5.	Аварийная циклическая нагрузка . . . . .	50	8.3.	Перспективы развития переключающих устройств . . . . .	72
	Литература к главе 2. . . . .	50	9.	Термины и определения, относящиеся к устройствам переключения ответвлений трансформаторов (переключающим устройствам) . . . . .	73
	Приложение 2.1. Эквивалентные мощности и полные сопротивления короткого замыкания автотрансформаторов . . . . .	50		Литература к главе 3. . . . .	75
	Приложение 2.2. Трансформаторы средней и большой мощности с охлаждением ОФ, $t = 8$ ч. Допустимые нагрузки и соответствующее суточное сокращение срока службы . . . . .	51			
<b>Глава третья. Регулирование напряжения . . . . .</b>					
1.	Требования стабилизации напряжения и регулирование напряжения в энергосистемах и в электроустановках потребителей. . . . .	53	<b>Глава четвертая. Снижение потерь. Капитализация потерь . . . . .</b>		
2.	Трансформаторы с переключением ответвлений без возбуждения . . . . .	54	1.	Введение . . . . .	76
3.	Регулирование под нагрузкой (РПН) . . . . .	57	2.	Снижение потерь . . . . .	76
			2.1.	Потери в трансформаторах . . . . .	76
			2.2.	Потери холостого хода . . . . .	76
			2.3.	Аморфная сталь . . . . .	77
			2.4.	Нагрузочные потери . . . . .	78
			2.4.1.	Снижение потерь в проводе . . . . .	78
			2.4.2.	Снижение добавочных потерь . . . . .	78

2.4.3. Расчетное определение потока рассеяния .....	79	5. Режимы работы автотрансформаторов .....	111
2.5. Измерение потерь .....	79	5.1. Расположение обмоток автотрансформаторов .....	111
2.5.1. Измерение потерь холостого хода .....	79	5.2. Режимы работы .....	112
2.5.2. Измерение нагрузочных потерь .....	80	6. Особенности перенапряжений в автотрансформаторах .....	113
3. Капитализация потерь .....	80	7. Третьичная обмотка автотрансформатора .....	115
3.1. Полная стоимость трансформатора и его оптимизация .....	80	7.1. Стабилизация междуфазовых напряжений при несбалансированной нагрузке .....	115
3.2. Коэффициент капитализации. Удельная капитализованная стоимость потерь .....	81	7.2. Подавление третьей и кратной ей гармоник .....	116
3.3. Оценка удельной капитализованной стоимости потерь холостого хода и нагрузочных потерь .....	82	7.3. Уменьшение сопротивления нулевой последовательности .....	116
4. Оптимизация полной стоимости .....	83	7.3.1. Сопротивление нулевой последовательности со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, при разомкнутой вторичной обмотке .....	116
5. Заключение .....	85	7.4. Подключение источников реактивной мощности или питание местных сетей .....	117
Литература к главе 4 .....	85	8. Преимущества и недостатки автотрансформаторов .....	118
<b>Глава пятая. Схемы соединения обмоток. Параллельная работа</b> .....	86	8.1. Преимущества .....	118
1. Условия эксплуатации .....	86	8.2. Недостатки .....	118
2. Векторная диаграмма напряжений трансформатора .....	87	8.3. Условия применения автотрансформаторов .....	118
3. Группы соединения обмоток .....	88	Литература к главе 6 .....	119
4. Измерение группы соединения обмоток .....	92	<b>Глава седьмая. Импульсные перенапряжения</b> .....	120
5. Фазировка и кольцевание сети .....	94	1. Введение .....	120
6. Коэффициент трансформации, циркулирующий ток .....	96	2. Расчет начального распределения напряжения .....	120
7. Распределение тока нагрузки .....	99	3. Индуктивные параметры схемы .....	122
8. Экономика параллельной работы .....	99	4. Перенапряжения в однородных обмотках .....	123
9. Схема замещения и особенности трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов .....	100	5. Факторы, влияющие на снижение перенапряжений в обмотках .....	129
10. Данные, необходимые для определения возможности параллельной работы .....	103	6. Наведенные перенапряжения .....	131
Литература к главе 5 .....	103	7. Особенности переходных процессов в автотрансформаторах .....	131
Приложение 5.1. Условия параллельного включения трансформаторов .....	103	8. Особенности переходных процессов в трехфазных трансформаторах с изолированной нейтралью .....	132
Литература к приложению 5.1 .....	103	Литература к главе 7 .....	132
<b>Глава шестая. Автотрансформаторы</b> .....	104	<b>Глава восьмая. Изоляция</b> .....	133
1. Основные принципы .....	104	1. Введение .....	133
2. Эквивалентные размеры .....	104	2. Выбор изоляции между обмотками трансформатора .....	135
3. Регулирование напряжения в автотрансформаторах .....	105	2.1. Изоляция в средней части обмоток .....	135
3.1. Регулирование на стороне ВН или СН .....	105	2.2. Изоляция края обмотки .....	138
3.2. Регулирование напряжения в нейтрали .....	107		
3.3. Сравнение методов регулирования на основе типовой мощности .....	108		
4. Напряжение короткого замыкания автотрансформаторов .....	110		

2.3. Определение размеров изоляционных промежутков главной изоляции . . . . .	138
2.4. Оценка электрической прочности маслобарьерной изоляции при длительном воздействии рабочего напряжения . . . . .	139
3. Изоляция отводов . . . . .	140
3.1. Изолированный отвод-плоскость . . . . .	140
3.2. Изоляционный промежуток между отводом и обмоткой . . . . .	141
3.3. Изоляция крепления отводов . . . . .	142
3.4. Выбор изоляционных промежутков от отводов до заземленных деталей с острыми кромками . . . . .	143
4. Продольная изоляция . . . . .	145
4.1. Межжатушечная изоляция . . . . .	145
4.2. Витковая изоляция . . . . .	146
Литература к главе 8. . . . .	147
Приложение 8.1. Зависимость напряжения зажигания частичных разрядов в изоляции масляных трансформаторов от времени . . . . .	147
Литература к приложению 8.1 . . . . .	150
<b>Глава девятая. Трансформаторное масло . . . . .</b>	<b>151</b>
1. Введение . . . . .	151
2. Применение трансформаторного масла . . . . .	151
3. Характеристики трансформаторного масла . . . . .	152
3.1. Физические характеристики . . . . .	152
3.2. Химические характеристики . . . . .	153
3.3. Основные диэлектрические характеристики . . . . .	154
3.3.1. Электрическая прочность масла . . . . .	154
3.3.2. Диэлектрические потери и электропроводность . . . . .	155
3.3.3. Влияние влаги на диэлектрические потери в масле . . . . .	156
3.4. Причины повышенных диэлектрических потерь в свежих маслах . . . . .	157
3.5. Причины повышения tgδ масла при старении в эксплуатации, связанные с его качеством . . . . .	157
3.5.1. Влияние кислородосодержащих соединений на tgδ масла . . . . .	158
3.6. Характеристики масла при низких температурах . . . . .	158
3.7. Газостойкость трансформаторного масла . . . . .	160
3.8. Электрическая прочность масла при импульсном напряжении . . . . .	161
4. Старение трансформаторных масел . . . . .	161
4.1. Влияние температуры на скорость окисления масла . . . . .	162
4.2. Влияние продуктов окисления на целлюлозную изоляцию . . . . .	162
4.3. Совместимость масла с твердыми материалами . . . . .	162
5. Контроль масла в эксплуатации . . . . .	163
5.1. Введение . . . . .	163
5.2. Состояние масла в эксплуатации . . . . .	163
5.3. Защита масла от увлажнения . . . . .	164
5.4. Контроль масла в эксплуатации . . . . .	164
5.4.1. Периодичность и объем испытаний масла в эксплуатации . . . . .	164
5.4.2. Испытания масла из трансформаторов в эксплуатации . . . . .	165
6. Обработка, регенерация и замена масла . . . . .	168
6.1. Обработка масла . . . . .	168
6.2. Регенерация масла . . . . .	168
6.3. Замена масла . . . . .	169
7. Причины ухудшения характеристик масла в высоковольтных вводах . . . . .	169
7.1. Процессы воскообразования в бумажномасляной изоляции негерметичных высоковольтных вводов, заполненных маслом марки ГК . . . . .	169
7.2. Причины повреждения вводов на напряжение 110—750 кВ на силовых трансформаторах и шунтирующих реакторах . . . . .	170
Литература к главе 9 . . . . .	171
Приложение 9.1. Показатели качества свежих отечественных трансформаторных масел . . . . .	172
Приложение 9.2. Требования к качеству свежих масел, подготовленных к заливке в новое электрооборудование . . . . .	174
Приложение 9.3. Требования к качеству эксплуатационных масел . . . . .	176
Приложение 9.4. Нормативы МЭК 60296(1982) для свежего трансформаторного масла . . . . .	178
Приложение 9.5. Стандартные методы испытаний жидких диэлектриков . . . . .	180
Приложение 9.6. Характеристики масла некоторых европейских фирм . . . . .	182
Приложение 9.7. Спецификация трансформаторных масел в соответствии с американскими стандартами ASTM . . . . .	184
<b>Глава десятая. Сушка и дегазация изоляции на заводе . . . . .</b>	<b>186</b>
1. Требования к сушке . . . . .	186
2. Сушка обмоток . . . . .	187

3. Сушка трансформаторов . . . . .	188	2.3. Характеристики вибрации . . . . .	246
3.1. Вакуумная сушка . . . . .	188	3. Источники вибрации и шума в трансформаторах . . . . .	247
3.2. Вакуумная сушка в парах теплоносителя . . . . .	190	3.1. Магнитострикция . . . . .	248
Приложение 10.1. Равновесное влагосодержание по данным разных авторов . . . . .	193	3.2. Электромагнитные силы . . . . .	248
Литература к главе 10 . . . . .	194	3.3. Влияние системы охлаждения . . . . .	249
<b>Глава одиннадцатая. Стойкость при токах короткого замыкания . . . . .</b>	<b>195</b>	3.4. Влияние конструкции и режимов работы . . . . .	250
1. Введение. Общие замечания, требования к стойкости трансформаторов при коротких замыканиях (КЗ) . . . . .	195	3.4.1. Зависимость шума трансформатора от размеров магнитной системы . . . . .	250
2. Ток КЗ, напряжение КЗ . . . . .	195	3.4.2. Влияние массы и электрической мощности . . . . .	250
3. Электромагнитные силы . . . . .	200	3.4.3. Влияние индукции . . . . .	251
4. Магнитное поле . . . . .	203	3.4.4. Влияние бака . . . . .	251
5. Осевые силы в обмотках . . . . .	205	3.4.5. Влияние режимов работы трансформатора . . . . .	251
6. Радиальные силы в обмотках . . . . .	211	3.4.6. Качество питающего напряжения . . . . .	252
7. Тангенциальные силы . . . . .	215	4. Методы измерений . . . . .	252
8. Термическая стойкость трансформаторов при КЗ . . . . .	218	4.1. Контроль шума трансформаторов . . . . .	252
9. Испытания на стойкость при КЗ . . . . .	220	4.2. Контроль вибраций . . . . .	255
10. Отраслевая методика расчета и система программ РЭСТ(ВЭИ) для расчета электродинамической стойкости трансформаторов при КЗ . . . . .	225	4.3. Средства виброакустических измерений и испытаний . . . . .	255
Литература к главе 11 . . . . .	225	4.3.1. Аппаратура для измерения шумовых характеристик . . . . .	255
Приложение 11.1 . . . . .	226	4.3.2. Аппаратура для измерения вибрационных характеристик . . . . .	256
<b>Глава двенадцатая. Токи включения . . . . .</b>	<b>227</b>	5. Методы снижения шума трансформаторов . . . . .	256
1. Введение . . . . .	227	5.1. Улучшение магнитных характеристик электротехнической стали и конструкции магнитной системы . . . . .	257
2. Схема замещения для расчета режимов трансформаторов с насыщением стали . . . . .	227	5.2. Возможности снижения шума обмоток . . . . .	258
3. Расчет процесса включения трансформатора на холостой ход (ХХ) . . . . .	229	5.3. Снижение шума, создаваемого баком . . . . .	258
4. Формула для максимального броска тока ХХ и параметры, входящие в эту формулу . . . . .	231	5.4. Снижение шума вентиляторов . . . . .	258
5. Затухание бросков намагничивающего тока . . . . .	233	5.5. Снижение шума трансформаторов малой мощности . . . . .	258
6. Рекомендации по снижению бросков намагничивающего тока . . . . .	235	5.6. Вибро- и звукоизоляция активной части . . . . .	259
7. Магнитное поле, электродинамические силы в присутствии намагничивающего тока . . . . .	239	6. Снижение вибрации шунтирующих и заземляющих реакторов . . . . .	259
Литература к главе 12 . . . . .	241	7. Внешние меры снижения шума . . . . .	260
Приложение 12.1 . . . . .	242	8. Активное подавление шума . . . . .	261
<b>Глава тринадцатая. Ограничение шума и вибраций трансформаторов и реакторов . . . . .</b>	<b>243</b>	9. Заключение . . . . .	262
1. Введение . . . . .	243	Литература к главе 13 . . . . .	262
2. Физические основы звука и вибрации . . . . .	243	<b>Глава четырнадцатая. Устройства контроля, защиты и охлаждения (комплектующие изделия) . . . . .</b>	<b>263</b>
2.1. Характеристики звука . . . . .	243	1. Классификация комплектующих изделий трансформаторов . . . . .	263
2.2. Распространение звука . . . . .	244	2. Контрольные и сигнальные устройства . . . . .	263

2.1. Указатели уровня масла (маслоуказатели) . . . . .	263
2.2. Термодатчики . . . . .	264
2.3. Манометры и мановакуумметры . . . . .	265
2.4. Встроенные трансформаторы тока . . . . .	265
3. Защитные устройства . . . . .	267
3.1. Расширители . . . . .	267
3.2. Клапан предохранительный . . . . .	269
3.3. Реле давления . . . . .	269
3.4. Газовое реле . . . . .	270
3.5. Клапан отсечной . . . . .	272
3.6. Устройство КИВ . . . . .	272
4. Устройства защиты масла от воздействий окружающей среды . . . . .	273
4.1. Воздухоосушитель . . . . .	273
4.2. Пленочная защита . . . . .	274
4.3. Герметичные трансформаторы с гофрированными баками . . . . .	274
5. Средства очистки масла . . . . .	275
5.1. Термосифонный и адсорбционный фильтры . . . . .	276
5.2. Маслоочистительный фильтр . . . . .	277
6. Охлаждающие устройства . . . . .	277
6.1. Система охлаждения с естественной циркуляцией масла М (ONAN) . . . . .	278
6.2. Система охлаждения с естественной циркуляцией масла и принудительной циркуляцией воздуха (с дутьем) Д(ONAF) . . . . .	279
6.3. Система охлаждения с принудительной циркуляцией масла и с дутьем ДЦ (OFAF) . . . . .	279
6.4. Система охлаждения с принудительной циркуляцией масла и воды Ц(OFWF) . . . . .	280
6.5. Групповые охлаждающие устройства . . . . .	282
6.6. Электронасосы . . . . .	282
7. Трубопроводная запорная арматура . . . . .	283
7.1. Плоские затворы . . . . .	283
7.2. Вентили . . . . .	283
7.3. Задвижки . . . . .	283
7.4. Пробки . . . . .	284
8. Системы мониторинга состояния трансформаторов . . . . .	284
Литература к главе 14 . . . . .	284
Приложение 14.1. Технические характеристики . . . . .	285
<b>Глава пятнадцатая. Высоковольтные вводы . . . . .</b>	<b>290</b>
1. Общие сведения о высоковольтных вводах . . . . .	290
2. Основные технические характеристики вводов . . . . .	294
3. Конструкции вводов . . . . .	297
4. Контроль состояния вводов в эксплуатации . . . . .	303
Литература к главе 15 . . . . .	303
<b>Глава шестнадцатая. Испытания . . . . .</b>	<b>304</b>
1. Введение . . . . .	304
2. Виды испытаний . . . . .	304
3. Подготовка трансформаторов к испытаниям . . . . .	305
4. Испытательные нормы . . . . .	306
4.1. Испытание электроизоляционной жидкости . . . . .	306
4.2. Основные характеристики трансформатора . . . . .	306
4.3. Испытания изоляции переменным напряжением . . . . .	307
4.4. Испытания импульсными напряжениями . . . . .	307
4.5. Испытания переключающих устройств . . . . .	310
4.6. Испытание бака на плотность . . . . .	311
4.7. Испытания на нагрев . . . . .	311
4.8. Испытания на механическую прочность . . . . .	312
4.9. Измерение сопротивления нулевой последовательности . . . . .	312
5. Методы испытаний . . . . .	312
5.1. Измерение сопротивлений обмоток постоянному току . . . . .	312
5.2. Проверка коэффициента трансформации и группы соединения обмоток . . . . .	313
5.3. Измерение потерь и тока холостого хода, потерь и напряжения короткого замыкания . . . . .	314
5.4. Измерение сопротивления нулевой последовательности . . . . .	315
5.5. Измерения диэлектрических характеристик изоляции . . . . .	316
5.6. Испытания электрической прочности изоляции . . . . .	316
5.7. Испытания на нагрев . . . . .	319
5.8. Механические испытания бака и активной части . . . . .	322
5.9. Испытания переключающих устройств . . . . .	322
6. Испытательные стенды и их оборудование . . . . .	322
6.1. Силовое оборудование . . . . .	323
6.2. Средства измерений . . . . .	324
6.3. Специальное оборудование для управления и регулирования . . . . .	326
Литература к главе 16 . . . . .	326
<b>Глава семнадцатая. Установка на месте эксплуатации . . . . .</b>	<b>327</b>
1. Введение . . . . .	327
2. Опыт эксплуатации, как критерий качества работ при монтаже . . . . .	327

2.1. Механизм ухудшения состояния изоляции в процессе транспортирования, хранения и монтажа . . .	328	9.4.6. Сушка горячим воздухом	339
2.2. Увлажнение при прямом контакте с сырым воздухом . . . . .	328	9.4.7. Критерии окончания сушки . . . . .	339
3. Перевозка и разгрузка трансформаторов . . . . .	328	9.5. Заливка маслом и пропитка . .	339
3.1. Перевозка железнодорожным транспортом . . . . .	328	9.6. Обработка масла . . . . .	340
3.2. Перевозка автомобильным транспортом . . . . .	329	9.6.1. Методы сушки масла . . . .	340
3.3. Перевозка транспортом других видов . . . . .	329	9.6.2. Очистка масла от механических частиц . . . . .	340
3.4. Погрузочно-разгрузочные и такелажные работы . . . . .	330	10. Испытания трансформаторов перед вводом в эксплуатацию . . . . .	341
4. Хранение и консервация трансформаторов . . . . .	330	11. Опробование и ввод в эксплуатацию	343
5. Опасность ухудшения качества изоляции при транспортировании и хранении . . . . .	331	Приложение 17.1. Контроль и оценка состояния изоляции трансформаторов перед вводом в эксплуатацию . . . . .	344
5.1. Увлажнение . . . . .	331	Приложение 17.2. Объем проверки и требования к трансформаторному маслу. Вакуумирование и заливка трансформатора маслом . .	345
5.2. Снижение пропитанности изоляции . . . . .	331	Приложение 17.3. Отбор и определение влагосодержания деталей макета твердой изоляции . . . . .	345
5.3. Насыщение изоляции газом . . . .	331	Приложение 17.4. Подсушка изоляции трансформатора с использованием установки «Иней» . . . . .	346
6. Методы защиты изоляции от увлажнения при перевозке и хранении . . . .	332	Приложение 17.5. Ревизия трансформатора с подъемом съемной части бака и активной части . .	348
6.1. Выбор методов и условий хранения . . . . .	332	Приложение 17.6. Сушка изоляции трансформатора индукционным методом . . . . .	348
6.2. Защита от увлажнения при вскрытии бака . . . . .	332	Литература к главе 17 . . . . .	348
7. Контроль увлажнения изоляции после хранения . . . . .	333	Глава восемнадцатая. <b>Координация изоляции</b> . . . . .	349
7.1. Оценка увлажнения изоляции во время транспортирования и хранения . . . . .	333	1. Уровень напряжения . . . . .	349
7.2. Методы определения влагосодержания изоляции . . . . .	333	2. Уровень изоляции электрооборудования . . . . .	350
8. Порядок проведения монтажных работ . . . . .	333	3. Процедура координации изоляции	351
8.1. Подготовительные работы. Документальное сопровождение монтажных работ . . . . .	334	4. Снижение уровня изоляции . . . . .	354
8.2. Монтаж составных частей . . . .	335	Приложение 18.1 . . . . .	355
9. Обработка изоляции трансформаторов перед вводом в эксплуатацию . . . .	336	Литература к главе 18 . . . . .	371
9.1. Требования к состоянию изоляции перед вводом в эксплуатацию . . . .	336	Глава девятнадцатая. <b>Состояние изоляции в эксплуатации</b> . . . . .	372
9.2. Вакуумная обработка активной части . . . . .	336	1. Ухудшение состояния изоляции в эксплуатации . . . . .	372
9.3. Прогрев трансформатора . . . .	337	2. Влагосодержание . . . . .	372
9.4. Методы сушки изоляции . . . . .	337	2.1. Источники воды в трансформаторе . . . . .	372
9.4.1. Циркуляция горячего сухого масла . . . . .	338	2.2. Распределение воды в изоляции . . . . .	373
9.4.2. Термовакuumная диффузия . . . . .	338	2.3. Снижение электрической прочности . . . . .	376
9.4.3. Метод холодного вакуума	338	2.4. Классы влагосодержания . . . .	378
9.4.4. Метод разбрызгивания масла . . . . .	338	2.5. Влияние на механическую прочность и скорость температурного старения . . . . .	378
9.4.5. Циклическая сушка . . . . .	339	3. Газосодержание . . . . .	379



3.1. Растворимость газов в трансформаторном масле .....	379
3.2. Снижение электрической прочности масла, содержащего растворенный газ .....	380
4. Содержание твердых частиц в масле .....	381
4.1. Источники образования твердых частиц, их состав .....	381
4.2. Оценка результатов определения количества частиц .....	381
4.3. Влияние частиц на электрическую прочность .....	382
5. Старение изоляции .....	383
5.1. Старение трансформаторного масла .....	383
5.2. Старение целлюлозной изоляции .....	383
6. Заключение .....	386
Литература к главе 19 .....	386

<b>Глава двадцатая. Пожаробезопасность</b> .....	387
1. Введение .....	387
2. Статистические данные о повреждаемости трансформаторов .....	387
3. Предотвращение разрыва бака маслонаполненных трансформаторов вследствие внутреннего повреждения .....	388
4. Характеристики предохранительного клапана .....	391
5. Защитное устройство фирмы Sergi (transformer protector) .....	392
6. Пожаробезопасные трансформаторы с элегазовой изоляцией .....	395
6.1. Введение .....	395
6.2. Конструкция элегазовых трансформаторов .....	395
6.3. Высоковольтные элегазовые трансформаторы большой мощности .....	396
6.4. Преимущества элегазовых трансформаторов .....	398
7. Пожаробезопасные распределительные трансформаторы с малогорючей экологически безопасной жидкостью .....	398
7.1. Краткий обзор .....	398
7.2. Физико-химические характеристики жидкости ПЭТ .....	399
7.3. Характеристики огнестойкости жидкости ПЭТ отечественного производства .....	400
7.4. Характеристики токсичности жидкости ПЭТ и возможности ее утилизации .....	400
7.5. Электрические характеристики изоляции трансформаторов, залитых жидкостью ПЭТ .....	401
7.6. Влагосодержание малогорючих жидкостей .....	402
8. Заключение .....	402

Приложение 20.1. Защитные устройства фирмы Sergi с применением пожаротушения .....	403
Приложение 20.2. Характеристики некоторых малогорючих жидкостей, применяемых в трансформаторах .....	405
Литература к главе 20 .....	406

<b>Глава двадцать первая. Диагностика в эксплуатации</b> .....	407
1. Задачи диагностики .....	407
2. Изменения в трансформаторе в течение эксплуатации .....	407
2.1. Ухудшение состояния изоляции в эксплуатации .....	407
2.2. Изменение механического состояния .....	409
3. Методология диагностики .....	409
3.1. Концепции обслуживания оборудования .....	409
3.2. Оценка состояния трансформаторов по результатам периодических испытаний .....	409
3.3. Система двухступенчатых профилактических испытаний (обслуживание по состоянию) .....	411
3.4. Концепция функциональной диагностики .....	412
3.5. Приемы диагностики .....	414
3.5.1. Сравнение с исходными данными .....	414
3.5.2. Анализ тенденции изменения характеристик .....	414
3.5.3. Статистический метод ..	414
3.5.4. Количественное определение состояния. Модель дефекта .....	414
3.5.5. Ранжирование оборудования по состоянию .....	414
3.5.6. Составление модели дефектов .....	415
3.5.7. Анализ конструкции .....	415
3.5.8. Оценка условий эксплуатации оборудования .....	415
3.5.9. Некоторые особенности конструкции, влияющие на диагностические характеристики ..	416
4. Диагностические характеристики ..	417
4.1. Диагностические характеристики, основанные на измерении электромагнитных параметров трансформатора .....	417
4.1.1. Определение коэффициента трансформации .....	417
4.1.2. Измерение тока и потерь холостого хода .....	417
4.1.3. Измерение сопротивления короткого замыкания .....	417

4.1.4. Измерение потерь короткого замыкания	418	1.1.2. Категории окончания эффективного срока службы	435
4.1.5. Измерение сопротивления обмоток постоянному току	418	1.2. Технический срок службы	435
4.2. Характеристики изоляции	418	1.2.1. Снижение электрической и механической прочности изоляции	435
4.2.1. Возможность обнаружения дефектов по характеристикам изоляции	418	1.2.2. Механическое ослабление креплений	436
4.2.2. Тангенс угла диэлектрических потерь и емкость изоляционного промежутка	419	1.2.3. Изменение состояния остова	436
4.2.3. Сопротивление изоляции	420	1.2.4. Ухудшение состояния комплектующих узлов	436
4.2.4. Абсорбционные характеристики	420	1.3. Тепловое старение	436
4.3. Частичные разряды	421	1.3.1. Механизм и продукты старения	436
4.4. Переходные и частотные характеристики обмоток	423	1.3.2. Основные задачи диагностики старения	438
4.4.1. Метод низковольтных импульсов (НВИ)	423	1.4. Оценка фактического ресурса изоляции	438
4.4.2. Метод частотного анализа (МЧА)	423	1.4.1. Нормирование ресурса по условию снижения степени полимеризации (СП)	438
4.5. Вибрационные характеристики	423	1.4.2. Оценка ресурса изоляции по изменению СП	438
4.6. Тепловизионное обследование	424	1.4.3. Измерение степени полимеризации	439
4.7. Диагностика трансформаторного оборудования под рабочим напряжением	425	1.4.4. Учет температурного профиля обмоток	440
4.8. Диагностика состояния посредством измерения характеристик масла	425	1.5. Влияние эксплуатационных факторов на скорость старения	441
5. Диагностика состояния трансформаторов по результатам анализа растворенных в масле газов	428	1.5.1. Режимы работы и скорость старения	441
5.1. Классификация дефектов	428	1.5.2. Влияние защиты от окружающего воздуха и состояния изоляции	441
5.2. Диагностические характеристики растворенных в масле газов	428	1.6. Оценка степени старения изоляции с помощью измерения фурановых производных	441
5.3. Диагностические схемы определения типа дефекта	428	1.6.1. Фурановые производные как показатели старения изоляции	441
6. Диагностика увлажнения изоляции	429	1.6.2. Определение значений СП через концентрацию фурановых производных	442
6.1. Распределение влаги в трансформаторе	429	1.6.3. Выявление повышенного нагрева и старения изоляции	444
6.2. Оценка степени увлажнения по температурной миграции влаги в масло	430	2. Методы продления срока службы трансформаторов	445
6.3. Оценка влажности барьеров по данным измерения сопротивления изоляции (методика НИЦ ЗТЗ — Сервис)	432	2.1. Экономические методы продления эксплуатации парка трансформаторов	445
7. Диагностика состояния вводов	433	2.1.1. Метод продленной жизни	445
Литература к главе 21	433	2.1.2. Метод ранжирования	446
Глава двадцать вторая. Методы продления срока службы	434	2.2. Методы продления срока службы крупных трансформаторов	446
1. Срок службы трансформатора. Оценка фактического ресурса изоляции	434	2.2.1. Учет индивидуальных отличий	446
1.1. Срок службы трансформаторов	434	2.2.2. Методы продления срока службы	446
1.1.1. Особенности состояния парка силовых трансформаторов	434		

3. Модернизация и реконструкция . . .	447	4.5. Методы поддержания и восста-	
3.1. Устранение характерных де-	447	новления состояния изоляционной	
3.1.1. Устранение короткоза-		системы трансформатора без отклю-	
мкнутых контуров в остове и		чения от сети . . . . .	457
других потенциальных источ-		4.5.1. Методы обработки под	
ников образования горючих га-		напряжением . . . . .	457
зов в масле . . . . .	447	4.5.1.1. Параметры про-	
3.1.2. Устранение перегрева		цесса обработки . . . . .	457
электромагнитных шунтов . . .	448	4.5.1.2. Требования безо-	
3.2. Реконструкция системы дыха-		пасности при обработке	
ния, улучшение герметичности . . .	448	масла под напряжением . .	457
3.2.1. Предотвращение прямого		4.5.2. Установки и устройства	
проникновения влаги . . . . .	448	для восстановления состояния	
3.2.2. Предотвращение перелива		изоляционной системы под на-	
масла из расширителя через		пряжением . . . . .	458
воздухоосушитель . . . . .	448	4.5.2.1. Абсорбционные и	
3.2.3. Реконструкция расшири-		термосифонные фильтры .	458
теля бака контактора РПН . . .	448	4.5.2.2. Установка для ре-	
3.3. Замена высоковольтных вво-		генерации изоляции и	
дов . . . . .	448	масла Fluidex . . . . .	458
3.4. Модернизация системы охла-		4.5.2.3. Установка для	
ждения . . . . .	449	очистки и сушки транс-	
3.5. Усовершенствование системы		форматора TDS 5 AB	
контроля и защиты . . . . .	449	(фирмы Velcon, США) . . .	458
4. Обновление состояния изоляцион-		4.5.2.4. Установка для	
ной системы . . . . .	449	очистки и сушки трансфор-	
4.1. Цели и задачи обновления . . .	449	матора Dry-Keep (фирмы	
4.2. Улучшение состояния транс-		Rotek, Южная Африка) . .	458
форматора посредством сушки, де-		Литература к главе 22 . . . . .	458
газации и фильтрации масла . . . .	450	Приложение 22.1. Оценка фак-	
4.2.1. Дегазация и осушка масла		тического ресурса изоляции . . . . .	459
с помощью вакуумно-дегазаци-		Литература к приложению 22.1 . . . .	460
онной установки . . . . .	450		
4.2.2. Осушка масла с помощью		<b>Глава двадцать третья. Распре-</b>	
бумажных фильтров . . . . .	451	<b>делительные маслонаполненные транс-</b>	
4.2.3. Осушка масла с помощью		<b>форматоры. Сухие трансформаторы</b> . .	461
фильтров из адсорбирующей		1. Введение . . . . .	461
пластмассы . . . . .	451	2. Маслонаполненные распреде-	
4.2.4. Сушка масла с помощью		лительные трансформаторы . . . . .	461
цеолитов . . . . .	451	3. Конструктивно-технологические	
4.2.5. Фильтрация масла . . . . .	451	особенности маслонаполненных	
4.3. Сушка изоляции . . . . .	451	распределительных трансформаторов . . .	463
4.3.1. Особенности сушки изо-		4. Распределительные трансформато-	
ляции в эксплуатации . . . . .	451	ры, заполненные негорючей или	
4.3.1.1. Фазы сушки . . . . .	452	малогорючей жидкостью . . . . .	463
4.3.1.2. Параметры сушки . . . . .	452	5. Сухие трансформаторы . . . . .	463
4.3.1.3. Критерии оконча-		5.1. Системы изоляции распреде-	
ния сушки . . . . .	453	лительных сухих трансформаторов . .	464
4.3.2. Методы нагрева . . . . .	453	6. Применение арамидной изоляции	
4.3.3. Методы сушки . . . . .	454	в распределительных трансформаторах	465
4.4. Регенерация изоляционной сис-		7. Нагрузочная способность сухих	
темы . . . . .	455	трансформаторов . . . . .	466
4.4.1. Состояние изоляции и		8. Установка РТ на распределительных	
масла, требующее проведения		подстанциях . . . . .	468
регенерации . . . . .	455	9. Заключение . . . . .	469
4.4.2. Регенерационные жид-		Приложение 23.1. Типы рас-	
кости . . . . .	455	пределительных масляных транс-	
4.4.2.1. Технология реген-		форматоров серий ТМ и ТМГ класса	
нерации с применением		напряжения 10 кВ и их основные	
регенерационного масла . . . . .	456	характеристики . . . . .	469
		Литература к главе 23 . . . . .	470

## Глава двадцать четвертая. Остов трансформатора . . . . . 471

1. Общие сведения . . . . . 471
  2. Электротехническая сталь . . . . . 471
  3. Типы магнитопроводов . . . . . 472
  4. Поперечное сечение стержня и ярма 474
  5. Прессовка магнитопровода . . . . . 475
  6. Устройство соединения верхней и нижней ярмовых балок и расчет механической прочности . . . . . 475
  7. Заземление остова . . . . . 476
  8. Основные рекомендации по снижению добавочных потерь в конструктивных элементах остова . . . . . 477
- Литература к главе 24 . . . . . 478

## Глава двадцать пятая. Обмотки . . . . . 479

1. Общие сведения . . . . . 479
  2. Проводниковые материалы . . . . . 479
  3. Детали электрической изоляции обмоток . . . . . 481
  4. Винтовая обмотка . . . . . 482
  5. Непрерывная обмотка . . . . . 486
  6. Переплетенная обмотка . . . . . 488
  7. Цилиндрическая слоевая обмотка . . . . . 491
  8. Дисковая катушечная обмотка . . . . . 491
- Литература к главе 25 . . . . . 491

## Глава двадцать шестая. Трансформаторы сверхвысокого напряжения . . . . . 492

1. Введение . . . . . 492
  2. Основные параметры . . . . . 492
    - 2.1. Мощности и напряжения короткого замыкания . . . . . 495
    - 2.2. Испытательные напряжения . . . . . 497
    - 2.3. Регулирование напряжения . . . . . 498
    - 2.4. Потери электроэнергии . . . . . 501
  3. Особенности конструкции . . . . . 503
    - 3.1. Обмотки и их расположение на стержне магнитопровода . . . . . 503
    - 3.2. Главная изоляция . . . . . 503
    - 3.3. Система охлаждения . . . . . 504
    - 3.4. Конструктивные и технологические решения по повышению электродинамической стойкости трансформаторов при коротком замыкании . . . . . 505
  4. Технологические процессы обработки изоляции трансформаторов . . . . . 506
  5. Защита внутренней изоляции трансформаторов в эксплуатации . . . . . 507
- Литература к главе 26 . . . . . 508

## Глава двадцать седьмая. Шунтирующие реакторы . . . . . 509

1. Режимы работы линий и роль реакторов . . . . . 509
2. Технические требования к реакторам . . . . . 511
3. Виды реакторов . . . . . 512

4. Конструкции реакторов . . . . . 513
  5. Особенности испытаний . . . . . 516
  6. Особенности эксплуатации . . . . . 520
- Литература к главе 27 . . . . . 522

## Глава двадцать восьмая. Трансформаторы для промышленных электропечей . . . . . 523

1. Режимы работы и особенности технических требований к электропечным трансформаторам . . . . . 523
    - 1.1. Трансформаторы для дуговых сталеплавильных печей . . . . . 523
    - 1.2. Трансформаторы для руднотермических печей . . . . . 524
    - 1.3. Трансформаторы для установок электрошлакового переплава . . . . . 525
    - 1.4. Трансформаторы для индукционных печей . . . . . 526
    - 1.5. Трансформаторы для печей сопротивления . . . . . 527
  2. Схемы регулирования вторичного напряжения в электропечных трансформаторах . . . . . 527
  3. Конструктивные особенности основных узлов ЭПТ . . . . . 530
    - 3.1. Обмотки . . . . . 530
    - 3.2. Отводы . . . . . 533
    - 3.3. Вводы . . . . . 533
    - 3.4. Переключающие устройства ЭПТ . . . . . 535
    - 3.5. Сварные конструкции и охлаждающие устройства ЭПТ . . . . . 537
  4. Основные серии электропечных трансформаторов . . . . . 540
    - 4.1. Трансформаторы для дуговых сталеплавильных печей . . . . . 540
    - 4.2. Трансформаторы для электрошлаковых печей . . . . . 542
    - 4.3. Трансформаторы для индукционных печей . . . . . 542
    - 4.4. Трансформаторы для руднотермических печей . . . . . 544
- Литература к главе 28 . . . . . 547

## Глава двадцать девятая. Трансформаторы для преобразовательных установок . . . . . 548

1. Назначение и области применения . . . . . 548
2. Режимы работы и особенности технических требований . . . . . 548
  - 2.1. Функции преобразовательных трансформаторов . . . . . 548
  - 2.2. Схемы и фазность преобразования . . . . . 550
  - 2.3. Схемы и группы соединения обмоток . . . . . 550
  - 2.4. Классификация напряжений и сопротивлений короткого замыкания . . . . . 552

2.5. Требования к сопротивлениям и напряжениям короткого замыкания .....	555
2.6. Внешняя характеристика преобразователя .....	558
2.7. Регулирование выпрямленного напряжения и стабилизация выпрямленного тока .....	558
2.8. Схемы регулирования напряжения и стабилизации тока .....	559
2.9. Испытательные напряжения .....	561
2.10. Классификация преобразовательных трансформаторов .....	562
2.11. Классификация реакторов .....	563
3. Конструктивные особенности .....	563
3.1. Магнитопроводы .....	563
3.2. Обмотки .....	564
3.3. Отводы сетевых обмоток .....	565
3.4. Отводы вентильных обмоток .....	565
3.5. Сварные конструкции, общая компоновка трансформаторов .....	566
3.6. Системы охлаждения .....	566
4. Основные серии преобразовательных трансформаторов .....	566
Литература к главе 29 .....	567
<b>Глава тридцатая. Новое в трансформаторостроении .....</b>	<b>568</b>
1. Управляемые шунтирующие реакторы .....	568
1.1. Реакторы, управляемые подмагничиванием .....	568
1.1.1. Преимущества реакторов, управляемых подмагничиванием .....	568
1.1.2. Принципиальная схема УР и описание его работы .....	568
1.1.3. Параметры изготовленных реакторов и опыт эксплуатации .....	573
1.2. Реакторы-трансформаторы с выключателями или тиристорными ключами на вторичной стороне .....	574
2. Разработка и освоение трансформаторов на напряжение 1150 кВ .....	579
2.1. Автотрансформаторы .....	579
2.2. Генераторный трансформатор .....	580
2.3. Методология разработки силовых трансформаторов сверхвысокого напряжения .....	581
2.4. Изоляция .....	581
2.5. Электромагнитные вопросы .....	583
2.6. Особенности конструкции и технологии изготовления трансформаторов ультравысокого напряжения .....	585
3. Создание силовых трансформаторов сверхвысокого напряжения со сниженным уровнем изоляции .....	585
4. Применение высокотемпературной изоляции .....	588
4.1. Недостатки обычной целлюлозо-омасляной изоляции .....	588
4.2. Эмалиевая изоляция .....	588
4.3. Арамидные изоляционные материалы (бумага, картон) .....	589
4.4. Эффект повышения температуры .....	590
4.5. Высокотемпературные трансформаторы .....	590
4.5.1. Передвижные трансформаторы .....	590
4.5.2. Тяговые трансформаторы для железнодорожных локомотивов .....	591
4.5.3. Повышение мощности трансформаторов при их ремонте после повреждения .....	591
4.5.4. Новые высокотемпературные трансформаторы .....	591
4.6. Испытания и опыт эксплуатации .....	591
4.7. Экономическая оценка .....	592
4.8. Заключение .....	592
5. Кабельные трансформаторы .....	592
5.1. Краткий обзор .....	592
5.2. Устройство кабельного трансформатора .....	592
5.3. Надежность .....	595
5.4. Перегрузочная способность .....	595
5.5. Кабельные трансформаторы в энергосистеме .....	596
5.6. Заключение .....	596
6. Трансформаторы с использованием высокотемпературной сверхпроводимости (ВТС) .....	596
6.1. Введение .....	596
6.2. Опытные образцы трансформаторов с использованием высокотемпературной сверхпроводимости .....	598
6.3. Экономическая оценка .....	602
6.4. Заключение .....	602
7. Заключение .....	596
Литература к главе 30. ....	603
<b>Приложение к справочной книге. Указатель действующих стандартов .....</b>	<b>605</b>
1. Межгосударственные стандарты стран СНГ (ГОСТ) и государственные стандарты Российской Федерации (ГОСТ Р) .....	605
2. Стандартизация в электротехнической промышленности: Руководящие документы (РД), Технические условия (ТУ) .....	610
3. Стандарты МЭК (IEC) по трансформаторам и реакторам .....	611

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Принципы работы трансформаторов и их устройство подробно описаны во многих учебниках и других публикациях. В предлагаемой книге авторы излагают основные практические вопросы современных высоковольтных трансформаторов, основываясь на собственном многолетнем опыте работы на Электрозаводе, в ВЭИ, на других предприятиях, а также публикациях в отечественной и зарубежной периодической литературе.

Помимо рассмотрения общих вопросов, связанных с силовыми трансформаторами общего назначения, приведены сведения о шунтирующих реакторах, а также о силовых трансформаторах для питания электрических печей и преобразовательных трансформаторах, питающих выпрямительные установки.

Уделено внимание оценке экономической эффективности трансформаторов с учетом капитализированной стоимости потерь за весь срок службы трансформатора и оптимизации трансформатора с учетом этих затрат.

Достаточно подробно рассмотрены проблемы воздействия трансформаторов на окружающую среду, а именно, вибрации и шума, создаваемых работающим трансформатором.

Проанализированы вероятностные характеристики повреждений трансформаторов, в том числе связанных с возникновением загорания. Приведено описание мер по снижению пожароопасности масляных трансформаторов, а также возможности изготовления трансформаторов полностью пожаробезопасных.

Изложены рекомендации по наиболее эффективным методам диагностики в зависимости от предполагаемого дефекта. Рассмотрена концепция продления срока службы трансформаторов, что является в настоящее время одной из актуальных задач в области высоковольтного электрооборудования.

Подробно описаны условия возможного продления срока службы силовых трансформаторов.

В последней главе описаны новые направления в развитии больших трансформаторов и шунтирующих реакторов, а именно: управляемые шунтирующие реакторы, снижение уровней изоляции, внедрение трансформаторов с ультравысоким номинальным напряжением 1150 кВ, применение изоляции с повышенной термостойкостью и использование в трансформаторах высокотемпературной сверхпроводимости.

К каждой из 30 глав дан список литературы, которая позволяет читателю более де-

тально изучить рассмотренные в данной главе вопросы.

В приложении дан перечень отечественных и международных (МЭК) стандартов, относящихся к высоковольтным трансформаторам и реакторам.

Книга рассчитана на подготовленного читателя, знакомого с теорией трансформаторов, конструкцией высоковольтных трансформаторов, а также со стандартами, регламентирующими основные требования к трансформаторам и, в первую очередь, с ГОСТ 11677—85 «Силовые трансформаторы. Общие технические условия».

Книга предназначена для инженерно-технического персонала трансформаторных заводов, а также персонала энергетических систем, связанного с эксплуатацией трансформаторов, а также может быть использована как пособие студентам энергетических вузов.

Авторы и составители отдельных глав: 1 — Диханов И. С., Пуродоминский В. В.; 2 — Лизунов С. Д.; 3 — Пуродоминский В. В.; 4 — Лизунов С. Д.; 5 — Лейтес Л. В.; 6 — Лизунов С. Д.; 7 — Лоханин А. К.; 8 — Морозова Т. И.; 9 — Лизунов С. Д.; 10 — Тищенко В. И.; 11 и 12 — Лурье А. И.; 13 — Строганов Ю. П.; 14 — Диханов И. С., Строганов Ю. П.; 15 — Кассихин С. Д., Пинталь Ю. С.; 16 — Шнейдер Г. Я.; 17 — Лизунов С. Д., Строганов Ю. П.; 18 — Лоханин А. К.; 19 и 20 — Лизунов С. Д.; 21 и 22 — Соколов В. В.; 23 — Маликова Г. А., Строганов Ю. П.; 24 и 25 — Воронов А. Е.; 26 — Шифрин Л. Н.; 27 — Шнейдер Г. Я.; 28 — Аншин В. Ш.; 29 — Фишлер Я. Л.; 30: 1.1 — Лурье А. И.; 1.2 — Александров Г. Н.; 2 — Лоханин А. К., Шифрин Л. Н.; 3 — Лоханин А. К.; 4 и 5 — Лизунов С. Д.; 6 — Лизунов С. Д., Лоханин А. К.; Приложение — Глазунова Л. Л.

В книге приведены фотографии трансформаторов и шунтирующих реакторов изготовления Электрозавода (все фотографии в главах 2—28 за исключением рис. 23.2), завода Уралэлектротяжмаш (29.3), ЗТЗ (30.2; 30.6; 30.13), ВНЕЛ, Индия (30.12), Минского электротехнического завода (23.2).

Авторы выражают благодарность руководству Электрозавода за содействие в получении технической информации и руководству ВЭИ за финансовую поддержку издания.