

**СИЛОВЫЕ
ТРАНСФОРМАТОРЫ**

справочная книга



ЭНЕРГОИЗДАТ

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Справочная книга

Под редакцией С. Д. ЛИЗУНОВА и А. К. ЛОХАНИНА

МОСКВА
ЭНЕРГОИЗДАТ
2004

УДК 621.314.21(03)
ББК 31.261.8
С36

Книга издается при финансовой поддержке Всероссийского электротехнического института

Авторы и составители: Г. Н. Александров⁸, В. Ш. Аншин¹, А. Е. Воронов¹, Л. Л. Глазунова², И. С. Диханов³, С. Д. Кассихин⁵, Л. В. Лейтес², С. Д. Лизунов¹, А. К. Лоханин², А. И. Лурье², Г. А. Маликова¹, Т. И. Морозова², Ю. С. Пинталь⁶, В. В. Порудоминский¹, В. В. Соколов⁴, Ю. П. Строганов¹, В. И. Тищенко¹, Я. Л. Фишлер⁷, Л. Н. Шифрин¹, Г. Я. Шнейдер¹

ПРИМЕЧАНИЕ:

1 — ОАО «Электроавтомат», 2 — ВЭИ, 3 — ВИТ, 4 — НИИ «Запорожсервис», 5 — ЗАО «Изольатор», 6 — МЭИ (Технический университет), 7 — Уралэлектротяжмаш, 8 — С.П.Б. ГИУ.

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

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

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 θ_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 точное сокращение срока службы	51			
Глава третья. Регулирование напряжения			Глава четвертая. Снижение потерь. Капитализация потерь		
1.	Требования стабилизации напряжения и регулирование напряжения в энергосистемах и в электроустановках потребителей.	53	1.	Введение	76
2.	Трансформаторы с переключением ответвлений без возбуждения	54	2.	Снижение потерь	76
3.	Регулирование под нагрузкой (РПН)	57	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 капитализированная стоимость потерь	81	7.2. Подавление третьей и кратной ей гармоник	116
3.3. Оценка удельной капитализированной 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
Глава пятая. Схемы соединения обмоток. Параллельная работа	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	Глава седьмая. Импульсные перенапряжения	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
Глава шестая. Автотрансформаторы	104	Глава восьмая. Изоляция	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. Межкатушечная 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
Глава девятая. Трансформаторное масло	151
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 tg δ масла при старении в эксплуатации, связанные с его качеством	157
3.5.1. Влияние кислородосодержащих соединений на tg δ 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
Глава десятая. Сушка и дегазация изоляции на заводе	186
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
Глава одиннадцатая. Стойкость при токах короткого замыкания	195	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
Глава двенадцатая. Токи включения	227	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
Глава тринадцатая. Ограничение шума и вибраций трансформаторов и реакторов	243	9. Заключение	262
1. Введение	243	Литература к главе 13	262
2. Физические основы звука и вибрации	243	Глава четырнадцатая. Устройства контроля, защиты и охлаждения (комплектующие изделия)	263
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 (масло-указатели)	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
Глава пятнадцатая. Высоковольтные вводы	290
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
Глава шестнадцатая. Испытания	304
1. Введение	304
2. Виды испытаний	304
3. Подготовка трансформаторов к испытаниям	305
4. Испытательные нормы	306
4.1. Испытания 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. Испытаний 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. Испытание 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
Глава семнадцатая. Установка на месте эксплуатации	327
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 проверок 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. Координация изоляции	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. Состояние изоляции в эксплуатации	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
Глава двадцатая. Пожаробезопасность	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
Глава двадцать первая. Диагностика в эксплуатации	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 восстановления состояния изоляционной системы трансформатора без отключения от сети	457
3.1. Устранение характерных дефектов	447	4.5.1. Методы обработки под напряжением	457
3.1.1. Устранение короткозамкнутых контуров в остове и других потенциальных источников образования горючих газов в масле	447	4.5.1.1. Параметры процесса обработки	457
3.1.2. Устранение перегрева электромагнитных шунтов	448	4.5.1.2. Требования безопасности при обработке масла под напряжением	457
3.2. Реконструкция системы дыхания, улучшение герметичности	448	4.5.2. Установки и устройства для восстановления состояния изоляционной системы под напряжением	458
3.2.1. Предотвращение прямого проникновения влаги	448	4.5.2.1. Абсорбционные и термосифонные фильтры	458
3.2.2. Предотвращение перелива масла из расширителя через воздухоосушитель	448	4.5.2.2. Установка для регенерации изоляции и масла Fluidex	458
3.2.3. Реконструкция расширителя бака контактора РПН	448	4.5.2.3. Установка для очистки и сушки трансформатора TDS 5 AB (фирмы Velcon, США)	458
3.3. Замена высоковольтных вводов	448	4.5.2.4. Установка для очистки и сушки трансформатора Дру-Кеер (фирмы Rotek, Южная Африка)	458
3.4. Модернизация системы охлаждения	449	Литература к главе 22	458
3.5. Усовершенствование системы контроля и защит	449	Приложение 22.1. Оценка фактического ресурса изоляции	459
4. Обновление состояния изоляционной системы	449	Литература к приложению 22.1	460
4.1. Цели и задачи обновления	449	Глава двадцать третья. Распределительные маслонаполненные трансформаторы. Сухие трансформаторы	461
4.2. Улучшение состояния трансформатора посредством сушки, дегазации и фильтрации масла	450	1. Введение	461
4.2.1. Дегазация и осушка масла с помощью вакуумно-дегазационной установки	450	2. Маслонаполненные распределительные трансформаторы	461
4.2.2. Осушка масла с помощью бумажных фильтров	451	3. Конструктивно-технологические особенности маслонаполненных распределительных трансформаторов	463
4.2.3. Осушка масла с помощью фильтров из адсорбирующей пластмассы	451	4. Распределительные трансформаторы, заполненные негорючей или малогорючей жидкостью	463
4.2.4. Сушка масла с помощью цеолитов	451	5. Сухие трансформаторы	463
4.2.5. Фильтрация масла	451	5.1. Системы изоляции распределительных сухих трансформаторов	464
4.3. Сушка изоляции	451	6. Применение арамидной изоляции в распределительных трансформаторах	465
4.3.1. Особенности сушки изоляции в эксплуатации	451	7. Нагрузочная способность сухих трансформаторов	466
4.3.1.1. Фазы сушки	452	8. Установка РТ на распределительных подстанциях	468
4.3.1.2. Параметры сушки	452	9. Заключение	469
4.3.1.3. Критерии окончания сушки	453	Приложение 23.1. Типы распределительных масляных трансформаторов серий ТМ и ТМГ класса напряжения 10 кВ и их основные характеристики	469
4.3.2. Методы нагрева	453	Литература к главе 23	470
4.3.3. Методы сушки	454		
4.4. Регенерация изоляционной системы	455		
4.4.1. Состояние изоляции и масла, требующее проведения регенерации	455		
4.4.2. Регенерационные жидкости	455		
4.4.2.1. Технология регенерации с применением регенерационного масла	456		

Глава двадцать четвертая. Ос- тов 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 ме- ханической прочности	475
7. Заземление остова	476
8. Основные рекомендации по сниже- нию добавочных потерь в конструк- тивных 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 об- моток	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. Транс- форматоры сверхвысокого напряжения	492
1. Введение	492
2. Основные параметры	492
2.1. Мощности и напряжения корот- кого 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 технологи- ческие решения по повышению элек- тродинамической стойкости транс- форматоров при коротком замыка- нии	505
4. Технологические процессы обра- ботки изоляции трансформаторов	506
5. Защита внутренней изоляции транс- форматоров в эксплуатации	507
Литература к главе 26	508
Глава двадцать седьмая. Шун- тирующие реакторы	509
1. Режимы работы линий и роль реак- торов	509
2. Технические требования к реакто- рам	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. Транс- форматоры для промышленных электро- печей	523
1. Режимы работы и особенности тех- нических требований к электропеч- ным трансформаторам	523
1.1. Трансформаторы для дуговых сталеплавильных печей	523
1.2. Трансформаторы для руднотер- мических печей	524
1.3. Трансформаторы для установок электрошлакового переплава	525
1.4. Трансформаторы для индукци- онных печей	526
1.5. Трансформаторы для печей со- противления	527
2. Схемы регулирования вторичного напряжения в электропечных транс- форматорах	527
3. Конструктивные особенности ос- новных 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 охла- дающие устройства ЭПТ	537
4. Основные серии электропечных трансформаторов	540
4.1. Трансформаторы для дуговых сталеплавильных печей	540
4.2. Трансформаторы для электро- шлаковых печей	542
4.3. Трансформаторы для индукци- онных печей	542
4.4. Трансформаторы для руднотер- мических печей	544
Литература к главе 28	547
Глава двадцать девятая. Транс- форматоры для преобразовательных ус- тановок	548
1. Назначение и области применения	548
2. Режимы работы и особенности тех- нических требований	548
2.1. Функции преобразовательных трансформаторов	548
2.2. Схемы и фазность преобразова- ния	550
2.3. Схемы и группы соединения обмоток	550
2.4. Классификация напряжений и сопротивлений короткого замыка- ния	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
Глава тридцатая. Новое в трансформаторостроении	568
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 цемолитомаляной 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
Приложение к справочной книге. Указатель действующих стандартов	605
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., Порудоминский В. В.; 2 — Лизунов С. Д.; 3 — Порудоминский 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.

С. Д. Лизунов, А. К. Лоханин

Глава тринадцатая

ОГРАНИЧЕНИЕ ШУМА И ВИБРАЦИИ
ТРАНСФОРМАТОРОВ И РЕАКТОРОВ¹

1. Введение

Шум трансформаторно-реакторного оборудования оказывает неблагоприятное воздействие на экологию в местах его установки — в промышленных и, особенно, в густонаселенных жилых районах. С другой стороны, повышенная вибрация оборудования может влиять на его собственную механическую прочность, снижая срок службы, а возможность возникновения при этом внутренних повреждений зачастую приводит, в том числе, к разливу трансформаторного масла с последующими пожарами.

Эти обстоятельства, а также возрастающее внимание общества к экологическим проблемам, диктуют ужесточение норм экологической безопасности и соответствующих требований, предъявляемых к трансформаторно-реакторному оборудованию в части его уровней шума и вибрации.

2. Физические основы звука
и вибрации

2.1. Характеристики звука

Создаваемые источником звука колебания передаются волнами разрежения и сжатия окружающей среды. При 20 °С скорость звука составляет: в воздухе — 310 м/с, в масле — 1300 м/с, в стали — 5029 м/с.

Характеристиками звука являются:

- ◆ *звуковое давление* p (Па), определяющее звуковое состояние окружающей источник звука среды;
- ◆ *звуковая мощность* P (Вт), характеризующая источник звука;
- ◆ *интенсивность звука* J (Вт/м²), определяемая, как средняя мощность звука, про-

ходящего через единицу поверхности в заданном направлении.

Диапазон воспринимаемых человеческим ухом звуковых давлений чрезвычайно широк: от $2 \cdot 10^{-5}$ Па до $2 \cdot 10^2$ Па. Столь широкий диапазон делает ненаглядным использование абсолютных значений звукового давления в Па или звуковой мощности в Вт. С целью преодоления этого недостатка в акустике принята шкала относительных единиц — *Бел*, посредством которой оценивается уровень звукового давления или уровень звуковой мощности. Бел равен десятичному логарифму отношения значения, подлежащего оценке, к стандартизированному опорному значению заданной величины. 1 Бел = 10 децибелам (дБ).

Таким образом, для уровня звукового давления

$$L = 20 \lg(p/p_0), \text{ дБ,}$$

где $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — среднеквадратическое опорное значение уровня звукового давления чистого тона частотой 1000 Гц, соответствующее порогу слышимости.

Для уровня звуковой мощности

$$L_P = 10 \lg(P/P_0), \text{ дБ,}$$

где $P_0 = 10^{-12}$ Вт — опорная звуковая мощность.

При переходе к шкале децибел весь диапазон слышимых звуков сокращается до 140 дБ. Экспериментально установлено, что реакция человеческого уха на изменения уровней звукового давления также носит логарифмический характер.

Зачастую, воспринимаемая человеческим ухом громкость звука неадекватна действительным значениям уровней звукового давления. Причина этого — в пониженной чувствительности уха за пределами диапазона частот 1—5 кГц, и особенно на низких частотах, где снижение чувствительности достигает 20 дБ на частоте 100 Гц и 50 дБ на частоте 20 Гц. Из-за необходимости оценки звука с точки зрения его воздействия на человека, были введены понятия скорректированного уровня звукового давления и скорректированного уровня звуковой мощности, учитывающие частотную чувствительность человеческого уха. На практике, коррекция означает ослабление измерительным прибором отдельных частотных составляющих звукового давления в соответствии со сред-

¹Примечание редактора. Ниже даются определения терминов звук и шум.

◆ *Звук*ом называют продольные механические волны, которые испускаются *источником звука* — колеблющимся телом — и распространяются в твердых телах, жидкостях и газах в виде колебаний давления (волн давления). Человеческое ухо воспринимает частоты от 16 до 20 000 Гц. Колебания более высокой частоты называют *ультразвуком*, более низкой — *инфразвуком*.

◆ *Шум* — беспорядочные колебания, смесь многочисленных колебаний примерно одинаковой амплитуды и с самыми разнообразными частотами. В быту под шумом понимают различного рода нежелательные акустические помехи.

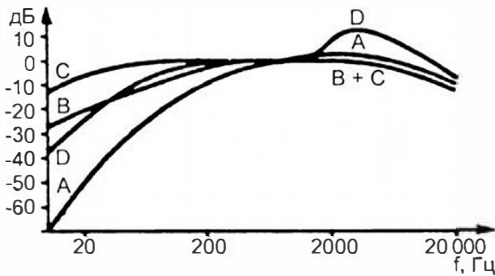


Рис. 13.1. Стандартные частотные характеристики схем коррекции A, B, C, D.

нестатистической частотной чувствительностью человеческого уха. В частности, шумомеры оснащаются измерительными схемами частотной коррекции A, B, C и D (рис. 13.1), которые позволяют, в дополнение к измерениям истинных значений уровней звукового давления, выполнять также оценку «субъективных» уровней звука.

Чувствительности человеческого уха соответствует характеристика частотной коррекции A. Уровень звукового давления, измеренный с использованием схемы коррекции A, называется *уровнем звука* L_A , дБА.

Корректированный уровень звуковой мощности L_{PA} рассчитывается по результатам измерений уровней звука также в дБА.

Частотный диапазон слышимых звуков простирается от 20 Гц до 20 кГц. Обычно слышимые нами звуки состоят из ряда отдельных тонов, где под тоном понимается звук, обусловленный синусоидальным изменением давления среды при постоянной частоте. С целью идентификации отдельных тональных составляющих диапазон частот слышимых звуков разделяется на полосы, в которых измеряются уровни звукового давления.

Процесс последовательного или одновременного измерения уровней звукового давления в полосах частот называется *спектральным анализом*.

При спектральном анализе звука измерения осуществляются, чаще всего, в *октавных полосах* частот (октава — частотный диапазон, в котором его высшая частота вдвое больше низшей), а также в *третьоктавных полосах* частот (третьоктава получается путем деления октавы на три части). Граничные частоты октавных и третьоктавных полос стандартизованы, а сами полосы обозначаются их среднегеометрическими частотами, определенными по формуле

$$f_{cp} = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

где f_1 и f_2 — верхняя и нижняя граничные частоты полосы.

Частотный диапазон слышимого звука разделен стандартом на октавные полосы со среднегеометрическими частотами: 16, 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Гц.

При оценке спектральных составляющих звука применяется также узкополосный анализ: в полосах частот с шириной, выраженной в процентах, например, 10, 3, 1 %, либо в полосах частот, выраженных в децибелах — 10, 3, 1 дБ.

По временным характеристикам звук подразделяется на постоянный, когда его уровень в течение 8 часов изменяется не более, чем на 5 дБА, и непостоянный при изменениях уровня более, чем на 5 дБА. Звук трансформаторов, в большинстве случаев, является постоянным.

2.2. Распространение звука

В однородной бесконечной среде звук источника распространяется во всех направлениях без искажений и с постоянной скоростью. С удвоением расстояния от источника интенсивность звука уменьшается в 4 раза, что соответствует уменьшению уровня звукового давления на 6 дБ. В условиях открытого пространства эта зависимость справедлива для так называемого «дальнего звукового поля», находящегося на расстоянии от источника звука, превышающем его удвоенный размер. При малых расстояниях от источника звука, т. е. в зоне «ближнего звукового поля», звуковое давление распределяется неравномерно, что затрудняет объективную оценку уровня звуковой мощности источника. Вблизи от источников звука, имеющих большие размеры, удвоение измерительного расстояния ведет к снижению уровня звукового давления менее чем на 6 дБ, либо это снижение вообще равно нулю.

На практике, среда, в которой распространяется звук, неоднородна и не бесконечна, что обуславливает различные эффекты, также ведущие к отклонению от вышеприведенной зависимости.

Наличие на пути звука предметов ведет к появлению звуковых теней. Движущиеся предметы делают звуковое поле неустойчивым. Большие поверхности отражают звук, часть звуковой энергии поглощается преградой ($E_{погл}$), часть проходит через преграду ($E_{проп}$), часть отражается от преграды ($E_{отр}$). Отношение между вошедшей в преграду звуковой энергией и падающей на нее называется *коэффициентом звукопоглощения* (α), т. е.

$$\alpha = \frac{E_{пад} - E_{отр}}{E_{пад}}$$

Из соотношения видно, что значение коэффициента звукопоглощения определяется не только потерями энергии в материале, но также энергией, прошедшей через преграду. Обычные строительные материалы имеют малое значение α . Например, при частоте 500 Гц α для бетона равно 0,01 (т.е. только один процент звуковой энергии поглощается, а 99 % энергии отражается), для оштукатуренной стены — 0,02. Специальные звукопоглощающие материалы (стекловолокно) имеют α в несколько раз выше. Пористые материалы более эффективны на высоких частотах.

Для помещений с малым звукопоглощением характерно явление *реверберации*, т.е. многократное отражение звука от стен, пола и потолка, при котором звук источника складывается с отраженным звуком, что приводит к повышению уровня звукового давления в помещении.

Вблизи источника звука в помещении, в его дальнем звуковом поле, преобладает излучаемый источником звук. У стен помещения сильнее сказывается влияние отраженного звука, дающее практически однородное распределение звукового давления. В таких помещениях при отключении источника звука последний исчезает не сразу, а время его существования зависит от звукопоглощения поверхностей. Это время называется *временем реверберации* и является параметром, определяющим звукопоглощающие характеристики помещения. Определяется оно экспериментально, путем регистрации снижения уровня звука на 60 дБ после выстрела из стартового пистолета (или другого импульсного звука), или определяется по формуле

$$T = 0,16V/S\alpha_{\text{ср}}, \text{ с.}$$

где T — время реверберации, с; V — объем помещения, м³; S — площадь поверхности помещения, м²; $\alpha_{\text{ср}}$ — средний коэффициент звукопоглощения для данного помещения.

Отношение прошедшей через преграду звуковой энергии $E_{\text{пр}}$ к $E_{\text{пад}}$ называется коэффициентом звукопередачи

$$\tau = E_{\text{пр}}/E_{\text{пад}}$$

Способность преграды не пропускать через себя звук называется звукоизоляцией. При удвоении массы такой преграды звукоизоляция увеличивается на

$$10 \lg 4 = 6 \text{ дБ.}$$

С удвоением частоты звукопоглощение также увеличивается на 6 дБ.

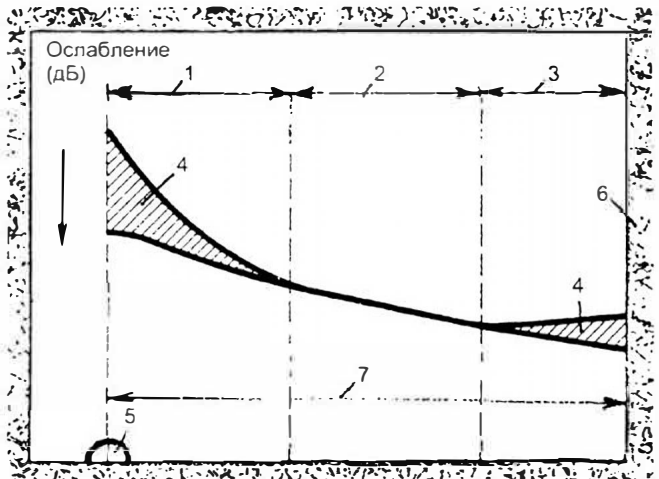
На звукоизоляцию влияет жесткость конструкции, а также, в значительной степени, имеющиеся щели.

Важной является неоднородность конструкции: введение воздушного промежутка в двухслойной конструкции перегородки повышает звукоизоляцию.

При определении уровня звуковой мощности в ограниченных пространствах следует помнить, что в подобных помещениях возможен звук с неподвижными в пространстве максимумами и минимумами уровня звукового давления, что ведет к погрешностям измерения. При этом небольшие изменения положения микрофона могут сопровождаться значительными изменениями измеренного уровня звукового давления. Наилучшие результаты могут быть получены при измерениях «в свободном поле» между ближним и реверберационным полем помещения (рис. 13.2).

Рис. 13.2. Звуковое поле помещения:

1 — ближнее поле; 2 — свободное поле; 3 — реверберационное поле; 4 — поле разброса измеренных уровней звука; 5 — источник звука; 6 — стена помещения; 7 — расстояние от источника звука (логарифмическая шкала).



2.3. Характеристики вибрации

Под вибрацией понимают механические колебания тела вокруг положения равновесия при относительно малой амплитуде и не слишком низкой частоте. Вибрация характеризуется амплитудой колебания и частотой. На практике вибрация представляет собой сложное колебание с рядом частотных составляющих. Первая составляющая вибрации называется основной гармоникой, последующие составляющие — высшими гармониками. Совокупность гармонических составляющих, расположенных в порядке возрастания частоты, называется частотным спектром.

Вибрации оцениваются параметрами *виброперемещения* (м, мкм), *виброскорости* (м/с) и *виброускорения* (м/с², g).

Выбор параметра для описания колебательного процесса обусловлен особенностями вибрирующего объекта.

Низкочастотные (до 1 кГц) вибрации изделия, обычно, оцениваются параметром виброперемещения.

Если вибрация изделия имеет широкий спектр частот, используется параметр виброускорения, при котором более подчеркиваются высокочастотные составляющие (рис. 13.3).

Для количественной оценки вибраций применяются различные величины (рис. 13.4).

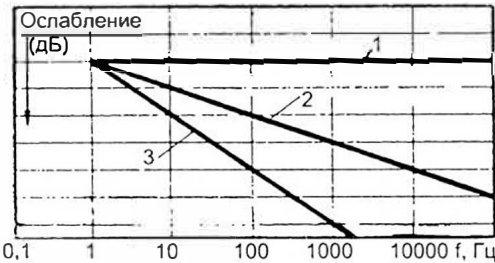


Рис. 13.3. Частотные характеристики параметров вибрации:

1 — виброускорение, a ; 2 — виброскорость, $v = a/2\pi f$; 3 — виброперемещение, $l = a/4\pi^2 f^2$.

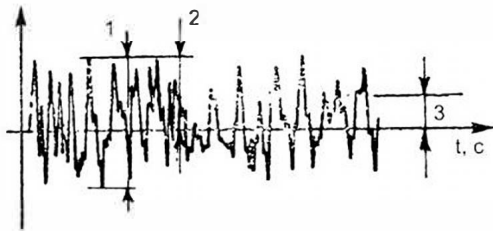


Рис. 13.4. Значения параметров вибрации: 1 — двойная амплитуда (размах); 2 — пиковое значение; 3 — среднее квадратическое значение.

Двойная амплитуда соответствует размаху колебаний и применяется, когда важно оценить смещение элемента и возникающие при этом механические напряжения. *Пиковое значение* вибрации используется при кратковременных ударах. *Среднеквадратическое значение* является наиболее важным, поскольку оно связано с энергией, определяющей разрушительную способность колебания.

Также как и при измерении звуковых характеристик, в вибромерии величины выражаются либо в абсолютных значениях, либо в децибелах.

Уровни вибрации зависят не только от возбуждающей силы, но во многом от упругих свойств механической системы и степени совпадения частоты возбуждающей силы с собственными частотами системы, т. е. от *резонансов*.

Собственной частотой, f_0 , механической системы называется такая частота, при которой свободно колеблется материальное тело, будучи кратковременно выведено из положения равновесия.

Для простейшего случая системы с одной степенью свободы, когда материальное тело представлено сосредоточенными параметрами массы « m » и жесткости « c »,

$$f_0 = (1/2\pi) \sqrt{c/m}, \text{ Гц.}$$

Из формулы следует, что уменьшение массы и увеличение жесткости колеблющейся системы ведут к увеличению частоты собственных колебаний и наоборот. Это определяет путь отстройки собственной частоты f_0 от частоты возбуждающей силы, в случае резонансов.

Реальные механические системы имеют густой спектр собственных частот, когда, помимо основной гармонической частоты, имеются кратные ей, а также собственные частоты отдельных элементов данной конструкции.

При воздействии на механическую систему внешней периодической силы возникают вынужденные колебания на частоте f изменения внешней силы. При $f = f_0$, амплитуда вынужденных колебаний значительно возрастает. Это явление называется *резонансом*. Фактически, и при резонансе амплитуда вибрации имеет конечное значение вследствие демпфирования, связанного с рассеянием энергии в материале конструкции. Для ухода из области резонанса необходимо, чтобы f более чем в 2 раза превышала частоту собственных колебаний f_0 .

Из-за того, что как собственные частоты, так и частоты вынужденных колебаний характеризуются довольно плотными спектрами, их взаимная расстройка является довольно сложной задачей.

Ограничение распространения вибраций достигается за счет применения виброизоляции, заключающейся в отделении источника вибрации от прочих элементов конструкции с помощью упругого элемента — виброизолятора.

При этом достигается снижение вибрационной силы, характеризуемое коэффициентом вибропередачи

$$\tau_{\text{вп}} = F_{\text{п}}/F_0,$$

где $F_{\text{п}}$ — передаваемая сила; F_0 — возбуждающая сила.

Виброизоляция достигается только при коэффициенте вибропередачи меньше единицы (рис. 13.5).

Сила, передаваемая от источника на конструкцию будет уменьшена, только если собственная частота системы, установленной на виброизоляторе, будет меньше частоты возбуждающей силы более чем в $\sqrt{2}$ раза. В противном случае, выигрыш не достигается, и сила вибрации передается через виброизолятор на конструкцию полностью.

Собственную частоту системы с избранным виброизолятором удобно определять экспериментально. Для этого виброизолятор нагружается известной массой и определяется статическая осадка виброизолятора d , см. Собственная частота определяется по формуле

$$f_0 = 5/\sqrt{d}, \text{ Гц.}$$

Например, при статической осадке виброизолятора, равной 0,4 см, собственная частота равна $f_0 = 8$ Гц; при $d = 2,5$ см, $f_0 = 3$ Гц и т. д.

На практике, виброактивность механической системы во многом зависит от жесткости опорной конструкции, значение которой не бесконечно. Например, стальные опорные конструкции достаточно гибки и обладают своими собственными частотами, что ведет к появлению в спектре вибрации виброизолируемого объекта дополнительных резонансов. Поэтому при выборе виброизолятора по статической осадке стремятся к тому, чтобы собственные частоты были в 3 (и более) раза меньше частот возбуждающих сил.

Вместе с тем, высокие значения статической осадки могут вызвать неустойчивость оборудования.

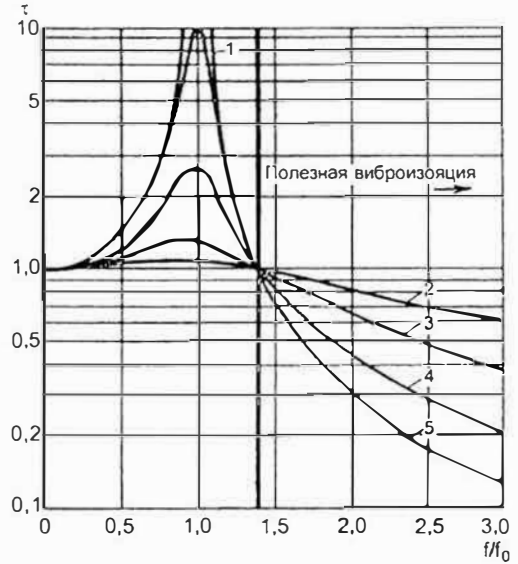


Рис. 13.5. Коэффициент передачи (τ) вибрационной силы для систем с демпфированием: 1 — демпфирование 5%; 2 — демпфирование 100%; 3 — демпфирование 50%; 4 — демпфирование 20%; 5 — демпфирование 0%.

Применяются различные виды виброизоляторов: резиновые, резинометаллические, пружинные, пневматические и др.

Для гашения локальных вибраций используются динамические виброгасители — antivibratory. При этом снижение вибрации происходит в точке крепления виброгасителя. Антивибратор представляет собой металлический предмет на упругой опоре, закрепленной на колеблющемся объекте. При удалении от точки крепления снижение вибрации быстро уменьшается. Пружинные виброгасители имеют острую характеристику частоты настройки; резиновые виброгасители имеют более широкую частотную полосу поглощения.

3. Источники вибрации и шума в трансформаторах

Шум трансформаторов вызывается вибрацией активной части, а также вентиляторами и насосами.

Вибрация активной части обусловлена магнитострикционными и магнитными силами в магнитной системе и динамическими силами в обмотках. В трансформаторах преобладает магнитострикционная составляющая вибрации. В магнитных системах реак-

торов, имеющих немагнитные зазоры, могут преобладать магнитные силы тяжения в зазорах.

3.1. Магнитострикция

Магнитострикцией называют явление деформации кристаллической решетки магнитного материала при его намагничивании. В процессе возрастания индукции сначала происходит смещение границ кристаллов материала, а затем их вращение, что ведет к изменению линейных размеров стали. Измеряется магнитострикция в относительных единицах изменения длины $\lambda = \Delta l/l$. Магнитострикционное удлинение листа стали может достигать нескольких десятков микрон на один метр длины.

При перемагничивании магнитной системы трансформаторов, индукция в ней достигает максимума дважды за один период частоты переменного тока, что соответствует двукратному изменению длины листов стали магнитной системы. Это ведет к периодическим колебаниям магнитной системы на удвоенной частоте переменного электрического тока.

Магнитострикция может быть монотонно положительной, т. е. вызывающей удлинение стали с возрастанием индукции, и, монотонно отрицательной, приводящей к уменьшению линейных размеров стали с возрастанием индукции. В промежуточном случае, магнитострикция может изменять свой знак с ростом индукции.

Магнитострикция содержит, кроме первой, также и высшие гармоники, что является предпосылкой гармонических составляющих шума трансформатора.

Фактическое значение магнитострикции электротехнической стали, применяемой для магнитных систем трансформаторов, изменяется в широких пределах, в зависимости от марки стали, изготовителя и пр.

Говоря о значении магнитострикции, обычно имеют в виду некоторое среднее (по длине листа) максимальное значение, соответствующее определенной индукции без учета гармонических составляющих.

Магнитострикция современной анизотропной стали находится в диапазоне от $-1,0 \cdot 10^{-6}$ до $1,5 \cdot 10^{-6}$ (при индукции 1,5 Тл).

Магнитострикция стали типа 3404, 3405, 3406 составляет $(0,7-0,9) \cdot 10^{-6}$ при 1,5 Тл. Сталь марки Ni-V имеет магнитострикцию в диапазоне от $-1 \cdot 10^{-6}$ до $0,5 \cdot 10^{-6}$ при 1,5 Тл.

Стали со специальным растягивающим покрытием имеют магнитострикцию $0,4 \cdot 10^{-6}$.

Технические условия на сталь марок 3407 и 3408 гарантируют значения магнитострикции не более $1,5 \cdot 10^{-6}$ при индукции 1,7 Тл (магнитострикция горячекатанной стали в 10–20 раз выше).

Наименьшие значения магнитострикции соответствуют намагничиванию стали в направлении прокатки. При намагничивании анизотропной стали под углом 90° к направлению прокатки магнитострикция увеличивается в 10–15 раз.

Магнитострикция уменьшается с увеличением содержания кремния в стали. При 6% она становится равной нулю. Но такая сталь имеет большую хрупкость, что делает ее неприемлемой.

Отжиг стали улучшает ее магнитострикционные характеристики. Наилучшие результаты дает отжиг в вакууме.

Механические воздействия существенно увеличивают магнитострикцию. Например, удар по образцу стали грузом 300г с высоты 2 см 5 раз может повысить магнитострикцию с $-0,9 \cdot 10^{-6}$ до $1,2 \cdot 10^{-6}$. Аналогичное влияние на сталь имеет ее резка. Сильное воздействие оказывает сжатие листа в направлении прокатки. При напряжении сжатия 20 кг/см^2 магнитострикция увеличивается в 5 раз.

Магнитострикция аморфной стали зависит от ее химического состава. Некоторые ее сплавы имеют магнитострикцию, близкую к нулю. Магнитные системы, выполненные из ленточной аморфной стали, с точки зрения ее шума, не самые лучшие, вследствие рыхлой структуры такой магнитной системы.

3.2. Электромагнитные силы

Магнитная система

Вместе с силами магнитострикционного происхождения, магнитная система испытывает воздействие сил магнитного притяжения. Наиболее ярко магнитные силы проявляются в стыковых соединениях. В шихтованных магнитных системах магнитный поток вынужден перетекать из листа в лист в воздушном или масляном зазорах, образующихся за счет неплотной стыковки листов стали. При этом возникают поперечные силы, приводящие к изгибным колебаниям листов. Поскольку листы стали на участках, соседствующих с зазорами, перенасыщаются, здесь увеличиваются также и магнитострикционные силы.

Силы магнитного притяжения преобладают в реакторах, где магнитная система имеет немагнитные зазоры.

Обмотка

Одним из источников шума трансформаторов является обмотка, проводники которой вибрируют под действием сил взаимного притяжения при протекании в них переменного тока в режиме нагрузки.

Кроме того, обмотка испытывает воздействие сил, вызванных протекающим в ней током и магнитным потоком рассеяния. Эти силы действуют как в поперечном, так и, особенно, в продольном по отношению к обмотке направлениях.

Генерирующими звук поверхностями здесь являются торцевые части обмоток, прессирующие кольца, ярмовые балки, детали крепления.

До последнего времени шуму обмотки не придавалось значения, поскольку при индукции порядка 1,5—1,7 Тл он значительно ниже шума магнитной системы. При создании маломощных трансформаторов обычно идут на снижение индукции, что может оказаться и экономически целесообразным, учитывая как пониженные потери холостого хода, так и устранение необходимости создания внешних устройств шумоподавления. Однако, при индукции порядка 1,4 Тл у мощных трансформаторов начинает преобладать шум, создаваемый обмотками. В зависимости от мощности трансформатора, его, обусловленную обмоткой, звуковую мощность можно определить по формуле

$$L_{P\text{Аобм}} = 39 + 18 \lg \frac{S_N}{S_0}, \text{ дБА}$$

где $S_0 = 1 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; S_N — номинальная мощность трансформатора, $\text{МВ} \cdot \text{А}$.

Например, для трансформатора с номинальной мощностью 100 $\text{МВ} \cdot \text{А}$ уровень звуковой мощности составит 75 дБА, а для трансформатора 1000 $\text{МВ} \cdot \text{А}$ — 94 дБА.

Шум, обусловленный обмоткой, зависит от тока нагрузки. Например, при токе, составляющем 70 % номинального, шум трансформатора на 6 дБ меньше, чем при номинальном токе.

Частотный спектр звука обмотки при синусоидальном токе содержит почти исключительно кратную промышленной частоте гармонику (100 Гц для сети 50 Гц), в отличие от звука магнитной системы, который содержит большие дополнительные составляющие звука — гармоники от 2-й до 5-й двойной промышленной частоты.

3.3. Влияние системы охлаждения

Вентиляторы

Для трансформаторов, имеющих систему охлаждения с принудительной циркуляцией воздуха, преобладающим может быть шум, создаваемый вентиляторами. Звуковая мощность вентилятора зависит от его производительности, частоты вращения, конструкции.

Приблизительно, общий уровень звуковой мощности вентилятора можно определить по формуле:

$$L_p = 10 \lg Q + 20 \lg p + 37, \text{ дБ}$$

где Q — расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; p — давление, $\text{н}/\text{м}^2$.

Уровень звуковой мощности вентилятора пропорционален 5—6^{ой} степени круговой скорости (об./мин) лопаток (50 % круговой скорости эквивалентны 16 дБ).

В спектре частот шума вентилятора основная гармоника определяется выражением $nk/60$, где n — частота вращения вентилятора, оборотов в минуту; k — количество лопаток.

Высокочастотные составляющие спектра шума вентилятора обусловлены срывом вихря с лопаток и турбулентным потоком воздуха, набегающего на элементы конструкции.

Охладители и радиаторы

Уровни звука оборудованных вентиляторами охладителей выше, чем у отдельно стоящих вентиляторов. Это обусловлено их большей поверхностью звукоизлучения и, зачастую, резонансами отдельных деталей охладителя. Радиаторы системы охлаждения с естественной циркуляцией воздуха и масла могут иметь повышенный шум из-за передачи вибрации от бака.

Насосы

Используемые в системах охлаждения маслонасосы не оказывают влияния на общий уровень шума трансформаторов. Уровень звуковой мощности насосов на несколько порядков ниже, чем у трансформаторов.

Повышение уровня звука маслонасоса обычно означает его аварийное состояние: выход из строя подшипника, задевание крыльчатки насоса за корпус или ротора двигателя за статор. Подобные дефекты маслонасоса могут привести к снижению электрической прочности изоляции трансформатора из-за попадания в масло продуктов истирания металлических деталей такого насоса.

В связи с этим, необходим периодический контроль состояния маслонасосов. Шум маслонасоса часто маскируется шумом работающего трансформатора; состояние насоса лучше всего определять по уровню его вибрации.

3.4. Влияние конструкции и режимов работы

3.4.1. Зависимость шума трансформатора от размеров магнитной системы

Уровни звуковой мощности трансформаторов пропорциональны их массо-габаритным параметрам, хотя, на практике, эта зависимость может значительно меняться под действием разного рода конструктивно-технологических факторов.

Уровень звуковой мощности трансформатора находится в прямой пропорциональной зависимости от длины стержня магнитной системы:

$$L_p = L_v + 20 \lg l + 10 \lg S_0, \text{ дБ}$$

где l — наибольшая длина стержня, м; S_0 — площадь поперечного сечения стержня, м²;

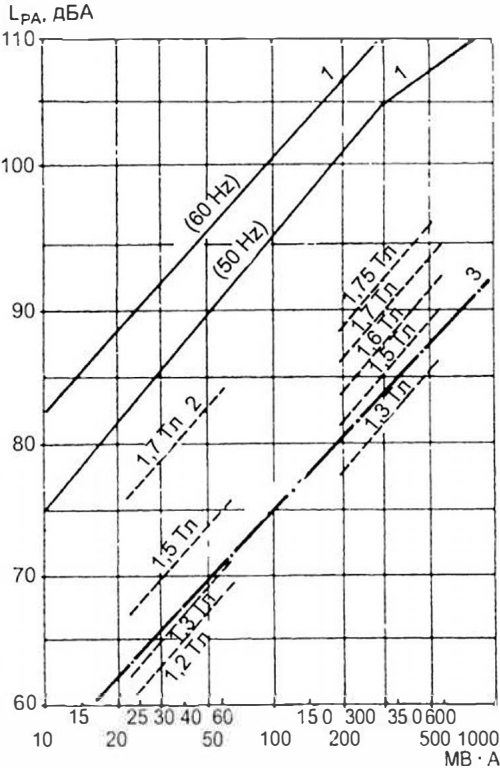


Рис. 13.6. Корректированные уровни звуковой мощности (КУЗМ), $L_{p, \text{дБА}}$, трансформаторов в зависимости от их электрической мощности S_H (частота сети 50 Гц):

1 — КУЗМ трансформаторов стандартной конструкции, обусловленные магнитной системой; 2 — КУЗМ малошумных трансформаторов, обусловленные магнитной системой; 3 — КУЗМ маломощных трансформаторов, обусловленные обмоткой.

L_v — виброскорость, дБ (при индукции $B = 1,6 \text{ Тл}$, $L_v = 70 \text{ дБ}$; снижение индукции на $0,5 \text{ Тл}$ обеспечивает уменьшение виброскорости на 10 дБ).

Значение L_v зависит от свойств электротехнической стали, распределения поперечных магнитных потоков в углах и над средним стержнем магнитной системы, а также от высших гармоник магнитострикции и магнитного потока на отдельных участках магнитной системы, что определяет известную приближенность расчета. При прочих равных условиях, увеличение длины стержня вдвое повышает уровень звука на 6 дБ . Резонанс магнитной системы может увеличить уровень звука трансформатора на 5 дБ .

Характерным для магнитных систем трансформаторов является густой спектр собственных частот в диапазоне $1-3 \text{ кГц}$, обусловленных отдельными пластинами электротехнической стали. Последние не всегда монолитно стянуты, в толще магнитной системы имеются пустоты, определяемые коэффициентом заполнения стали (не менее $0,97$ по ГОСТ 21427.2—83), что ведет к высокочастотным резонансным колебаниям пластин и их участков. Этим, в частности, объясняется высокий уровень звука трансформаторов с частотой питающего напряжения 400 Гц и выше.

3.4.2. Влияние массы и электрической мощности

Существует прямая зависимость уровней звуковой мощности трансформаторов от их электрической мощности (рис. 13.6). Эта зависимость может меняться с изменением конструкции и материалов, индукции или массы при сохранении на прежнем уровне прочих параметров. Для геометрически подобных трансформаторов их уровень звуковой мощности пропорционален массе (M), или линейным размерам в третьей степени, а также пропорционален электрической мощности трансформатора (S) в степени $3/4$.

$$L_p = L'_0 + 20 \lg M, \text{ дБ},$$

$$L_p = L''_0 + 15 \lg S, \text{ дБ},$$

где M — масса магнитной системы, т; S — мощность, кВт·А; L'_0 , L''_0 — постоянные для конкретных типов трансформаторов, которые зависят от величины индукции и конструкции.

Эти зависимости справедливы при неизменном значении магнитострикции. Отклонения от этих законов могут быть при появлении резонансов.

3.4.3. Влияние индукции

Уровень шума трансформатора изменяется на 3 дБ при изменении индукции на 10 %. Это соотношение характерно для основной гармоники шума трансформатора. Высшие гармоники (3-я и 5-я) при снижении индукции уменьшаются быстрее: на 4—5 дБ при снижении индукции на 10 %, что связано с улучшением синусоидальности индукции в отдельных участках магнитной системы.

Уровни вибрации и шума трансформатора зависят от характера распределения магнитных потоков по сечению сердечника.

Даже в простейшей навитой магнитной системе при синусоидальности суммарного магнитного потока, в наружном и внутреннем, относительно окна, контурах магнитной системы индукция искажена за счет третьей гармоники. Это обуславливает повышение третьей гармонической составляющей вибрации магнитной системы. При снижении индукции содержание третьей гармоники в крайних контурах уменьшается, но при этом возрастает неравномерность общей индукции (например, при $B = 1,4$ Тл индукция внутреннего участка магнитной системы, превышает индукцию наружного участка на 30 %).

Индукция в углах шихтованных рамных магнитных систем может достигать удвоенного значения от номинального, что является предпосылкой повышения вибраций и шума.

Для трехфазных магнитных систем характерно повышенное содержание третьей гармоники шума, что связано как с фазовым сдвигом колебаний отдельных стержней, так и с наличием значительной третьей гармоники индукции.

Повышенным шумом и вибрацией отличаются симметричные трехфазные магнитные системы из навитых магнитопроводов, где третья гармоника индукции может достигать 40 % от основной гармоники.

Применение косого стыка в магнитных системах снижает уровень шума на 3 дБ, по сравнению с прямым стыком. При косом стыке достигается наилучшее распределение магнитного потока, и, соответственно, снижение значения магнитострикции.

Трехстержневые двухрамные магнитные системы имеют уровень шума на 3 дБ больше, по сравнению с однорамными, что вызвано изгибными колебаниями отдельных участков рам, вследствие сложного потоко-распределения.

3.4.4. Влияние бака

Стенки бака обычно повышают уровень звука источника вибраций, т.е. активной части трансформатора, как за счет увеличения поверхности звукового излучения, так и за счет резонанса стенок бака. Это повышение характерно для низших гармоник звука. Более высокие гармоники источника, звукоизолированные баком, могут и снижаться.

Передача вибрационной энергии от активной части к стенкам бака происходит через опоры, либо другие механические элементы, а также через масло.

Из соображений механической прочности стенки баков обычно укрепляют ребрами жесткости. Максимальные вибрации имеют место в центре пластин между ребрами жесткости и зависят от значения собственной частоты пластин.

Собственные частоты пластин, заключенных между ребрами жесткости, можно рассчитать по формуле:

$$f_0 = 2,48 \cdot 10^6 \delta e^2 / \sqrt{1 + (0,36/\delta e^2)}, \text{ Гц}$$

где $e = (1/A^2) + (1/B^2)$; A и B — размеры пластин, мм; δ — толщина пластин, мм.

У плоских баков трансформаторов амплитуда вибрационных смещений случайно зависит от неплоскостности пластины стенки и от полученных ею механических напряжений в процессе сварочных работ.

Более закономерный характер распределения максимальных вибраций имеют круглые в плане баки.

3.4.5. Влияние режимов работы трансформатора

Вибрации и шум трансформаторов во многом зависят от режимов их работы.

Спектральное содержание характеристик вибрации и шума трансформаторов связано с частотой питающего напряжения. Для частоты сети 50 Гц гармонические составляющие вибрации и шума кратны частоте 100 Гц. У трехфазных трансформаторов наиболее ярко выражены первые три гармоники, у однофазных — первые две. Соответственно трансформаторы, например, на 400 Гц имеют гармонические составляющие шума и вибрации 800, 1600, 2500 и т.д. Гц.

Традиционно контроль виброакустических характеристик трансформаторов осуществляется в режиме холостого хода, т.к. преобладающим является шум, создаваемый магнитной системой.

Определенные коррективы в виброакустические параметры трансформаторов вносит их нагрузка. О влиянии обмотки уже

упоминалось (оно начинает проявляться при индукции 1,4 Тл и ниже).

Емкостная нагрузка ухудшает виброакустические характеристики по сравнению с индуктивной нагрузкой. Повышенную виброактивность и уровень звука имеют преобразовательные и электронечные трансформаторы. Амплитуда и частотный состав вибрации и звука преобразовательного трансформатора зависят от типа выпрямительных устройств. Повышение уровня звука электропечных трансформаторов вызывается прерывистым режимом работы. Например, в режиме расплава шихты в печи, когда ток нагрузки трансформатора определяется прерывистой электрической дугой на электродах, увеличивается шум трансформатора как в связи с большими бросками тока, так и с повышением высокочастотных составляющих в токе.

Включение трансформатора в работу может привести к повышенному шуму вследствие остаточной намагниченности сердечника. Из-за перенасыщения сердечника уровень шума может превысить уровень при нормальной работе на 20 дБ. Снижение шума до установившегося состояния после включения может длиться до 6 часов.

3.4.6. Качество питающего напряжения

Определенное влияние на уровень звука оказывают высокочастотные помехи в питающем напряжении сети, в которых работают различные преобразовательные устройства. Электрические помехи в таких сетях обычно невелики, составляя доли процента от номинального напряжения. Однако, эти составляющие могут повысить уровень звука сухих трансформаторов малой и средней мощности на 20–30 дБ. Это повышение связано с резонансами отдельных пластин магнитной системы.

Борьба с этим явлением затруднительна, т. к. связана с устранением резонанса отдельных пластин активной стали, и, особенно, в углах шихтованных магнитных систем. Снижение индукции для устранения высокочастотных гармоник вибрации оказывается бесполезным: снижение индукции на 10 % снижает шум в высокочастотной области спектра на 1–2 дБ.

4. Методы измерений

4.1. Контроль шума трансформаторов

Согласно стандарту ГОСТ 12.2.024–87 [1] в качестве нормируемого параметра принят «корректируемый уровень звуковой мощности» (КУЗМ) по характеристике A —

$L_{РА}$, дБА. Стандарт нормирует предельные значения КУЗМ в зависимости от номинальной мощности и системы охлаждения трансформаторов.

Предельные значения КУЗМ представлены в табл. 13.1.

Регламентируемый в [6] скорректированный уровень звуковой мощности шунтирующих реакторов класса напряжения 500, 750 кВ не должен превышать 110 дБА; средний уровень звука реакторов при отключенном дутье не должен превышать 85 дБА, при включенном дутье — 90 дБА.

Методы определения шумовых характеристик масляных трансформаторов

При подготовке к акустическим испытаниям прежде всего проверяется пригодность испытательного помещения. Оценивается уровень звуковых помех в помещении и принимаются меры (отключается шумное оборудование, выбирается время суток) к тому, чтобы он был меньше ожидаемого шума трансформатора самое малое на 3 дБ. Определяется постоянная помещения K , характеризующая звукоотражение. Постоянная K не должна превышать 7 дБ. Определение K осуществляется методом образцового источника (ГОСТ 12.1.025–81), т. е. путем сравнения известного уровня звукового давления (УЗД) образцового источника с измеренным уровнем в конкретном помещении. (Постоянная K равна разности между двумя значениями УЗД.) При отсутствии образцового источника звука, K рассчитывается по формуле:

$$K = 10 \lg [1 + (4S/A)(1 - A/S_V)],$$

где S — площадь измерительной поверхности, м²; A — эквивалентная площадь звукопоглощения, $A = \alpha \infty S_V$; S_V — площадь поверхности помещения, включая пол, м²; $\alpha = 0,15$ для помещений машинных залов.

Если акустические испытания проводятся на испытательной станции цеха, располагающейся в торце здания, тогда значение S_V принимается, исходя из площади испытательной станции, поскольку измеренные УЗД трансформатора будут определяться звукоотражением от ближайших стен.

Измерение шумовых характеристик трансформатора производится в режиме холостого хода, при навешенных охладителях и радиаторах и с установленными переключающими устройствами, находящимися в положении основного отвлечения. Электрические средства испытаний и измерений должны соответствовать требованиям ГОСТ 3484–77. Трансформатор устанавливается в середине

Таблица 13.1. Допустимые скорректированные уровни звуковой мощности трансформаторов, в зависимости от их номинальной мощности, класса напряжения и системы охлаждения, дБА

Система охлаждения М (ONAN); естественная циркуляция воздуха и масла												
Типовая мощность, МВ·А		0,1	0,16	0,25	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4,0	6,3	10
Класс напряжения, кВ	6—35	59	62	65	68	70	73	75	76	79	81	83
	110, 150	—	—	—	—	—	—	—	78	80	82	84
Система охлаждения Д (ONAF); принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла												
Типовая мощность, МВ·А		10	16	25	32	40	63	80	125			
Класс напряжения, кВ	10—110	87	88	89	90	91	95	98	102			
	150	—	89	90	91	92	96	99	103			
	220—330	—	—	—	94	97	99	102	105			
Система охлаждения ДЦ, НДЦ (OFAF); принудительная циркуляция воздуха и масла												
Типовая мощность, МВ·А		63	80	125	200	250	400	500				
Класс напряжения, кВ	110—150	—	103	106	108	109	110	—				
	220, 330	105	107	108	110	112	114	115				
	500, 750	—	—	110	112	113	115	116				
Система охлаждения Ц, НЦ, МЦ, НМЦ (DFWF); принудительная циркуляция воды и масла												
Типовая мощность, МВ·А		160	200	250	400	630	1000	1250				
Класс напряжения, кВ	150, 220	105	107	109	111	112	114	—				
	330, 500	—	108	110	112	114	115	116				
	750	—	—	—	—	115	—	—				

испытательного поля на звукоотражающем полу на высоте, соответствующей высоте кареток. Все посторонние звукоотражающие предметы от трансформатора удаляются.

Измерительные точки равномерно располагаются вокруг испытуемого трансформатора на условной поверхности, охватывающей изделие (рис. 13.7). Расстояние между измерительными точками не должно превышать 1 м, при общем количестве точек не менее 10. Для трансформаторов с системами охлаждения без вентиляторов измерительная поверхность располагается на расстоянии 0,3 м, а для трансформаторов с системами охлаждения с вентиляторами, кроме того и на расстоянии 2 м, от условной излучающей звук поверхности трансформатора. Условную звукоизлучающую поверхность трансформатора определяет охватывающая его горизонтальную проекцию линия с наименьшим периметром (воображаемая натянутая нить, включающая элементы жесткости бака, радиаторы, переключательные устройства и т.д. за исключением вводов, расширителя и прочих деталей, не оказывающих влияния на звуконзлучение трансформатора). Если ох-

лаждающие устройства вынесены от бака на расстояние 3 м и более, они рассматриваются, как независимые источники звука.

При высоте бака менее 2,5 м измерительные точки располагаются на половине высоты бака; при высоте бака 2,5 м и более, точки располагаются на 1/3 и 2/3 высоты бака.

До и после испытаний определяются уровни помех при отключенном трансформаторе, при количестве точек измерения не менее десяти. Если разность между измеренными уровнями звука при включенном и отключенном трансформаторе (ΔL , дБА) менее 10 дБА, из измеренного значения вычитается поправка (Δ), в соответствии с таблицей 13.2.

Уровни звука трансформаторов с системой охлаждения Д, ДЦ, НДЦ измеряются

Таблица 13.2. Значения поправок на уровни помех в помещении (дБА)

ΔL	3	4—5	6—8	9—10
Δ	3	2	1	0,5

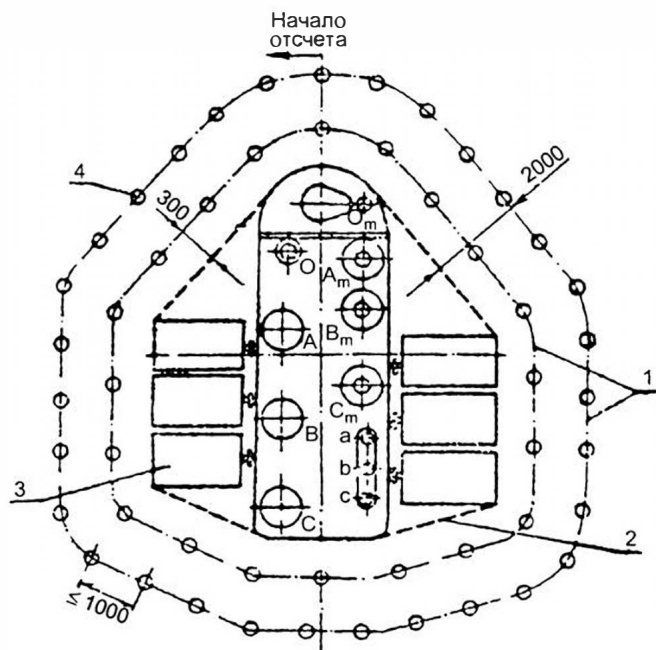


Рис. 13.7. Расположение точек измерения шумовых характеристик трансформатора с принудительной циркуляцией воздуха (система Д):

1 — измерительная линия; 2 — условная излучающая звук поверхность; 3 — охладители; 4 — микрофон.

дважды: с отключенными вентиляторами на расстоянии 0,3 м и с включенными вентиляторами на расстоянии 2 м. Для остальных трансформаторов измерение уровня звука выполняется только на расстоянии 0,3 м. У трансформаторов с циркуляционной системой охлаждения должна быть включена циркуляция масла.

Средний уровень звука L_A вычисляется по формуле:

$$L_A = 10 \cdot \left(\lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 L_i} \right) - K, \text{ дБА},$$

где L_i — уровень звука в дБА в i -й точке, за вычетом поправки на помехи (Δ); n — число точек измерения; K — постоянная, учитывающая влияние отраженного звука, дБА.

Если значения L_i отличаются от точки к точке не более, чем на 5 дБА, тогда в качестве среднего уровня звука принимается среднее арифметическое значение.

Корректированный уровень звуковой мощности L_{PA} вычисляется по формуле:

$$L_{PA} = L_A + 10 \lg S/S_0, \text{ дБА}$$

где S — площадь измерительной поверхности, м^2 ;

$$S_0 = 1 \text{ м}^2.$$

Площадь измерительной поверхности на расстоянии 0,3 м от поверхности звуконзлучения трансформатора равна:

$$S_{0,3} = 1,25 H l, \text{ м}^2,$$

где H — высота бака без расширителя и вводов, м; l — длина измерительной линии, м.

Для измерительного расстояния 2 м площадь измерительной поверхности равна:

$$S_{2,0} = (H + 2) l, \text{ м}^2.$$

Уровни звуковой мощности трансформатора в октавных полосах частот вычисляются аналогично.

Методы определения шумовых характеристик трансформаторов малой мощности

При определении шумовых характеристик трансформаторов до 100 кВ·А используется ориентировочный метод [3]. Измерения проводятся либо на открытой площадке над звукоотражающей поверхностью ($K = 0$), либо в помещениях, размеры которых достаточны для размещения испытуемого объекта и измерительных точек ($K < 7$ дБ). Количество измерительных точек принимается равным 5 (рис. 13.8: при разности между уровнями звука в отдельных точках большей, чем 8 дБА, принимается 8 измерительных точек [2]). При условии, что измерительное расстояние d (обычно принимается равным 1 м) больше или равно $1,5 \cdot l_{\text{макс}}$ (где $l_{\text{макс}}$ — наибольший размер изделия), в качестве измерительной поверхности принимается по-

лусфера площадью $S = 2\pi R^2$, м. кв. Если указанное условие не выполняется, тогда за измерительную поверхность принимается огибающий источник звука параллелепипед [3].

Основная трудность, возникающая при акустических испытаниях маломощных трансформаторов, связана с их низкими уровнями звука и невозможностью достижения в обычных помещениях малых уровней помех, которые должны быть, самое малое, на 3 дБ ниже уровней звука включенного трансформатора. Поэтому измерения шумовых характеристик маломощных трансформаторов желательно проводить в заглушенных камерах.

4.2. Контроль вибраций

Стандартами предписывается проверка уровня вибраций (мкМ среднеквадратических) шунтирующих и дугогасящих заземляющих реакторов при приемо-сдаточных испытаниях, а также их системы охлаждения при периодических и типовых испытаниях.

Техническими условиями установлены предельные значения вибраций реакторов (табл. 13.3).

Вибрация реакторов измеряется при номинальном напряжении и номинальной частоте. На заводе-изготовителе измерения выполняются дважды: до и после одночасовой выдержки при повышенном напряжении. Это позволяет оценить динамику виброактивности реактора в процессе нагрева, а также выявить дефекты сборки и ослабление прессовки магнитной системы в процессе работы реактора.

Конкретные типы реакторов характеризуются определенными участками бака с максимальными вибрациями. Местонахождение точек с максимальной вибрацией на элементах бака определяется опытным путем; в дальнейшем разметка измерительных точек осуществляется в соответствии с разработанной схемой. Характерные точки измерения берутся, что позволяет осуществлять контроль вибрации реактора в процессе эксплуатации.

Таблица 13.3. Допустимые значения виброперемещений реакторов, мкМ ср. кв.

Тип реактора	Класс напряжения, кВ	Стенки бака	Система охлаждения
Реакторы шунтирующие и токоограничивающие	6—10	100	120
	400—750	60	85
Реакторы заземляющие дугогасительные	6—35	130	130

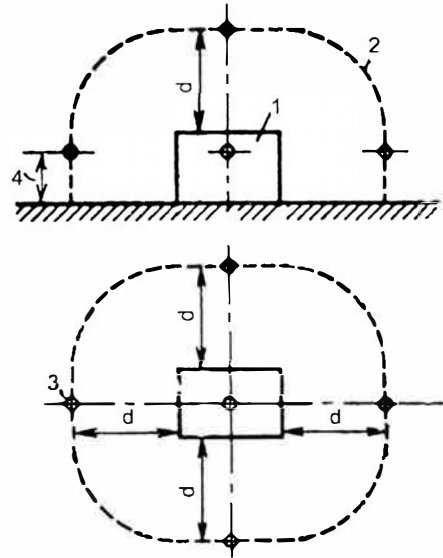


Рис. 13.8. Расположение точек измерения шумовых характеристик трансформатора малой мощности (до 100 кВ·А):

1 — источник звука; 2 — измерительная поверхность; 3 — микрофон; 4 — не менее 0,15 м.

Вибропреобразователь (акселерометр) крепится в измерительных точках с помощью магнита, либо шупа; измерительная ось вибропреобразователя должна быть перпендикулярной поверхности объекта.

4.3. Средства виброакустических измерений и испытаний

Виброакустическая аппаратура, как правило, универсальна: при условии ее оснащения преобразователями звукового давления и вибрации, а также шкалами, она позволяет измерять как шумовые, так и вибрационные характеристики. Универсальная аппаратура используется для контроля параметров при приемо-сдаточных испытаниях и в условиях эксплуатации. Для исследовательских или мониторинговых целей используется аппаратура, предназначенная для анализа отдельно шумовых либо вибрационных параметров.

4.3.1. Аппаратура для измерения шумовых характеристик

Измерение уровня звука в дБА или уровня звукового давления в дБ осуществляется шумомерами. Воспринимаемое микрофоном звуковое давление преобразуется в шумомере в электрический сигнал, который после усиления подается через аттенюаторы на блок фильтров частотной коррекции.

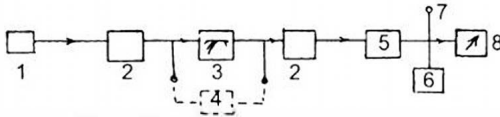


Рис. 13.9. Блок-схема шумомера: 1 — микрофон; 2 — усилитель; 3 — схемы частотной коррекции; 4 — внешние фильтры; 5 — среднеквадратичный детектор; 6 — запоминающее устройство; 7 — выход; 8 — аналоговый или цифровой измерительный прибор.

содержащий стандартные схемы *A, B, C, D* (рис. 13.9). Затем сигнал подается на индикатор (аналоговый или цифровой). Для выполнения спектрального анализа шума шумомеры либо оснащаются собственными полосовыми фильтрами, либо имеют возможность подключения внешних фильтров.

Характеристики шумомеров определены ГОСТ 17187—81, стандартами СЭВ 1351—78, МЭК R/179/1973 и МЭК-651.

В качестве приемника звука в шумомерах применяются конденсаторные микрофоны.

Для предотвращения влияния оператора на результаты измерений, микрофон часто подключают к шумомеру через удлинитель. Наличие удлинительного кабеля снижает чувствительность измерительного тракта. Поэтому между шумомером и микрофоном включается предусилитель заряда или напряжения. При использовании предусилителей заряда длина кабеля не сказывается на чувствительности измерительной системы.

Перед проведением и после акустических испытаний проводится калибровка измерительного тракта шумомера. Для этих целей применяется акустический калибратор — источник звука, создающий постоянное звуковое давление на фиксированной частоте. Например, акустический калибратор типа 4230(Б и К) создает УЗД, равный 94 дБ на частоте 1000 Гц.

Виброакустическая аппаратура оснащается источником собственного калибровочного сигнала, с помощью которого контролируется состояние аппаратуры без внешних устройств (микрофона и кабеля). Последние выпускаются с калибровочными данными, согласующимися с внутренним электрическим сигналом прибора. Поскольку микрофон является достаточно уязвимым звеном системы, предпочтение отдается калибровке всего измерительного тракта с помощью акустического калибратора.

4.3.2. Аппаратура для измерения вибрационных характеристик

Контроль вибрации осуществляется с помощью специализированных приборов — виброметров, сигнал на которые подается от вибропреобразователя — акселерометра,

закрепленного на колеблющейся поверхности.

Используемые в качестве вибропреобразователей пьезоэлектрические акселерометры преобразуют ускорение колебания в электрический сигнал; отношение между этими двумя значениями представляет собой чувствительность акселерометра, выражающуюся через напряжение $\text{мВ/м} \cdot \text{с}^{-2}$ или через заряд $\text{пКл/м} \cdot \text{с}^{-2}$. Обычно акселерометры имеют нормализованную чувствительность, отрегулированную в процессе производства с допуском $\pm 2\%$ на определенное значение, кратное 10. Применение нормализованных акселерометров облегчает калибровку измерительных трактов и позволяет эффективно работать в многоканальных системах. Частотная характеристика акселерометра линейна вплоть до его резонансной частоты, зависящей от массы акселерометра и способа его крепления. Например, для акселерометра массой 15 г верхняя граничная частота его рабочего диапазона составляет: при креплении на шпильке — 20 кГц, на магните — 2 кГц, на шуле — 1 кГц. Для того, чтобы устранить влияние акселерометра на колеблющийся объект, масса первого должна быть в 10 раз меньше, чем у объекта. Для устранения влияния длины провода, соединяющего прибор с преобразователем, аппаратура оснащается предусилителем заряда, согласующим сопротивление вход/выход.

Обычно используются преобразователи, измеряющие колебания объекта в направлении, перпендикулярном колеблющейся плоскости. Существуют трех-компонентные преобразователи, позволяющие измерять вибрацию в трех координатах.

Для калибровки измерительных трактов, включающих аппаратуру, кабель и преобразователь, используются вибрационные столы, генерирующие механические колебания на фиксированной или регулируемой частоте. В качестве примера, можно назвать калибратор типа 4291 (Дания, Брюль и Кьер), создающий колебания с пиковым значением ускорения 10 м/с^2 на частоте 79,6 Гц и предназначенный для калибровки акселерометров массой до 100 г.

5. Методы снижения шума трансформаторов

Снижение шума трансформаторов связано с решением задач из области акустики, вибрации, динамики, механики, материаловедения и, конечно, электротехники. Про-

цесс создания малозумной конструкции следует разделить на ряд этапов: обеспечение малозумности источников вибрации, т.е. магнитной системы, обмоток и вентиляторов; виброизоляция этих источников, ограждение источников звука звукопоглощающими устройствами, установка вибропоглощающих конструкций и, наконец, выполнение внешних мероприятий по снижению шумности в местах установки трансформаторов.

5.1. Улучшение магнитных характеристик электротехнической стали и конструкции магнитной системы

Снижение шума магнитной системы достигается, в первую очередь, за счет использования электротехнических сталей с гарантированно малыми значениями магнитострикции. К таким сталям относятся электротехнические стали типов 3407, 3408 и другие.

Применение электротехнических сталей с пониженной магнитострикцией эффективно лишь при условии выбора оптимального режима отжига стали. Необходимо учитывать максимальное значение магнитострикции при определенной индукции, знак и спектр ее динамической петли. Для монотонно положительной магнитострикции оптимальная температура отжига составляет 820 °С в сочетании с постоянным температурным градиентом охлаждения стали, равным 50 °С/час. Режим отжига должен уточняться, в зависимости от результатов входного контроля магнитострикции различных партий стали, учитывая, что при отрицательной магнитострикции отжиг может увеличить ее абсолютное значение при еще большем сдвиге в отрицательную область. Выполняющиеся вслед за отжигом технологические операции сборки как магнитной системы, так и трансформатора в целом, должны обеспечивать минимальные механические воздействия на электротехническую сталь, как ухудшающие ее магнитострикционные характеристики.

Вторым естественным методом уменьшения шума магнитной системы является снижение номинальной индукции. Этот метод наиболее пригоден для трансформаторов с частотой питающего напряжения 50 Гц (снижение индукции на 10 % уменьшает уровень звука на 3 дБА); для трансформаторного оборудования с частотой питающего напряжения 400 Гц и более, либо работающего в условиях прерывистой нагрузки.

Эффект от снижения индукции оказывается недостаточным (несколько более 1 дБА при 10-процентном снижении индукции),

Конструктивно-технологические решения, направленные на снижение шума магнитных систем, диктуются необходимостью устранения резонансов как всей механической системы, так и ее элементов, вплоть до отдельной пластины электротехнической стали. Одновременно, конструкция магнитной системы должна обеспечивать равномерное распределение индукции, исключаящее локальные перенасыщения в магнитной системе, устранение поперечных составляющих магнитного потока и снижение гармонических составляющих индукции в отдельных участках магнитной системы.

Применительно к планарным шихтованным магнитным системам, решение перечисленных задач обеспечивается за счет следующих мер:

- ◆ Подбираются листы электротехнической стали с повышенной плоскостностью, учитывая, что в деформированных листах при стяжке магнитной системы (МС) возникают механические напряжения, ведущие к увеличению магнитострикции. Использование листов стали с повышенной плоскостностью позволяет снизить уровень звука трансформатора на 5 дБА.
- ◆ Предпочтительным для МС является косяк стык со ступенчатым перекрытием. Уровень звука при этом понижается до 4 дБА, по сравнению с прямым стыком.
- ◆ Отдается предпочтение однорамным магнитным системам, уровни звука которых на 3 дБА меньше, чем у многорамных конструкций.
- ◆ Для 3-фазных трансформаторов используется групповая магнитная система, состоящая из трех отдельных фаз. При этом достигается снижение 3-ей гармоники вибрации и шума.
- ◆ Применяется бандажирование стержней и ярем магнитной системы, направленное на снижение амплитуды изгибных колебаний пластин стали.
- ◆ Следует стремиться к минимальным размерам окна и, соответственно, к малой суммарной длине стержней и ярем МС, что обеспечит уменьшение абсолютного значения удлинения системы.
- ◆ Элементы прессовки должны создавать усилия, растягивающие сталь в направлении прокатки и магнитного потока.

Равномерность распределения магнитного потока в системе достигается за счет

подбора стали, отличающейся однородностью магнитных свойств. Устранение влияния разношинности внешних и внутренних контуров магнитной системы может достигаться применением для них разных марок стали с различным магнитным сопротивлением.

Применение стали Ni–В, имеющей низкие магнитострикцию и чувствительность к изгибу, в сочетании со ступенчатым косым стыком в углах магнитной системы может значительно уменьшить уровни звуковой мощности трансформаторов.

В случае особых требований к снижению уровня звука трансформатора индукция может быть снижена до 1,4 Тл. Однако, это увеличивает габариты трансформатора и его стоимость. Дальнейшее снижение индукции неэффективно, т. к. начинает преобладать шум, создаваемый обмотками.

5.2. Возможности снижения шума обмоток

До настоящего времени не найдено действенных средств для снижения шума, создаваемого обмотками. Возможности имеются в снижении эластичности обмотки путем применения изоляционных материалов с большим динамическим модулем упругости и за счет усовершенствования системы крепления обмоток. Простое увеличение усилий прессовки обмоток их уровень звука не уменьшает.

5.3. Снижение шума, создаваемого баком

Вибрации, передаваемые от магнитной системы на бак, уменьшаются за счет виброизоляции активной части, устанавливаемой в баке на амортизаторы.

Устранить второй путь передачи вибрации, то есть от активной части на бак через масло, затруднительно, поскольку при этом требуется установка звукопоглощающих материалов на внутренней поверхности бака. Этот способ снижения шума в трансформаторах не применяется.

Для уменьшения шума, излучаемого баком трансформатора необходимо повышение его жесткости. Это автоматически достигается в трансформаторах и реакторах, бак которых рассчитывается на полный вакуум и укреплен ребрами жесткости. Дальнейшее уменьшение шума может быть достигнуто установкой демпферов, настроенных на частоту 100–200 Гц. Эта мера может снизить уровень шума на величину до 10 дБ.

5.4. Снижение шума вентиляторов

Для снижения уровня звука вентиляторов возможны следующие мероприятия:

- ◆ установка вентиляторов на резиновые или пружинные амортизаторы;
- ◆ балансировка вращающихся частей вентилятора, включая крыльчатку и ротор электродвигателя;
- ◆ замена лопаток вентилятора, выполненных из металла, на стеклопластиковые, как не поддающиеся коррозии и лучше балансирующиеся;
- ◆ устранение элементов, находящихся в потоке воздуха;
- ◆ нанесение звукопоглощающих материалов на входе и выходе вентилятора.

Меры, снижающие шум вентиляторов, оправданы, если не вызывают уменьшения их производительности. Поэтому уменьшенные скорости вращения вентилятора, как снижающее его шум, должно сопровождаться увеличением числа лопаток, их ширины и диаметра, а также увеличением размеров самого вентилятора. Для центробежных вентиляторов возможно использование лопаток, загнутых вперед. Снижение шума осевых вентиляторов достигается за счет применения профилированных лопаток, уменьшения зазора рабочего колеса, установки направляющих за лопатками.

Снижение скорости вращения целесообразно примерно до 750 об/мин. Эти и другие меры позволяют снизить уровень звука вентиляторов до 10 дБ.

5.5. Снижение шума трансформаторов малой мощности

Спецификой трансформаторов мощностью до 100 кВ·А является большое разнообразие конструкций магнитных систем, среди которых можно назвать шихтованные, навитые, стыковые (склеиваемые из двух половин), симметричные пространственные, при множестве модификаций, обусловленных типами стыков, видами шихтовки, характером прессовки и т. д.

При создании малозумных трансформаторов предпочтение следует отдавать шихтованным магнитным системам, как наименее виброактивным, в силу своей повышенной жесткости.

Наиболее шумными являются симметричные пространственные магнитные системы 3-фазных трансформаторов, укомплектованные 3-мя О-образными навитыми магнитными элементами. Повышенная виброактивность такой системы обусловлена

резкой несинусоидальностью индукции в отдельных элементах, низкой жесткостью конструкции и собственными частотами, находящимися в диапазоне 100—300 Гц.

1-фазные трансформаторы с навитой тороидальной магнитной системой также имеют малую величину шумовых характеристик. Положительный эффект в данном случае достигается за счет вибро- и звукоизолирующих свойств обмотки, которая полностью охватывает магнитную систему. Крепление тороидальной активной части за центр тяжести еще более улучшает виброшумовые характеристики такого трансформатора.

Существенное снижение уровня звука трансформаторов достигается при помощи пропитки и склейки магнитной системы материалами на основе эпоксидных смол. Происходящее при склейке замоноличивание магнитной системы устраняет ее вибрации в направлении, перпендикулярном плоскости листа, при некотором ухудшении магнитострикционных стали. Эффект пропитки тем выше, чем глубже в толщу магнитной системы проникает склеивающий материал. Но, зачастую, жидкий компаунд, во-первых, не проникает во все пустоты между пластинами стали, а, во-вторых, вытекает из них в процессе полимеризации. Коэффициент температурного расширения пропитывающего материала должен быть меньше, чем у электротехнической стали: в этом случае полимеризованный материал горячего отверждения будет, по мере охлаждения, оказывать растягивающее действие на сталь магнитной системы.

5.6. Вибро- и звукоизоляция активной части

По исчерпанию физических, конструктивных и технологических возможностей снижения вибрации и шума в источнике, принимаются меры по виброакустической изоляции активной части от бака (кожуха) трансформатора.

С этой целью активная часть устанавливается в баке трансформатора на виброизоляторах, в качестве которых используются резиновые, металлические, пружинные амортизаторы, минерально-волоконные и пенопластовые плиты и т.д. Собственная частота f_0 установленной на виброизоляторах активной части должна быть в 2—3 раза меньше частоты возбуждающих вибрацию сил. Например, для трансформаторов с основной гармоникой возбуждающих вибрацию сил $f = 100$ Гц, должно выполняться

условие $f_0 < 50$ Гц. Только в этом случае амортизаторами будет обеспечено снижение вибрационной силы, передаваемой от активной части на бак трансформатора. При $f/f_0 = \sqrt{2}$, коэффициент передачи $\tau = 100$ %, т.е. виброизоляция равна нулю. Предусматривая виброизоляцию активной части от днища бака, необходимо также обеспечить отсутствие жестких контактов магнитной системы со стенками и крышкой бака.

Снижению шума трансформатора способствуют также следующие мероприятия:

- ◆ Установка активной части на обмотках, выполняющих виброизолирующие функции (для $B > 1,4$ Тл).
- ◆ Размещение виброизолирующих опор на равных расстояниях от центра тяжести активной части, что обеспечивает их равномерную нагрузку.
- ◆ Установка виброизолирующих опор непосредственно над катками или другими опорными фундаментными элементами.

Метод виброизоляции в особенности эффективен и необходим в условиях замкнутых помещений, например, на судах. Вместе с тем, активная часть, установленная на «мягких» амортизаторах, может сама сильно вибрировать, повышая виброактивность бака или кожуха за счет передаваемого по воздуху или маслу звука. Поэтому может оказаться оправданным жесткое крепление трансформатора или даже только активной части к тяжелому фундаменту, амортизационно развязанному с остальными конструкциями здания. Присоединение дополнительной массы фундамента к активной части понижает ее собственные уровни вибрации и уменьшает амплитуду возбуждающих вибрационных сил, передаваемых в окружающую среду.

6. Снижение вибраций шумящих и заземляющих реакторов

Вибрация реакторного оборудования может достигать значений до 100 мкм ср. кв. и выше) и представлять опасность для его механической прочности.

Повышенные вибрации и шум шумящих реакторов объясняются конструкцией их магнитных систем с немагнитными зазорами (рис. 13.10).

В дополнение к магнитострикционным силам, силы магнитного прижатия, возникающие в зазорах с периодичностью рабочего напряжения, повышают вибрацию элементов магнитной системы в продольном направле-

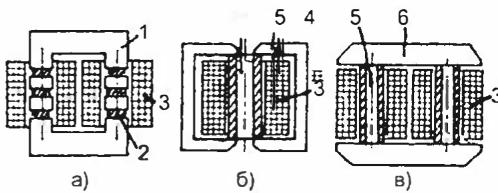


Рис. 13.10. Виды конструктивных магнитных систем реакторов:

a — стержневая магнитная система с немагнитными зазорами в стержне; *б* — броневая магнитная система; *в* — ярмовая магнитная система; 1 — магнитная система; 2 — немагнитная прокладка в зазоре; 3 — обмотка; 4 — шунты броневой магнитной системы; 5 — фарфоровая стойка; 6 — ярмо магнитной системы.

нии. Кроме того, вынуживание магнитного потока в зазорах вызывает появление его поперечной составляющей и, соответственно, изгибные колебания магнитной системы.

Для снижения уровня вибраций такого рода, в зазорах устанавливаются дистанцирующие элементы из материала с повышенной жесткостью, например, из фарфора. В мощных (60—300 МВ · А, 500—1200 кВ) безстержневых шунтирующих реакторах с машинными системами броневое и ярмового типа проблема вибрации решается с помощью размещаемой в обмотке фарфоровой стойки, на которую опираются окончания С-образных магнитных шунтов (рис. 13.10, *б*), или ярма (рис. 13.10, *в*). Прессовка магнитной системы относительно стойки из фарфора, отличающаяся высокими жесткостными характеристиками, обеспечивает малые амплитуды колебаний магнитных элементов системы.

Еще одной проблемой является устранение резонансов магнитной системы. Имеющиеся расчетные методы позволяют решить эту задачу.

Для виброизоляции от бака часто применяется установка активной части на демпфирующие элементы. Активная часть шунтирующих реакторов большой мощности устанавливается на пружинных амортизаторах.

Особого внимания в шунтирующих реакторах требует обеспечение отсутствия резонансов отдельных частей бака. Зачастую эти резонансы связаны с технологией изготовления баков, влиянием сварки и т. д. Устранение таких «технологических» резонансов осуществляется на стадии приемосдаточных испытаний.

7. Внешние меры снижения шума

Внешние меры, направленные на снижение передаваемого в окружающее пространство шума трансформатора, предусматривают уменьшение вибрации бака, а также установку на трансформаторе, или поблизости звукоизолирующих конструкций.

Снижение вибрации бака обеспечивают следующие конструктивные меры.

Стенки бака должны иметь рационально размещенные ребра жесткости, что может существенно снизить амплитуду вибрации и, тем самым, снизить уровень шума. В точках максимальных вибраций могут устанавливаться antivибраторы. Собственная частота металлической массы antivибратора должна составлять около 70 % от основной гармонички участка стенки бака.

С одной или со всех сторон трансформатора, возможно ближе к нему, могут устанавливаться экраны, перпендикулярные к защищаемому направлению. Края экранов должны выступать за трансформатор в стороны и вверх (рис. 13.11).

Ослабление уровня шума у защищаемого объекта при установленном экране может

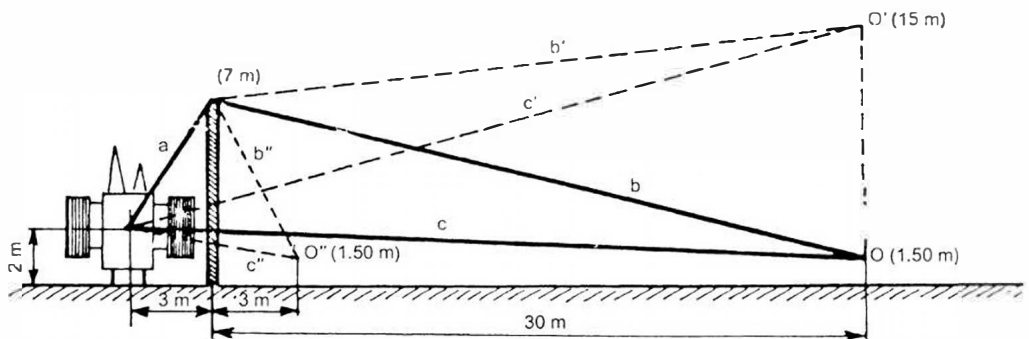


Рис. 13.11. Эффект экрана для различных положений наблюдателя: O (19.9 дБ), O' (9.2 дБ), O'' (15.5 дБ) при 100 Гц.

быть оценено по формуле

$$\Delta L = 10 \lg \left[\frac{20}{\lambda} (a + b - c) \right], \text{ дБ}$$

где a и b — расстояние от трансформатора до края экрана и от него до защищаемого объекта; c — расстояние от трансформатора до объекта по прямой линии, м; λ — длина волны звука, м.

Расчет проводится для преобладающих гармоник спектра звука. Для первых двух $\lambda = 3,4$ м и 1,7 м.

С помощью экрана уровень шума может быть уменьшен примерно на 10 дБ.

Большее снижение может быть достигнуто полным укрытием трансформатора звукопоглощающими панелями (рис. 13.12). При этом должны быть решены вопросы выноса за пределы укрытия систем охлаждения и обеспечение звукоизоляции труб системы охлаждения, проходящих через укрытие. Сверху звукоизоляция не должна быть выше нижнего края фарфора и не уменьшать изоляционных расстояний. Такой тип звукоизоляции может снизить уровень шума на 15—20 дБ.

Согласно сведениям, представленным на сессии СИГРЕ в 1998 году, были достигнуты следующие уровни снижения шума:

- ◆ звукопоглощающие стенки, смонтированные на баке — 5 дБА;
- ◆ двухслойные легкие панели — 15 дБА;
- ◆ кирпичные или бетонные стены — 20—30 дБА.

По некоторым данным при сооружении укрытия, имеющего толстые кирпичные стены и стоящего на отдельном фундаменте, можно получить более глубокое ограничение шума — на 40—50 дБА.

Стоимость таких способов снижения шума может оказаться выше, чем при снижении индукции в трансформаторе.

Внешние способы снижения шума имеют преимущество в том случае, когда требуется снизить уровень шума уже работающего трансформатора.

8. Активное подавление шума

Существуют методы активного воздействия на шум. Под активным воздействием понимается подача на объект сигнала, находящегося в противофазе к сигналу, вырабатываемому самим объектом. Пример разработки такой системы описан в докладе на сессии СИГРЕ 1998 г. Система состоит из датчиков, воздействующих элементов и управляющего устройства.

Сигнал, создаваемый устройством управляет антишумовыми и антивибрационными воздействующими элементами. Их воздействие должно быть адекватным акустической мощности или ускорению конкретных участков бака. Шум предотвращается до того, как он возникает. Это осуществляется после детального акустического обследования трансформатора, которое позволяет установить воздействующие элементы с наилучшим результатом.

Вибрации участков бака с ускорениями порядка 4 м/с^2 могут быть подавлены посредством одного пьезокерамического элемента.

Рабочая полоса антиакустических элементов находится в диапазоне 100—400 Гц. Элементы располагаются непосредственно у стенок бака и обеспечивают снижение уровней трех первых гармонических тонов.

На расстоянии, обычно у ограды подстанции, установлены микрофоны. Они включены на вход системы и позволяют корректировать ее работу при изменениях уровней звука оборудования, например при ухудшении погоды, изменении напряжения и нагрузки трансформатора.

Управляющее устройство располагается в помещении и может иметь до 64 входных и 48 выходных каналов. Система сама учитывает изменения погоды, влияющие на распространение звука, а также изменения уровня шума.

Наилучшее снижение шума система обеспечивает на частоте 100 Гц — 15 дБ, на

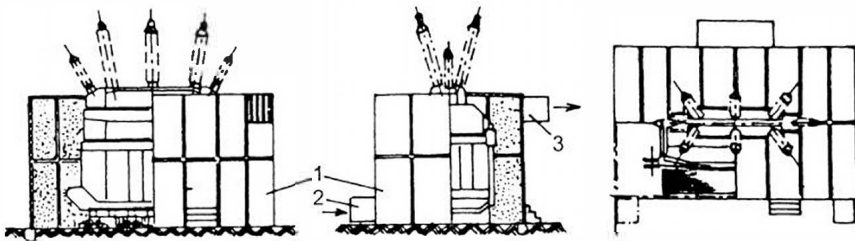


Рис. 13.12. Звукозащитное укрытие для трансформатора 220 кВ:

1 — звукозащитное укрытие; 2 — звукозащитный вход охлаждающего воздуха; 3 — звукозащитный выход воздуха, охлаждающее устройство и расширитель укрыты отдельно.

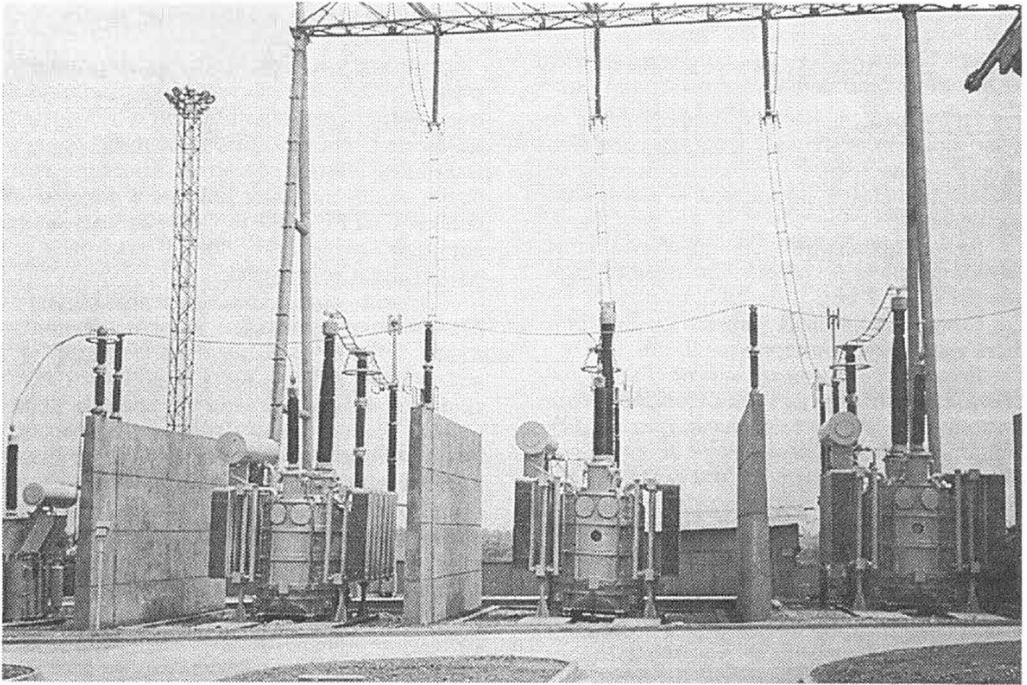


Рис. 13.13. Трехфазная группа шунтирующих реакторов $3 \times 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, 550 кВ и заземляющий реактор в нейтрали (класс изоляции нейтрали 220 кВ).

200 Гц — 10–12 дБ, на 300 и 400 Гц — 6–8 дБ.

Общее уменьшение слышимого шума зависит от наличия высших гармоник и уровня посторонних шумов. При низком их уровне получен результат 12–15 дБА.

Согласно [9], экономическая эффективность системы активного подавления шума, приблизительно на 30 % выше, чем у защитной стенки (экрана).

Однако следует заметить, что для более высоких тонов система дает меньшее снижение, как это видно из приведенных данных. Звукоизолирующее действие стенок для более высоких тонов будет лучше.

9. Заключение

Современные знания причин, вызывающих шум работающих трансформаторов и вибрации шунтирующих реакторов, а также применение современных расчетных методов, позволяют снизить шум и вибрации до приемлемых значений, предусмотренных стандартами. Более глубокое ограничение шума, требуемое при установке в густонаселенных районах, также возможно, но требует дополнительных затрат.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 13

1. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Трансформаторы силовые масляные. Нормы и методы контроля. ГОСТ 12.2.024–87. Введ. 1/1 1989. М., 26 с.
2. ССБТ. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума в свободном звуковом поле над звукоотражающей поверхностью. Технический метод. ГОСТ 12.1.026–80. Введ. 1/7 1981. М., 11 с.
3. ССБТ. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума. Ориентировочный метод. ГОСТ 12.1.028–80. Введ. 1/VI 1981. М., 8 с.
4. Вибрация. Общие требования к проведению измерений. ГОСТ 12.1.034–84.
5. Аппаратура для измерения параметров вибрации. ГОСТ 12.4.012–83.
6. Реакторы масляные шунтирующие. Технические условия ТУ 16–90.
7. Реакторы масляные заземляющие дугогасящие. Технические условия ТУ 16–88.
8. Reiplinger E. Study of noise emitted by power transformers, based on today's view point. CIGRE. International Conference on large high voltage electric systems. 1988, 12–08.
9. Vierengel J., Ahlmann B., Mudry T., Boss P. Use of active noise control technology to quiet power transformers.
10. Power transformer Handbook. Edited by Bernhard Hochart, Alstom transformer division. Saut-Quen, France. First English Edition.