

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л.А. Оглезнева, А.Н. Калиниченко

**АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ**

Часть II

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2009

УДК 620.179.17(075.8)

ББК 30.3я73

О-37

Оглезнева Л.А.

О-37 Акустические методы контроля и диагностики. Часть II: учебное пособие / Л.А. Оглезнева, А.Н. Калиниченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 292 с.

В пособии даны теоретические и практические характеристики акустико-эмиссионного метода контроля: природа явления, аппаратура и его применение для различных объектов. Рассмотрены методы и средства вибродиагностики машин и механизмов. Особое внимание уделено вопросам вибродиагностики подшипников, валов, зубчатых передач и электрических машин.

Разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Неразрушающий контроль» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению 200100 «Приборостроение», специальностям 200102 и 220501, для подготовки магистров по программам 200100.22, 200100.23, а также для персонала, аттестуемого на I, II и III уровни квалификации по акустико-эмиссионному и вибродиагностическому методам неразрушающего контроля.

УДК 620.179.17(075.8)

ББК 30.3я73

Рецензенты

Начальник производственно-испытательной лаборатории
ООО «Регионгазстрой»

О.В. Павлов

Генеральный директор ООО «ВиТэк-Сибирь»

А.А. Виноградов

© Оглезнева Л.А., Калиниченко А.Н., 2009

© Томский политехнический университет, 2009

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

КНИГА 1. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ	8
Введение	8
Глава 1. История развития работ по акустической эмиссии	9
Глава 2. Физические основы акустико-эмиссионного метода контроля	14
2.1. Источники АЭ	14
2.1.1. Причины и характер появления АЭ в металлах и сплавах	14
2.1.2. Элементарные источники АЭ	22
2.1.3. АЭ при зарождении и распространении трещин	29
2.1.4. АЭ при фазовых превращениях – плавлении, затвердевании, фазовых переходах без изменения и с изменением агрегатного состояния	31
2.1.5. Причины и характер появления АЭ в неметаллических однородных материалах	33
2.1.6. Причины и характер появления АЭ в композиционных материалах	33
2.1.7. Электрические разряды	34
2.1.8. Утечки жидкости и газа	35
2.1.9. Растрескивание окисных плён и окалины	37
2.1.10. Разрушение шлаковых включений	38
2.1.11. Взаимное трение узлов и деталей	38
2.1.12. Плохой акустический контакт преобразователя с объектом	41
2.1.13. Трение берегов трещин	41
2.1.14. Коррозия	41
2.2. Характеристика сигналов АЭ	43
2.2.1. Характеристики отдельного импульса АЭ	43
2.2.2. Модель полного сигнала АЭ	47
2.2.3. Амплитуда и ее связь с параметрами процесса разрушения в объекте	48
2.2.4. Длительность сигнала и ее зависимость от параметров аппаратуры и характеристик объекта	49
2.2.5. Частотный спектр	50
2.2.6. Время нарастания и спада	51
2.2.7. Характеристики дискретной АЭ и потока импульсов АЭ	52
2.2.8. Амплитудное распределение	53
2.2.9. Временное распределение	55
2.2.10. Суммарная АЭ	55
2.2.11. Скорость счета и активность АЭ	58
2.2.12. Характеристики непрерывной АЭ	64
2.3. Эффект Кайзера. Физические основы	66
2.3.1. Эффект Кайзера в металлах и сплавах, в аморфных телах и в композиционных материалах	69
2.3.2. Условия выполнения эффекта Кайзера	70
2.3.3. Использование эффекта Кайзера при решении практических задач	70
2.4. Эффект Баушингера	71
2.5. Распространение АЭ сигналов	72

2.5.1. Основные типы волн в твердых телах.....	73
2.5.2. Форма волны. Дисперсия и нелинейность волн. Групповая и фазовая скорость волн.....	78
2.5.3. Затухание и поглощение упругих волн.....	80
2.5.4. Волны Лэмба.....	82
2.5.5. Волны Рэлея.....	83
2.5.6. Головные волны	84
Глава 3. Технические средства АЭ контроля	85
3.1. Связь первичных параметров АЭ с характеристиками регистрируемых сигналов АЭ.....	92
3.1.1. Трансформация сигнала в объекте контроля.....	92
3.1.2. Искажение формы сигнала при распространении по объекту и преобразователем АЭ	93
3.1.3. Влияние аппаратурных шумов	96
3.1.4. Влияние уровня дискриминации амплитудных шумов.....	97
3.1.5. Влияние полосы частот регистрации	98
3.1.6. Разрешающая способность по времени	98
3.2. Преобразователи АЭ	99
3.2.1. Классификация ПАЭ по принципу работы	99
3.2.2. Сравнительная характеристика ПАЭ	107
3.2.3. Конструкции ПАЭ.....	110
3.2.4. Установка ПАЭ на объект контроля	114
3.2.5. Соединение ПАЭ с усилителем	115
3.3. Аппаратура для предварительной обработки АЭ сигналов	116
3.3.1. Предусилители	116
3.3.2. Усилители	116
3.3.3. Фильтры	117
3.3.4. Пороговые устройства	117
3.3.5. Аналогово-цифровые и цифроаналоговые преобразователи.....	118
3.3.6. Устройства предварительной обработки информации: дискриминаторы уровня, длительности и других параметров сигналов и другие устройства аналоговой обработки.....	119
3.4. Аппаратура для отображения и обработки АЭ информации.....	122
3.4.1. Акустические сигнализаторы.....	122
3.4.2. Цифровые регистраторы.....	123
Глава 4. Основы технологии АЭ контроля	124
4.1. Аттестация аппаратуры	124
4.1.1. Источники имитационных сигналов	124
4.1.2. Аппаратура для аттестации	126
4.1.3. Контролируемые характеристики	126
4.1.4. Контроль работоспособности аппаратуры	128
4.2. Ограничение влияния помех и шумов. Выявление помех и их источники	128
4.2.1. Электромагнитные помехи.....	129
4.2.2. Акустические помехи	130
4.2.3. Аппаратурные шумы	130
4.2.4. Методы ограничения влияния помех	130

4.3. Обработка данных АЭ контроля.....	136
4.3.1. Формы представления данных.....	136
4.3.2. Сравнение данных контроля с характеристиками имитационных сигналов.....	138
4.3.3. Статистическая обработка данных – вычисление средних значений, среднеквадратических отклонений, построение гистограмм.....	138
4.3.4. Проверка статистических гипотез.....	141
4.3.5. Определение координат источника.....	143
4.3.6. Определение характеристик дефекта альтернативными неразрушающими и разрушающими методами.....	151
Глава 5. Применение АЭ диагностики и контроля	152
5.1. Объекты контроля	152
5.1.1. Трубопроводы различного назначения	153
5.1.2. Сосуды давления	155
5.1.3. Строительные сооружения.....	160
5.1.4. Шахты и рудники	162
5.1.5. Механизмы и машины	165
5.1.6. Технологические процессы.....	166
5.1.7. Объекты специального назначения	168
5.2. Обнаруживаемые дефекты	171
5.2.1. Трещины.....	171
5.2.2. Расслоения	174
5.2.3. Коррозия.....	174
5.2.4. Трение.....	175
5.2.5. Утечки жидкости и газа	177
5.2.6. Построение моделей АЭ на основе лабораторных данных	180
5.2.7. АЭ мониторинг	181
Глава 6. Принципы использования АЭ данных для технической диагностики и контроля.....	183
6.1. Принципы и правила классификации объектов на основании данных технического контроля	183
6.1.1. Классификация источников АЭ.....	183
6.1.2. Критерии оценки источников АЭ.....	183
6.1.3. Выбор системы классификации источников АЭ и критериев браковки	187
6.1.4. Оценка остаточного ресурса	189
Глава 7. Метрологическое обеспечение АЭ	191
7.1. Калибровка ПАЭ. Снятие АЧХ ПАЭ	191
Библиографический список.....	195
КНИГА 2. ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ.....	198
Введение.....	198
Глава 1. Общие вопросы вибродиагностического метода неразрушающего контроля	199
1.1. Цели контроля и диагностического анализа вибрации работающего оборудования	199

1.2. Этапы жизненного цикла машинного оборудования	203
1.3. Источники механических колебаний	204
1.4. Природа механических колебаний	205
1.5. Основные понятия теории колебаний	207
1.6. Кинематические характеристики колебательного процесса.....	211
1.7. Критерии оценки вибрационного состояния машин	214
1.7.1. Виды критериев	214
1.7.2. Критерий 1	214
1.7.3. Критерий 2	218
1.7.4. Предельные уровни вибрации.....	218
Глава 2. Анализ вибрации	220
2.1. Основные виды анализа и области их применения	220
2.2. Анализ формы сигнала	225
2.3. Спектральный анализ.....	228
Глава 3. Сбор вибрационных данных	231
3.1. Выбор точек измерения	231
3.1.1. Контролепригодность оборудования	231
3.1.2. Контрольные точки измерений вибрации.....	232
3.1.3. Места установки датчиков	235
3.2. Выбор частотного диапазона измерений	236
3.3. Использование датчика оборотов	237
Глава 4. Аппаратура, применяемая для вибрационного контроля	239
4.1. Виды датчиков	239
4.2. Обзор крепления датчиков	240
4.2.1. Крепление датчика с помощью шпильки	243
4.2.2. Крепление датчика при помощи магнита	243
4.2.3. Крепление датчика с помощью щупа.....	244
4.3. Средства сбора и обработки данных	245
4.3.1. Стационарная аппаратура.....	245
4.3.2. Переносная аппаратура.....	246
4.4. Вторичные блоки контроля вибрации.....	247
4.4.1. Переносные виброметры	248
4.4.2. Переносные одноканальные виброанализаторы	249
4.4.3. Многоканальные виброанализаторы.....	251
Глава 5. Основные характеристики датчиков и аппаратуры вибрационного контроля.....	252
5.1. Пьезоэлектрический акселерометр.....	252
5.1.1. Принцип действия пьезоэлектрического акселерометра	253
5.1.2. Характеристики акселерометров	253
5.1.3. Частотный диапазон.....	255
5.1.4. Верхний предел частоты.....	255
5.1.5. Нижний предел частоты	256
5.2. Типы акселерометров.....	257
5.3. Конструкции акселерометров	258
5.4. Крепление акселерометров.....	260
5.4.1. Крепление при помощи шпильки	260

5.4.2. Крепление при помощи воска	262
5.4.3. Крепление при помощи магнита.....	263
5.4.4. Крепление при помощи липкой пластинки	265
5.4.5. Крепление при помощи клея.....	266
5.4.5.1. Непосредственное крепление акселерометра.....	267
5.4.5.2. Применение закрепляемой при помощи клея специальной шпильки	268
5.4.6. Крепление при помощи ручного щупа	270
5.5. Влияния условий внешней среды	271
5.5.2. Влияния условий внешней среды – шум соединительных кабелей.....	273
5.5.3. Другие влияния условий внешней среды	274
5.6. Калибровка акселерометров.....	275
5.7. Другие типы датчиков.....	276
5.7.1. Веломер	276
5.6.2. Проксиметр	277
Глава 6. Общие сведения о периодическом и непрерывном мониторинге.....	278
6.1. Цели и задачи мониторинга.....	278
6.2. Стратегии технического обслуживания	279
6.3. Программные и аппаратные средства	279
6.4. Базы данных (БД)	281
6.5. Маршруты виброобследований	283
6.6. Периодичность и объем измерений.....	285
Термины	287
Библиографический список.....	290

КНИГА 1

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перспективы и преимущества метода акустической эмиссии несомненны. Как показал анализ публикаций по неразрушающим методам контроля, основными областями, в которых проводятся работы по практическому использованию метода акустической эмиссии, являются: испытания сосудов, работающих под давлением; диагностика газопроводов; нефтеналивных цистерн; контейнеров для перевозки особо опасных грузов, режущего инструмента и дорогостоящего оборудования. Данным методом проводят исследования усталостной прочности разнообразных материалов, определяются координаты зарождающихся дефектов и т. д. Метод акустической эмиссии все большее применение находит при контроле резервуаров, трубопроводов и котлов.

Метод акустической эмиссии используется для исследования физических процессов, происходящих в твердых телах (кристаллографические превращения, термоупругие эффекты, движение доменных стенок в ферромагнетиках и т. д.); для контроля качества материалов (обнаружение возникших и развивающихся трещин, процессов коррозии, расслоений и т. д.); при испытании герметичности тонкостенных оболочечных конструкций; при контроле целостности неметаллических конструкций (стеклопластик, композиционные материалы, конструкционная керамика) и контроля их состояния при работе в агрессивных средах, при нагреве, охлаждении для контроля производственных процессов (режимов сварки, прокатки, сверления и т. д.); для обнаружения утечек различных веществ; для раннего обнаружения трещин при испытании материалов на ползучесть.

В предлагаемом учебном пособии представлено систематизированное изложение, основные теоретические и практические сведения по акустико-эмиссионному неразрушающему контролю, соответствующие требованиям образовательного стандарта инженеров по специальности 200102 – «Приборы и методы контроля качества и диагностики».

ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РАБОТ ПО АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Возникновение шумов при деформировании и, особенно, при разрушении материалов известно достаточно давно. Вследствие отсутствия специальной аппаратуры, не позволяющей измерять параметры шумов, к числу «шумящих» при деформировании относили очень небольшое число материалов, для которых частоты шумов имеют составляющие в звуковом диапазоне, а интенсивность достаточна для восприятия на слух. Наиболее известными в этом отношении являются такие материалы, как древесина и олово. Акустическая эмиссия при деформировании олова известна под названием «крик олова». Это явление не находило практического применения до тех пор, пока не была доказана связь шумов с процессами, происходящими в деформируемом материале и определяющими его качество и работоспособность [1].

В 1917 году попытку установления такой связи сделал И. Жохральский, который объяснил «крик олова» процессом спонтанного двойникования решетки металла.

В двадцатых годах двадцатого столетия А.Ф. Иоффе и М.В. Класен обнаружили возникновение шумов при деформировании нагретых кристаллов каменной соли и цинка, указав на связь явления с особенностями протекания процесса пластической деформации. А.Ф. Иоффе в работе [2] писал: «...сдвиг нагретой каменной соли и цинка происходит малыми скачками, причем каждый из них сопровождается шумом, наподобие тиканья часов. В комнате при отсутствии шума эти тики хорошо слышны и следуют через правильные промежутки времени. Можно отметить много сотен тиков, причем частота их зависит от приложенного груза. Скачки становятся заметными и слышными только при значительной уже пластической деформации».

В 1948 году У. Мэзон и Г. Мак-Скимин, используя пьезоэлектрический датчик и электронную аппаратуру, обнаружили ультразвуковые составляющие шумов при двойниковании олова. При изгибе и сжатии олова наблюдались нерегулярные волны с частотой примерно 100 кГц и амплитудами смещений порядка 10^{-8} мм. Возникновение указанных механических волн авторы объясняли движением дислокаций.

Впервые систематические исследования шумов, возникающих при деформировании материалов, выполнены Д. Кайзером, который в

1950 году по этой теме защитил в Мюнхене докторскую диссертацию. Используя электронно-акустическую аппаратуру с большим усилением, Д. Кайзер показал, что шумы при деформировании обнаруживаются у широкого круга материалов, начиная с очень низких напряжений. Им установлено явление невоспроизводимости шумов при повторном нагружении. Это явление в дальнейшем получило название эффекта Кайзера. Установлено наличие характерных для каждого материала зависимостей между величиной напряжения при деформировании и такими параметрами шумов, как интенсивность (число импульсов в единицу времени) и амплитуда звукового давления. Д. Кайзер объяснял возникновение шумов процессами скольжения и отрыва в деформируемом кристалле (поликристалле), а также взаимным трением поверхностей разрыва. В его работах впервые была обоснована возможность использования шумов для определения напряжений, ранее перенесенных материалом, остаточных напряжений, для обнаружения изменений в структуре материала и фазовых превращений [1].

Работы Д. Кайзера послужили толчком для широких исследований деформационных шумов в ряде стран. В пятидесятых годах появляются публикации по этой проблеме во Франции и США. Было описано возникновение шумов при деформировании мягкой стали в районе площадки текучести (образование полос Людерса), при образовании ступенек на диаграмме упрочнения (эффект Портевена–Ле-Шателье) и непосредственно перед разрывом (при образовании внутренних докритических трещин).

В США в пятидесятых годах начало работам по исследованию шумов в материалах положил Б. Шофильд [1]. Им установлено наличие шумов двух типов – непрерывное излучение и шумы взрывного типа. Непрерывное излучение шумов, по его мнению, обусловлено скоплением и срывом дислокаций. Б. Шофильд показал также, что источником шума при деформировании может быть поверхностное покрытие металла, например, анодированный слой на алюминии.

Начиная с пятидесятых годов, наиболее интенсивные исследования деформационных шумов конструкционных материалов проводятся в США.

Этой работой занимался ряд фирм и университетов. Но потребовалось около пятнадцати лет исследований для разработки практически пригодных методов и систем неразрушающего контроля, основанных на измерении деформационных шумов материалов.

В США работа проводилась в рамках нескольких исследовательских программ. Д. Пэрри разработана система обнаружения дефектов в резервуарах емкостью до 28 м³ путем регистрации деформационных шумов при помощи четырех преобразователей с использованием ЭВМ

(IBM-7044). Система способна обрабатывать в течение часа 104–106 сигналов и определять место расположения дефекта с погрешностью в один дюйм. Испытания системы на реакторе Министерства обороны США показали возможность оценки степени «охрупчивания» материала от радиоактивного излучения [1].

Лабораторией института им. Баттеля на основе детального изучения деформационных шумов, их природы и параметров разработаны преобразователи с большим отношением «сигнал–помеха», позволяющие надежно регистрировать деформационные шумы на фоне помех (в частности, шумов от кавитации). Создана методика крепления преобразователей для длительной работы в условиях ядерных реакторов. Конечная цель этой программы, возглавляемой Ф. Хаттоном – создание системы непрерывного контроля за зарождением и ростом структурных дефектов или трещин в первичной системе высокого давления ядерного реактора. Разработанные методы и средства измерений позволяют надежно предсказывать время разрушения конструкций типа сосудов давления и трубопроводов, что было продемонстрировано Ф. Хаттоном с группой коллег при испытании трубы в г. Колумбус, шт. Огайо.

В этой же лаборатории В. Джоли исследована возможность применения деформационных шумов для контроля за дефектами сварных швов. Эксперименты показали, что при охлаждении сварного шва сразу же после сварки процесс образования дефектов сопровождается интенсивными шумами вплоть до наступления теплового равновесия. Разработанная аппаратура и методика измерений позволяют выявлять дефекты сварных швов типа трещин, волосовин и т. п., что подтверждено контрольным рентгеновским просвечиванием. Место расположения дефектов выявляется триангуляцией, причем для некоторых типов дефектов метод оказывается более чувствительным, чем рентгеновский и ультразвуковой.

Значительная программа работ в области использования деформационных шумов для неразрушающего контроля материалов в авиационной и космической технике выполнена фирмой Aerojet General Corporation и в частности, ее сотрудниками А. Грином и К. Хартбауэром.

Исследованы деформационные шумы широкого круга материалов, связь параметров шумов с параметрами дефектов. К. Хартбауэром установлены корреляции между интенсивностью излучения и скоростью роста трещины. Создана аппаратура для оперативного определения положения дефектов в сварных конструкциях, трубопроводах, резервуарах для ракетного топлива. В комплексе аппаратуры, получившем наименование SWAT (Stress Wave Analysis Technique), эта задача решается методом триангуляции с помощью ЭВМ. Аппаратура изготовлена и опробована осенью 1967 года при промышленных испытаниях резервуаров гидростатическим давлением.

В более сложных разрабатываемых вариантах аппаратуры ЭВМ используется не только для обработки поступающей информации, но и для принятия решений.

Отметим также следующие работы, проводимые США в рассматриваемой области. А. Поллок разработал аппаратуру для амплитудного анализа шумов и исследовал возможность контроля качества клеевых соединений. По его данным плохое качество склейки обнаруживается уже при низких нагрузках клеевого соединения (10–30 % от разрушающей нагрузки).

Г. Дунеганом и К. Тэтро созданы пассивные датчики давления на основе измерения шумов, возникающих при нагружении чувствительного элемента (мембраны).

Таким образом, к 70-м годам была доказана возможность практического использования деформационных шумов для оценки качества материалов и изделий при испытаниях, а также в системах непрерывного слежения (технической диагностики) за возникновением и развитием дефектов структуры конструкционных материалов.

В России значительные успехи по практическому использованию деформационных шумов достигнуты в области прогнозирования выбросов угля и газа в шахтах [3, 4, 5]. В 1952 году по инициативе академиков А. А. Скочинского и Г. А. Гамбурцева были начаты исследования деформационных шумов горных пород с целью отыскания надежных прогностических признаков приближающегося выброса. В результате этих работ были созданы сейсмоакустические методы исследования состояния угольного массива при подземной разработке, один из которых основан на использовании акустических импульсов звуковой частоты, естественно возникающих в горной породе вследствие роста местных концентраций напряжений при общем или локальном увеличении горного давления. Установлено, что интегральную оценку количества трещин в исследуемом объеме горной породы дает параметр, названный «шумностью» породы – количество акустических импульсов в единицу времени. Разработана аппаратура (типа ЗУА-1, ЗУА-2) для сейсмоакустических измерений, которая выпускалась отечественной промышленностью. В качестве исходного преобразователя (датчика) деформационных шумов применяется электродинамический акселерометр (геофон типа СЭД). Частотный диапазон регистрируемых сигналов составляет 20–20000 Гц, регистрация производится на магнитную ленту. Для лабораторных исследований деформационных шумов горных пород

М.С. Анцыферовым были разработаны пьезоэлектрические геофоны на основе пластин сегнетовой соли [5].

Применение сейсмоакустических методов и аппаратуры позволило резко снизить число случаев неожиданных выбросов угля и пород в шахтах.

В настоящее время метод АЭ широко применяется в различных отраслях для неразрушающего контроля и исследования материалов.

Метод АЭ используется:

- для исследования физических процессов, происходящих в твердых телах (кристаллографические превращения, термоупругие эффекты, движение доменных стенок в ферромагнетиках и т. д.);
- для контроля качества материалов (обнаружение возникших и развивающихся трещин, процессов коррозии, расслоений и т. д.);
- при испытании герметичности тонкостенных оболочечных конструкций;
- при контроле целостности неметаллических конструкций (стеклопластик, композиционные материалы, конструкционная керамика) и контроля их состояния при работе в агрессивных средах, при нагреве, охлаждении для контроля производственных процессов (режимов сварки, прокатки, сверления и т. д.);
- для обнаружения утечек различных веществ;
- для раннего обнаружения трещин при испытании материалов на ползучесть.

ГЛАВА 2 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Акустическая эмиссия (АЭ) – это испускание объектом контроля (испытаний) акустических волн [6].

АЭ материала – АЭ, вызванная динамической локальной перестройкой структуры материала.

АЭ метод – метод контроля (испытаний), основанный на анализе параметров упругих волн АЭ.

2.1. Источники АЭ

Источник АЭ – область объекта испытаний, в которой происходит преобразование какого-либо вида энергии в механическую энергию акустической эмиссии [6].

2.1.1. Причины и характер появления АЭ в металлах и сплавах

В большинстве случаев процесс возникновения АЭ можно представить следующим образом. При нагружении твердого тела постепенно нарастают механические напряжения, в решетке накапливается потенциальная энергия. По достижении предельных значений напряжений, равных прочности кристаллической решетки, атомные связи разрываются с импульсным выделением накопленной энергии в виде акустического излучения [7].

Параметры АЭ тесно связаны с параметрами и характеристиками механики разрушения материалов, поэтому, прежде чем говорить о характеристиках сигналов АЭ, причинах их появления, параметрах и связи с процессом разрушения материалов, рассмотрим механические явления в твердых телах.

Связность тела в недеформированном состоянии обуславливается тем, что между его атомами существуют силы взаимодействия и каждый атом находится в равновесии под действием приложенных к нему сил. Внешние силы вызывают деформацию тела, следовательно, меняются межуатомные расстояния, меняется взаимное расположение атомов, меняются и силы взаимодействия между атомами. Изменение сил

взаимодействия между атомами вследствие деформации называют внутренними силами, сопровождающими деформацию.

Мера внутренних сил для данной точки деформированного тела дается физической величиной, которую называют *напряжением*. Оно определяется как сила, отнесенная к единице поверхности.

Различают нормальное (растягивающее или сжимающее – рис. 1, а) напряжение σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и касательные или тангенциальные (сдвиговые) напряжения σ_{xy} , σ_{yz} и др. Напряженное состояние твердого тела, таким образом, характеризуют тензором третьего ранга – таблицей из девяти чисел-компонентов σ_{ij} , где i и j принимают значения осей координат x , y , z . Первый индекс указывает координату, в направлении которой действует сила, а второй – площадку, перпендикулярную направлению указанной в нем координаты, к которой эта сила приложена. Тензор этот симметричный: в нем – $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$.

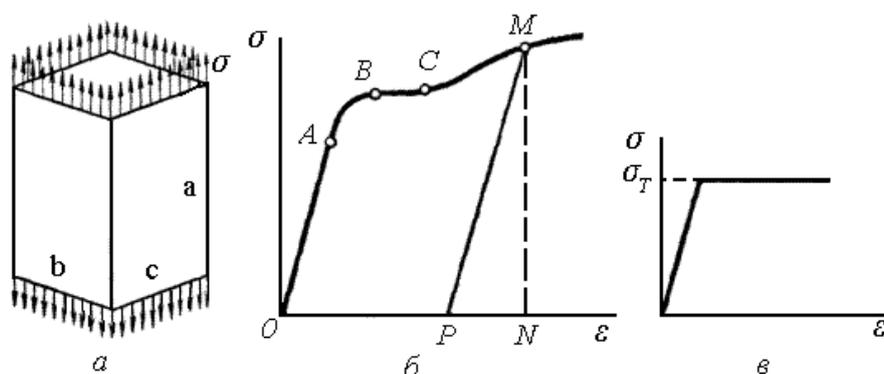


Рис. 1: а – растяжение призматического тела;
 б – диаграмма пластичности (при одноосном растяжении);
 в – идеальная диаграмма пластичности

Деформация – изменение взаимного расположения точек тела.

Призма, находящаяся под действием равномерно распределенных по ее основаниям растягивающих напряжений (рис.1, а), будет равномерно растягиваться в направлении оси. Если выбрать отрезок какой-либо образующей прямой или другой прямой, параллельной образующей, длина которой до деформации была l , после деформации длина его увеличится, станет равной $l + \Delta l$.

Величина $\varepsilon = \Delta l / l$ называется относительным удлинением. Очевидно, что если материал однороден, величина ε не зависит от того, как выбран отрезок длины l и какова эта длина. Поперечные размеры призмы при растяжении уменьшаются. Если длина отрезка, перпендикулярного оси, была до деформации равна l_1 , после деформации она стала равной $l_1 + \Delta l_1$.

Величина $\varepsilon' = \Delta l_1 / l_1$ представляет собою относительное поперечное сокращение. Величины ε и ε' имеют всегда противоположные знаки.

Напряжения и деформации могут существовать не только в твердом теле, но и в жидкости, в газе и вообще в любой сплошной среде. В реальных твердых телах напряжения и деформации оказываются связанными между собой определенными зависимостями, которые могут быть установлены лишь из опыта. Различные материалы обладают различными свойствами, зависимости между напряжением и деформацией оказываются для них различными.

По характеру зависимость между напряжениями и деформациями тела можно условно различать: *тела упругие и тела пластические*.

Упругость – свойство тела, выражающееся в однозначной зависимости между силами, действующими на тело, и его деформациями. В частности, упругое тело после снятия действовавших на него нагрузок возвращается в исходное состояние, т. е. оно не получает остаточных деформаций. Этот факт содержится в определении упругости.

В противоположность упругости пластичность состоит в том, что тела получают деформации, зависящие не только от конечных значений, действующих на них сил, но и от порядка их приложения. В частности, если пластическое тело было подвергнуто действию сил, то после удаления их, оно в первоначальное состояние не приходит, сообщенные силами деформации сохраняются полностью или частично и после прекращения действия этих сил.

Свойства упругости и пластичности являются не абсолютными, а относительными. Например, стальная пружина, которая выпрямляется полностью, будучи согнута небольшой силой, под действием большей силы получает такой прогиб, который полностью уже не восстанавливается. Значит, для стали малые деформации упруги, а большие – пластичны. В то же время пластическое тело восстанавливает некоторую, пусть небольшую, часть своей деформации. Следовательно, в ней, наряду со свойствами пластичности, существует свойство упругости.

Для большинства упругих тел, таких как сталь, бронза, дерево и др., величины деформаций пропорциональны величинам действующих сил. Типичный пример, поясняющий это свойство, представляют пружинные весы, у которых удлинение пружины пропорционально действующей силе. Это видно из того, что шкала делений у таких весов равномерна. Как общее свойство упругих тел закон пропорциональности между силой и деформацией был впервые сформулирован Р. Гуком в 1660 г. (*закон Гука*). В формулировке этого закона рассматриваются не силы и перемещения точек их приложения, а напряжение и деформацию.

Так, для чистого растяжения полагают

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E},$$

где ε – относительное удлинение любого отрезка, взятого в направлении растяжения. Например, если ребра призмы, изображенной на рис. 1, до приложения нагрузки были a , b и c , как показано на чертеже, а после деформации они будут, соответственно, a' , b' , c' , тогда $\varepsilon = \frac{a' - a}{a}$ [8].

Постоянная E , имеющая размерность напряжения, называется модулем упругости или модулем Юнга.

Растяжение элементов, параллельных действующим напряжениям σ , сопровождается сокращением перпендикулярных элементов, то есть уменьшением поперечных размеров стержня (на рис. 1, a – размеры b и c). Относительная поперечная деформация

$$\varepsilon' = \frac{b' - b}{b} = \frac{c' - c}{c}$$

будет величиной отрицательной. Продольная и поперечная деформации в упругом теле связаны постоянным отношением:

$$\varepsilon' = -\nu\varepsilon. \quad (1)$$

Безразмерная величина ν , постоянная для каждого материала, называется коэффициентом поперечного сжатия или коэффициентом Пуассона. Значения этого коэффициента различны для разных материалов. Так, для стали $\nu = 0,3$. Заменяя в формуле (1) ε выражением σ/E , получаем

$$\varepsilon' = -\frac{\nu\sigma}{E}.$$

Закон Гука не является точным законом. Для стали отклонения от пропорциональности между ε и σ незначительны, тогда как чугун или резина явно этому закону не подчиняются. Для них $\varepsilon = f(\sigma)$, причем $f(\sigma)$ может быть аппроксимирована линейной функцией разве лишь в самом грубом приближении.

Свойства *пластичности* проще всего уяснить на примере чистого растяжения такого материала, как мягкая малоуглеродистая сталь. Предположим, что стержень находится в условиях простого растяжения (рис. 1, a) и напряжение σ растет. При этом стержень растягивается, сохраняя призматическую форму.

При растяжении стержня напряжения распределяются по сечению не вполне равномерно, а призматическая форма образца нарушается. Поэтому график, подобный изображенному на рис. 1, b , удастся постро-

ить лишь для деформаций, не превышающих нескольких процентов. До точки A зависимость между σ и ε следует закону Гука.

Если снижение внешней нагрузки до нуля не приводит к уменьшению деформации, то последняя называется *неупругой*.

После точки A диаграмма становится криволинейной, в точке B она имеет горизонтальную площадку, называемую *площадкой текучести* [8]. На площадке текучести деформация происходит без увеличения нагрузки. Напряжение в точке A называется *пределом упругости* σ_l . Напряжение, требуемое для создания некоторой заданной малой пластической деформации, например $\sigma_{0,2}$, где остаточная деформация стандартного образца $\varepsilon = 0,2\%$, называется *пределом текучести* σ_T (точка B). Начиная с точки C , диаграмма снова идет вверх. Часть диаграммы, расположенная правее точки C , называется областью упрочнения. Однозначная всюду, кроме площадки BC , зависимость между σ и ε устанавливается диаграммой пластичности только при условии непрерывного возрастания σ или ε . Представим, что мы довели нагружение до точки M на диаграмме и начали уменьшать нагрузку. Процесс разгрузки будет изображаться прямой MP , параллельной первоначальному упругому участку диаграммы. Этот результат можно истолковать в том смысле, что полная деформация, изображаемая абсциссой точки M на диаграмме пластичности, состоит из двух частей – пластической деформации $\varepsilon_{пл}$ и упругой деформации σ/E :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{пл}.$$

При снятии нагрузки упругая деформация, пропорциональная в каждый момент напряжению, исчезает, а пластическая остается. На чертеже пластическая деформация изображается отрезком OP , а отрезок PN представляет собою упругую деформацию, соответствующую напряжению в точке M диаграммы.

Значение максимальной нагрузки, при которой начинается локализация деформации – образование шейки, называется *пределом прочности* при растяжении (временное сопротивление) σ_B (точка M).

Таким образом, существенная особенность пластических материалов состоит в том, что процессы нагрузки и разгрузки описываются для них различными законами.

Иногда диаграмму пластичности заменяют идеальной диаграммой, изображенной на рис. 1, в, а именно считают:

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon \cdot (\varepsilon \leq \varepsilon_T), \\ \sigma &= \sigma_T \cdot (\varepsilon \geq \varepsilon_T). \end{aligned}$$

Совершенно аналогичным образом рассматривается зависимость между сдвиговой деформацией и касательными напряжениями.

В реальных телах возможны и более сложные виды связи между напряжениями и деформациями, существенно зависящие от времени действия нагрузки [8].

Рассмотренные выше свойства упругости и пластичности устанавливаются в результате опытов, произведенных над образцами. Для некоторых материалов, как например сталь, медь и другие металлы, прессованные пластики, бетон, эти свойства будут одинаковыми для образцов, вырезанных из тела в различных направлениях. Такие тела называются *изотропными*. Но древесина обладает в силу своей структуры разными свойствами в разных направлениях; образец, вырезанный вдоль волокна, покажет при испытании на растяжение или сжатие совершенно иные свойства, чем образец, вырезанный в поперечном направлении. Такие материалы, которые обнаруживают разные свойства в разных направлениях, называются *анизотропными*.

Единичные кристаллы металлов всегда анизотропны, т. к. атомы образуют в них кристаллическую решетку правильного строения и степень густоты расположения атомов для различных направлений различна. Изотропия поликристаллического металла объясняется тем, что кристаллические зерна чрезвычайно малы по сравнению с образцом и расположены в беспорядке; таким образом, все ориентации зерен равновероятны и в среднем для всех направлений свойства оказываются одинаковыми. Обработка давлением – ковка, штамповка, протяжка, волочение – создает определенную ориентацию зерен, поэтому, например, свойства проката в продольном и поперечном направлениях будут различными. Такая анизотропия в меньшей мере относится к упругим свойствам, чем к пластичности и прочности. Модуль упругости для продольных и поперечных по отношению к направлению проката образцов почти одинаков, тогда как характеристики прочности, например сопротивление разрыву, различны.

Материалы, в которых перед разрушением происходит значительное пластическое деформирование, называют *пластичными*. Если же заметная пластическая деформация перед разрушением отсутствует, то материалы называют *хрупкими*.

Непрерывное растяжение образца может привести к постепенному уменьшению площади поперечного сечения до исчезающе малой величины (рис. 2, *a*). Такой процесс, характерный для материалов, обладающих высокими пластическими свойствами, называется *разрывом*. Если разделение образца на две части произойдет при меньшем удлинении, чем это необходимо для разрыва, то такой процесс называется *раз-*

рушением (рис. 2, б). Разрушение характерно для большинства конструкционных материалов, в том числе для металлов и их сплавов. В инженерной практике основными механическими характеристиками металлов обычно считают предел текучести σ_T , предел прочности σ_B и относительное поперечное сужение ψ , отвечающее моменту разрушения.

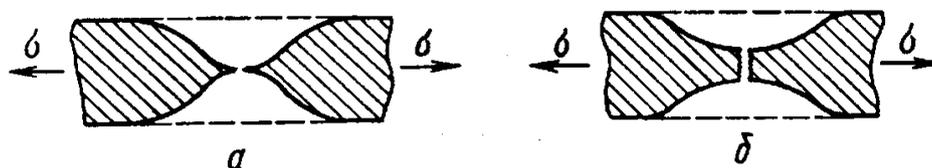


Рис. 2. Схемы разрыва (а) и разрушения (б) материала при одноосном растяжении

Механические свойства твердых деформируемых сред, их способность к пластическому деформированию, типы их разрушения, особенности этих процессов, в основном, определяются фундаментальными свойствами твердых тел – их внутренним строением и дефектами кристаллической структуры [8].

Деформирование и разрушение твердых тел тесно связаны друг с другом. Если тело подвергнуто действию нагрузки, при которой нарушается сплошность среды и интенсивность поля напряжения достигает предельного значения, то наступает разрушение, т. е. необратимое разделение тела на части. В зависимости от характера распределения напряжений в теле разрушение бывает двух типов: *отрывом и сдвигом (скольжением)*.

Разрушение отрывом, как правило, является хрупким, возникает в результате приложения растягивающих нагрузок, происходит по определенным кристаллографическим плоскостям, характерным для кристаллической решетки материала, а поверхность разрушения нормальна к максимальному главному напряжению.

Разрушение сдвигом является вязким, связано с касательными напряжениями, происходит по направлению максимального сдвига (по плоскости скольжения двух частей кристалла относительно друг друга до полного их разделения), а поверхность сдвига образца ориентирована под углом примерно 45° к главным напряжениям.

Начало и динамика развития разрушения представляет собой разрыв среды без заметного предшествующего пластического деформирования. Для хрупкого разрушения типична острая ветвящаяся трещина (рис. 3, а) с высокой скоростью распространения, движущаяся за счет накопленной в теле потенциальной энергии упругих деформаций.

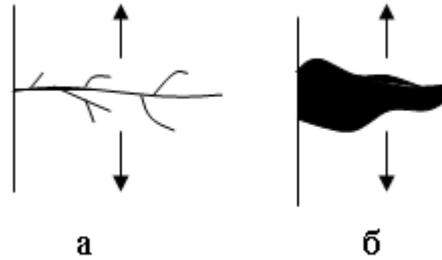


Рис. 3. Вид хрупкой (а) и вязкой (б) трещин

Хрупкое разрушение требует малых затрат энергии, распространяется перпендикулярно напряжению растяжения и продолжается до тех пор, пока выделяющейся энергии достаточно для образования новых поверхностей разрушения, либо пока местные напряжения, возникающие в вершине трещины, не окажутся ниже предела прочности. Вязкое разрушение сопровождается значительным пластическим деформированием и относительным скольжением двух областей среды. Для вязкого разрушения типична тупая раскрывающаяся трещина (рис. 3, б) с малой скоростью распространения, зависящей от условий нагружения. Вязкое разрушение требует для своего развития значительных затрат энергии и распространяется в направлениях, в которых возникает интенсивное пластическое течение (прогрессирующее скольжение), когда касательное напряжение превышает предельное значение [8].

Таким образом, вязкое разрушение происходит при наличии больших, а хрупкое – сравнительно малых деформаций. В соответствии с условными типами разрушения можно выделить три типа тел:

- хрупкие тела – классический объект линейной механики разрушения;
- полухрупкие тела – классический объект дислокационной теории разрушения;
- пластичные (вязкие) тела, о которых нельзя сказать, что они разрушаются, но, сохраняя пластичность, они могут при определенных условиях проявлять черты хрупкого поведения.

Акустическая эмиссия не возбуждается при повторном нагружении во время медленного монотонного изменения межатомных расстояний, при деформации. Акустическая эмиссия генерируется лишь в тех случаях, когда имеется резкое изменение состояния материала. Существуют следующие механизмы АЭ в металлах: ускоренное движение и размножение дислокаций, скольжение, двойникование, разрушение и отслоение осажденных частиц, включений и поверхностных частиц, некоторые коррозионные процессы, зарождение и рост микротрещин, скачки трещин и процессы трения при закрытии и открытии трещин.

Количество высвобожденной АЭ, прежде всего, зависит от размера дефекта и скорости локального процесса деформации. Например, несмотря на то, что движение одной дислокации сопровождается излучением АЭ волн напряжений, однако для регистрации этой энергии недостаточно. В то же время при одновременном движении миллионов дислокаций в период течения образца, сгенерированные волны напряжений накладываются и дают значительную так называемую непрерывную эмиссию. При малых скоростях деформации образца возбуждаемая эмиссия сравнима с фоновым шумом, однако по мере роста скорости деформации число сигналов и их амплитуды возрастают. АЭ при пластической деформации отличается от импульсной эмиссии тем, что в первом случае индивидуальные источники являются практически неразличимыми во времени. Непрерывную эмиссию лучше всего измерять в терминах среднеквадратичного значения или оценивать скорость изменения энергии АЭ процесса [9].

2.1.2. Элементарные источники АЭ

В идеальной кристаллической решетке твердого тела атомы расположены в узлах и совершают тепловые колебания около своего центрального положения, в котором они могут находиться неподвижно только при абсолютном нуле температур, если не учитывать квантовых эффектов. Тепловое движение атомов создает акустический шум, энергия которого распределена в частотном диапазоне от долей до 10^{13} Гц. По аналогии с белым светом, состоящим из электромагнитного излучения, частотный спектр которого равномерен по диапазону видимого света, тепловой шум решетки называют «белым» шумом. При комнатной температуре энергия тепловых шумов в единичном частотном диапазоне $E_{ш}/\Delta f = 4 \cdot 10^{-21}$ Дж/Гц.

Амплитуды тепловых колебаний атомов решетки и их скорости статистически распределены в соответствии с законом Больцмана. Согласно этому закону, есть некоторая часть атомов, которые имеют высокие скорости движения и перемещаются на большие расстояния. Они могут оторваться от своего положения равновесия (узла) и оказаться между другими атомами. В этом случае образуются два характерных дефекта: вакансия и атом внедрения.

Эти дефекты вызывают искажения кристаллической решетки, с ними связана дополнительная потенциальная энергия решетки. Обратное событие – атом внедрения может встретиться с вакансией. В этот момент искажение кристаллической решетки исчезает, два дефекта решетки аннигилируют. Дополнительная потенциальная энергия кристаллической решетки превращается в энергию упругих колебаний, излучается импульс АЭ, энергия которого равна сумме энергий вакансии и

атома внедрения (в статической реакции аннигиляции). Для металлов энергия излученного импульса составляет 10^{-19} Дж.

Параметры теплового шума при наличии в кристаллической решетке микроскопических дефектов должны отличаться от параметров шума идеальной структуры. Они определяются типом дефектов кристаллической решетки, их числом и размерами, а также условиями, в которых находятся. Характер теплового шума должен изменяться с увеличением вклада в шумовой процесс излучения образующихся, перемещающихся и аннигилирующих вакансий и атомов внедрения. Белый тепловой шум приобретает «окраску». Однако интенсивность такого шума настолько мала, что не имеет практического значения при контроле производственных объектов. Основными процессами, определяющими поведение контролируемого объекта, являются пластическая деформация и образование и развитие трещины.

АЭ в одномерном кристалле

Предварительно, до рассмотрения формирования трещины и сопровождающего его акустического излучения, представим деформацию и разрушение одномерного кристалла в виде цепочки атомов, связанных между собой силовыми линиями.

Одномерный кристалл – это модельная идеализация, которая достаточно широко используется при изучении ряда процессов в твердом теле. На возможности представления твердого тела в виде одномерных цепочек, двухмерных сеток или трехмерных объемных структур, в которых атомы изображаются в виде массивных образований (шариков), связанных упругими силами межатомного взаимодействия, основаны осцилляторные модели твердого тела. В подобных моделях твердое тело может быть описано как набор фононов – элементарных возбуждений решетки [10].

Нагружение цепочки атомов приводит к растяжению связей. Совершается работа по перемещению атомов цепочки с преодолением сил межатомной связи. Происходит накопление потенциальной энергии в атомных связях. Связи растягиваются до максимально возможных для данного вещества значений r_m после чего цепочка разрывается. Значение энергии в области максимума силы связи для железа составляет порядка 10^{-19} Дж. Очевидно и без детального анализа, что уловить сигнал с такой энергией не представляется возможным. Величина r_m максимально возможного перемещения атома составляет 10–20 нм.

При непрерывном нагружении в некоторый момент цепочка атомов разрывается, при этом в месте разрыва происходит ускоренное взаимное перемещение атомов. Атомы удаляются друг от друга с уменьше-

нием силы взаимодействия. Связи между другими парами атомов, принадлежащих рассматриваемой цепочке, начинают релаксировать [10].

Релаксация в данном случае означает высвобождение энергии, накопленной предварительным растяжением, и соответствующее перемещение этих атомов вдоль цепочки. Величина выделившейся энергии и путь, пройденный атомом, расположенным на границе разрыва, пропорциональны числу прорелаксировавших связей или, в данном случае, релаксации половины длины цепочки. Если в половине длины цепочки порядка 1000 атомных ячеек, то суммарная выделившаяся энергия составит порядка 10^{-16} Дж, а амплитуда перемещения – порядка 10^{-6} м. А это уже величины энергии и смещения частиц среды, которые можно обнаружить прибором. На рис. 4 представлена зависимость силы атомной связи от расстояния с указанием энергий, которые затрачиваются на разрыв цепочки и на излучение АЭ, здесь E_D – энергия диссоциации, т. е. энергия, требующаяся для удаления двух соседних атомов на бесконечное расстояние, E_{II} – поверхностная энергия, $E_{II}' = E_{II} - E_p$, E_p – энергия релаксации, r_0 – расстояние между атомами в состоянии покоя, r_m – критическое расстояние между атомами. E_p является энергией АЭ при релаксации от r_m до r_0 . Таким образом, энергия АЭ есть энергия релаксации связей после разрыва одной из них в цепочке атомов.

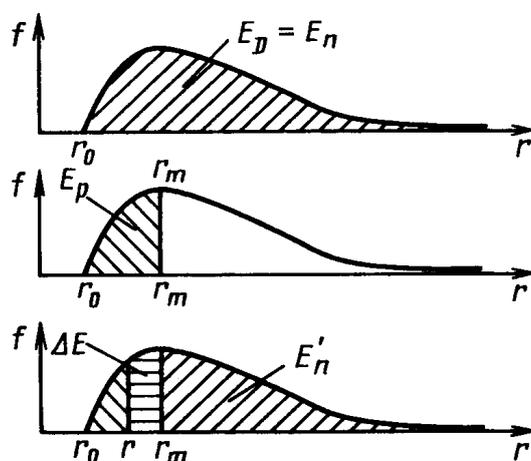


Рис. 4. Зависимость силы атомной связи f от расстояния r с указанием соответствующих энергий

Каждый из элементарных импульсов соответствует элементарному смещению отдельной точки среды, то поток элементарных импульсов образует акустическое смещение частиц среды вблизи источника АЭ.

Большое влияние на процесс оказывает когерентность отдельных его составляющих. Для пластической деформации или какого-либо другого случая, когда источники АЭ случайно распределены как в пространстве, так и во времени, характерна непрерывная АЭ. При этом

можно говорить о полностью некоррелированных источниках и соответственно некоррелированном потоке квазичастиц. Для компактного источника – скачка трещины или скачка деформации – можно говорить о когерентности потока элементарных импульсов [10].

Можно выделить три зоны изменения потока элементарных импульсов (рис. 4), пропорционального величине релаксации объема материала, расположенного над площадкой разрушения. Первая зона связана с нарастанием потока. Следует отметить, что темп нарастания величины смещения на начальном этапе зависит от места начала разрушения. Если оно приходится на «центр зерна», то распространению фронта разрушения ничего не препятствует и темп нарастания максимален. Если разрушение началось на границе зерна или даже в угловой зоне, то темп нарастания в меньшей степени зависит от времени. Когда фронт разрушения начинает выходить на границы площадки разрушения, а происходит это статистически постепенно, имеет место снижение темпа роста потока фрактонів. Для трехмерного тела акустические смещения, вызванные потоком фрактонів от образовавшегося разрыва в твердом теле на различном расстоянии от источника (рис. 5).

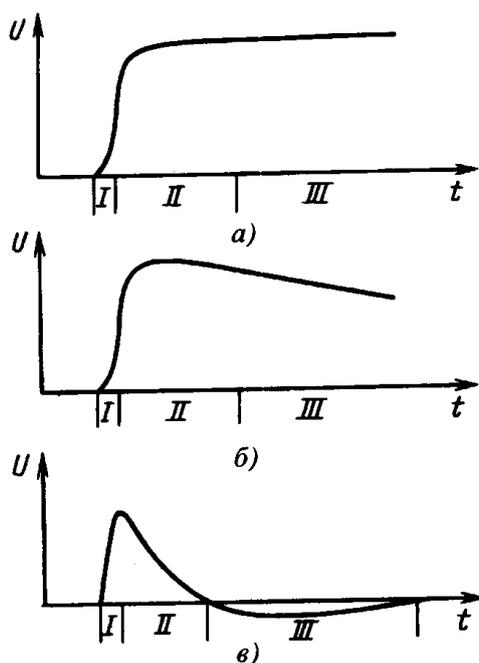


Рис. 5. Схема смещения частиц среды в трехмерном теле, вызванные потоком фрактонів от образовавшегося разрыва (трещины) на различном расстоянии: а – вблизи источника; б – в переходной зоне; в – вдали от источника; I – диапазон времени от начала разрушения связей в пределах границы зерна; II – зона замедленного темпа разрушения, обусловленного встречей с границей зерна; III – окончание процесса развития связей

АЭ при пластической деформации

Под пластичностью понимают свойство твердых тел необратимо деформироваться без разрушения под действием механических нагрузок или внутренних напряжений. Пластичность характеризуется максимальной деформацией до начала разрушения. Пластическая деформация поликристалла складывается из деформации отдельных зерен относительно друг друга по плоскостям скольжения кристаллов, двойникования и перемещения одних зерен относительно других, где первые два процесса составляют внутрикристаллическую деформацию, а последние – межкристаллитную [7, 11].

Пластическая деформация изменяет форму первичных кристаллитов и способствует образованию волокнистой структуры в направлении наибольшей деформации. Волокна представляют собой вытянутые скопления примесей, располагающихся по границам зерен. Толщина деформируемого слоя или пакета скольжения изменяется в зависимости от условий деформирования.

Возможны два основных механизма пластической деформации – скольжением и двойникованием. Как тот, так и другой механизмы связаны с образованием и движением дислокаций и сопровождаются излучением упругих волн.

Скольжение является основным механизмом деформирования поликристаллического тела, обуславливает его пластичность. Чем больше возможных направлений скольжения присуще кристаллам рассматриваемого поликристалла, тем меньше его сопротивление деформации и тем больше его пластичность. Скольжению может соответствовать двойникование.

Двойникование – один из механизмов пластической деформации, который приводит к изменению ориентировки кристаллической решетки одной части зерна по отношению к ориентировке кристаллической решетки другой его части. Переориентированные области называют двойниками. Решетка части кристалла, получившей деформацию двойникованием, является зеркальным отображением решетки недеформированной части кристалла относительно плоскости двойникования. Двойникование является плоским дефектом кристаллической решетки. Возникновение таких дефектов связано с изменением энергии на значение порядка 10^{-3} Дж. Амплитуда импульсов АЭ (следовательно, и смещение) значительно больше в случае двойникования по сравнению с дислокационным скольжением [12].

Существенный вклад в АЭ при пластическом деформировании материалов вносят явления, обусловленные динамикой дислокаций. Эти явления дискретны по природе и могут служить источником упругих волн, хотя

основная часть энергии, связанной с дислокационной динамикой, превращается в тепло. Около 1 % энергии пластической деформации, вызванной дислокационными механизмами, расходуется на излучение упругих волн.

Дефектом кристаллической решетки, который оказывает решающее влияние на механические свойства реальных твердых тел, является *дислокация* (от лат. *dislocatio* – смещение, перемещение). Это линейное несовершенство кристаллической решетки, которое в двух измерениях имеет размеры порядка атомных, а в третьем гораздо больший. Когда между атомными плоскостями «вставлена» дополнительная неполная плоскость, край ее называется *краевой дислокацией* (рис. 6). Ее энергия порядка 10^{-16} – 10^{-17} Дж. Она ослабляет прочность кристалла на 2–3 порядка, так как участки с разным количеством плоскостей сдвигаются друг относительно друга при значительно меньших напряжениях, чем на других участках, где атомы расположены регулярно в узлах решетки. Это смещение представляют как движение дислокаций по кристаллу. Если два участка кристалла с лишними кристаллическими полуплоскостями встретятся, образуется полная плоскость, дислокация аннигилирует. Существуют другие виды дислокаций, например, *винтообразные* (рис. 7).

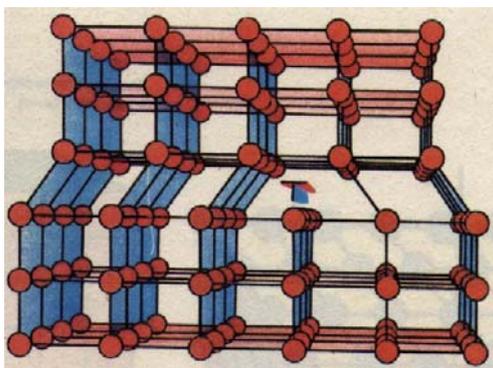


Рис. 6. Краевая дислокация

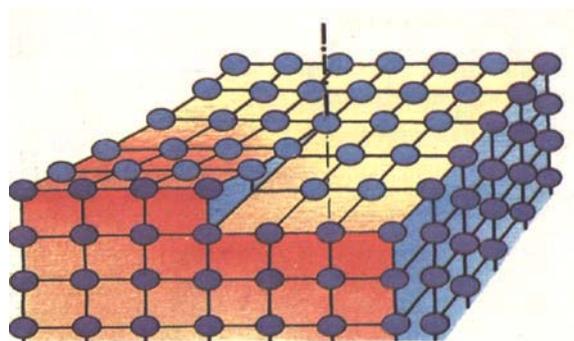


Рис. 7. Винтовая дислокация

Дислокации накапливаются у препятствий других нарушений кристаллической решетки. Преодоление препятствий происходит путем совместного движения группы дислокаций и вызывает более интенсивные упругие сигналы.

Линейные дефекты способны двигаться через кристаллическую решетку обычно намного быстрее, чем любые другие типы дефектов. Они вызывают деформации и могут взаимодействовать с другими дефектами. Движение дислокации с высокой скоростью при наличии локальных полей напряжения вокруг нее должно сопровождаться генерацией упругих импульсов.

Энергия, выделяемая при отдельном акте рождения, перемещения или исчезновения дислокации, настолько мала, что не может быть зарегистрирована АЭ аппаратурой [11, 13]. Коллективные процессы, когда в одной и той же стадии развития находятся сотни и тысячи дислокаций, могут дать когерентные упругие волны, сумма которых и воспринимается как отдельный акт АЭ. Если проследить отдельные стадии жизни дислокаций, то можно установить следующие источники дислокационной АЭ:

1. *Размножение дислокаций.* Возникновение каждой новой дислокационной петли есть элементарный скачкообразный пластический сдвиг с изменением упругого поля дислокации.

2. *Отрыв дислокаций* и их скоплений от точек закрепления.

3. *Движение дислокации.* В процессе движения дислокации возможны различные механизмы излучения упругой энергии. При скольжении дислокация периодически преодолевает потенциальные барьеры, связанные с отдельными атомными плоскостями (барьеры Пайерлса). После преодоления барьера дислокация ускоряется полем внешних напряжений, излучая упругие волны.

4. *Взаимодействие дислокации с препятствиями.* При торможении дислокации препятствиями (примесными атомами, другими дислокациями, границами зерен и т. п.) происходит резкая перестройка упругого поля дислокации, в результате чего поле как бы отрывается от нее и распространяется в среде. По аналогии с излучением электромагнитной энергии замедляющейся заряженной частицей такое акустическое излучение иногда называют переходным.

5. *Гибель дислокации.* К исчезновению дислокации приводит аннигиляция двух дислокаций противоположного знака при их взаимодействии и выход дислокации на поверхность кристалла. Исчезновение упругого поля дислокации при этих процессах порождает упругую волну.

Механические свойства твердых деформируемых сред, их способность к пластическому деформированию, типы их разрушения, особенности этих процессов, в основном, определяются фундаментальными свойствами твердых тел – их внутренним строением и дефектами кристаллической структуры.

Описание движения дислокации в рамках теории упругости показывает, что в случае изменения формы или скорости дислокации она излучает в окружающую среду упругую волну. Точный анализ этих волн затруднителен, да и вряд ли целесообразен, поскольку они обладают низкой энергией и сильно затухают в реальном материале из-за высокой частоты. Более высокую энергию упругих волн обеспечивает движение скопления дислокации. При движении дислокации происходит их мест-

ная задержка у различных препятствий. Преодоление их приводит к быстрым местным сдвигам. Для некоторых материалов лавина сдвигов вызывает увеличение абсолютной деформации на 10^{-2} – 10^{-4} мм за 10^{-1} – 10^{-2} с. Накопленная при этом энергия освобождается в виде волн (происходит динамическое перераспределение напряжений, что и порождает волны) [14].

Процесс деформирования материала разделяется на три стадии. Во время первой стадии образуется зона концентрации напряжений. Во время второй стадии разрушения происходит образование трещины и быстрое перераспределение растягивающих напряжений. Во время третьей стадии происходит развитие образовавшейся трещины, которая при достижении критических размеров приводит к разрушению конструкции.

2.1.3. АЭ при зарождении и распространении трещин

Другой источник АЭ – акустическое излучение трещины.

Образование и рост микротрещины приводит к локальным разрывам сплошности. Причем некоторая часть высвобождающейся поверхностной энергии может переноситься в виде объемных, а при наличии границ – и поверхностных акустических волн. Рост трещины – процесс, в котором сочетаются необратимые акты пластической деформации (перемещение дислокации) и повреждение структуры (образование, рост и накопление микротрещин). На стадиях зарождения и докритического подрастания микротрещин доминируют первые, на этапе закритического роста – вторые. Но и те, и другие могут быть источниками акустического излучения. При трещинообразовании обычно отмечается большая амплитуда всплеск АЭ, что значительно облегчает ее регистрацию [7].

Акустическое излучение при зарождении микротрещины происходит в момент объединения одноименных дислокаций в микротрещину при действии нагрузки на объект. В металлах возможно почти мгновенное образование микротрещин с размерами порядка 0,1 мкм в результате действия всего одной тепловой флуктуации. Зарождение микротрещины происходит путем термоактивированного объединения одноименных дислокаций.

Рассмотрим процесс разрушения твердого тела и сопровождающее его акустическое излучение. Для этого используем представление структуры твердого тела в виде плоской решетки (рис. 8). Между атомами действуют силы связи в приближении ближайшего соседа [10].

Прямые линии обозначают атомные связи. Трещина в виде разрыва атомных связей распространяется слева направо. Сила F , приложенная к решетке твердого тела в вертикальном направлении (рис. 9), растягивает решетку, при этом в нагруженных продольных атомных связях накапливается упругая энергия.

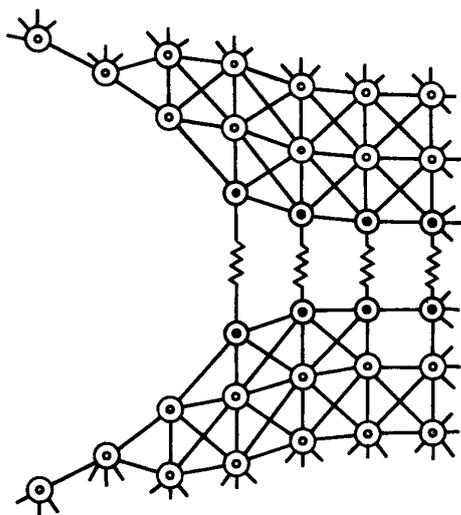


Рис. 8. Атомная модель конца трещины

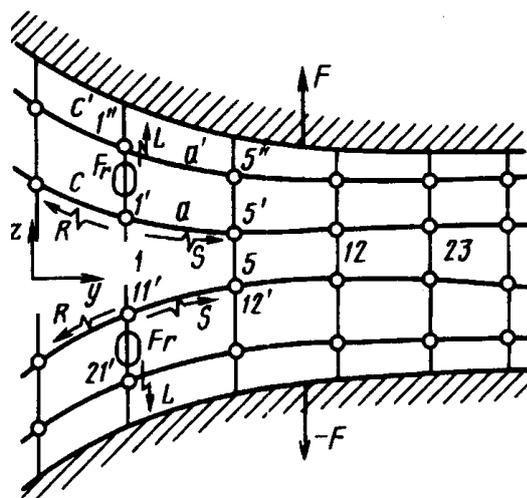


Рис. 9. Схема развития разрушения атомной решетки в двухмерной структуре

Акустическое излучение в процессе движения трещины возникает в основном при скачкообразном изменении скорости роста трещины и может иметь следующий механизм. При пересечении упругонапряженного образца трещина способна на несколько микросекунд застопориться у какого-либо барьера. Напряжения в ее вершине возрастают и после прорыва импульсивно излучаются в виде упругих волн в матрицу материала. Подобный механизм возможен в поли- (взаимодействие с границами) и монокристаллах (пересечение трещиной субграниц и т. д.). Импульсы разгрузки, возникающие при скачкообразных перемещениях трещины, возбуждают поверхность тела, что может приводить к излучению сигналов АЭ.

При хрупком разрушении образцов процесс разрушения можно разделить на три стадии: зарождение микротрещины, ее подрастание до критических размеров и катастрофический рост. Принципиальным отличием третьей стадии от первых двух является то, что из множества зародившихся микротрещин критического состояния достигает, как правило, одна трещина, прочие остаются как бы законсервированными в состоянии, которого они достигли к моменту разрушения [10].

Таким образом, акустическое излучение возникает при быстром освобождении упругой энергии, запасенной кристаллической решеткой. Величина этой энергии зависит от конкретного механизма пластической деформации или разрушения и может иметь широкие пределы. Для идентификации основных механизмов АЭ необходимо экспериментально получить достаточно точные количественные оценки энергетических параметров самого акта акустического излучения – единичного действия (срабатывания) источника АЭ.

Процесс деформирования материала разделяется на три стадии. Во время первой стадии образуется зона концентрации напряжений. Во время второй стадии разрушения происходит образование трещины и быстрое перераспределение растягивающих напряжений. Во время третьей стадии происходит развитие образовавшейся трещины, которая при достижении критических размеров приводит к разрушению конструкции.

2.1.4. АЭ при фазовых превращениях – плавлению, затвердеванию, фазовых переходах без изменения и с изменением агрегатного состояния

АЭ при кристаллизации. Кристаллизация расплава может сопровождаться разрывами жидкой фазы. При кристаллизации в двухфазной зоне падает давление, и при достижении упругости насыщенного пара или растворенных газов в жидкости возникают полости, приводящие в последующем к кристаллизационной пористости. Если объем жидкости изолирован твердой фазой, может произойти захлопывание разрыва с одновременным возникновением на соседнем участке. Усадочные процессы могут приводить к деформации твердой фазы. В указанных случаях может возникать АЭ, причем первопричиной является разность плотностей жидкой и твердой фаз. АЭ может быть вызвана образованием горячих трещин под действием термических напряжений, флоконообразованием в результате падения растворимости водорода, появления субмикроразрывов при структурных превращениях [7, 15].

АЭ при растворении. Сопутствующие явления переноса вещества в ионной или молекулярной форме с поверхности твердого тела в жидкость могут вызвать АЭ [14].

Газовыделение может быть косвенным источником АЭ при гидравлическом ударе лопающихся пузырей. Поток жидкости, увлекаемый пузырями, может оказывать механическое воздействие на твердое тело.

Источником АЭ может быть образование микротрещин в результате перераспределения внутренних напряжений в материале при растворении. Этот эффект используется для контроля остаточных напряжений.

Фазовые превращения в металлах и сплавах разделяют на две основные группы: связанные с возникновением и последующим ростом зародышей и мартенситные. В первом случае важное значение имеют термическая активация и диффузия, механизм превращения основан на переносе атомов через межфазную границу раздела. В противоположность этому, мартенситные превращения представляют собой сдвиговые коллективные перемещения атомов и, как правило, сопровождающиеся изменением формы. При превращении образуются (исчезают) частицы новой фазы за 0,05–0,5 мкс. Характерный пример – образова-

ние мартенситных плоскостей в стали (на шлифе они видны как иглы) в переохлажденном аустените – растворе углерода в гамма-железе. Мартенсит здесь – пересыщенный твердый раствор углерода в альфа-железе. Применение АЭ позволяет определить скорость и полноту мартенситного превращения и время образования мартенситных игл [11].

Причинами звукового излучения при фазовых превращениях являются изменение объема в ходе превращения, возникновение внутренних напряжений и связанных с ними искажений решетки, рождение дислокаций и зернограничное скольжение.

При сварке могут возникать линейные, плоскостные и объемные напряжения первого, второго и третьего рода. Напряжениями первого рода называются напряжения, уравнивающиеся в объеме металла, соизмеримом с размерами изделий. Напряжениями второго рода называются напряжения, уравнивающиеся в объеме металла, соизмеримом с объемом одного или нескольких зерен. Напряжения третьего рода вызваны искажениями кристаллической решетки.

Таким образом, при высоком уровне сварочных напряжений может наблюдаться деформация всей конструкции, локальная (в небольшом объеме металла) и в объеме решетки. Напряжения, вызванные сваркой, разделяют на временные, возникающие в процессе сварки, и остаточные, сохраняющиеся после окончания процесса и остывания конструкции. Также разделяют и появляющиеся при сварке деформации. Результатом этих напряжений и, соответственно, деформаций может быть образование трещин горячих и холодных.

Горячие трещины возникают при кристаллизации металла и во всех случаях зарождаются и распространяются по границам зерен. Они подразделяются на кристаллизационные, образующиеся под влиянием растягивающих усадочных напряжений в температурном интервале кристаллизации при наличии жидкой фазы по границам зерен, и образующиеся при температуре несколько ниже температуры солидуса (температуры полного затвердения металла). Эти трещины чаще всего появляются в металле шва, но иногда и в зоне сплавления или на участке перегрева основного металла. Горячие трещины в металле швов могут располагаться вдоль и поперек шва, могут выходить и не выходить на его поверхность.

Холодные трещины обычно образуются не в металле шва, а в зоне сплавления и на участках перегрева основного металла. Если напряжение в металле больше критического, то образовавшиеся зародыши трещин способны к росту, что с течением времени приводит к разрушению. Возникновение холодных трещин чаще всего происходит скачками и сопровождается интенсивным звуком.

Процессы развития фазовых и структурных превращений и развития внутренних напряжений и деформаций первого рода взаимообусловлены. Фазовые и структурные превращения существенно изменяют сопротивление металлов деформированию, а следовательно, и процессы развития внутренних деформаций и напряжений в различных зонах сварного соединения. Вместе с тем развитие внутренних деформаций способствует активации фазовых и структурных превращений, например, развитию деформационного старения, скоплению вакансий и ионов газов в зонах растягивающих напряжений и пр.

2.1.5. Причины и характер появления АЭ в неметаллических однородных материалах

Специфика проявления АЭ при нагружении керамических материалов определяется особенностями их деформации. Поликристаллическая керамика при комнатной температуре не проявляет пластичности, однако внутренние концентраторы создают уровень напряжений, превышающий предел прочности и приводящий к появлению микротрещин. При этом возбуждаются упругие волны, обусловленные освобождением энергии. Поэтому заметную АЭ можно ожидать лишь в случае структурно-неоднородного материала. Например, основной источник АЭ при нагружении фарфора – микроразрушение частиц кварца [7].

Отсутствие АЭ при нагружении однородной керамики подтвердили эксперименты на стеклокерамике, мелкозернистой однофазной окиси алюминия, цирконата–титаната свинца, нитрида кремния. При нагружении этих материалов не было обнаружено АЭ сигналов, за исключением очень короткого времени, непосредственно перед разрушением.

Наличие пористости, пустот, усадочных раковин также способствует возникновению АЭ при нагружении керамики.

2.1.6. Причины и характер появления АЭ в композиционных материалах

Композиционные материалы различают по составу материала матрицы и упрочнителя. В качестве матрицы в композитах на основе пластмасс используют различные полимеры (обычно синтетические смолы), а в качестве наполнителя – хлопчатобумажные ткани (текстолит), стекло или минералы (стеклотекстолит, асбопласты), углеродные волокна (углепластики) и другие. Композиты различают также по форме наполнителя: волокнистые – упрочненные волокнами или нитевидными кристаллами; слоистые – состоящие из слоев разнородных материалов. Слоистые композиты называют также многослойными конструкциями. Они состоят из двух или более слоев металлов, пластмасс,

керамики. Широко применяют многослойные композиты, внешние слои которых (обшивки) состоят из металла или армированного пластика, а внутренние – из легкого заполнителя – пенопласта, структуры типа пчелиных сот (из металлической фольги, пластика, бумаги) [7, 15].

Возможными механизмами разрушения системы волокно–матрица и генерации АЭ являются: разрыв волокна, трещинообразование в матрице, разрыв адгезионных связей между волокнами и матрицей, сухое трение в системе, если адгезионная связь не возникла.

Основные виды разрушения композиционных материалов – это разрыв волокон, разрушение матрицы и разрушение по границе раздела волокно–матрица. Расслоения, возникающие в результате перерывов в литье или при сборке пакетов из разнородных материалов, загрязнений соединяемых поверхностей. Дефектом являются также зоны пониженного или повышенного содержания связующего. В армированных композитах несоединение связующего с арматурой, неправильное размещение арматуры.

При нагружении стеклонитей импульсы АЭ возникают сразу же после приложения нагрузки и соответствуют разрыву наиболее слабых волокон в нити. При нагружении образцов из чистого связующего АЭ не возникает практически до нагрузки около 80 % по отношению к разрушающей.

Слабые сигналы АЭ соответствуют разрушению адгезии эпоксидной смолы, наиболее сильные – разрыву стекловолокна.

Регистрация параметров сигнала АЭ позволяет оценивать число разрушенных волокон, а также длину (площадь) развивающейся трещины.

2.1.7. Электрические разряды

Наложение электрического поля на материал может вызвать электрические разряды на отдельных участках, даже если средняя напряженность электрического поля меньше той, при которой имеет место полный пробой. С увеличением разности потенциалов растет число зарегистрированных акустических событий.

При протекании тока через полупроводниковые приборы в них вследствие неравномерного разогрева р-п перехода возникают локальные области перенапряженного состояния термоупругого характера, являющиеся источником АЭ. Интенсивность должна возрасти в режиме перехода к электрическому пробую в связи с резким нарастанием тока и особенно в режиме теплового пробоя. В транзисторах сигналы АЭ появляются при $I_k \approx 0,5$ А и $U_k \approx 50$ В и наблюдаются до теплового пробоя, который наступает при токах коллектора примерно 1,5–2 А. В данном случае АЭ можно использовать для диагностики предпробивного состояния полупроводниковых приборов [7].

2.1.8. Утечки жидкости и газа

АЭ утечки – АЭ, вызванная гидродинамическими и (или) аэродинамическими явлениями при протекании жидкости или газа через сквозную несплошность объекта испытаний [16].

Струя жидкости, выходя из отверстия, возбуждает акустические шумы, главным образом на звуковых частотах, распространяющиеся по стенкам объекта и возникающие при движении продукта истечения через течь под действием перепада давления.

Непрерывный акустический сигнал, генерируемый течью, можно считать стационарным случайным процессом при постоянном давлении и геометрии течи [7]. Более точным критерием применимости гипотезы о стационарности сигнала от течи является постоянство расхода рабочего вещества, поскольку постоянным давлению и размерам течи могут соответствовать и импульсные (нестационарные) сигналы.

При газообразном продукте истечения движение в течи может быть молекулярным или вязкостным. Для объектов, работающих под избыточным давлением, молекулярное движение недостижимо. Для таких объектов минимально возможное давление в течи соизмеримо с атмосферным – около 0,1 МПа; длина свободного пробега молекул газа по каналу течи l_c примерно равна 10^{-4} мм. Вязкое течение может быть ламинарным и турбулентным. Высокая упорядоченность ламинарного движения обуславливает отсутствие акустических сигналов, которые возникают только при турбулентном движении, когда появление нестационарных вихрей вызывает пристеночные пульсации давления и собственно акустические сигналы [14].

Когда продукт истечения представляет собой жидкость, число возможных режимов течения в неплотности увеличивается. При малых перепадах давлений и нормальной температуре жидкость полностью заполняет течь. Этот режим сопровождается акустическими сигналами также только в своей турбулентной части. С ростом перепада давлений, в отличие от газа, в районе входного течения неплотности происходит отрыв жидкости от стенок канала и образование кавитационных пузырьков. Кавитационный режим течения сопровождается сильными акустическими сигналами, на порядок и более превышающими шумами турбулентности.

Течь можно представить в виде цилиндрического канала длиной L , соответствующей толщине стенки объекта, эквивалентным диаметром (раскрытием), равным $2r$ (рис. 10). Параметры возникающих акустических сигналов зависят от продукта истечения, режимов его движения по каналу, а также от среды, в которую происходит истечение (приемной среды). В случае газообразного рабочего тела движение в течи

может быть молекулярным или вязкостным. В большинстве случаев минимально возможное давление для производственных объектов соизмеримо с атмосферным и составляет $\sim 0,1$ МПа, а длина l_c свободного пробега молекул газа $\sim 10^{-4}$ мм. В этом случае условие, обеспечивающее молекулярное течение ($l_c \gg 2$ мм), не соблюдается во всем реальном диапазоне раскрытия течи. Поэтому для производственных объектов, работающих под избыточным давлением, имеет место исключительно вязкостное движение, которое может быть ламинарным или турбулентным. Акустическое излучение возникает только при турбулентном движении, когда появление вихрей вызывает пульсации давления, возбуждающие акустические сигналы [10].

Акустические сигналы, связанные с утечкой, могут распространяться следующими путями (рис. 10): I – непосредственно по стенке объекта, II – через рабочее вещество с трансформацией на границе сред 1 и 2, III – через приемную среду с трансформацией на границе сред 3 и 2.

При утечках перегретой капельной жидкости, двух- и многофазных сред возможны и другие механизмы генерации полезных сигналов, связанные с кипением, паровой кавитацией и другими явлениями.

Основными характеристиками метода и средств течеискания являются порог чувствительности и эффективность контроля. В АЭ течеискании под порогом чувствительности понимают наименьший регистрируемый поток газообразного или расход жидкого пробного вещества через течи. Порогом чувствительности можно также считать минимальные величины диаметра (размеров раскрытия) обнаруживаемого отверстия при определенных значениях перепада давления и характеристиках сред [10].

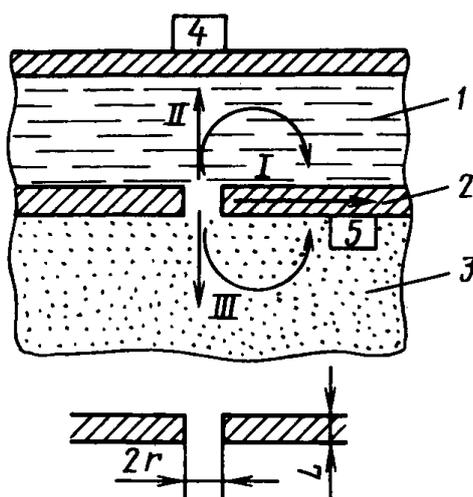


Рис. 10. Схема образования и распространения сигнала АЭ от течи:
 1 – жидкая рабочая среда; 2 – металлическая стенка объекта;
 3 – приемная среда (газ); 4,5 – преобразователь АЭ

Порог чувствительности определяется уровнем собственных тепловых шумов аппаратуры. Этот параметр должен измеряться при отсутствии посторонних акустических шумов и расположении преобразователя в зоне утечки. Измерение проводят, уменьшая перепад давлений или сечение канала. Минимальным расходам соответствует капельный режим истечения жидкости в газ или пузырьковый при истечении газа в жидкость.

Значения порога чувствительности традиционных методов (по расходу пробного вещества) составляют: масс-спектрометрический $5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$, люминесцентный $5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$, галогенный $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ и пузырьковый компрессионный $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

Предельные чувствительности АЭ метода течеискания существенно превосходят чувствительности других методов (табл. 1).

Таблица 1

Экспериментальные значения предельной чувствительности акустического контактного течеискателя (АКТ) [30]

Условия истечения	Δp , МПа	Расход в начале капельного (пузырькового)	Порог чувствительности АКТ 10^9 , $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$	Детектор
Вода в воздух	1,6	2,3	5,0	Двухполупериодный линейный
Воздух в воду	6,0	6,7	1,0	Двухполупериодный линейный
Гелий в воду	10,0	5,3	2,5	Двухполупериодный линейный
			0,2	Корреляционный

2.1.9. Растрескивание окисных плён и окалины

Источником АЭ может быть растрескивание поверхности в результате наводораживания, и возможно пластическое течение вблизи коллекторов водорода.

Если на поверхности есть окисная плёнка или иное инертное покрытие, то после проникновения раствора под покрытие газовыделение приводит к разрушению покрытия и появлению АЭ.

Разрушение толстых оксидных пленок на поверхности металла вызывает АЭ взрывного типа с относительно небольшой амплитудой из-за малой энергоёмкости процесса [15].

2.1.10. Разрушение шлаковых включений

Разрушение шлаковых включений также является источником АЭ. Разрушение включения возможно путём отслоения пустот на границе раздела с основным металлом. В этом случае образуется сферическая полость. Возможны также случаи разрушения самого включения путём образования дискообразной трещины. Такое разрушение имеет место, например, при нагружении образцов из алюминиевых сплавов или чугунов, когда перед вершиной трещины начинают разрушаться шлаковые включения [17].

Неметаллические включения образуются в случаях, когда под расплавленный металл попадают оставшийся в зазорах или углублениях флюс или шлак, не успевший расплавиться и всплыть на поверхность сварного шва. При остывании сварного соединения они также могут стать источниками АЭ. Непровары представляют собой несплошности со значительной величиной раскрытия на границе между основным и наплавленным металлом или незаполненные полости в сечении и в корне шва. В ряде случаев непровары заполнены шлаком. Как правило, в отдельных областях непровары имеют слипания, которые при остывании сварных соединений становятся источниками АЭ.

2.1.11. Взаимное трение узлов и деталей

АЭ трения – АЭ, вызванная трением поверхностей твердых тел [6].

Считается, что при трении твердых тел возникают три вида колебаний [10]:

- автоколебания, образующиеся в результате изменения статистических, динамических или кинематических условий сопряжений твердых тел;
- эмиссионные сигналы в объеме тела (непосредственно АЭ материала), вызванные пластическим деформированием, структурно-фазовой перестройкой и разрушением поверхности трения;
- поверхностные волны.

Эти процессы взаимосвязаны и поэтому их можно отнести к области АЭ.

Исследования закономерностей и механизмов возникновения АЭ при трении позволяют выявить и оценить параметры сложных физических процессов данного явления [10].

При сухом трении твердых тел происходят пластические деформации вершин микронеоднородностей поверхности, а также «слипание» тел на участках истинного контакта, где действуют силы молекулярного сцепления. При взаимном скольжении тел происходит разрыв старых и образование новых участков контакта. Сухое трение может сопровож-

даться образованием микротрещин на поверхности, подвергаемой трению. Все эти процессы способны возбуждать механические волны.

Шумы, связанные с трением, характеризуются излучением сигналов небольшой амплитуды и большой длительности по сравнению с сигналами АЭ от трещины.

Физическая основа трения заключается в том, что фрикционное взаимодействие вызывает динамическое локальное изменение полей механических напряжений в контактирующих средах, которое проявляется в возникновении АЭ [17]. Трение можно рассматривать как:

1. Результат упругих и неупругих взаимодействий микрошероховатостей твердых поверхностей, при которых в микрообластях фактического касания возникают мгновенные давления большой величины, т. е. процесс имеет ясно выраженный характер удара.

2. Процесс последовательного установления и нарушения адгезионного контакта между компонентами пары трения. При этом на пятнах фактического касания этих пар возникает двойной электрический слой, плотность заряда которого особенно велика в случае контактирования разнородных тел. Физически это обусловлено изменением электронной плотности соприкасающихся поверхностных слоев по отношению к их исходной электронной структуре. В результате взаимодействия на каждой из поверхностей образуется дискретная или мозаичная электронная структура. В связи с этим трение можно рассматривать как мгновенное возникновение и нарушение двойных электрических слоев на границе раздела тел. При разрушении электроадгезионных связей между материалами, различающимися по своей электронной структуре, наблюдается сложный комплекс физических процессов, в том числе акустическая эмиссия.

3. Процессы структурно-фазовых превращений поверхностных слоев взаимодействующих пар. Степень развития и интенсивность этих процессов зависят от свойств материалов и температурного режима трения. Так, например, при трении аустенитных чугунов обнаружено превращение аустенита в мартенсит. Фрикционная трансформация структуры наблюдается и у полимерных материалов. При возникновении (исчезновении) частиц новой фазы в окружающей среде развиваются дилатационные и сдвиговые компоненты-смещения, внутренние напряжения и связанные с ними искажения решетки, рождение дислокации и зернограничное скольжение и т. д., что вызывает появление упругих волн.

4. Процесс образования новых поверхностей. Это объясняется, прежде всего, тем, что при распространении трещины в низкочастотном диапазоне выделяется значительная упругая энергия, что облегчает ее регистрацию. Энергию упругих колебаний, которая выделяется при об-

разовании микротрещины из скопления дислокации, можно оценить. Упругая энергия W_1 , запасенная объемом V деформируемого поверхностного слоя, пропорциональна среднему действующему напряжению и величине деформации:

$$W_1 = \frac{1}{2} \sigma \cdot \varepsilon \cdot V = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} V.$$

Взаимодействующую поверхность материалов можно рассматривать как неоднородную фрагментированную структуру с чередующимися зонами высокой и низкой плотности дислокации. Так как скопление дислокаций является концентратором напряжений, то объем, в котором реализуются критические напряжения, будет равен $V = S \cdot l$, где S – площадь поверхности частицы износа, l – размер фрагментированной структуры. Разрыв атомных связей произойдет, если действующее напряжение достигнет теоретической прочности данного материала. По приближенным оценкам оно составляет $\sigma_{\max} = E/S$. Накопленная энергия деформации при образовании разрыва распределится между энергией W_2 , необходимой для образования частицы износа.

Эффекты схватывания поверхностей, фрикционный перенос, прорыв масляной пленки сопровождаются качественным изменением спектральных характеристик АЭ. В момент появления на дорожках трения кольцевых микротрещин формировался устойчивый эмиссионный спектр, близкий по форме к «гауссовой кривой» с максимумом на частоте 20–40 кГц при исследуемой области частот до 500 кГц. Параметры акустического излучения отражают природу происходящих процессов разрушения [10].

Поэтому для получения полной информации о кинетике этих процессов необходима одновременная регистрация нескольких параметров АЭ.

Анализ теоретических и экспериментальных данных по источникам АЭ при фрикционном взаимодействии показывает, что наибольшей энергией обладают источники, активируемые образованием новых поверхностей, наименьшей – источники, связанные с пластической деформацией в контактирующих поверхностях. При контактировании разнородных по электрическим свойствам тел (например, в сопряжении полимер – металл) существенный вклад в АЭ вносят акустические источники, инициируемые электроадгезионными явлениями. Теоретическое обоснование соотношений между параметрами АЭ и характеристиками фрикционных процессов требует учета комплексности и многообразия источников, кооперативного характера их действия, а также законов распределения источников по номинальной площади касания.

2.1.12. Плохой акустический контакт преобразователя с объектом

При плохом контакте преобразователя с объектом контроля в пространстве между ними могут образовываться пустоты, заполненные воздухом. Отражение акустических волн, принимаемых преобразователем, от этих пустот может приводить к появлению дополнительных сигналов АЭ. Они являются мешающими, так как не относятся к перестройке структуры материала объекта контроля [18].

2.1.13. Трение берегов трещин

Процессы трения поверхностей разрыва (берегов трещины), образующихся внутри материала при деформировании, – один из основных источников АЭ. Типичным случаем действия такого механизма является работа материала с усталостной трещиной при циклическом нагружении. Процесс периодического раскрытия и схлопывания трещины сопровождается трением и притиркой ее поверхностей [7, 19].

2.1.14. Коррозия

Многообразие видов коррозионных повреждений (химическое, электрохимическое, водородное охрупчивание, коррозия под напряжением и др.) определяются специфичностью свойств материала, среды, уровнем приложенных напряжений, электродным потенциалом. Если эти факторы определить на плоскости пространствами признаков, обозначив их соответственно, то наложение зон выявит единственный механизм коррозии (рис. 11). Так при определенном сочетании свойств материала и среды возникает химическая коррозия, а в случае наличия электролита – электрохимическая. Коррозия под напряжением происходит, когда одновременно действуют механические напряжения и среда. Сочетание всех факторов 1, 2, 3, 4 может вызвать коррозию под напряжением в электрическом поле [19].

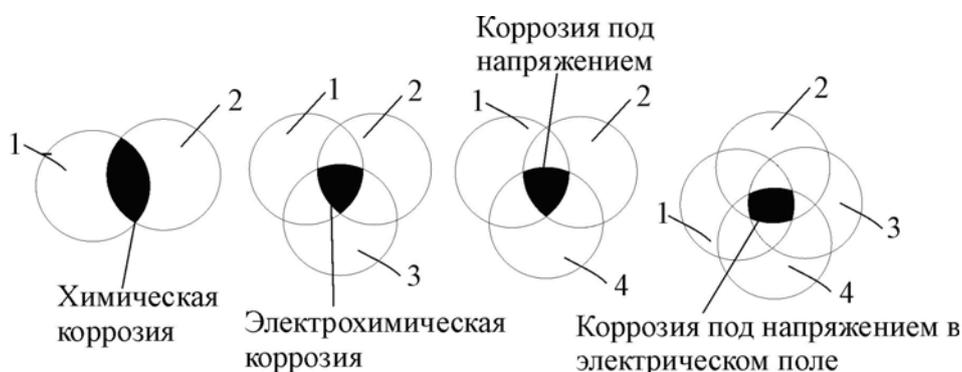


Рис. 11. Виды коррозии: 1 – внешняя среда; 2 – микроструктура материала; 3 – потенциал; 4 – напряжение

Вследствие чувствительности метода АЭ к изменению структурных и механических характеристик разрушения каждому механизму коррозии отвечает свой источник АЭ со специфическими свойствами (рис. 12).

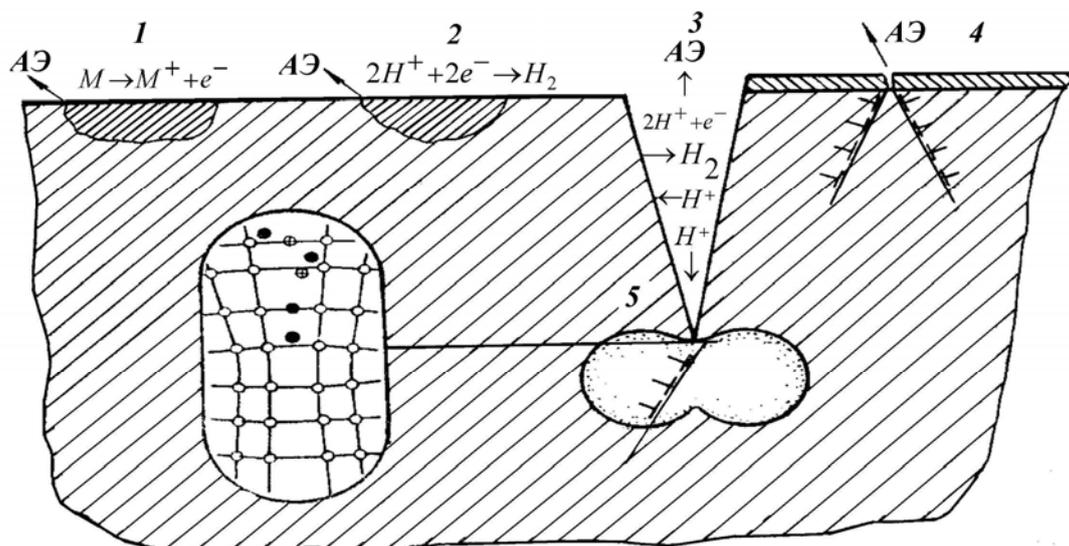


Рис. 12. Источники акустической эмиссии при коррозии:
 1 – растворение металла вследствие анодных реакций; 2 – выделение пузырьков газообразного водорода при катодных реакциях; 3 – водородное охрупчивание;
 4 – разрушение толстых оксидных пленок на поверхности металла;
 5 – пластическая деформация в вершине трещины

Так растворение металла вследствие анодных реакций ($M \rightarrow M^{2+} + 2e^-$) – медленный и недетерминированный процесс – сопровождается излучением сигналов небольшой амплитуды. Подобный вид может иметь и ложная эмиссия, связанная с выделением пузырьков газообразного водорода при катодных реакциях ($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$).

Источниками АЭ являются и солевые отложения на берегах трещин. Они образуются при корродировании металла в морской воде в присутствии катодной защиты. В этом случае отмечено как появление пузырьков водорода, так и выпадение на берегах трещин солей $CaCO_3$ и $Mg(OH)_2$ помимо пленки Fe_2O_3 . Идентификация сигналов АЭ осуществляется путем селекции отдельных компонентов коррозионного процесса.

Под воздействием внешних напряжений берега трещины остаются разомкнутыми, коррозионный агент получает свободный доступ к образовавшимся полостям. Пластическая деформация непрерывно обнажает новую поверхность, способствуя протеканию коррозионного процесса, вызывает восходящую диффузию в область с высоким гидростатическим напряжением перед вершиной трещины.

При этом следы явного повреждения материала на поверхности элементов сооружения часто отсутствуют.

Перечисленные механизмы не исчерпывают, очевидно, всех причин возникновения АЭ. Все они обладают одинаковыми признаками, позволяющими следующим образом сформулировать понятие АЭ. АЭ – процесс излучения материалом механических волн, вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры материала.

2.2. Характеристика сигналов АЭ

Сигнал АЭ – изменяющаяся стохастическая физическая величина, отражающая сообщение об АЭ [6].

Электрический сигнал АЭ – электрическое напряжение или ток, отображающие сообщение об АЭ.

Импульс АЭ – сигнал АЭ, значение которого отлично от нуля в интервале времени, в течение которого его значение превышает заданный относительный уровень от максимального.

2.2.1. Характеристики отдельного импульса АЭ

Простейший тип волны от АЭ источника представлен на рис. 13. Волновое смещение представляет собой функцию близкую к ступенчатой. Напряжение, соответствующее смещению, имеет форму импульса, ширина и высота которого зависят от динамики процесса излучения. Импульсы таких источников как проскок микротрещины или разрушение осажденных фракций имеют малую длительность (порядка микросекунд или долей микросекунд). Амплитуда и энергия первоначального импульса АЭ может меняться в широком диапазоне в зависимости от типа источника акустической эмиссии. Зародившаяся волна (импульс) распространяется от источника во всех направлениях, при этом распространение в соответствии с природой источника может носить ярко выраженный анизотропный характер, как показано на рис. 13 (т. е. зависимость скорости распространения от направления) [9].

Численные расчеты для зерен с формой границ, описанных в металлографических исследованиях, дали единичные и усредненные кривые изменения числа разорванных связей, приведенные на рис. 14. Сравнение импульсов, полученных расчетом и в экспериментах (рис. 15), показывает достаточно хорошее совпадение форм [10].

На рис. 14 представлены рассчитанные формы единичных импульсов. Расчет проводился с использованием кинематической (скалярной) модели формирования единичных импульсов [10]. Следует отметить определенные черты сходства полученных в экспериментах и рассчитанных импульсов АЭ. Анализ показывает, что по измеренным временным параметрам сигналов АЭ можно восстановить параметры источников АЭ.

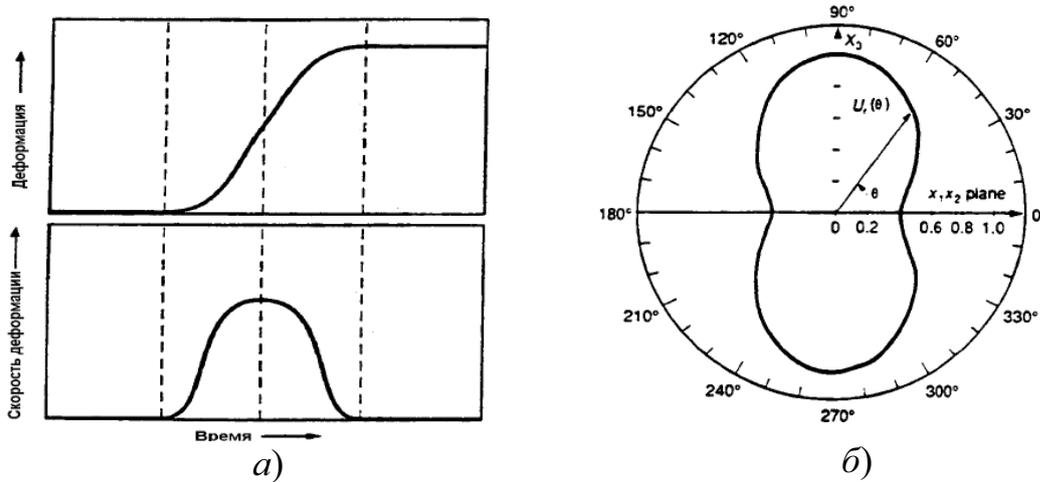


Рис. 13. а – простейшая волна АЭ, возникающая от источника, импульс напряжения, соответствующий смещению поверхности материала; б – угловая зависимость АЭ от растущей трещины, распределение основной энергии

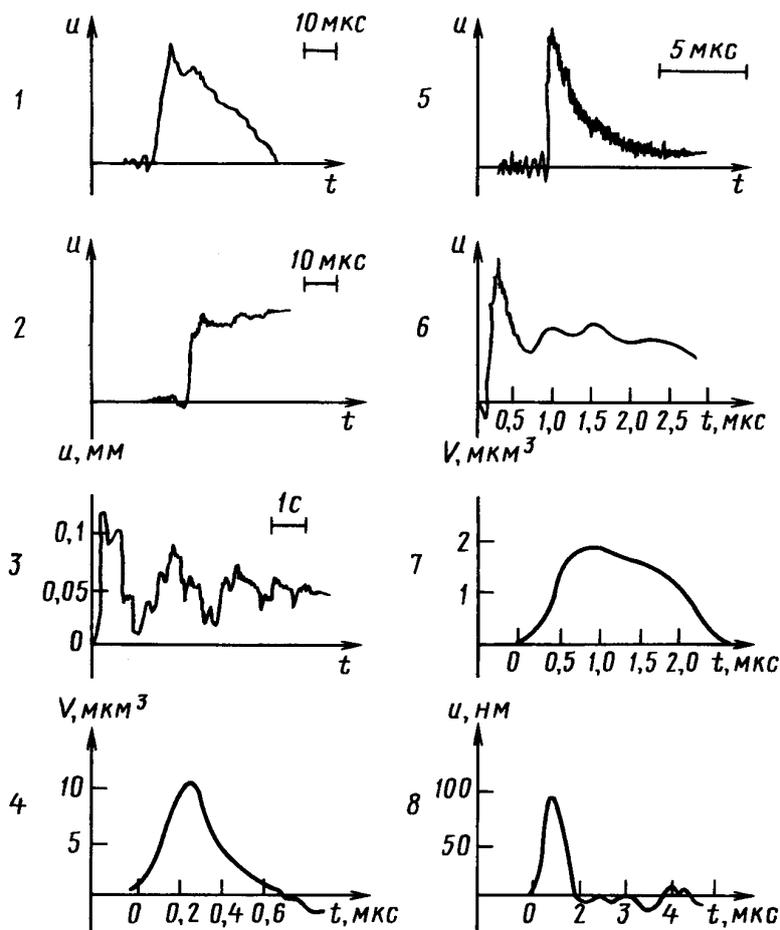


Рис. 14. Теоретически рассчитанные формы единичных импульсов АЭ в дальней зоне

Все импульсы как теоретические, так и полученные в экспериментах, характеризуются «гладким» фронтом, крутизна которого имеет определенное значение. В соответствии с приведенной моделью крутизна фронта импульса АЭ зависит от скорости процесса разрыва связей (скорости распространения разрыва) и места начала разрыва. Импульсы АЭ имеют характер преимущественно однополярного импульса с некоторыми осцилляциями мгновенного значения. Мгновенное значение сигнала АЭ достигает максимума, после которого форма кривой может быть весьма разнообразной, что связано с рядом причин. Если зарегистрированный импульс АЭ имеет форму, близкую по внешнему виду к функции Хэвисайда, то можно сделать вывод, что источник АЭ расположен вблизи точки регистрации и, следовательно, зарегистрировано смещение точек среды в ближней зоне (рис. 15, кривая 2).

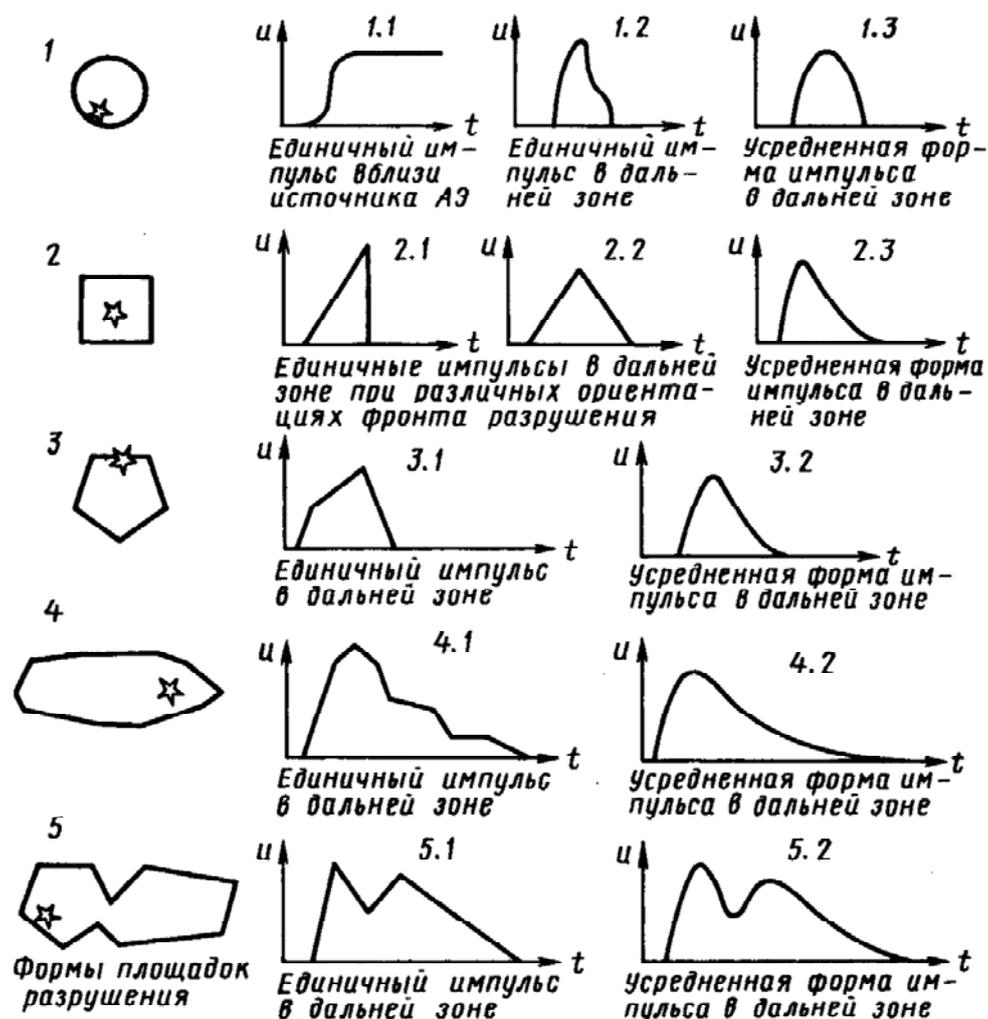


Рис. 15. Экспериментально зарегистрированные формы единичных импульсов АЭ, взятые из различных источников

Изменение мгновенного значения импульса АЭ в зоне, расположенной за максимумом импульса, можно связать с существенным взаимодействием фронта разрушения с границами площадки разрушения. В результате этого взаимодействия, приводящего к прекращению разрушения в данной зоне, формируется спад импульса.

Итак, фронт импульса определяется двумя первичными факторами: скоростью распространения фронта разрыва и местом начала разрыва. Скорость распространения тем выше, чем более однороден материал, больше уровень напряжений. Темп нарастания фронта импульса тем больше, чем дальше начало разрыва расположено от границ площадки разрушения.

Для ниспадающей части импульса характерны нерегулярности (осцилляции), связанные с особенностями формы площадки разрушения и взаимодействием фронта разрыва с границами площадки. Выпуклой форме площадки соответствует в среднем монотонный спадающий участок. Если на площадке разрушения есть вогнутости, например площадка разрушения по форме похожа на цифру «8», то единичный импульс АЭ может иметь один или несколько дополнительных максимумов (рис. 14, кривая 5.1). Первый после основного максимума выброс на экспериментальном зарегистрированном импульсе (рис. 15, кривая 6) можно связать именно с эффектом появления дополнительных максимумов из-за особенностей форм площадок разрушения.

Еще одна причина, которая может привести к образованию дополнительного максимума, обусловлена задержкой разрушения на какой-либо неоднородности в материале, служащей препятствием для распространения процесса разрыва. Таким препятствием может быть любой дефект кристаллической структуры, для преодоления которого необходимо затратить дополнительную энергию и, соответственно, дополнительное время. Чем большей высокоэнергетичностью (прочностью) отличается препятствие, тем требуется больше энергии для его преодоления и времени для «сбора» энергии. После преодоления препятствия направление плоскости разрыва может сохраниться. В некоторых случаях может произойти изменение направления плоскости разрушения, в результате сформируется «ступенька». Вследствие этого увеличивается время полного разрушения и появляется некогерентная составляющая АЭ.

Единичный импульс АЭ является сугубо индивидуальным сигналом, несущим информацию только о конкретной площадке разрушения, и может быть получен, строго говоря, только расчетным путем, т. е. принципиально не может быть выражен в аналитической детерминированной форме. Это связано со случайным характером процесса разрушения и соответствующей ему поверхности разрушения.

2.2.2. Модель полного сигнала АЭ

Процессы кинетики микродеформирования и микроразрушения протекают дискретно во времени. Каждому процессу повреждения материала (срыв лавины дислокаций, слияние микротрещин между собой, с макротрещиной и т. д.) соответствует первичный упругий импульс, процесс излучения которого представляет собой акт АЭ.

Форма импульсов АЭ, возникающих в результате перестройки структуры, зависит от природы процесса и материала изделия. При снятии локальных напряжений путем разрушения вызывает импульс с крутым фронтом. Процесс восстановления первоначального состояния называется релаксацией. Первоначальное состояние – ненагруженное. Разрыв связей соответствует возвращению к ненагруженному состоянию. Он происходит быстро, за время порядка 10^{-13} с [14].

Спад импульса соответствует восстановлению внутренних напряжений (иногда они не восстанавливаются или восстанавливаются не полностью). Здесь первоначальное состояние – напряженное, и под релаксацией понимают возвращение к напряженному состоянию. Оно происходит медленнее, чем разрыв, может сопровождаться быстрозатухающими колебаниями (рис. 16, *а*). Импульсы рассматриваемого типа называются *релаксационными* (*р*-типа). Они характерны для процессов возникновения и движения дислокаций и их групп, возникновения и развития трещин.

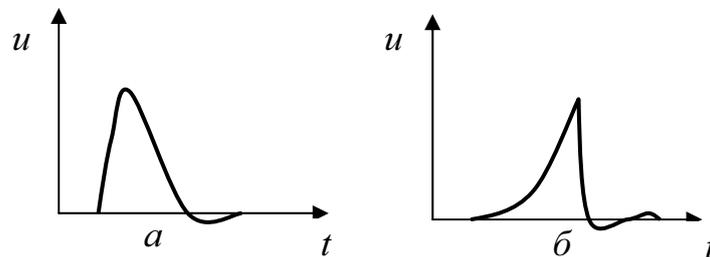


Рис. 16. Типы сигналов: *а* – релаксационный; *б* – акселерационный

На рис. 16, *б* показан импульс, соответствующий процессу *акселерационного* типа (*а*-типа). Когда дислокации противоположного типа сближаются и аннигилируют или дислокация выходит на поверхность кристалла и исчезает, их энергия преобразуется в упругую. Процессы сближения или выхода на поверхность дислокаций происходят с ускорением, отсюда название импульса этого типа. Энергия процесса аннигиляции дислокаций порядка 10^{-18} – 10^{-16} Дж, длительность импульса – 10^{-11} с, ширина спектра – сотни мегагерц. Другие дислокационные источники имеют большую длительность и энергию (до 10^{-6} Дж).

Полный сигнал АЭ формируется из отдельных импульсов, форма и параметры которых зависят от физического механизма срабатывания источника АЭ.

2.2.3. Амплитуда и ее связь с параметрами процесса разрушения в объекте

Амплитуда сигнала АЭ – максимальное значение электрического импульса АЭ. Амплитуда сигнала АЭ определяется интенсивностью процессов деформирования или разрушения, вызывающих АЭ. Если источником волны напряжения является развитие трещины, то амплитуда сигнала пропорциональна площади образовавшейся при этом поверхности. Амплитуда импульсов АЭ характеризует энергетические возможности развивающегося дефекта.

Для ряда материалов характерно образование микротрещин перед магистральной макротрещиной [7, 14]. Образование такой изолированной микротрещины вызывает упругие колебания с очень малыми амплитудами. При наличии макротрещин возникающие сигналы значительно усиливаются. Если длина макротрещины в 100 раз больше размера микротрещины и расстояния между ними, то амплитуда сигнала АЭ рассматриваемой микротрещины будет почти в 4 раза больше, чем от изолированной. Макротрещина обеспечивает еще дополнительное усиление амплитуды сигнала АЭ примерно в 14 раз больше, чем микротрещина. Слияние двух трещин дает сигнал в 386 раз больший, чем изолированная микротрещина. В табл. 2 приведено сопоставление влияния различных факторов на амплитуду АЭ [20].

Таблица 2

Влияние различных факторов на амплитуду АЭ

Большая амплитуда	Малая амплитуда
Большая скорость деформации	Малая скорость деформации
Большое напряжение	Малое напряжение
Гетерогенность материала	Гомогенность материала
Хрупкое разрушение	Деформация сдвига
Низкие температуры испытаний	Высокие температуры испытаний
Материал с трещинами	Материал без трещин
Распространение трещин	Пластическая деформация
Наличие окисной пленки на поверхности	Отсутствие окисной пленки
Литая структура	Структура обработки
Большой размер зерен	Малый размер зерен

Все физические и механические свойства материала при его деформировании находят отражение в параметрах АЭ. Общие качественные оценки влияния свойств материалов на АЭ сформулировал Х. Данеган с сотрудниками [21]. Анизотропные материалы дают большую амплитуду АЭ, с повышением степени анизотропии амплитуда увеличива-

ется. Материалы типа олова, урана, бериллия или материалы, энергия решетки которых больше (решетка типа ГПУ), при деформации излучают сигналы более высокой амплитуды, чем материалы с решеткой ГЦК. На амплитуду сигналов АЭ влияют и упругие постоянные.

Важное значение имеет история материала – виды обработки, которые он претерпел. У литых изделий и металла сварного шва, как правило, крупное зерно, малая плотность дислокаций, что приводит к излучению импульсов АЭ большой амплитуды при нагружении материала.

Амплитуда сигналов прямо связаны с магнитудами событий в источнике и варьируются в широких пределах от микровольт до вольт. Амплитуды АЭ принято выражать в децибельном (логарифмическом) масштабе, при этом 1 мкВ на выходе датчика принимается за 0 дБ, 10 мкВ – 20 дБ, 100 мкВ – 40 дБ и т. д.

Энергия E , присутствующая в событии переходного (неустановившегося) процесса, можно определить как:

$$E = \frac{1}{R} \int_0^a u^2(t) dt,$$

R – электрическое сопротивление измерительного контура.

MARSE (Measured Area of the Rectified Signal Envelope) – параметр, известный также как измеренная площадь под огибающей сигнала. Параметр MARSE является чувствительным и к амплитуде, и к длительности сигнала, поэтому в последнее время он стал очень распространенным. Кроме того, он менее зависим от установленного порога и рабочей частоты. Суммарная АЭ активность должна измеряться путем суммирования магнитуд всех зарегистрированных сигналов, среди всех измеряемых параметров, MARSE наилучшим образом подходит для этих целей.

2.2.4. Длительность сигнала и ее зависимость от параметров аппаратуры и характеристик объекта

Вследствие многомодовости распространения, отражения, трансформации волн различных типов, затухания высокочастотных составляющих и резонансных свойств приемной аппаратуры, сигналы АЭ, регистрируемые на выходе датчика, значительно искажаются и имеют вид радиоимпульса с затухающей по экспоненте амплитудой колебаний.

Длительность сигнала АЭ (T) – время между началом и концом сигнала АЭ. Начало и конец сигнала, как правило, отсчитываются на уровне $0,1 \cdot u_m$, где u_m – амплитуда сигнала АЭ. Если установлен порог по амплитуде, то по превышению этого порога u_0 (рис. 17).

Порог – величина напряжения на электронном компараторе, при котором сигналы с амплитудами большими, чем эта величина, могут быть зарегистрированы [6].

Длительность импульсов АЭ может использоваться для идентификации полезного сигнала на фоне помех [17]. Этот параметр при заданном, неизменном пороге ограничения связан с амплитудой импульсов АЭ.

Хрупкому росту трещины соответствует АЭ большей интенсивности с малой продолжительностью сигнала. Пластическая деформация, наоборот, обуславливает слабую АЭ и большую длительность процесса.

Если источником волны напряжения является развитие трещины, то время нарастания соответствующих этому процессу акустических сигналов пропорционально времени увеличения трещины.

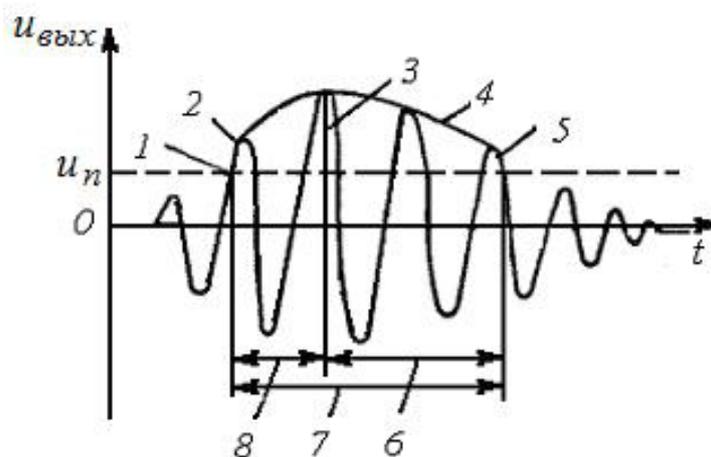


Рис. 17. Схематическое изображение сигнала АЭ на выходе преобразователя: u_n — уровень дискриминации (порог); 1 — время прихода; 2 — первый импульс; 3 — амплитуда u_m ; 4 — огибающая; 5 — последний импульс; 6 — время убывания; 7 — длительность события (T); 8 — время нарастания (RT)

2.2.5. Частотный спектр

Важную информацию о физической природе излучения несет частотный спектр. По нему можно судить об энергетических и временных параметрах источников акустического излучения. Из всех регистрируемых параметров АЭ он претерпевает наибольшие искажения в процессе распространения и приема.

Особенности спектра сигналов АЭ определяются в значительной степени статистическим характером явления АЭ как случайного потока импульсов. Следовательно, при рассмотрении спектральных характеристик АЭ необходимо учитывать не столько спектр одиночного импульса, сколько особенности спектра случайного процесса совокупности импульсов АЭ. В табл. 3 приведены оценки некоторых параметров одиночных сигналов АЭ [7, 14].

Таблица 3

Параметры сигналов АЭ для некоторых источников

Вид источника	Амплитуда или энергия импульса АЭ, Дж	Длительность сигнала, мкс	Ширина спектра сигнала, МГц
Аннигиляция дислокаций длиной 10^{-6} – 10^{-4} см	$4(10^{-18} - 10^{-16})$	$5 \cdot 10^{-5}$	≤ 1
Образование микротрещины	10^{-10} – 10^{-12}	10^{-3} – 10^{-2}	Сотни
Исчезновение двойника размером ~ 1 мм ³	10^{-2} – 10^{-3}	$1 \cdot 10^{-4}$	≤ 50
Пластическая деформация объема со стороной 0,1 мм	10^{-4}	$\leq 1 \cdot 10^3$	–
Энергия тепловых шумов	$4,2 \cdot 10^{-21}$ Дж/Гц	–	Равномерный спектр до 10^7 Гц

Основной энергетический спектр сигналов АЭ сосредоточен в диапазоне ниже 1 МГц, причем во многих материалах резкий пик сигналов АЭ появляется в диапазоне 100–150 кГц.

2.2.6. Время нарастания и спада

Время нарастания импульса АЭ (Rise time – RT) – время между началом сигнала и максимальным значением сигнала (рис. 17) [6].

Время спада импульса АЭ – время между максимальным значением импульса и концом сигнала.

Начало импульса АЭ – отмеченное начало импульса АЭ, определяемое как первое пересечение порога этим импульсом.

Конец импульса АЭ – отмеченное окончание импульса АЭ, определяемое как последнее пересечение порога этим импульсом.

Время нарастания сигнала совпадает со временем раскрытия трещины [18]. Время раскрытия τ внутренней трещины до состояния статистического равновесия находится из соотношения:

$$\tau = 2 \cdot l / c,$$

где c – скорость, l – длина трещины.

Время нарастания переднего фронта импульсов АЭ и время спада импульсов АЭ могут быть использованы для фильтрации шума и оценки реверберационных характеристик материала конструкции. Время спада может использоваться для оценки «мертвого времени» – времени между двумя соседними импульсами, исключаящего наложение импульсов друг на друга. Спад импульса АЭ соответствует восстановлению внутренних напряжений.

Время прихода сигнала зависит от расстояния между источником эмиссии и приемным преобразователем и используется для его расчета.

2.2.7. Характеристики дискретной АЭ и потока импульсов АЭ

Форма первоначальной волны претерпевает существенные изменения при распространении в среде материала и при преобразовании датчиком, поэтому сигнал, пришедший с датчика, весьма отдаленно напоминает исходный сигнал от источника. Такое изменение формы АЭ сигнала является важной проблемой, с которой приходится сталкиваться как при исследованиях функции источника, так и при решении практических задач неразрушающего контроля. Для исследования первоначальной формы сигнала, используются широкополосные датчики и производится подробный анализ начальной части зарегистрированного сигнала. Это важный, но вместе с тем очень непростой способ исследования, т. к. обработка одного сигнала может занимать длительное время. В связи с этим многие исследователи в области испытания материалов и НК в большей степени заинтересованы в получении статистических оценок параметров АЭ, чем в подробном изучении характеристик отдельных источников АЭ. Они используют узкополосную аппаратуру, позволяющую измерять лишь некоторые параметры формы сигналов, но одновременно с этим – регистрировать большие потоки сигналов (сотни сигналов в секунду) [9].

Акустический импульс АЭ можно представить видеоимпульсом, имеющим, например, форму (рис. 15, кривая 4.2):

$$u = u_m \cdot e^{-\delta \cdot t},$$

где u_m – амплитуда начального сигнала, δ – коэффициент затухания, t – время.

Сигнал на выходе преобразователя (рис. 17):

$$u = u_m \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

где u – выходное напряжение датчика, ω – угловая частота.

Итак, АЭ является результатом протекания множества элементарных событий в объеме исследуемого объекта, каждое из которых происходит в малом интервале времени, начинающемся в случайный момент [11, 17]. В общем случае результирующий процесс $z(t)$ может быть записан в виде

$$z(t) = \sum_{i=1}^n u_i \cdot F_i(t - t_i),$$

где u_i – амплитуда импульса, появляющегося в момент времени t_i , F_i – характеристика формы единичного импульса, n – число зарегистрированных импульсов.

Полный сигнал АЭ представляет собой совокупность элементарных сигналов, причем в зависимости от физики протекания процесса это может быть стохастическая последовательность импульсов p - или a -типа, или смешанная последовательность.

Различают два вида потоков импульсов:

1. Потоки неперекрывающихся импульсов возникают при небольшой частоте событий и регистрируются независимо друг от друга – это *дискретная АЭ* (рис. 18 б, г).
2. Потоки перекрывающихся импульсов или *непрерывная АЭ*, когда возможно частичное наложение элементарных импульсов друг на друга (рис. 18 а, в).

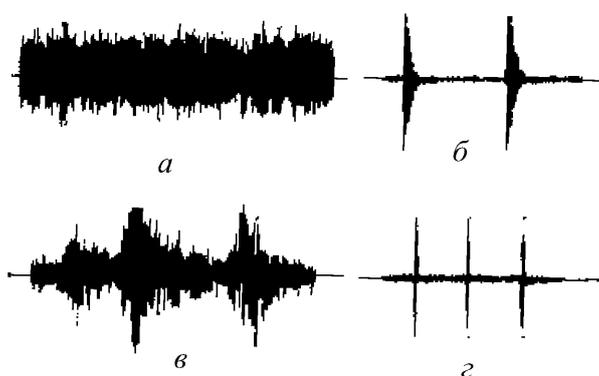


Рис. 18. Типичные формы сигналов АЭ:

а – непрерывная АЭ при пластической деформации, при шуме течения;
б – взрывные сигналы от образования трещин и трения по малой площади;
в – сигналы от трения по большой площади; *г* – сигналы от электрических помех

Появление импульсов АЭ в значительном объеме материала – процесс во времени статистический, поэтому можно говорить лишь о средней длительности импульсов и интервалов между ними. Кроме того, дискретность или непрерывность зависит от разрешающей способности регистрирующей аппаратуры.

2.2.8. Амплитудное распределение

Дополнительную информацию о физической природе и особенностях источников АЭ может дать амплитудное распределение импульсов АЭ, поскольку амплитуда импульсов АЭ непосредственно связана с их энергией:

$$u \approx \sqrt{E}.$$

Многие особенности регистрируемых сигналов АЭ, связанные с кинетикой дефектов, определяются больше общими статистическими характеристиками ансамблей несовершенства структуры, чем их отдельными индивидуальными особенностями. В связи с этим во многих случа-

ях наиболее полными информативными параметрами АЭ являются амплитудные распределения импульсов, соответствующих отдельным актам АЭ и распределения временных интервалов между ними [17].

Амплитудное распределение характеризует дискретную АЭ как случайный процесс [7, 13]. Под таким распределением понимают плотность вероятностей амплитуд $w(u)$, характеризующую вероятность того, что амплитуда отдельного АЭ импульса u_0 будет находиться в интервале значений от u до $u+du$:

$$P(u < u_0 < u + du) = \omega(u)du. \quad (2)$$

То есть, амплитудное распределение – это количество импульсов с амплитудой, находящейся в интервале от u до $u+du$. Если общее число импульсов, зарегистрированных за фиксированное время, равно N , их амплитудное распределение $n(u)$ связано с плотностью вероятностей $\omega(u)$ соотношением

$$n(u) = N \cdot \omega(u),$$

причем

$$N = \int_0^T n(u)du,$$

где T – время измерения.

Функции $\omega(u)$ и $n(u)$ оцениваются по экспериментальным данным, построив гистограмму распределения импульсов по амплитуде.

Дискретная АЭ обусловлена скачкообразным продвижением фронта усталостной трещины и отмечается при определенных значениях нагрузки, характеризуется высокой амплитудой. Критерием обнаружения продвижения трещины является получение сигналов АЭ с достаточно большими амплитудами. Развитие трещины характеризуется более равномерным амплитудным распределением. На рис. 19 показано амплитудное распределение сигналов АЭ при хрупком разрушении образца, сопровождаемое дискретной АЭ.

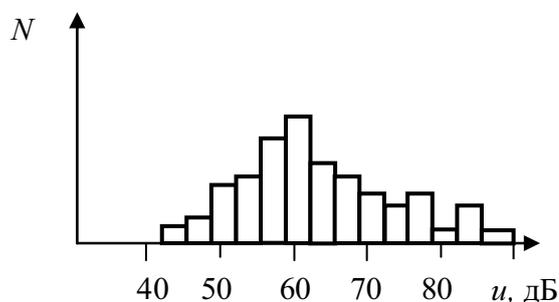


Рис. 19. Амплитудное распределение импульсов АЭ при росте трещины:
 N – количество импульсов

2.2.9. Временное распределение

Временное распределение – зависимость показателей АЭ от времени (рис. 20).

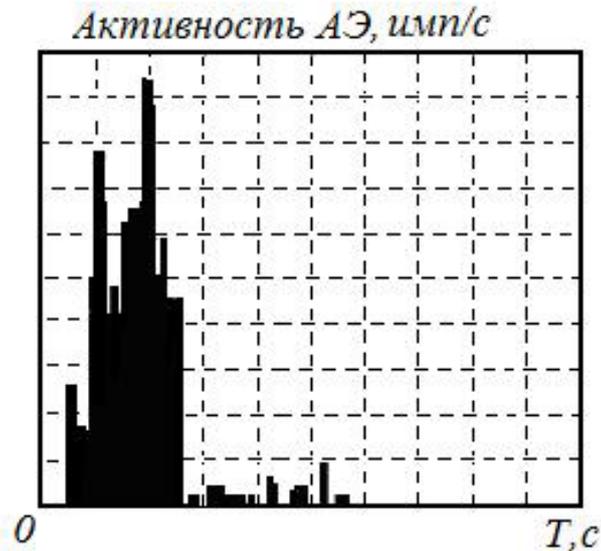


Рис. 20. Временное распределение импульсов АЭ

2.2.10. Суммарная АЭ

Характеризовать амплитуду импульса косвенно можно также следующим образом. Если установить определенный уровень ограничения (дискриминации) сигнала и подсчитать число превышений сигналом этого уровня, то это число и есть *суммарная АЭ*. Эта величина характеризует число событий с амплитудой (энергией), превышающей некоторое пороговое значение. При подобной регистрации теряется значительная информация, поскольку регистрируются только высокоамплитудные составляющие сигнала [7,13, 14].

Суммарную АЭ N можно рассчитать исходя из следующей формулы:

$$N = \frac{1}{\delta \cdot T_0} \ln \left(\frac{u_m}{u_n} \right),$$

где u_n – пороговое напряжение, T_0 – период собственных колебаний преобразователя АЭ.

Как информационный параметр, *сумма импульсов АЭ*, наиболее полно характеризует деформационные свойства материала испытываемой конструкции. Вследствие интегральности данного параметра он имеет высокую помехозащищенность. Этот параметр зависит от магнитуды источника сигналов, а также от акустических и резонансных свойств среды и датчика.

Количество импульсов АЭ и связанное с ним число выбросов является одним из наиболее важных и относительно легко регистрируемых параметров АЭ. В ряде случаев можно найти закономерную связь между числом зарегистрированных импульсов АЭ и такими параметрами, как длина трещины или ее площадь.

Если суммарная АЭ изменяется монотонно – это результат постепенного увеличения напряженно-деформированного состояния (НДС) материала или развитие пластических деформаций. Скачкообразное изменение суммарной АЭ может соответствовать скачкообразному подрастанию трещины.

Для последовательности импульсов дискретной эмиссии суммарная АЭ характеризует косвенным образом также общее число импульсов за исследуемый интервал времени, т. е. число единичных актов АЭ и число действующих источников. Практически используют также параметры, получаемые отнесением общего числа импульсов АЭ и суммарной АЭ к единице времени. Они называются соответственно *активностью* и *скоростью счета АЭ (интенсивностью)*.

Х. Данеган с сотрудниками [21] одним из первых высказал предположение о связи суммарной АЭ N с коэффициентом интенсивности напряжений K :

$$N = a \cdot K^4. \quad (3)$$

Данный коэффициент связан с НДС материала вблизи кончика трещины и характеризует работу, затрачиваемую на разрушение (вследствие этого его иногда называют вязкостью разрушения). Он зависит от свойств материала объекта, его геометрии, размера, формы и положения трещины. Выражение вида (3) использовалось Х. Данеганом для описания АЭ при росте трещины в различных материалах, как в металлах, так и в композиционных материалах [10].

Связь коэффициента интенсивности напряжений с числом импульсов АЭ при росте трещины (3) основана на следующих предпосылках. Увеличение нагрузки на объект, содержащий трещину, увеличивает действующее общее (номинальное) напряжение и в особенности локальное напряжение на конце трещины. Локальное напряжение в конце концов достигает предела текучести материала. Впереди фронта трещины образуется зона пластической деформации, изменение объема которой определяется изменением коэффициента интенсивности напряжений. Число импульсов АЭ пропорционально числу элементарных источников в пластически деформируемом объеме, размер которого определяется коэффициентом интенсивности напряжений. На рис. 21 условно представлены области в окрестности конца трещины, находящиеся в различных НДС.

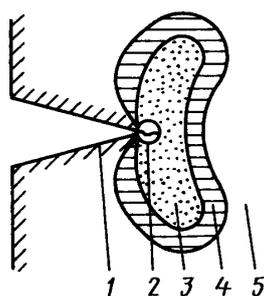


Рис. 21. Области в окрестности конца трещины:

- 1 – поверхность трещины (свободна от нормальных напряжений);
 2 – область упрочненного и охрупченного в результате «глубокой» деформации материала за пределом текучести; 3 – область пластической деформации;
 4 – область пластического течения на границе области пластической деформации;
 5 – область упругой деформации

Обобщая подход Х. Данегана [21], можно представить связь между коэффициентом интенсивности напряжений K и суммарной АЭ N при развитии трещины в виде:

$$N = a \cdot K^m, \quad (4)$$

где a и m – параметры, зависящие от состояния материала, условий роста трещины. Для различных материалов и условий испытаний параметр m может изменяться в больших пределах ($m = 4-12$) и в дальнейшем используется в «Правилах АЭ контроля» [22] для оценки состояния контролируемого объекта.

Коэффициент интенсивности напряжений тонкой пластины с трещиной длиной $2 \cdot l$, при однородном растягивающем напряжении σ равен [10]:

$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot l}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) при $m = 4$, имеем:

$$N = a \cdot \sigma^4 \cdot l^2 \cdot \pi^2, \quad (6)$$

т. е. измерение числа импульсов АЭ (или суммарной АЭ) дает информацию (при определенных условиях) о размерах трещины.

Размер зоны пластической деформации и, соответственно, параметры АЭ зависят от многих факторов, в том числе от вида НДС. Пластическую зону приближенно можно представить в виде некоторой сферы. Радиус пластической зоны для трещины нормального отрыва можно оценить по формуле:

$$r = \frac{K_1^2}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T^2},$$

где K_1 – коэффициент интенсивности напряжений, σ_T – предел текучести материала.

2.2.11. Скорость счета и активность АЭ

Активность сигнала АЭ напрямую связана с характером пластического деформирования и для разных материалов различается между собой. Резкое увеличение активности сигнала АЭ наблюдается перед самым разрушением конструкции.

По характеру изменения зависимости скорости счета от деформации $\dot{N}(\varepsilon)$ и времени $\dot{N}(t)$ для разных материалов разнообразны. Несмотря на большое разнообразие, кривые $\dot{N}(\varepsilon)$ по характеру изменения скорости счета в большинстве случаев можно отнести к одному из трех типов, показанных на рис. 22 [7]. Кривая типа 1 характеризуется примерно постоянной интенсивностью во всем диапазоне пластических деформаций. На кривой типа 2 наблюдается монотонное повышение интенсивности во всем диапазоне деформаций. Кривая типа 3 характеризуется наличием максимума в районе предела текучести и снижением интенсивности в зоне упрочнения (металлы с ГЦК-решеткой (Al, Ag, Cu, латунь) и углеродистая сталь при температуре выше 250 °С). Общей особенностью кривых является низкая интенсивность в зоне упругих деформаций и сильное ее увеличение непосредственно перед разрушением образца.

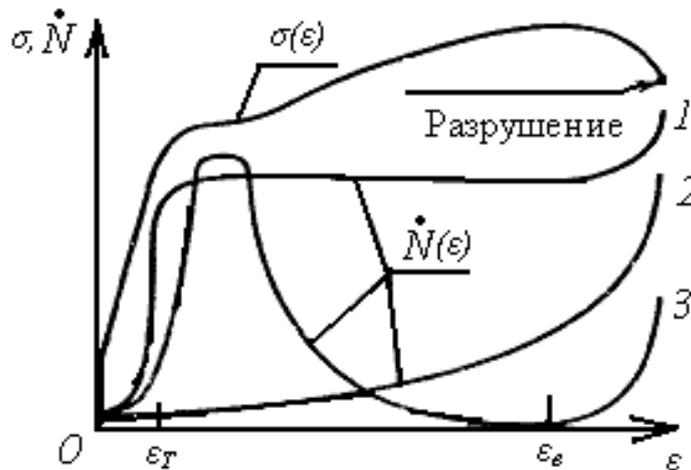


Рис. 22. Основные типы зависимости скорости счета АЭ от относительной деформации при растяжении образца

Процесс пластической деформации до образования шейки в поликристаллических металлах при статическом растяжении состоит из следующих стадий:

- микротекучести (область макроупругой деформации, где соблюдается закон Гука);
- текучести (деформация Чернова–Людерса);
- деформационного упрочнения.

В случае отсутствия площадки текучести за макроупругой деформацией следует деформационное упрочнение.

Так как чисто упругие деформации не рождают АЭ, регистрация ее в зоне упругих деформаций конструкционных материалов свидетельствует о появлении в них пластически деформируемых микрообъемов уже при низкой нагрузке.

Резкие изменения хода кривой $\dot{N}(\varepsilon)$ при увеличении деформации свидетельствуют о смене механизмов деформации материала. Например, развитие и протекание в материале деформаций Чернова–Людерса, выражающееся в образовании на кривой упрочнения площадки текучести, сопровождается резким возрастанием скорости счета и сохранением ее высокого уровня до начала упрочнения (кривая типа 3 на рис. 22). Резкий рост скорости счета непосредственно перед разрушением можно отнести на начало трещинообразования (даже у пластичных конструкционных материалов, деформирующихся перед разрушением путем образования «шейки» общему разрушению предшествует образование микроразрывов в наиболее узком сечении).

По резкому возрастанию скорости счета и амплитуды сигналов можно фиксировать продвижение трещины.

Сравнение диаграмм нагрузка – деформация с графиками скорость счета – деформация показывает, что существует однозначная связь, во-первых, между степенью деформации и уровнем скорости счета для образцов из одного и того же материала, и, во-вторых, между формой кривой акустической эмиссии для образцов из разных материалов [23].

Подсчитывая импульсы АЭ, можно судить об увеличении длины дефекта и изменении его площади. Опыты показывают, что число импульсов АЭ дает наиболее наглядное представление о росте дефекта (рис. 23). На этой кривой хорошо различаются участки, определяющие состояние сосуда. Достаточно надежно можно идентифицировать стадию, предшествующую разрушению. Заключительная стадия характеризуется определенной закономерностью возрастания числа импульсов АЭ при повышении давления. Возрастание числа импульсов на отдельных промежуточных участках носит случайный характер и связано с относительно быстрым развитием отдельных дефектов, размер которых не является критическим для конструкции.

С увеличением давления один из дефектов достигает субкритического размера, после чего происходит ускоренный рост дефекта вплоть до катастрофического разрушения. Ускоренный или нестабильный рост трещины происходит, как правило, вязким образом и подчиняется закономерности $N \sim P^4$. Следовательно, можно прогнозировать с некоторой степенью вероятности разрушение по признаку, когда увеличение числа импульсов АЭ начинает подчиняться степенному закону с показателем степени нагрузки равной 4 или более [13, 14, 15].

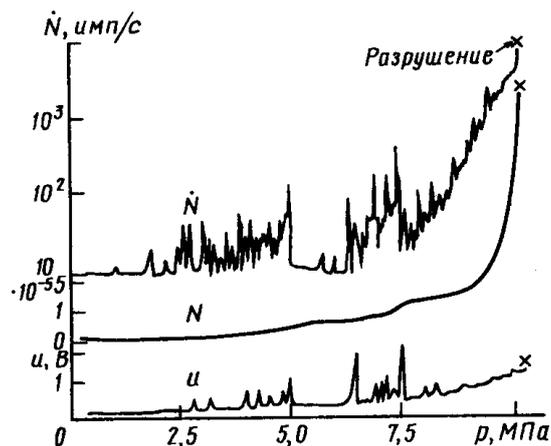


Рис. 23. Изменение скорости счета АЭ \dot{N} , числа импульсов N и эффективного значения u при испытании сосуда давления: p – внутреннее давление; x – разрушение

Эффективное значение АЭ (u) – это произведение активности на среднее значение амплитуды сигналов АЭ за единицу времени.

Числовые значения параметров АЭ могут изменяться в очень широких пределах. Это связано как с особенностями структуры различных материалов, режимов их нагружения, так и с параметрами аппаратуры. Очевидно, например, что изменение порога дискриминации сигналов может существенно изменить регистрируемую суммарную эмиссию и ее скорость счета. Энергетические параметры АЭ существенно зависят также от характеристик применяемого приемного преобразователя и выбранного частотного диапазона.

Приведем несколько примеров.

На рис. 24 приведен результат испытания образца из стали марки Ст. 3. В упругой области деформации скорость счета мала, но все же наблюдаются отдельные импульсы АЭ, иногда значительной амплитуды.

Хотя металл деформируется, подчиняясь закону Гука, в отдельных микрообъемах образца создаются необратимые локальные деформации, которые появляются сразу после начала испытания на растяжение. После достижения предела упругости скорость счёта резко возрастает. Запись механической диаграммы показывает наличие в образцах этого сорта стали прямого зуба текучести, обратного зуба текучести и волнообразного хода кривой на участке текучести, что свидетельствует о неравномерности пластической деформации. Прямому зубу текучести так же, как и обратному, соответствуют очень большие выбросы, каждой неравномерности деформации – выброс несколько меньшей величины. Даже в тех местах, где на механической диаграмме не неравномерностей, на кривой

скорости счёта наблюдаются выбросы, свидетельствующие о малых изменениях скорости деформации. Если сравнить кривую с ходом изменения скорости деформации, то можно заметить, что они подобны.

После достижения предела текучести уровень скорости счета АЭ резко падает и остается низким вплоть до разрушения.

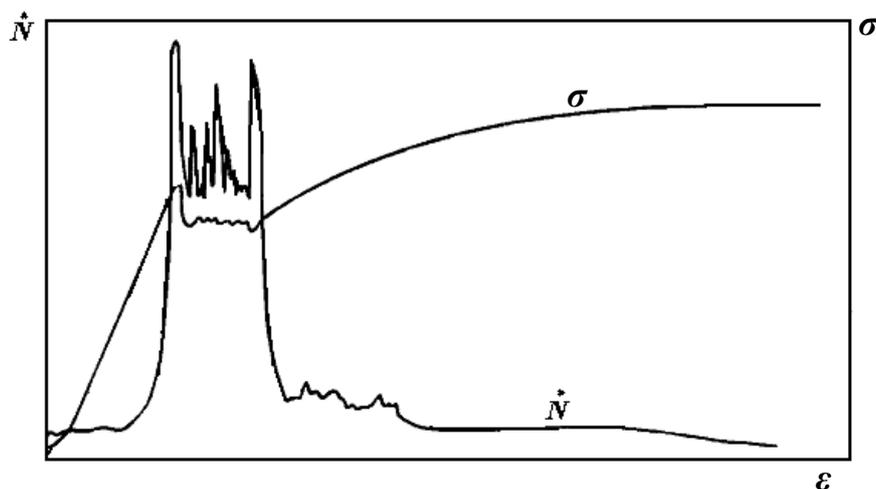


Рис. 24. Зависимость скорости счета АЭ от деформации в Ст. 3

Подобный ход кривой скорости счета АЭ будет наблюдаться для всех образцов из стали марки Ст. 3, независимо от их размеров и скорости деформации. Таким образом, кривая скорости счета АЭ может служить характеристикой материала образца, как и обычная механическая диаграмма нагружения. В пользу этого предположения говорят графики скорости счета АЭ для разных материалов. Были испытаны образцы из следующих материалов: Ст. 3, 1Х18Н9Т (нержавеющая сталь), арможелезо, Д16Т, алюминий, медь, латунь, ниобий (при скорости деформации 0,05 см/мин). На рис. 25 приведены кривые АЭ для этих материалов.

Для разных сортов стали графики эмиссии различаются. Все они представляют собой кривые с максимумом в области от предела упругости до предела текучести, но сама форма кривых различается, сохраняясь независимо от скорости деформации для каждого материала от образца к образцу. Если для Ст. 3 кривая имеет вышеописанный вид, то нержавеющая сталь дает несимметричную колоколообразную кривую, а армо – кривую с плоской вершиной и очень резким, мгновенным спадом при достижении предела текучести. Эти особенности говорят о том, что деформация каждого из этих материалов протекает несколько иначе, чем других, однако эти различия на механической диаграмме не заметны.

Следующий пример иллюстрирует одно из приложений АЭ для контроля композитов с металлической матрицей.

При испытании на растяжение композитов с двойной металлической матрицей задолго до того, как происходит окончательное разрушение вязкой матрицы, в результате микрорастрескивания хрупкой фазы

между волокнами и матрицей в материале излучается значительная эмиссия. Это позволяет использовать АЭ для мониторинга такого типа структур, обеспечивая раннее обнаружение структурных изменений за долго до наступления полного разрушения материала [9].

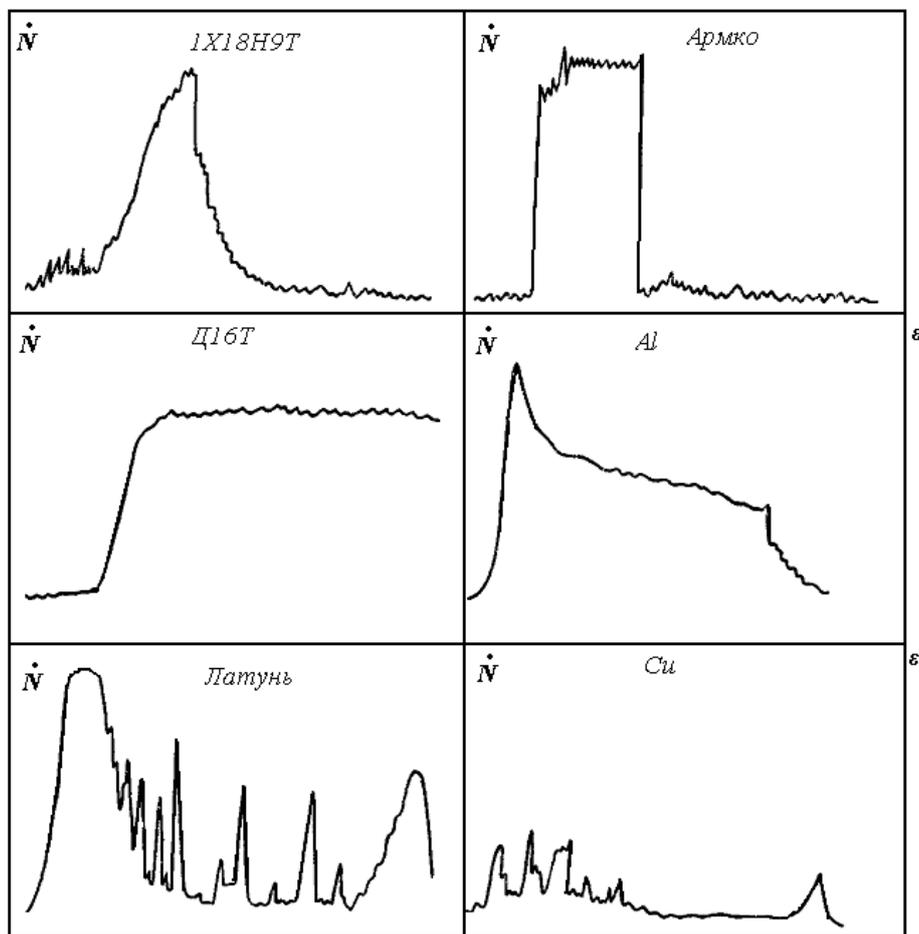


Рис. 25. Зависимость скорости счета АЭ от деформации в разных материалах

Исследования проводились путем испытания композитов с титановой матрицей (Ti-6Al-4V), усиленной различными волокнами: карбида кремния большого диаметра ($\text{SiC} \approx 0,142$ мм в диаметре) и карбида бора, покрытого бором $\approx 0,145$ мм); объем волокон составлял 0,205 и 0,224, соответственно. Для испытаний использовались стандартные плоские отшлифованные образцы, вырезанные в продольном и поперечном направлениях по отношению к расположению волокон. Разрушение образцов при постоянной скорости деформации осуществляли с помощью разрывной машины с гидросервером. При каждом испытании на середину образца ставился один АЭ датчик, измеряли скорость акустического счета как функцию продольного смещения (деформации). После каждого испытания поверхность разрушенного образца изучали с помощью оптического и электронного сканирующего микроскопов.

Параметры разрушения материалов, полученных в результате горячего прессования и входящих в состав двух рассматриваемых композитов, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Механические свойства хрупкой фазы

Металло-матричный композит	Хрупкая фаза	Удлинение, %
В(В,4С)/Ti-6Al-4V	Диборид титана	0,25
	Карбид бора	0,57
	Бор	0,80
SiC/Ti-6Al-4V	Карбид титана	0,28
	Силикат титана	0,66
	Карбид кремния	0,91

Проведен сравнительный анализ их прочностных свойств с целью установления связи состава со скоростью АЭ счета. Как показано на рис. 26 (а), при нагружении образцов, вырезанных в продольном направлении и имеющих состав В(В,4С)/(Ti-6Al-4V), наблюдался значительный рост скорости АЭ счета вблизи нагрузки разрушения диборида титана и пик АЭ вблизи нагрузки разрушения карбида бора. В образцах, вырезанных в поперечном направлении, рис. 26 (б, в), пик АЭ скорости счета наблюдался в районе нагрузки разрушения основного хрупкого компонента – диборида титана в композите В(В,4 С)/(Ti-6Al-4V) и карбида титана в SiC/(Ti-6Al-4V), соответственно. Кроме того, наблюдались также пики вблизи нагрузок разрушения, характерных для других хрупких компонент [9].

Показано, что больший размер хрупкой зоны, полученный в композите В(В,4 С)/(Ti-6Al-4V), соответствует большей площади под кривой АЭ счета на графике зависимости скорости счета от деформации. Окончательное разрушение поперечных образцов в основном заключалось в разрушении пластичной матрицы, и сопровождалось сравнительно малой скоростью АЭ счета.

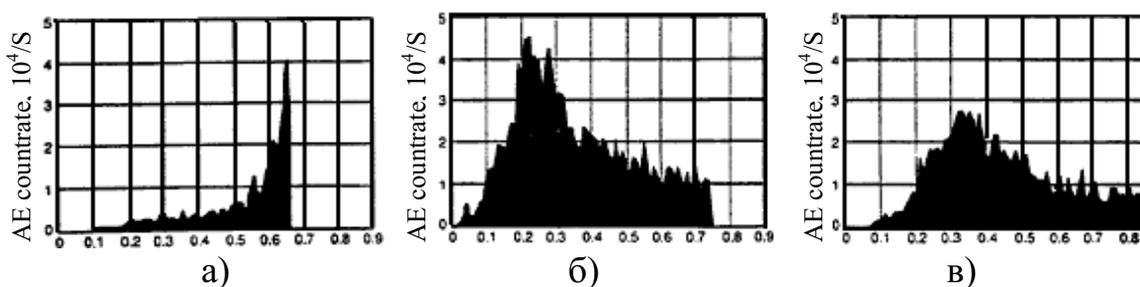


Рис. 26. Зависимость скорости счета от деформации: а – растяжение продольных образцов В(В,4С)/Ti-6Al-4V; б – растяжение поперечных образцов В(В,4С)/Ti-6Al-4V; в – растяжение поперечных образцов SiC/Ti-6Al-4V

2.2.12. Характеристики непрерывной АЭ

Непрерывная АЭ – АЭ, механические сигналы которой представляют непрерывное волновое поле или регистрируются как непрерывный сигнал [6].

Принято считать, что длительность импульсов непрерывной АЭ составляет $4 \cdot 10^{-6}$ с. Непрерывная АЭ характеризуется малой амплитудой и большой частотой [17].

Энергия импульса АЭ дискретного типа достигает значений $10^{10} - 10^{14}$ эВ ($1 \text{ эВ} = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ Дж – энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов), в то время как для непрерывной эмиссии она составляет 10 эВ [20, 24].

В случае непрерывной АЭ смысл некоторых приведенных выше характеристик меняется и могут быть введены дополнительные характеристики процесса. Поскольку теперь теряется смысл понятия амплитуды импульса, суммарная АЭ и скорость счета АЭ определяются числом выбросов случайного процесса за уровень дискриминации, т. е. числом превышений регистрируемой величины (напряжением, током) установленного уровня дискриминации. Соответственно, вместо амплитудного распределения должна использоваться плотность вероятности АЭ, определяющая долю времени наблюдения, в течение которого значение регистрируемой величины находится в интервале значений вблизи u_0 в соответствии с формулой 2.

Возникновение непрерывной АЭ связано с процессами деформирования твердых тел, не сопровождающимися трещинообразованием. Она может быть объяснена флуктуациями потока элементарных событий, вызывающих соответствующие микроскопические явления. Например, в случае пластической деформации таким элементарным событием может являться акт рождения или гибели дислокаций, при диффузионной ползучести – перескок вакансий из одного узла решетки в другой, при электрохимической коррозии – переход иона в раствор и т. д. При этом среднее значение потока событий определяет скорость соответствующего микроскопического явления – пластической деформации, диффузионной ползучести, коррозии, а размер флуктуаций – среднее квадратическое значение непрерывной АЭ. Также, непрерывная АЭ появляется при растрескивании поверхностных пленок и покрытий, фазовых превращениях.

Уровень и среднее квадратическое значение АЭ

В случае непрерывной АЭ, когда сигнал имеет постоянную амплитуду и частоту, то энергия находится как среднее квадратическое значение сигнала (RMS) – это корень квадратный из среднего значения квадрата сигнала:

$$u_{ск} = \sqrt{\overline{u^2(t)}},$$

где $u(t)$ – мгновенное значение напряжения в момент времени t , $\overline{u^2(t)}$ – среднее значение сигнала.

Уровень АЭ – среднеквадратическое значение сигнала АЭ в рассматриваемом интервале времени [6].

Скорость счета и ее смысл для непрерывной АЭ

Для непрерывной АЭ теряется смысл понятия амплитуды импульса, тогда суммарная АЭ и скорость счета АЭ определяются числом выбросов случайного процесса за уровень дискриминации [13].

Амплитудное распределение непрерывной АЭ

Под *амплитудным распределением* понимают функцию распределения $F(u)$ амплитуд случайного процесса из налагающихся импульсов непрерывной АЭ, определяемую через плотность вероятности $\omega(u)$ по формуле:

$$F = \int_0^T \omega(u) du.$$

Измеряется непосредственно плотность вероятности $\omega(u)$ и число выбросов в заданном интервале амплитуд посредством вычитания выбросов на двух уровнях u и $u+\Delta u$.

Два процесса – пластическая деформация и рост трещин различаются по амплитудным распределениям сигналов АЭ. Пластическая деформация происходит в достаточно больших объемах относительно малыми ступенями, обусловленными малыми по масштабу всего объекта единичными деформационными ступенями. При тех же энергетических вложениях трещины продвигаются значительными скачками, что также отражается на параметрах АЭ. При разрушении путем роста трещины акты АЭ имеют большие амплитуды и следуют реже, чем при пластической деформации.

Однако в каждом конкретном случае необходимо устанавливать количественные соотношения, разделяющие параметры АЭ при пластической деформации и росте трещины. Дело в том, что и пластическая деформация сопровождается большими по амплитуде импульсами АЭ, например, при двойниковании, а рост трещины в случае вязкого разрушения сопровождается большой пластической деформацией [14].

На рис. 27 приведено амплитудное распределение АЭ при пластической деформации.

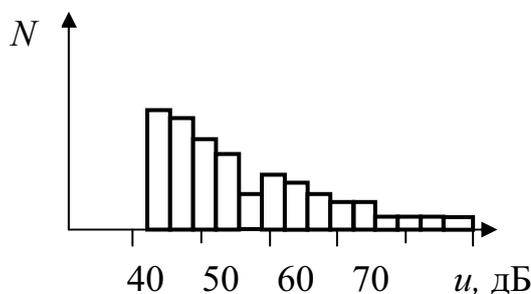


Рис. 27. Амплитудное распределение импульсов АЭ пластической деформации

Амплитудное распределение импульсов АЭ бездефектного материала имеет монотонно спадающий вид, близкий к экспоненциальному. Появление максимумов в амплитудном распределении связывают с наличием макродефектов, сопровождаемых дискретной АЭ.

Резюмируя вышесказанное, сигнал АЭ, его амплитудные, временные, частотные, вероятностные и другие характеристики содержат информацию о дефектах материалов и конструкций. Так, амплитуда импульса сигнала АЭ пропорциональна изменению площади трещины, амплитудное распределение сигналов АЭ характеризует тип разрушения, положение максимума и ширина частотного спектра определяют стадии деформации, интенсивность потока импульсов и функция ее изменения во времени связаны с прочностью конструкции, моменты появления импульсов на элементах пьезоантенны позволяют локализовать место положения дефекта. В табл. 5 приведены информативные параметры АЭ.

Таблица 5

Информативные параметры АЭ

Параметр АЭ	Вид информации
Форма волны	Тонкая структура источника АЭ
Частотный спектр	Природа источника АЭ
Амплитуда	Энергия источника АЭ
Амплитудное распределение	<ul style="list-style-type: none"> • тип присутствующих дефектов; • тип разрушения (хрупкое или вязкое)
Интенсивность	Скорость появления дефектов
Распределение импульсов во времени	Тип появляющегося дефекта (интегрально по образцу)
Относительное время прохождения волны напряжения до разных преобразователей	Местонахождение источника

2.3. Эффект Кайзера. Физические основы

В связи с тем, что АЭ возникает в результате изменения напряженно-деформированного состояния материала, на характеристики АЭ большое влияние оказывает история нагружения конструкции. Кроме того, графики АЭ зависимости напряжения от времени обусловлены свойствами материала и типами деформаций, приводящих к возникновению АЭ. Некоторые материалы практически немедленно реагируют на приложение напряжения, а затем быстро приходят в стабильное состояние. Другим же необходимо некоторое время для того, чтобы «успокоиться» после приложения нагрузки. Такое поведение часто наблюдается в материалах, демонстрирующих упругопластические свойства, например, в композитах, имеющих резиновую матрицу. В некоторых случаях

воздействие постоянной нагрузки приводит к тому, что структура разрушается, так и не вернувшись в стабильное состояние. Примером может служить водородное растрескивание охрупченного материала, сопровождающееся излучением непрерывной эмиссией и приводящее к окончательному разрушению конструкции под воздействием постоянной нагрузки (при этом уровень нагрузки может быть невысоким) [9].

Обычно АЭ испытания проводятся в условиях растущей нагрузки. Начальное приложение нагрузки обычно приводит к возникновению большей эмиссии, чем последующее нагружение. Хорошо известен тот факт, что сильно пластические материалы не генерируют никакой АЭ до тех пор, пока не будет превышен уровень предыдущей приложенной нагрузки. Такое поведение материалов впервые было отмечено Кайзером еще в 1950 году и оказало огромное влияние на развитие методики АЭ контроля. Данеган показал, что материалы, для которых должен выполняться эффект Кайзера, факт появления эмиссии при приложении повторной нагрузки (до достижения предыдущего уровня нагрузки) должен свидетельствовать о наличии дефекта, проявляющегося между первым и вторым приложениями нагрузки. Этот вывод послужил основой для концепции промышленного использования метода АЭ в 70-х годах, когда были впервые проведены АЭ испытания сосудов давления и других промышленных конструкций.

В последующих методических разработках АЭ испытаний большое внимание уделяется наличию эмиссии на повторных нагрузках (меньших, чем ранее достигнутых), а также существованию эмиссии, продолжающейся во время выдержки нагрузки. Логика анализа заключается в том, что такое поведение должно свидетельствовать о наличии существенных дефектов в конструкции, в то время как в отсутствие дефектов при выдержке должна происходить релаксация напряжений и через определенное время выдержки материал должен «замолкать» до тех пор, пока повторное нагружение не превысит предыдущий максимальный уровень нагрузки.

Рис. 28 иллюстрирует данные различных типов поведения материалов. При начальном нагружении (от точки А к точке В) наблюдается эмиссия, которая однако отсутствует при разгрузке (от В к С). При повторном нагружении эмиссия не возникает (горизонтальная линия) до тех пор, пока вновь не достигается точка В. Это и есть проявление эффекта Кайзера. Далее нагрузка растет до D, сопровождаясь при этом генерацией эмиссии, после чего вновь производится разгрузка. Теперь уже благодаря высоким уровням нагрузки в точке F (до достижения предыдущей максимальной нагрузки) начинают проявляться значительные дефекты, имеющиеся в материале. Такое поведение известно как эффект Фелисити, который количественно характеризуется коэффициентом Фелисити (FR) и равен отношению максимальной нагрузки нагружения к нагрузке повторного нагружения, при которой появилась АЭ [9].

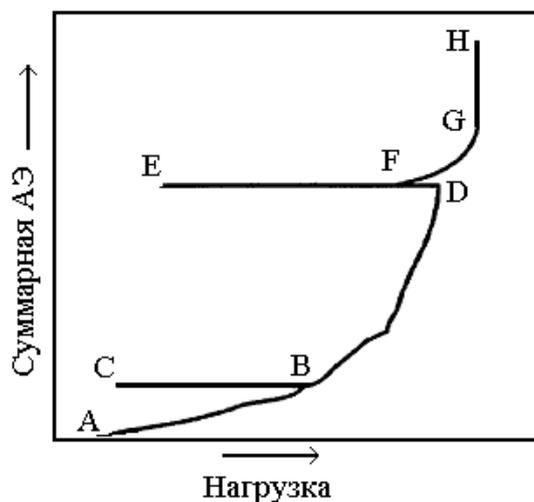


Рис. 28. Иллюстрация эффекта Кайзера, эффекта Фелисити, а также АЭ на выдержке нагрузки

Эффект Кайзера можно рассмотреть как частный случай эффекта Фелисити, коэффициент которого $FR \geq 1$. Факт систематического снижения коэффициента по мере приближения к разрушению был подробно описан для фибропластиков. Кроме того, в соответствии с 11 Статьей Стандарта ASME принято, что если при проведении АЭ контроля сосудов давления или контейнеров Фелисити фактор составляет менее 0,95, необходимо производить отбраковку таких объектов. В соответствии со Статьей 12 Стандарта ASME в некоторых случаях при контроле сосудов давления допускается игнорировать информацию, получаемую при первом нагружении сосуда и учитывать лишь данные от повторного нагружения. Это положение основано на том, что при первом нагружении сигналы могут проявляться от незначительных источников, например, локального пластического течения материала, в то время как при повторном нагружении должны проявляться только серьезные дефекты ($FR < 1$) [9].

На рис. 28 приведена графическая иллюстрация появления эмиссии при выдержке нагрузки (от G к H). Эффект Фелисити и проявление АЭ при выдержке можно объяснить следующим: оба этих эффекта вызваны нестабильной природой значительных дефектов, имеющихся в материале объекта. АЭ при выдержке нагрузки известна, начиная с проведения первых работ по АЭ контролю. Данный эффект был включен в критерий оценки FRP в середине 1970-х годов, а в конце 1980-х АЭ при выдержке нагрузки стала основой при создании методики Монсанто (Monsanto), которая представляет собой эффективную процедуру АЭ контроля железнодорожных платформ и цистерн. Эта методика является очень удобным и эффективным способом анализа данных, поскольку уровень фоновых шумов в период выдержки нагрузки намного ниже, чем в период роста нагрузки [9].

Для успешного проведения АЭ контроля необходимо уделять должное внимание графику нагружения. Обычно, в процедурах АЭ контроля определяются уровни прилагаемых нагрузок (в соответствии с рабочими или расчетными нагрузками), а также минимальную и максимальную скорости нагружения. В соответствии с методикой проведения АЭ контроля сосуда и резервуары из фибропластика должны сначала выдерживаться при пониженных нагрузках. Процедура АЭ тестирования может оказаться нарушенной, если вдруг по небрежности персонала перед проведением нагружения сосуда последний будет подгружен. В связи с этим для успешного контроля необходимо правильно координировать работу всех подразделений, занимающихся обеспечением безопасности конструкций.

Эффект Кайзера наблюдается для большинства материалов. На рис. 29 показано проявление этого эффекта при нагружении образца из стали 45.

Рост АЭ при повторном нагружении начинается несколько раньше, а восстановление прежнего уровня происходит несколько позже достижения нагрузкой ее максимального значения при первом нагружении.

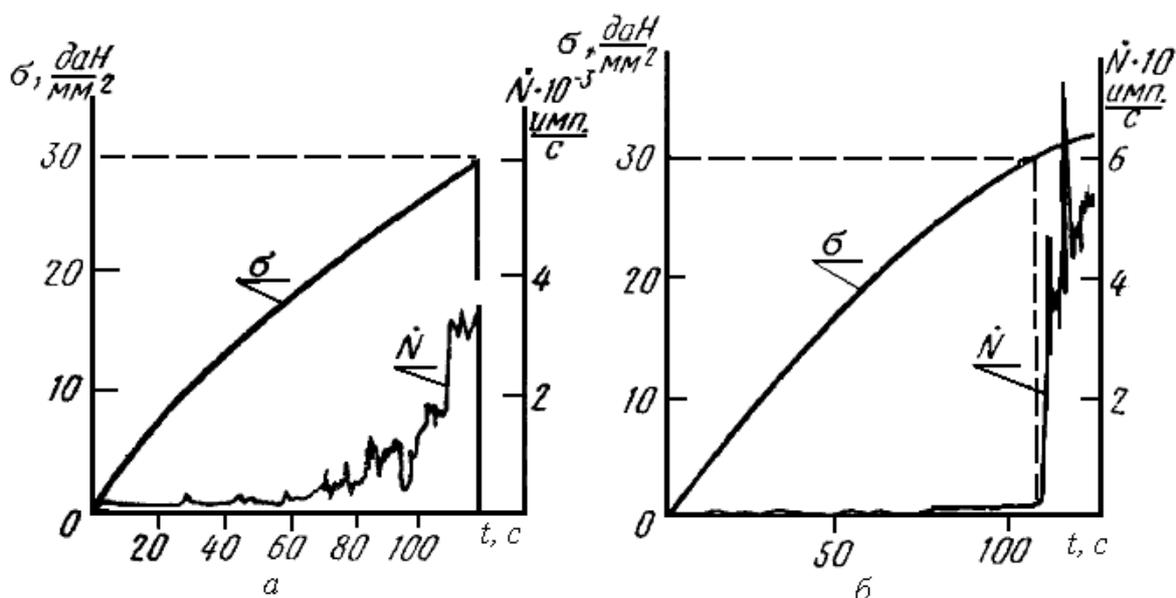


Рис. 29. Эффект Кайзера при растяжении образца из стали 45:
а – первое нагружение, б – повторное нагружение ($\frac{даН}{мм^2} = 10 \frac{Н}{мм^2}$)

2.3.1. Эффект Кайзера в металлах и сплавах, в аморфных телах и в композиционных материалах

Для пластмасс характерно отсутствие эффекта Кайзера. При повторных нагружениях каждый раз возникает эмиссия, активность которой несколько уменьшается при переходе от цикла к циклу.

Для неметаллических материалов существуют особенности в поведении АЭ. Для стеклопластиков, например, установлен эффект *послезвучания*, т. е. при неизменной нагрузке и при разгрузке АЭ продолжается. Отсутствует эффект Кайзера: при повторном нагружении каждый раз возникают сигналы АЭ, активность которой несколько уменьшается при повторных циклах [25].

2.3.2. Условия выполнения эффекта Кайзера

Эффект Кайзера частично или полностью устраняется термообработкой после первого нагружения. Повышение температуры отжига приводит ко все более полному восстановлению эмиссионных свойств материала. После полной рекристаллизации кривая скорости счета имеет при прочих равных условиях тот же вид, что и при первом нагружении.

Эффект Кайзера не соблюдается и при возникновении в образце макротрещины, так как в этом случае средняя по объему образца деформация не характеризует деформацию отдельных его областей. Хотя общая деформация образца и не превышает ранее достигнутую, из-за наличия концентраторов напряжений и активации трещин при повторном нагружении вблизи вершин трещин деформация может превзойти ранее достигнутую, что приведет к появлению АЭ.

Для ряда материалов было отмечено, что при снятии нагрузки возникала АЭ, хотя число зарегистрированных импульсов было во много раз меньше, чем при нагружении. АЭ возникала при последующих циклах нагрузки–разгрузки. Соответственно, эффект Кайзера в полном объеме не выполнялся. Это объясняется тем, что при разгрузке материала АЭ связана с эффектом Баушингера, который заключается в том, что сопротивление деформации уменьшается в том случае, если материал был предварительно нагружен в противоположном направлении [17].

2.3.3. Использование эффекта Кайзера при решении практических задач

Эффект Кайзера позволяет определить наличие посторонних механических шумов, но он вносит существенные трудности при практическом применении АЭ для исследования объекта, история нагружения которого заранее неизвестна. Трудности возникают и при использовании АЭ в случае циклического нагружения.

Наиболее важное практическое применение рассмотренных зависимостей для испытаний материалов заключается в возможности определить уровень действующих напряжений или деформаций путем измерения только скорости счета, что может дать существенные преимущества с учетом значительных расстояний распространения волн напря-

жений. При монотонном повышении $\dot{N}(\varepsilon)$ (кривая 2 на рис. 22) имеется однозначная зависимость скорости счета АЭ от деформации, а с учетом известной кривой упрочнения – и от напряжений. Таким образом, измерив при нагружении только скорость счета, можно оценить как деформацию, так и напряжение образца, используя как графические способы, так и аналитические – при этом для кривых $\dot{N}(\varepsilon)$ и $\sigma(\varepsilon)$ подбирают аппроксимирующие зависимости.

При устойчивом совпадении максимума интенсивности с определенным уровнем деформаций или напряжений (кривые типа 3 рис. 22) измерение скорости счета позволяет определять момент достижения указанного уровня деформаций (напряжений). Для ряда конструктивных материалов это дает возможность измерить предел текучести [7].

2.4. Эффект Баушингера

Пластическая деформация, вызванная уменьшением напряжений в образце до нуля и повторным приложением такого же напряжения в обратном направлении отличается от деформации, полученной в результате простого разгрузки и повторного нагружения образца до первоначального напряжения. Когда знак нагрузки на образце меняется, деформация металла в обратном направлении осуществляется легче, чем в первоначальном направлении. Этот эффект при пластической деформации известен как *эффект Баушингера* [9].

Сравнение кривых зависимости АЭ от деформации в случае повторного нагружения образцов в том же направлении и с переменной знака показывает их существенную разницу (рис. 30).

Если образец нагружать в одном направлении, то кривая имеет вид, приведенный на рис. 30, а. При первом проходе интенсивность АЭ изображена кривой 1. При сбросе нагрузки АЭ резко прекращается. При повторном нагружении вначале АЭ отсутствует (эффект Кайзера), а при достижении прежней деформации (и прежней нагрузки) эмиссия снова резко возрастает до прежнего уровня (кривая 2).

При нагружении образца с переменной знака деформации кривая имеет вид, приведенный на рис. 30, б. Первое нагружение дает такую же кривую, как и в первом случае (кривая 1). При повторном нагружении с переменной знака деформации вначале АЭ отсутствует (эффект Кайзера). Однако при достижении прежней деформации появляется АЭ, интенсивность которой возрастает, достигая при деформации, по абсолютной величине несколько большей первоначальной, уровня, который она имела бы в случае однозначного нагружения, и далее следуя общему для данного материала закону изменения интенсивности АЭ (кривая 2).

2.5. Распространение АЭ сигналов

При излучении несимметричного источника, как это бывает в подавляющем большинстве случаев, наблюдаются продольные и поперечные волны (в твердом теле). Если источник находится на поверхности, то регистрируются еще и рэлеевские (поверхностные волны). Источник звука в области раздела двух твердых сред возбуждает волны Лява и Стоунли. Источник, находящийся в пластине, возбуждает волны Лэмба (нормальные волны).

Форма акустических сигналов существенно изменяется при распространении их по поверхности или в стенке объекта. Наиболее простой случай – возбуждение точечным источником поверхности твердого тела. Этот случай называется задачей Лэмба (по имени исследователя, впервые сформулировавшего и решившего ее). Применительно к методу АЭ данная задача интересна тем, что она описывает работу источника акустического излучения, который используется весьма часто для имитации сигналов АЭ, а также для калибровки акустических каналов и преобразователей. Имеется в виду источник Су–Нильсена.

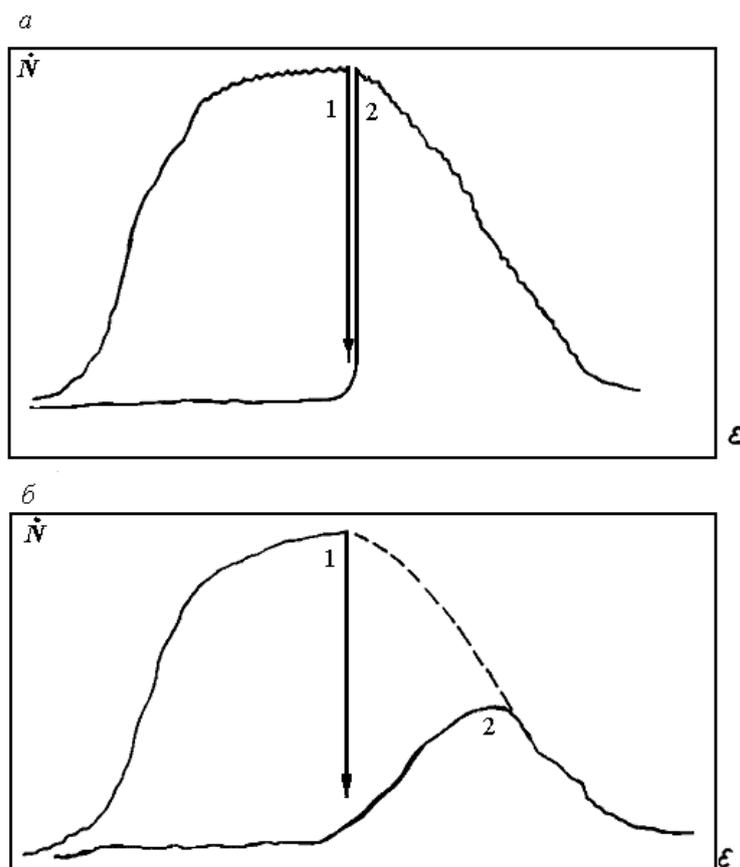


Рис. 30. Эффект Баушингера при изгибе образцов из стали 45

2.5.1. Основные типы волн в твердых телах

Акустическими волнами называют распространяющиеся в упругой среде механические колебания частичек среды [26].

При движении волны частицы не перемещаются, а совершают колебания около своих положений равновесия.

Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны λ .

Длина волны связана со скоростью распространения c и частотой f (или периодом T) соотношением:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f},$$

где λ – длина волны, c – скорость распространения, T – период, f – частота.

Например, для воздуха $c = 330$ м/с:

- $f = 20$ Гц $\rightarrow \lambda = 16,5$ м;
- $f = 20000$ Гц $\rightarrow \lambda = 1,65$ см;
- $f = 20000000$ Гц $\rightarrow \lambda = 0,165$ мм.

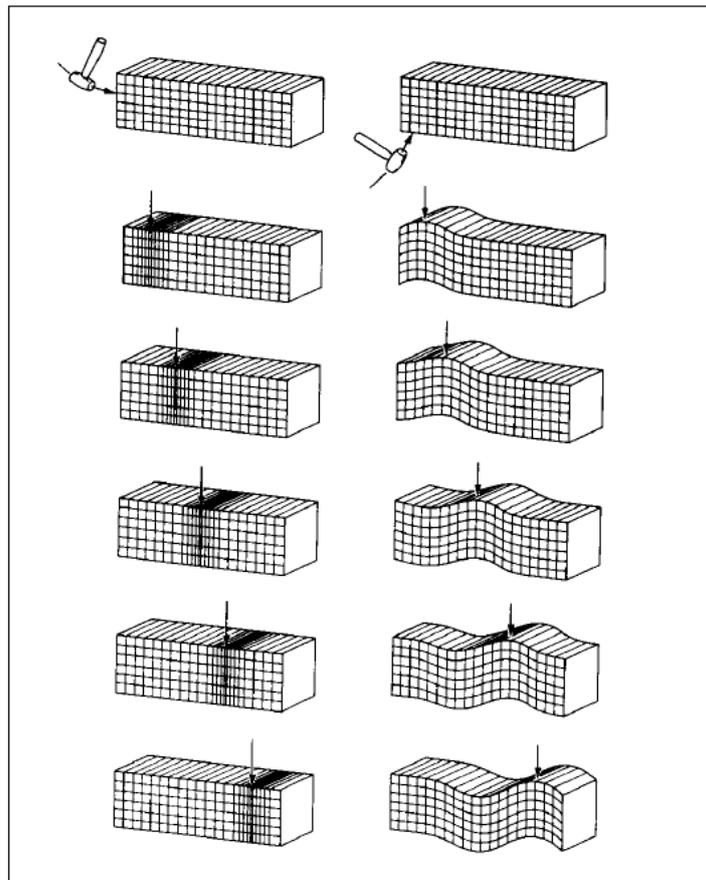


Рис. 31. Распространение продольной и поперечной волн

В зависимости от направления колебаний частиц по отношению к направлению распространения волны различают: продольные, поперечные, поверхностные и нормальные волны (волны в пластинах).

В *продольной волне* частицы колеблются вдоль направления распространения волны. Колебания могут распространяться в твердой, жидкой и газообразной среде.

Если направление колебаний частиц среды перпендикулярно направлению распространения, то такие колебания называются *поперечными (или сдвиговыми)*. Они могут распространяться только в среде, которая обладает упругостью формы.

Продольные и поперечные волны могут распространяться в чистом виде только в неограниченной среде (∞ или $\infty/2$) или в теле, размеры которого в направлениях, не совпадающих с направлением распространения волны, значительно превышают длину последней. Схематично продольные и поперечные волны представлены на рис. 31.

Любые ограничения среды приводят к появлению новых типов волн.

На свободной поверхности могут распространяться *поверхностные волны*. В поверхностной волне частицы одновременно совершают колебания в направлении распространения и перпендикулярно ему, описывая эллиптические или более сложные траектории. Амплитуда колебания по мере удаления от поверхности вглубь убывает по экспоненте, поэтому волна локализована в тонком поверхностном слое толщиной в одну-полторы длины волны и следует изгибам поверхности (рис. 32).

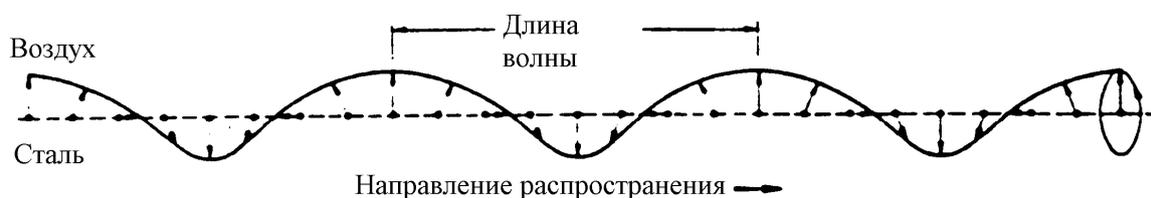


Рис. 32. Распространение поверхностных волн

Скорости распространения продольной c_l , поперечной c_t и поверхностной c_s волн определяются упругими свойствами материала (модулями упругости и сдвига, коэффициентами Пуассона) и его плотностью и находятся в соотношении между собой:

$$c_l > c_t > c_s \quad c_t \approx 0,55 \cdot c_l \quad c_s \approx 0,93 \cdot c_t.$$

В кристаллах, обладающих пьезоэффектом, существуют чисто *сдвиговые волны*, которые называются *волнами Гуляева–Блюштейна*.

Эти волны распространяются со скоростью $c \approx c_t$, спадают с глубиной на расстоянии

$$l \approx K_{эм}^{-2} \cdot k_t,$$

где k_t – волновое число t – волны, $K_{эм}$ – коэффициент электромеханической связи, характеризующий «силу» пьезоэффекта.

Обычно $l \approx 50 - 100 \cdot \lambda_t$. Волны такого же типа могут существовать и в пьезоэлектрических средах при приложении к ним внешних полей – электрического (за счет наведенного пьезоэффекта) и магнитного (за счет действия силы Лоренца на электроны в металлах). При этом имеется возможность управлять глубиной локализации таких волн с помощью изменения напряженности прикладываемых полей.

К важной разновидности поверхностных волн относятся *волны Лява*, возникающие в слоистой системе, состоящей из упругого полупространства и слоя, скорость поперечных волн в котором c_{t1} меньше их скорости в полупространстве c_{t2} , как показано на рис. 33 [27, 28].

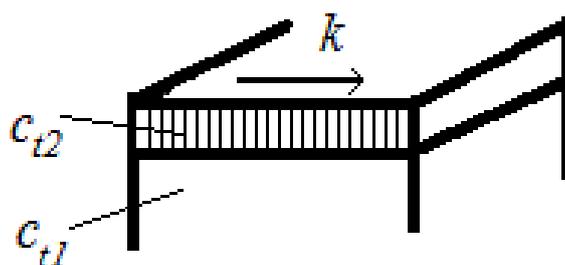


Рис. 33. Волны Лява

При условии $c_{t1} < c_{t2}$ в такой системе могут существовать чисто сдвиговые поверхностные волны, фазовая скорость которых больше скорости c_{t1} , но меньше c_{t2} . Вообще, волны Лява не являются строго поверхностной волной, т. к. для их существования требуется слоистая среда. Волны Лява часто наблюдаются при землетрясениях, поскольку земная кора имеет слоистую структуру.

Кроме волн, существующих на границе твердого тела с вакуумом, существуют волны на границе двух сред. К ним относятся волны с вертикальной поляризацией, распространяющейся вдоль границы твердого тела с жидкостью или *волны Стоунли*. Эти волны распространяются со скоростью, меньшей скорости звука в жидкости, спадая экспоненциально при удалении от общей границы. Волны Стоунли могут существовать и на границе двух твердых сред, если их плотности и упругие постоянные удовлетворяют определенным соотношениям.

Сдвиговые поверхностные волны могут распространяться вдоль периодически неровной границы твердого тела, как показано на рис. 34.

Выбором параметров неоднородностей a , l , h можно замедлять поверхностные волны, т. е. управлять распространением акустической волны.

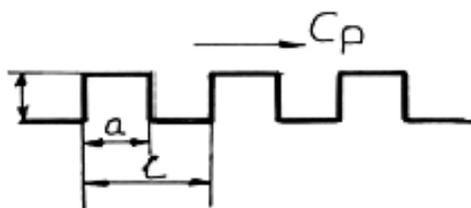


Рис. 34. Сдвиговые поверхностные волны

Можно также сказать о *линейных волнах*, которые распространяются вдоль ребер упругих клиньев, в связи с чем такие волны называют еще *клиновыми*, что видно из рис. 35.

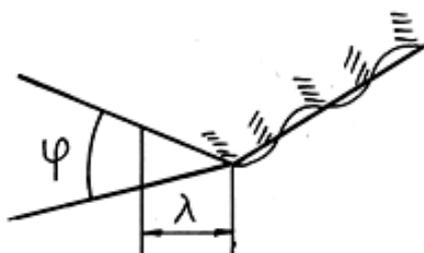


Рис. 35. Клиновые волны

Амплитуда таких волн быстро падает при удалении от ребра, так что практически вся энергия волны оказывается сосредоточенной около острия клина. Скорость клиновых волн уменьшается с уменьшением угла раскрытия клина φ и может оказаться на порядок ниже c_t при $\varphi \approx (5-10)^\circ$.

В пластине могут существовать другие волны, при которых колебания совершаются в направлении, перпендикулярном этой плоскости. Такие волны называются *нормальными поперечными волнами*. При отражении от границ пластины такие волны не трансформируются. Нормальные волны распространяются в пластине, как в волноводе, на большие расстояния [27].

В круглых стержнях могут существовать симметричные и асимметричные волны, сходные с волнами в пластинах (рис. 36). Кроме того, в круглом стержне могут существовать *крутильные волны*, заключающиеся в повороте некоторого сечения стержня вокруг его оси.

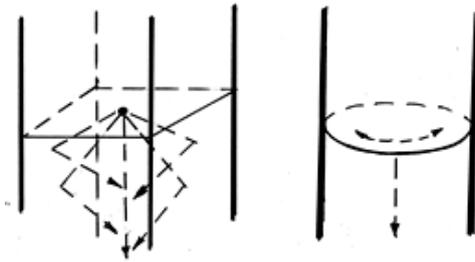


Рис. 36. Волны в стержнях

Стержень, подобно пластине, служит волноводом, и упругие волны могут выявлять в нем как поперечно, так и продольно ориентированные дефекты.

Акустические волны различают также по форме фронта волны или волновой поверхности.

Фронт волны – это геометрическое место точек среды, в которых в рассматриваемый момент времени фаза волны имеет одно и то же значение.

Если в среде распространяется кратковременное возмущение (импульс), то *фронтом волны* называется граница между возмущенной и невозмущенной областями среды.

Фронт или волновая поверхность непрерывно перемещается в среде и при этом деформируется. В неограниченной изотропной среде распространение упругих волн имеет пространственный характер. В зависимости от формы фронта, волны могут быть *плоскими, сферическими и цилиндрическими* (рис. 37).

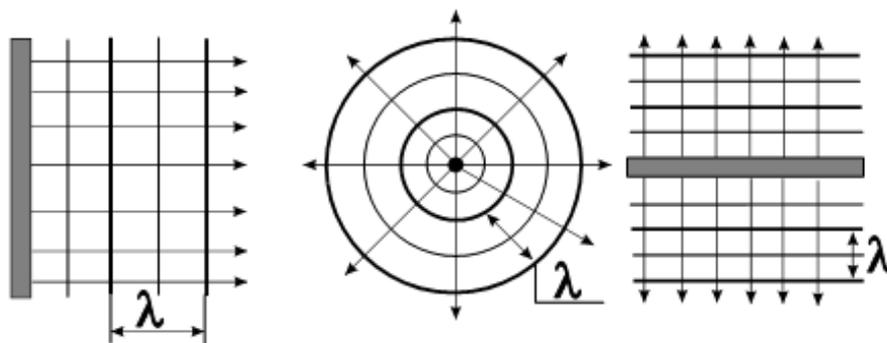


Рис. 37. Плоские, сферические, цилиндрические волны

Плоские волны возбуждаются пластинкой, если ее поперечные размеры намного превосходят длину волны. Волновые поверхности плоской волны имеют вид параллельных плоскостей.

Сферические волны возбуждаются точечным источником или колеблющимся шаровым телом, размеры которого малы. Волновые поверхности сферической волны имеют вид концентрических сфер.

Цилиндрические волны возбуждаются цилиндрическим телом (стержень, цилиндр и т. д.), длина которого значительно больше его поперечных размеров. Волновые поверхности имеют вид концентрических цилиндров. На очень больших расстояниях сферические и цилиндрические волны переходят в плоские.

В зависимости от частот различают следующие волны:

- 1) инфразвуковые ($f =$ до 16–20 Гц).
- 2) звуковые ($f = 16–20000$ Гц).
- 3) ультразвуковые ($f = 20$ кГц – 1000 МГц).
- 4) гиперзвуковые ($f > 1000$ МГц).

2.5.2. Форма волны. Дисперсия и нелинейность волн. Групповая и фазовая скорость волн

В процессе распространения волны ее форма претерпевает изменения. Характер изменений существенно зависит от первоначальной формы волны. Лишь бесконечная синусоидальная (гармоническая) волна (за исключением волн очень большой интенсивности) сохраняет свою форму волны неизменной при распространении, если при этом она не испытывает заметного поглощения. Но всякую волну (любой формы) можно представить как сумму бесконечных гармонических волн разных частот (разложить в спектр). Например, одиночный импульс можно представить как бесконечную сумму наложенных друг на друга гармонических волн. Если среда, в которой распространяется волна, линейна, т. е. ее свойства не меняются под действием возмущений, создаваемых волной, то все эффекты, вызываемые негармоническими волнами, могут быть определены как сумма эффектов, создаваемых в отдельности каждой из гармонических составляющих (принцип суперпозиции).

В реальных средах нередко скорости распространения гармонических волн зависят от частоты волны (дисперсия волны). Поэтому негармоническая волна, состоящая из совокупности гармонических волн различных частот, в процессе распространения меняет свою форму вследствие того, что соотношение между фазами составляющих ее гармонических волн меняется. Искажение формы волны может происходить и при дифракции и рассеянии негармонической волны, так как оба эти процесса зависят от длины волны, и поэтому для гармонической волны разной длины дифракция и рассеяние будут происходить по-разному. При наличии дисперсии изменение формы негармонической волны может происходить также в результате ее преломления. Иногда может искажаться и форма гармонической волны. Это происходит в тех случаях, когда амплитуда распространяющейся волны достаточно велика, так что уже нельзя пренебрегать изменением свойств среды под ее воздей-

ствием, т. е. когда сказываются нелинейные свойства среды. В нелинейной среде существенно изменяются и другие законы распространения волн, в частности законы отражения и преломления (рис. 38).

Фазовая скорость – скорость перемещения фазы гармонической волны (ее еще называют монохроматической) [28]. Выражается через частоту f и длину волны λ или через круговую частоту $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ и волновое число $k = 2 \cdot \pi / \lambda$ формулой:

$$c_p = f / \lambda = \omega / k.$$

Для применимости понятия фазовой скорости достаточно, чтобы гармонические волны распространялись без изменения формы. Это условие выполняется в линейной среде, в которой свойства не меняются под воздействием возмущений, создаваемых волной.

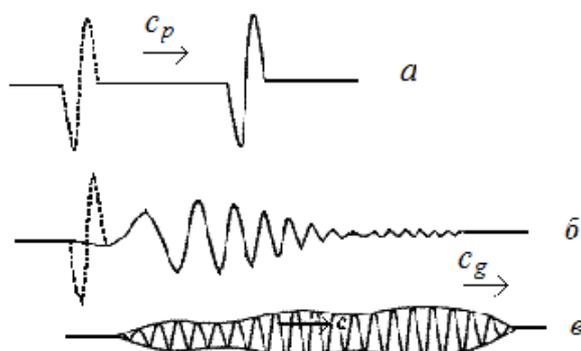


Рис. 38: а – волна, распространяющаяся без изменения формы; б – волна, меняющая свою форму при распространении (пунктир – профиль волны в начальный момент, сплошная линия – форма волны в некоторый последующий момент времени); в – распространение квазимонохроматической волны; с – фазовая скорость; c_g – групповая скорость (скорость огибающей)

Введенная выше скорость волны называется фазовой скоростью – это скорость, с которой перемещается какая-нибудь определенная фаза бесконечной синусоидальной волны. Фазовая скорость, в частности, входит в формулу закона преломления. Однако на практике имею дело с волнами не в виде бесконечных синусоид, называемых также монохроматическими волнами, для которых только и имеет смысл понятие фазовой скорости, а с ограниченными волнами. Любая ограниченная волна может быть представлена в виде наложения бесконечно большого числа монохроматических волн различных частот. Если фазовые скорости всех частот одинаковы, то с этой же скоростью распространяется и вся совокупность или группа волн. Если же эти скорости неодинаковы, т. е.

имеет место дисперсия (явление, когда фазовая скорость зависит от частоты колебаний), то вопрос о скорости распространения ограниченной волны усложняется. Если ограниченная волна состоит из волн, частоты которых мало отличаются друг от друга, то эта волна, или как ее часто называют волновой пакет, распространяется с определенной скоростью, называемой *групповой скоростью*, $c_g = c_p - \lambda \cdot dc_p / d\lambda$. Групповая скорость отражает скорость переноса энергии в волне, т. е. скорость передачи взаимодействия или скорость распространения импульса.

Таким образом, фазовая скорость волны характеризует скорость смещения точки волны, имеющей фиксированное значение фазы, а групповая скорость отражает скорость переноса энергии в волне, т. е. скорость передачи взаимодействия.

Понятие групповой скорости позволяет также выяснить основные черты изменения широкополосного сигнала при его распространении в диспергирующей среде. В этом случае огибающая сигнала не сохраняется: группы квазимонохроматических волн, соответствующие различным узким участкам суммарного широкого спектра, распространяются каждая со своей групповой скоростью, и сигнал «расползается», образуя «синусоиду», вдоль которой меняются не только амплитуды и фазы, но и несущие частоты, причем последние следуют в порядке соответствующих групповых скоростей и голове сигнала бежит квазимонохроматическая волна с наибольшей групповой скоростью (которая может и не соответствовать наибольшей фазовой скорости).

В поглощающих средах применимость понятия групповой скорости ограничена тем, что спектр исходной волны изменяется по мере ее распространения, так как поглощение волн зависит от частоты. Пользоваться понятием групповой скорости для описания поведения волн целесообразно, только пока изменение спектра остается малым. То же относится и к нелинейным средам, в которых спектр волн также меняется при распространении.

2.5.3. Затухание и поглощение упругих волн

Ослабление амплитуды плоской гармонической волны в результате взаимодействия ее со средой происходит по закону $e^{-\delta x}$, где x – путь в среде, а δ – коэффициент затухания. Коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения δ_n и рассеяния δ_p : $\delta = \delta_n + \delta_p$. При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остается звуковой, но уходит из направленно распространяющейся волны [28].

Поглощение обусловлено вязкостью, упругим гистерезисом (т. е. различной упругой зависимостью при рассеянии и сжатии) и теплопро-

водностью. Последний механизм поглощения связан с тем, что процесс распространения акустической волны считается адиабатическим. Расширение или сжатие элементарного объема сопровождается изменением температуры. Коэффициент поглощения в твердых телах пропорционален f (стекло, биологические ткани, металлы, некоторые пластмассы) или f^2 (резина, многие пластмассы).

Рассеяние происходит из-за наличия в среде неоднородностей, размеры которых соизмеримы с длиной волны. Различие в волновых сопротивлениях приводит к отражению волн.

Величина, обратная коэффициенту затухания, показывает, на каком пути амплитуда волны уменьшается в $e = 2,718$ раз, где e – число Непера, поэтому размерность коэффициента затухания m^{-1} или непер/м (Нп/м). Часто коэффициент затухания выражают числом N отрицательных децибел, на которое уменьшается амплитуда волны на единичном участке пути x , равному 1 м; $N = 20 \cdot \lg e^{-1\delta} = -8,686$ дБ/м, поэтому $1 m^{-1} = 1$ Нп/м = 8,686 дБ/м.

Бел – логарифмическая единица, соответствующая (при частоте 1000 Гц) десятикратному изменению силы звука. Логарифмическая единица, соответствующая 1/10 бела, называется децибелом. Одному децибелу соответствует изменение звукового давления в 1,12 раза.

Децибел – логарифмическая единица измерения отношений токов, напряжений, смещений, энергий, мощностей и т. д. Для сравнения интенсивностей J и J_0 или амплитуд A и A_0 двух акустических волн используют отношение:

$$N = 10 \cdot \lg(J/J_0) = 20 \cdot \lg(A/A_0).$$

При использовании номограммы перевода относительных величин в децибелы (рис. 39) следует сопоставлять значения на шкалах с одинаковым номером. Например, если $N = -6$ дБ (1-я верхняя шкала), то $A/A_0 = 0,5$ (верхняя нижняя шкала); если $A/A_0 = 500$ (3-я нижняя шкала), то $N = 54$ (3-я верхняя шкала) [26].



Рис. 39. Номограмма перевода относительных единиц в децибелы

Удобство введения единицы заключается в её аддитивности, т. е. возможности суммирования. Если известно затухание в дБ на каждом из двух отрезков пути волны, то результирующее затухание после прохождения обеих отрезков в дБ выразится суммой составляющих затухания. Таким образом, если за 0,01 с амплитуда убывает на 10 дБ, то за 0,02 с она уменьшится на 20 дБ, за 0,03 – на 30 дБ и т. д.

2.5.4. Волны Лэмба

При распространении волны в плоских телах с постоянной толщиной (листах, тонких пластинках, проволоке) могут возникать *нормальные волны или волны Лэмба*. При этом частицы совершают колебания по таким же траекториям, как в поверхностной волне, но на всю толщину листа, пластины оболочки. Это волны, бегущие вдоль границ среды и стоящие в перпендикулярном направлении (рис. 40).

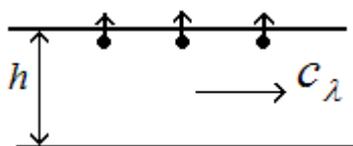


Рис. 40. Волны Лэмба

Обычно возникают и распространяются независимо две нормальные волны: *симметричная* (волна сжатия или растяжения) и *асимметричная* (волна изгиба) (рис. 41).

Фазовая скорость нормальных волн зависит от частоты колебаний (длины волны λ) и толщины слоя h , т. е. фазовая скорость нормальной волны имеет дисперсию (изменяется). В точках, где $h = n \frac{\lambda}{2}$, скорость $c_n \rightarrow \infty$, n – целое число. Это означает, что вся поверхность колеблется одновременно. При $h \rightarrow \infty$ $c_n \rightarrow c_2$, т. е. при увеличении толщины слоя c_n стремится к скорости обычной волны [27].

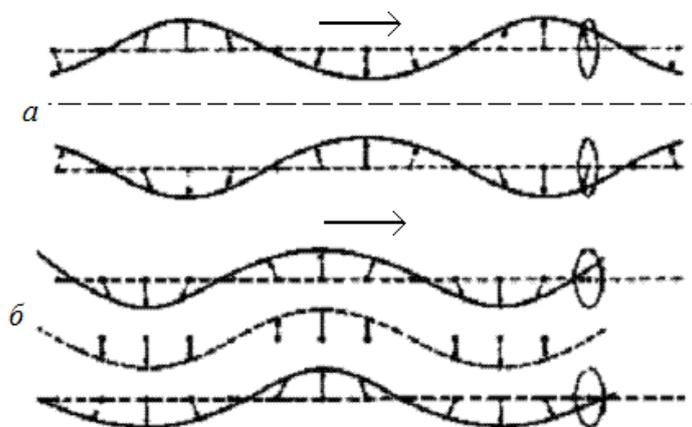


Рис. 41. Волны в пластинах: а – симметричная; б – асимметричная

2.5.5. Волны Рэлея

В ограниченных твердых телах, кроме объемных волн (продольной и поперечной), существуют другие типы волн. Так вдоль свободной поверхности ненагруженного твердого тела могут распространяться *поверхностные волны* [26].

Волна, бегущая вдоль границы твердого тела и состоящая из линейной комбинации продольной и поперечной волн (рис. 42), называется *волной Рэлея*. Для металлов скорость распространения такой волны $c_s \approx 0,93 \cdot c_t$. Она способна распространяться на большое расстояние вдоль поверхности твердого тела, незначительно проникая внутрь тела. На расстоянии длины волны от поверхности интенсивность составляет приблизительно 5 %. При распространении поверхностной волны частицы двигаются, вращаясь по эллипсам, большая ось которых перпендикулярна границе. Вытянутость эллипса с глубиной увеличивается. Такие волны хорошо распространяются вдоль искривленных поверхностей, хотя на вогнутых участках они испытывают значительное дополнительное затухание вследствие излучения энергии вглубь изделия. Поверхностные волны успешно используются для выявления дефектов вблизи поверхности изделия.

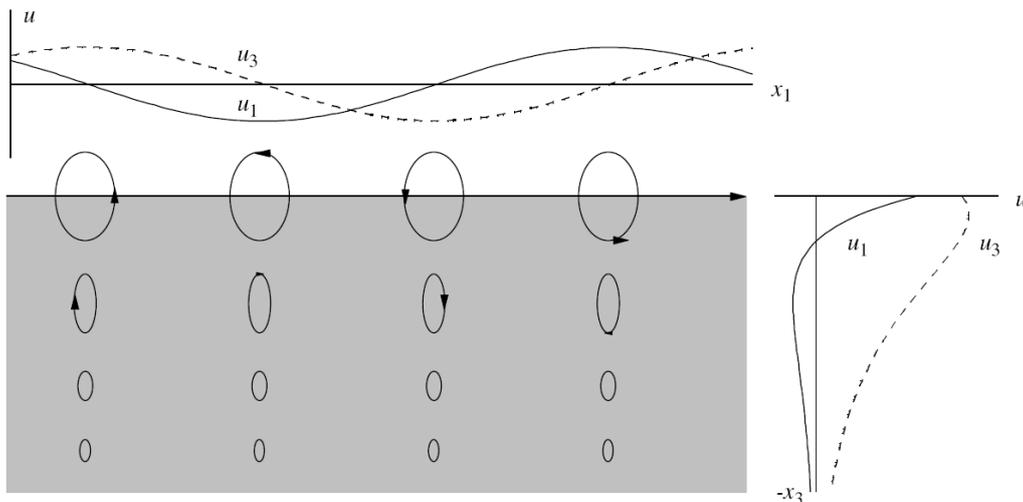


Рис. 42. Волны Рэлея, вертикальное и горизонтальное распространение

На рис. 43 изображена зависимость скорости разных видов волн в зависимости от свойств материала.

Целый ряд поверхностных волн обусловлен чисто геометрическими факторами. Так на выпуклых цилиндрических поверхностях твердых тел, кроме волн рэлеевского типа, могут существовать и нерэлеевские волны, у которых продольная компонента, как и у рэлеевской волны, спадает по экспоненциальному закону, а сдвиговая часть убывает с глубиной, осциллируя. Такие волны получили название *волн смешанного типа*.

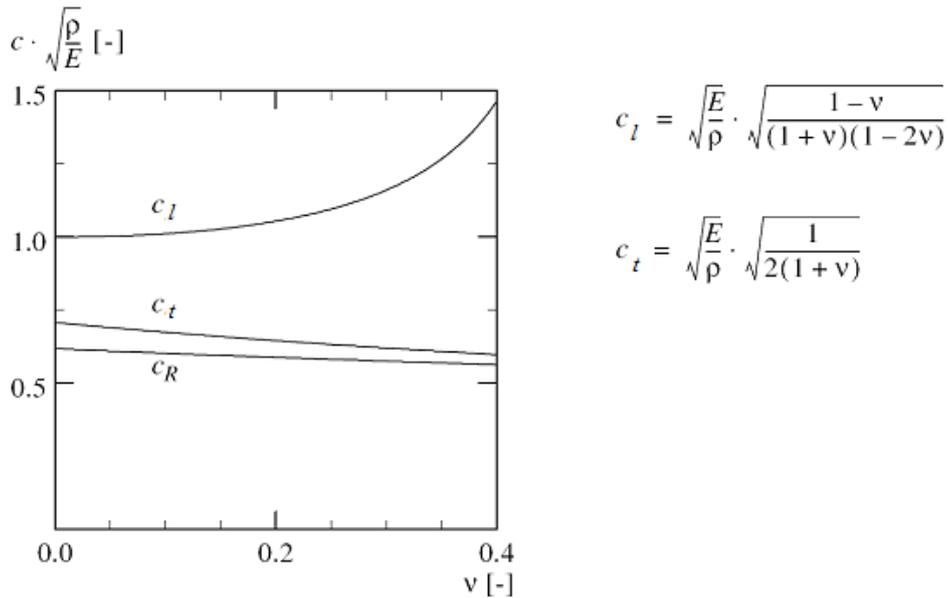


Рис. 43. Скорость поперечной, продольной и рэлеевской волн в зависимости от коэффициента Пуассона, модуля Юнга и плотности материала

2.5.6. Головные волны

Волна, представляющая собой линейную комбинацию поверхностной и объемной волн, называется *вытекающей, поверхностно-продольной, ползучей* (рис. 44).

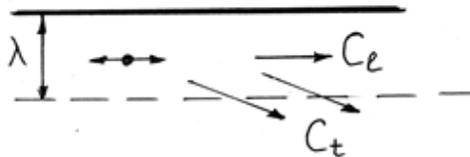


Рис. 44. Поверхностно-продольная волна

В такой комбинации поверхностная компонента непрерывно трансформируется в объемную и уходит от поверхности. Сама волна затухает довольно быстро вдоль поверхности тела, но порожденные ею объемные волны, распространяются на значительные расстояния и могут использоваться для контроля. Совокупность поверхностно-продольной и порождаемой ею продольной (объемной) волн в дефектоскопии называют *головной волной*.

В процессе развития трещины, генерируемая выделяемой энергией волна напряжения распространяется к граничным поверхностям материала в виде сферического волнового фронта, который взаимодействует с границами зерен, локальными расслоениями и пр., а также, отражаясь от поверхности, создает сложное волновое поле: волны сжатия и сдвига и т. п. Продольные волны напряжений менее интенсивны, чем сдвиговые, поверхностные волны быстро затухают при наличии преград и других поверхностных помех.

ГЛАВА 3 ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АЭ КОНТРОЛЯ

Средства АЭ контроля – это технические средства, включающие преобразователи АЭ, соединительные кабели, волноводы, контактные среды, аппаратуру [29].

Средства АЭ контроля по сложности разделяются на приборы и системы. Приборы АЭ подразделяются на:

- 1) одноканальные;
- 2) двухканальные;
- 3) четырехканальные;
- 4) многоканальные.

Системы АЭ – многоканальные сложные устройства, представляющие собой совокупность аппаратных средств, вычислительных устройств и специализированного программного обеспечения и включающие как специализированные процессоры, так и универсальные ЭВМ.

По месту использования аппаратных средств они подразделяются на лабораторные, полевые. По способу использования – на стационарные, мобильные (установленные на технических средствах), переносные. По области применения – на универсальные, специализированные.

По классу аппаратные средства АЭ контроля разделяются на четыре класса, в соответствии с объемом получаемой при АЭ контроле информации.

Аппаратура АЭ представляет собой акустико-электронные устройства, которые используются при выполнении АЭ НК процесса образования, наличия и процесса развития дефектов в контролируемом объекте. Метод АЭ относится к акустическому виду контроля и является пассивным методом. Это определяет структуру аппаратуры, основными задачами которой являются прием и идентификация сигналов АЭ, их усиление, обработка, выделение и определение значений параметров сигналов, регистрация и предоставление информации. В состав аппаратуры входят следующие блоки:

- преобразователи АЭ;
- предварительные и основные усилители;
- средства идентификации и обработки сигналов, включая пороговые устройства, устройства выделения и измерений параметров сигналов АЭ, устройства регистрации и представления информации;
- средства измерения вспомогательных параметров;
- контроллеры, ЭВМ.

На рис. 45 приведена функциональная схема АЭ системы, которая состоит из 16 каналов. Каждый канал содержит последовательно соединенные преобразователь, предварительный усилитель, фильтр, основной усилитель, блок селекции. Механические колебания преобразуются в электрические сигналы в преобразователе 1. Затем сигнал усиливается предварительным усилителем 2 и проходит на программно-управляемые фильтры 3, которые ограничивают полосу частот сигналов АЭ в соответствии с кодом, поступающим из блока управления 6, связанного с компьютером. Компьютер осуществляет полный контроль за сбором и преобразованием информации о сигналах АЭ. Сигнал АЭ в каждом из каналов после фильтра проходит на вход основного усилителя, с выхода которого поступает на вход амплитудного детектора 5, осуществляющего запоминание его фронта и информации об его максимальной амплитуде. С выхода амплитудного детектора сигналы через аналоговый коммутатор 9 проходят на вход сравнивающего устройства 10, где они поочередно сравниваются с соответствующим пороговым напряжением, задаваемым цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) 8. Работой ЦАП управляет также компьютер, осуществляющий предварительную запись соответствующих кодов в регистре RG1. Если уровень сигнала превышает пороговый уровень, то компаратор срабатывает и уровень логической единицы поступает по шине данных в компьютер, который регистрирует время прихода сигнала и запускает таймеры для регистрации относительных времен прихода сигналов других каналов для определения координат источников АЭ. Одновременно с помощью АЦП происходит оцифровка сигналов АЭ. Данные записываются и сохраняются в памяти компьютера [20].

В зависимости от решаемых задач и принципа ввода информации в компьютер АЭ системы могут иметь различную структуру построения: параллельную, параллельно-последовательную и последовательную.

Системы с параллельной структурой построения имеют максимальное быстродействие. Главным их недостатком является сложность аппаратной части, что для большого числа каналов приводит к их удорожанию и увеличению габаритов.

Для систем с последовательной структурой построения при использовании большого числа каналов характерно значительное уменьшение быстродействия, что приводит к большим погрешностям при определении координат дефектов.

Используя параллельно-последовательную структуру построения, можно получить оптимальное сочетание высоких технических характеристик и достаточно низкой стоимости. При этом регистрация времен прихода осуществляется параллельно, а аналогово-цифровое преобразование сигналов АЭ – с использованием параллельно-последовательной структуры построения.

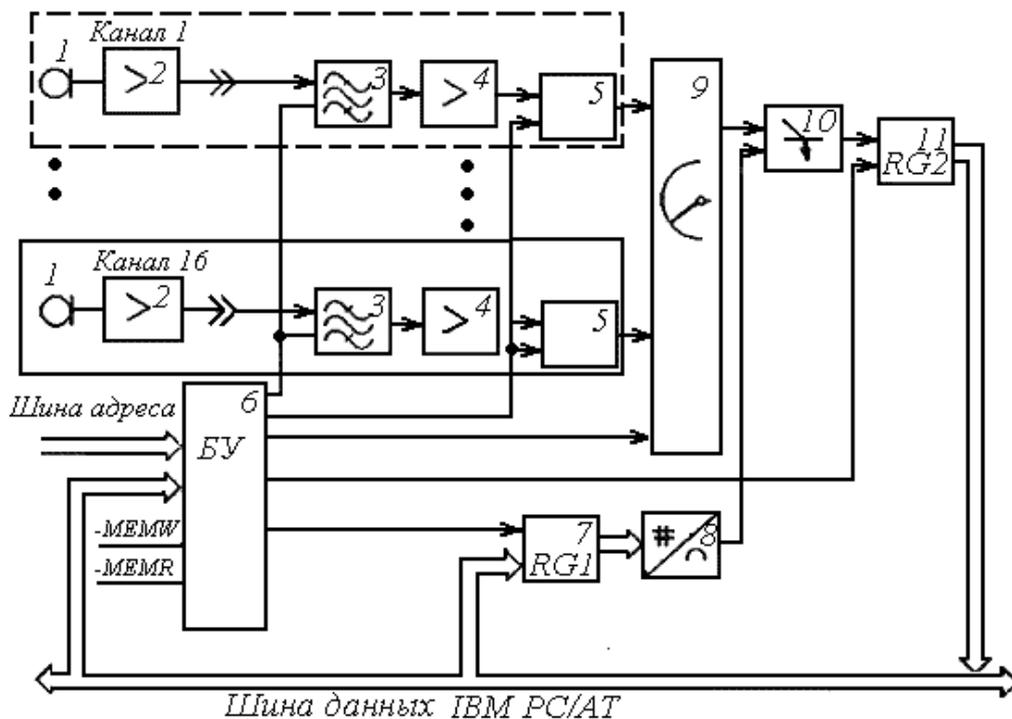


Рис. 45. Функциональная схема АЭ системы с последовательной схемой построения

Основными техническими характеристиками аппаратуры АЭ являются:

- число каналов;
- коэффициент усиления;
- динамический диапазон усилительного тракта;
- частотный диапазон;
- параметрический вход;
- габаритно-весовые характеристики;
- информационные параметры и способы представления данных.

Число каналов определяет возможности аппаратуры и область ее применения.

Для аппаратуры, которая имеет пороговое устройство, динамический диапазон есть отношение максимального значения неискаженного сигнала к уровню минимального значения порога [22]. Для определения динамического диапазона используется выражение:

$$D = 20 \cdot \lg(u_{\max} / u_{\text{дmin}}),$$

где D – динамический диапазон прибора (системы), u_{\max} – значение сигнала, при котором проходят неискаженными сигнал с наибольшими амплитудами, $u_{\text{дmin}}$ – значение порога, при котором производится регистрация менее чем 1 выброса/с при отсутствии на входе сигнала.

Частотный диапазон аппаратуры выбирается из соображений защищенности от внешних помех, максимальной прозрачности акустического тракта, зависящий от материала изделия, вида дефекта. Нижняя граница частотного диапазона лежит в области 20–50 кГц. При этом результаты измерений защищены от воздействия механических шумов, связанных с работой насосов, кранов и т. д.

Параметрический вход служит для подключения к аппаратуре сигнала с выхода параметрического устройства, преобразующего физическую величину – давление, температуру, силу и другие в электрический сигнал. Необходимость параметрических измерений объясняется тем, что события АЭ возникают и сопровождаются за счет изменения во времени упомянутых выше давления, силы и т. д., воздействующих на контролируемый объект, поэтому информационный АЭ параметр, будь это сумма импульсов, их интенсивность, энергия, длительность импульсов и т. п., рассматривается только в совокупности с характером изменения параметрических сигналов.

Это обстоятельство приобретает особую важность в тех случаях, когда ведутся гидравлические или пневматические испытания трубопроводов или технологического оборудования с использованием АЭ метода и имеется реальная вероятность разрушения конструкции в процессе самого нагружения. Поэтому, наблюдая за поведением объекта по сигналам АЭ и изменением прикладываемых к объекту нагрузок, можно наверняка избежать повреждения конструкции, а тем более – ее разрушения. Типовая аппаратура АЭ, таким образом, должна иметь один или два параметрических входа с нормированным уровнем напряжения входного сигнала 5 или 10 В.

Габаритно-весовые характеристики аппаратуры АЭ зависят от целевого назначения аппаратуры.

На рис. 46 приведены типичная АЭ аппаратура для общего назначения.

Акустико-эмиссионный контроль является основным методом контроля применяемый в системах диагностического мониторинга.

На рис. 47 представлена одна из функциональных схем системы комплексного диагностического мониторинга (КДМ) различных объектов и конструкций. Аппаратно система КДМ реализована как распределенная система сбора и обработки данных с передачей информации на центральную вычислительную станцию в цифровом виде. Основным элементом данной архитектуры является модуль сбора и обработки данных [30].



Рис. 46. Типичная АЭ аппаратура общего назначения

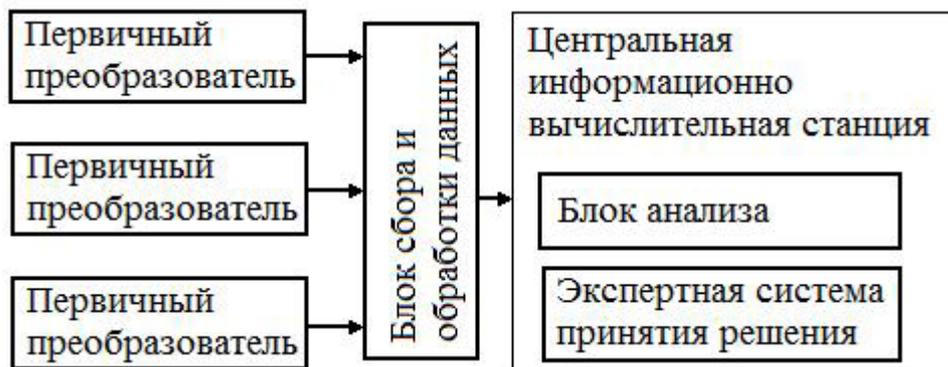


Рис. 47. Схема системы комплексного мониторинга

Модуль сбора и обработки данных обеспечивает гальваническую развязку измерительных каналов, принимает и обрабатывает аналоговые сигналы с датчиков АЭ, датчиков деформации, датчиков температуры, датчиков линейных перемещений, уровнемеров, датчиков давления, вибродатчиков. Обработка аналоговых сигналов происходит в режиме реального времени непосредственно в модуле, что позволяет получать высокую точность и достоверность обнаружения дефекта. Наличие у модуля сбора и обработки данных большого количества универсальных входов для подсоединения датчиков различного типа и выхода для передачи обработанных данных в цифровом виде создает оптимальную физическую топологию распределенной системы [30].

Работа программно-аппаратной части КДМ происходит следующим образом. Аналоговые сигналы с датчиков поступают в модуль сбора и обра-

ботки данных. После обработки полученные данные в цифровом виде передаются по высокоскоростному цифровому каналу в концентратор. С концентратора объединенный поток данных поступает на центральную вычислительную станцию. Центральная вычислительная станция обеспечивает полный анализ полученных данных, отображение, управление, накопление, принятие решения и формирование управляющих команд для модулей сбора и обработки данных и исполнительного оборудования (если это требуется). Накапливаемый банк данных диагностической информации в любое время может извлекаться специалистом по неразрушающему контролю для последующего анализа и корректировки эксплуатационных мероприятий.

Во время эксплуатации система работает в автоматическом режиме, анализируя и накапливая полную информацию о техническом состоянии контролируемого объекта в реальном времени. При этом в случае поступления данных о динамически развивающихся дефектах на центральную вычислительную станцию, происходит автоматическая выборка всех параметров поврежденной конструкции. В результате на информационном экране формируется строка – сообщение, которая содержит конструктивное описание контролируемого объекта и описание дефекта. Одновременно инициализируется программный блок принятия экспертных решений.

Система принятия решений комплексного диагностического мониторинга о возможности дальнейшей эксплуатации объекта при обнаружении различных дефектов и их различных сочетаний создается на базе физической модели повреждения конструкции под действием нагрузок и дополнительных факторов в процессе эксплуатации. Основой для этой модели служат известные закономерности из области механики разрушения и прочности применительно к трещинам.

Реализованный алгоритм принятия решений работает следующим образом. По результатам предварительного дефектоскопического и конструкционного анализа объекты контроля разбиваются на некоторое конечное число элементов, в общем случае неодинаковых и разнотипных, в пределах которых их свойства можно считать одинаковыми и известными, а акустические характеристики достаточно благоприятными для уверенной и достоверной локации дефектов. Далее каждому из элементов присваивается некоторое индивидуальное критическое число импульсов АЭ, превышение которого, при определенных условиях, будет означать начало существенных изменений в данном месте, требующих реакции системы.

При этом система КДМ обеспечивает жесткую синхронизацию потоков АЭ и дефектоскопической информации, данных о величинах текущих напряжений в стенке и пространственного положения объекта с динамической составляющей внутреннего давления как определяющего силового фактора, создающего предпосылки для образования и развития дефектов.

В конечном итоге, по результатам сравнения обнаруженных дефектов с допустимыми и уточнения срока службы объекта до возникновения дефектов, делается прогноз безопасной эксплуатации объекта, на основе которого вырабатываются следующие решения:

- следить за развитием (с рассчитанной ранее периодичностью или иной уточненной расчетом);
- удалить дефект и продолжить эксплуатацию без ограничений;
- произвести локальный ремонт;
- произвести капитальный ремонт в месте повреждения;
- немедленно отключить поврежденный объект.

Для проведения контроля крупногабаритных промышленных объектов, как, например, колонн нефтеперегонных заводов, магистральных трубопроводов и др., применяются многоканальные системы АЭ. Основным фактором, определяющим временные затраты на контроль, является прокладка кабельных линий от объекта до места расположения системы АЭ. Кроме того, оставляет желать лучшего надежность кабельных линий за счет контактных ошибок в разъемах, радиочастотных наводок на кабели, возможность повреждения и разрыва линий многочисленным персоналом установки [31].

Существуют беспроводные системы АЭ контроля, созданные на базе современных микропроцессорных устройств, которые лишены указанных выше недостатков.

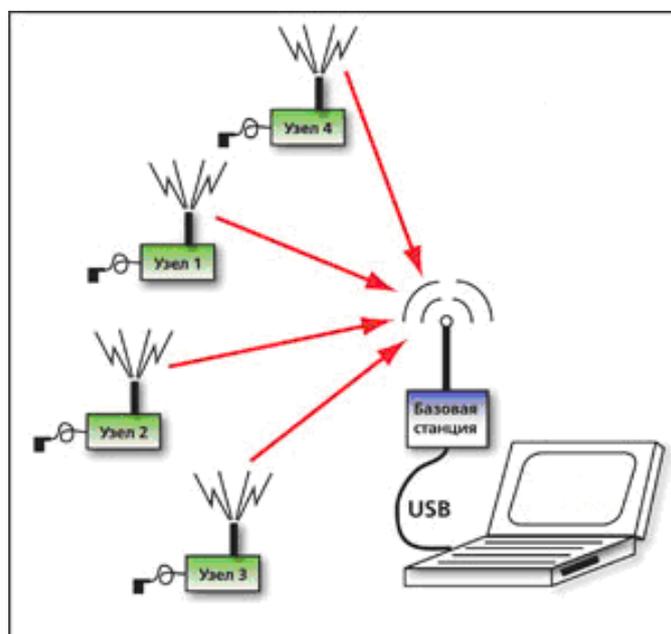


Рис. 48. Схема беспроводной АЭ системы в режиме непосредственной передачи сигналов

На рис. 48 изображен один из вариантов такой системы. Основной беспроводной системы является узел, состоящий из датчика АЭ с модулем, который осуществляет измерение параметров сигналов АЭ, их формы и передачу этих параметров в цифровом виде по радиоканалу в приемную станцию, называемую базой. База, в свою очередь, соединяется с управляющим компьютером по каналу USB, от которого получает электропитание. Узлы разработаны на основе специальных малопотребляющих микросхем, позволяющих работать от батареи в течение 4 часов. Использование выносной, более емкой батареи, или солнечной батареи, позволяет существенно увеличить время беспереывной работы.

Узел с датчиком представляет собой полностью функциональный цифровой АЭ канал с возможностями вычисления всех параметров АЭ и формы волны. Узел содержит встроенный предварительный усилитель (возможно также опциональное подключение внешнего предусилителя). Полностью поддерживаются временные параметры импульса АЭ. В системе предусмотрен специальный «пакетный» режим автоматического контроля датчиков (АКД) для реализации большей мощности импульса.

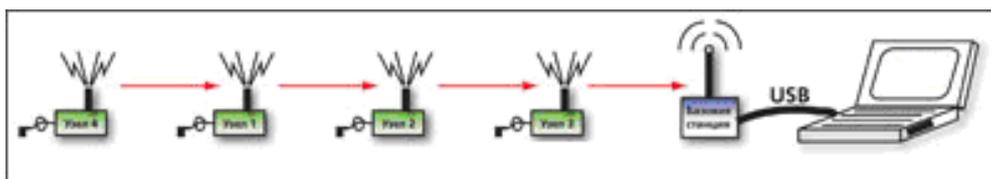


Рис. 49. Схема беспроводной АЭ системы в «сетевом» режиме

Система может работать в двух режимах:

- в режиме непосредственной передачи сигналов от узлов к базовой станции;
- в «сетевом» режиме, когда узлы передают сигналы к базовой станции по цепи через соседние узлы (рис. 49). Этот режим наиболее подходит для контроля протяженных объектов, типа трубопроводов.

3.1. Связь первичных параметров АЭ с характеристиками регистрируемых сигналов АЭ

3.1.1. Трансформация сигнала в объекте контроля

Точечный удаленный от поверхности источник АЭ излучает сферические продольную и поперечную волны. Затухание волн в металле вызывает наиболее сильное ослабление высокочастотной составляющей сигнала, так как коэффициент затухания быстро возрастает с частотой. При падении на поверхность объекта контроля волны отражаются и трансформируются. В результате появляются поверхностные волны,

амплитуда которых уменьшается с расстоянием значительно меньше, чем сферических волн, поэтому поверхностные волны преимущественно регистрируются преобразователем. Все это приводит к значительному искажению первоначального сигнала АЭ в зоне приема [32].

Регистрируемая аппаратурой форма электрического сигнала АЭ является откликом системы образец–датчик на локальное возмущение внутри объекта контроля и отличается от истинной формы волны, возникающей непосредственно у источника. Степень искажения истинной формы волны напряжения зависит от большого числа факторов: природа локального поля деформации до возмущения, деформируемый объем, модуль упругости среды и др. В результате возмущения, связанного с локальным актом деформации в образце, происходит возбуждение нормальных мод колебаний, передающих основную часть упругой энергии, и небольшого числа высших гармоник, составляющих в совокупности волну напряжения [7].

3.1.2. Искажение формы сигнала при распространении по объекту и преобразователем АЭ

В дополнении к уже перечисленным факторам существенное влияние на форму сигнала оказывает сам датчик. Когда широкополосный сигнал эмиссии воздействует на резонансный датчик, в результате получается эффект колокольчика, звящего на определенной частоте, независимо от способа своего возбуждения. Таким образом, на форму сигнала на выходе датчика одновременно влияют многие факторы: пути распространения волн, наличие различных мод, распространяющихся с разными скоростями и эффект преобразования входного сигнала преобразователем. Типичный сигнал эмиссии на выходе резонансного датчика приведен на рис. 50 нельзя не увидеть огромного различия между этим наблюдаемым сигналом и простейшим сигналом, сгенерированным источником АЭ (рис. 51) [7, 9].

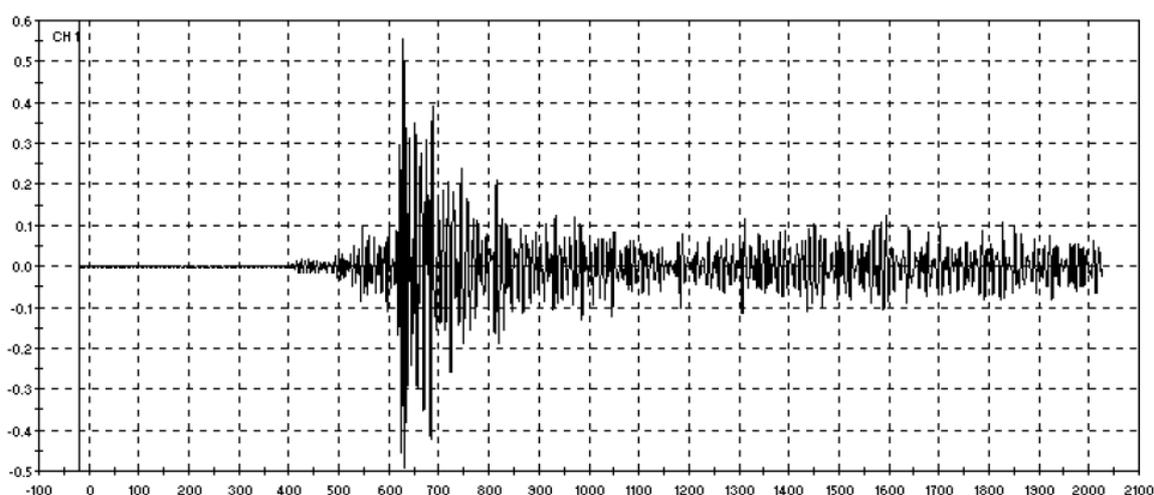


Рис. 50. Типичный импульсный сигнал АЭ

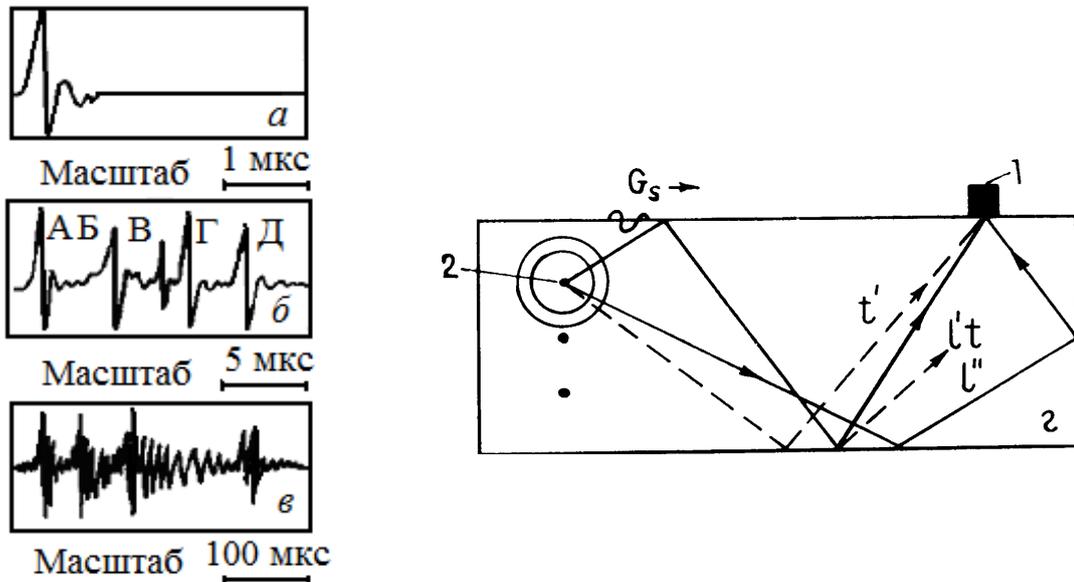


Рис. 51. Искажение сигналов АЭ при их распространении в изделии: а – излучаемый имитатором сигнал АЭ; б – регистрируемый датчиком сигнал; в – сигнал на выходе приемного датчика, г – схема распространения сигнала АЭ в теле конечных размеров, 1 – датчик сигналов АЭ, 2 – источник АЭ: А – первый пришедший сигнал продольной волны, Б – первый сигнал поперечной волны, В – первый сигнал поверхностной волны, Г – первый отраженный от дна сигнал продольной волны, Д – первый отраженный сигнал поперечной волны

Если интервал времени между импульсами АЭ меньше времени их затухания, то отдельные вспышки перекрываются и наблюдается непрерывная эмиссия [32].

Если преобразователь установлен в непосредственной близости от источника (в ближнем поле), то он улавливает не только волны напряжения от источника, но и сопровождающие их отражения.

Дисперсия волнового движения в твердом теле приводит к искажению формы исходного механического импульса, поступающего от источника эмиссии. Положим, например, что действие источника характеризуется во времени прямоугольным импульсом смещения (рис. 52, а). Его можно представить в компонентах Фурье бесконечным набором синусоидальных волн. Зависимость фазовой и групповой скоростей волн от длины волны (частоты) приводит к искажению формы импульса по мере его распространения: резкие изменения градиента «размываются», основной импульс сопровождается «хвостом» колебаний высокой частоты, а прямоугольная часть импульса превращается в колебательную кривую. Ограниченность размеров исследуемого тела приводит к отражению волн от его поверхностей, трансформации типов волн и другим явлениям. В итоге перемещение точки поверхности в простейшем случае будет носить характер затухающих колебаний (рис. 52, б).

Дополнительные искажения может вносить преобразователь. Вследствие малости энергии исходного механического импульса для повышения чувствительности применяют, как правило, резонансный пьезопреобразователь. Поэтому в каждом цикле механического воздействия будут возбуждаться резонансные колебания самого преобразователя. Электрический сигнал на преобразователе будет иметь вид радиоимпульса, показанного на рис. 52, в.

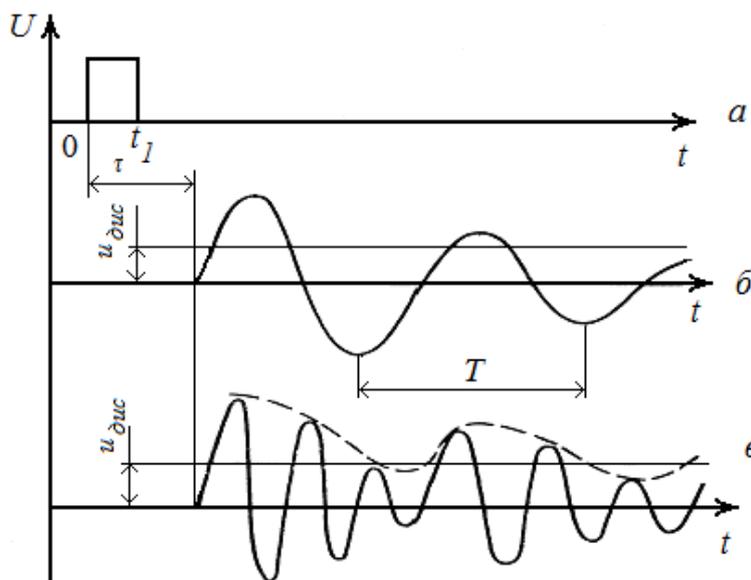


Рис. 52. Схематическое изображение формы сигналов АЭ

АЭ излучается в виде коротких (менее 1 мкс) видеоимпульсов. В то же время вследствие отражений, трансформации типов волн и резонансных сигналов датчика, сигналы АЭ, регистрируемые на поверхности исследуемого тела, имеют вид вспышек с затухающей по экспоненте амплитудой колебаний:

$$u = u_0 \cdot e^{-t/\tau} \cdot \sin 2\pi ft, \quad (7)$$

где u – амплитуда колебаний АЭ, τ – постоянная времени послезвучания датчика и исследуемого тела, f – частота заполнения импульсов АЭ (рис. 53).

Если интервал времени между импульсами АЭ меньше времени их затухания, то отдельные вспышки перекрываются и наблюдается непрерывная эмиссия.

В результате прохождения импульсов через приемный преобразователь и усилительный тракт с ограниченной полосой пропускания происходит дальнейшее искажение импульсов. Они приобретают характер колебаний, длительность их увеличивается, быстро следующие друг за другом импульсы сливаются в один [7].

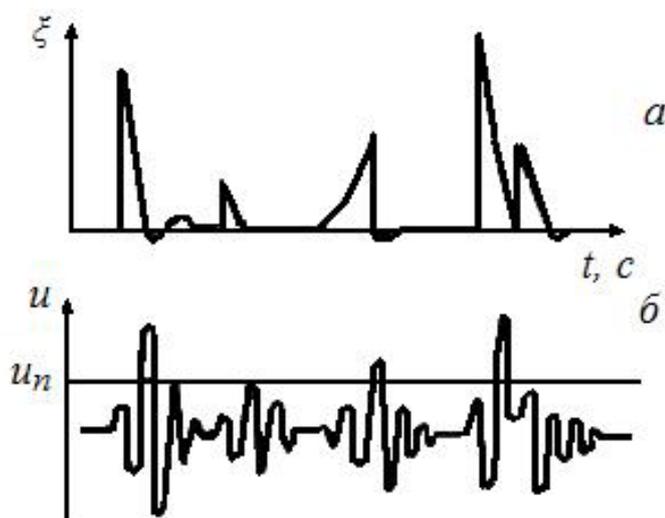


Рис. 53. Форма первичных импульсов АЭ (а) и соответствующих импульсов в приемном тракте (б)

При выявлении источника напряжения наиболее достоверные результаты получаются, когда преобразователь установлен в дальнем поле, т. е. удален от источников настолько, что волны сжатия и сдвиговые в основном затухают на пути к преобразователю, который улавливает менее ослабляющиеся поверхностные волны [26].

3.1.3. Влияние аппаратных шумов

Минимальный уровень шумов, который определяет чувствительность аппаратуры АЭ, связан с собственными тепловыми шумами преобразователя АЭ и коэффициентом шума входных каскадов предусилителя. Собственный тепловой шум ПАЭ с чувствительным элементом, изготовленным из пьезокерамики, в большинстве случаев не превышает 5 мкВ. Коэффициент шума входных каскадов усилителя не должен превышать 6 дБ. Поэтому собственные шумы аппаратуры АЭ не должны превышать 10 мкВ ($u_{ша} < 10$ мкВ), приведенных ко входу [22].

Уровень непрерывных акустических или электромагнитных шумов ($u_{ш}$) не должен превышать $u_{ша} + 6$ дБ ($u_{ш} < u_{пор} = u_{ша} + 6$ дБ). Здесь $u_{пор}$ – пороговое напряжение. Если это условие не выполняется, то необходимо предпринять все меры (технические и организационные) для уменьшения уровня шумов. При невозможности уменьшения шумов до требуемого значения необходимо прекратить проведение АЭ контроля. Проведение контроля в условиях повышенных шумов (т. е. при выполнении неравенства $u_{ш} > u_{ша} + 6$ дБ) возможно только при научно-техническом обосновании возможности выявления требуемых источников АЭ. В этом случае значение порогового уровня аппаратуры может превысить значение 20 мкВ, т. е. $u_{пор} > u_{ш} > 20$ мкВ.

Ограничения по импульсным шумам (помехам) устанавливаются исходя из условий, при которых проводят испытания. Рекомендуется, чтобы средняя частота регистрации импульсных помех не превышала 0,01 Гц (т. е. $F_{\text{пом}} < 0,01$ Гц). При невозможности уменьшения частоты регистрации импульсных помех до требуемого значения необходимо прекратить проведение АЭ контроля.

Проведение контроля в условиях повышенной частоты регистрации импульсных помех (т. е. при выполнении неравенства $F_{\text{пом}} > 0,01$) возможно только при научно-техническом обосновании выявляемости требуемых источников АЭ.

3.1.4. Влияние уровня дискриминации амплитудных шумов

Правильность интерпретации числа событий АЭ и выбросов зависит от условий распространения сигналов АЭ и разрешающей способности аппаратуры.

Для учета параметров перекрывающихся импульсов существенное значение имеет установление их средней длительности. Вследствие того, что импульс АЭ на выходе приемного тракта описывается выражением (7), огибающей импульса АЭ является экспонента и длительность огибающей импульса АЭ t_0 на уровне дискриминации u_0 определяется соотношением:

$$t_0 = \tau \cdot \ln \cdot \frac{u_0}{u_\delta} \quad (8)$$

Зависимость (8) получается из (7) путем логарифмирования. Длительность t_0 можно рассматривать как мертвое время, т. к. если временной интервал между элементарными актами АЭ меньше t_0 , они воспринимаются как один импульс [12].

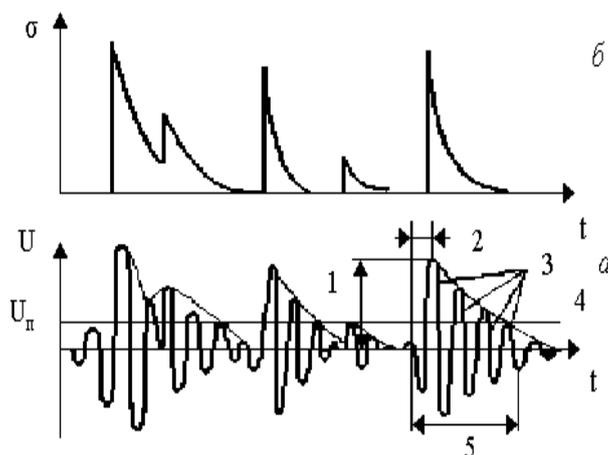


Рис. 54. Регистрация сигналов АЭ, прошедших через акустико-электронный канал: а – первичные сигналы; б – регистрируемые сигналы; 1 – амплитуда; 2 – длительность переднего фронта; 3 – число осцилляций; 4 – порог дискриминации; 5 – длительность сигнала АЭ

3.1.5. Влияние полосы частот регистрации

Частотный спектр АЭ по своему происхождению очень широк и простирается от низкочастотных сигналов в области слышимости 0,1–20 кГц до ультразвукового диапазона (30 МГц). Но диапазон частот, имеющих практическое значение, существенно ниже и зависит от применяемых датчиков, а также характеристик используемой АЭ аппаратуры. Только при широкой полосе пропускания можно осуществить прием и передачу сигнала АЭ с минимальными искажениями. Практически все ПЭП работают в импульсном режиме. Преобразователи с ограниченной полосой пропускания позволяют получить высокую чувствительность, но при этом он обладает повышенным уровнем радиальных колебаний, что вызывает в выходном сигнале ПЭП серию низкочастотных колебаний [7, 33].

Обнаружение и обработка сигналов АЭ в целях обеспечения неразрушающего контроля проводится обычно в пределах от 10 до 500 кГц. Нижний предел этого спектра обусловлен появлением мешающих сигналов, а верхний предел имеет указанное значение в связи с большим затуханием АЭ сигналов при высоких частотах, а также с невозможностью преодоления такими сигналами больших расстояний. Расстояние между АЭ источником и датчиком существенно сокращается при увеличении частоты АЭ сигнала. При 100 кГц это расстояние равно 6 м, при 300–800 кГц – приблизительно 2,5 м, а при 1 МГц – 0,5 м. Нижний частотный предел обусловлен появлением мешающих факторов. Помехи от механических ударов имеют частотный спектр не выше 0,4 МГц, от трения – до 1 МГц. Спектр электромагнитных помех еще более высокочастотный. Повышение частоты принимаемых сигналов более 1 МГц нежелательно, так как это уменьшает дальность приема сигналов АЭ. Поэтому от высокочастотных помех отстраиваются другими способами. В связи с этим, предпочтительно использование датчиков с рабочим диапазоном 50–500 кГц и необходимо использовать фильтры для исключения различных помех [14].

3.1.6. Разрешающая способность по времени

При высокой интенсивности потока актов АЭ близко расположенные импульсы перекрываются. Кроме того, сигналы АЭ, регистрируемые приемным датчиком на поверхности исследуемого тела, сильно искажаются вследствие особенностей их распространения и свойств регистрирующей аппаратуры. Все это при существующих методах измерения АЭ может привести к большим погрешностям оценки действительной длительности сигналов АЭ.

3.2. Преобразователи АЭ

Преобразователь АЭ (ПАЭ) – устройство, в котором сигнал АЭ преобразуется в электрический сигнал [6].

Преобразователи должны обеспечивать прием сигналов АЭ со следующими основными параметрами: амплитуда 10^{-1} – 10^3 Н/м², длительность электрического импульса 10^{-6} – 10^{-2} с, энергия акта АЭ 10^{-14} – 10^{-15} Дж, энергетический спектр до нескольких МГц, динамический диапазон линейно преобразованных сигналов не менее 80 дБ. Характеристики преобразователя должны быть стабильны во времени при воздействии температур и специальной среды, а преобразователь удобным в эксплуатации [13, 15, 34].

Основными параметрами ПАЭ являются максимальная чувствительность или чувствительность на рабочей частоте, полоса пропускания, рабочая температура, помехоустойчивость, собственные шумы, электрический импеданс. Большинство этих параметров является частотно-зависимыми.

3.2.1. Классификация ПАЭ по принципу работы

Основные методы ПАЭ колебательного движения поверхности твердого тела в электрический сигнал, применяемые для АЭ: емкостные, магнитострикционные, оптические, пьезоэлектрические [13].

Принцип действия *емкостного преобразователя* заключается в регистрации изменения электрического потенциала между пластинами конденсатора, одна из которых неподвижна, а вторая соединена с колеблющимся телом. Поверхность тела может непосредственно служить в качестве подвижной пластины. Заряд на емкости преобразователя, равный $Q = C_{np} E$, остается постоянным при не слишком медленных колебаниях емкости преобразователя. Выходное напряжение составляет

$$u_{вых} = E(dh / h),$$

где h – расстояние между электродами, dh – колебательное смещение подвижного электрода, E – напряженность электрического поля между электродами. Для лучших образцов емкостных преобразователей $h \sim 5 \cdot 10^{-6}$ м [14, 20].

Пьезомагнитные (магнитострикционные) материалы деформируются при наложении внешнего магнитного поля (эффект магнитострикции, или эффект Джоуля). Если приложить к пьезомагнитному материалу внешнюю механическую нагрузку, то меняется его магнитная проницаемость (эффект магнитоупругости, или эффект Виллари), что изменяет магнитный поток через катушку, намотанную на сердечник из пьезомагнитного материала, и в ней возникает электродвижущая сила. Достаточной для практического использования магнитострикцией и

магнитоупругостью обладают только ферри- и ферромагнетики. Из этих металлов в чистом виде для изготовления магнитострикторов используют только никель. Для уменьшения вихревых токов сердечники из никеля изготавливают из тонкой ленты, пластин или труб. Наиболее употребительны сплавы железо-алюминий (альферы) и железо-кобальт (пермендюры). Первые легко обрабатываются, технологичны, имеют стабильные свойства, характеризуются высокой температурой Кюри. Пермендюр в исходном состоянии достаточно технологичен, но изделия из него требуют термообработки, придающей им необходимые магнитные характеристики, но ухудшающей их механические свойства [13].

Поскольку перемещения поверхности твердого тела, обусловленные генерированием АЭ, достаточно малы 10^{-7} – 10^{-14} м, то в основе *оптических методов* лежит использование интерферометров и когерентного лазерного излучения.

Основное распространение для измерения параметров АЭ получил *пьезоэлектрический метод*.

Пьезоэлектрическими свойствами обладают очень многие кристаллические диэлектрики, но у большинства из них пьезоэлектрический эффект очень мал. Для изготовления пьезоэлементов используются лишь те материалы, которые обладают помимо хороших пьезоэлектрических свойств, приемлемыми физико-механическими и химическими характеристиками [7].

Пьезоэлектрические материалы при деформировании электрически поляризуются (прямой пьезоэффект, или эффект Кюри) и на электродах, нанесенных на поверхность пьезоэлектрика, возникает электрический заряд. Приложение электрического напряжения к электродам вызывает их механическую деформацию (эффект Джоуля, или обратный пьезоэффект).

Поверхности пьезоэлемента металлизированы и являются электродами. При работе ПЭП в режиме обратного пьезоэффекта на их пьезопластины подается электрическое напряжение, под действием которого пластина изменяет свою толщину. Если напряжение знакопеременно, то пластина колеблется в такт этим изменениям, создавая в окружающей среде упругие колебания (рис. 55). При этом пластина работает как излучатель. И наоборот, если пьезопластина воспринимает импульс давления, то на ее обкладках вследствие прямого пьезоэффекта появятся заряды, величина которых может быть измерена. В этом случае пьезопластина работает как приемник.

Пьезокерамические материалы классифицируются по двум основным признакам: назначению и электромеханическим свойствам. В зависимости от электрофизических параметров, применяемых пьезоэлектриков, преобразователи можно условно разделить на *пьезодиэлектрические и пьезополупроводниковые* [13].

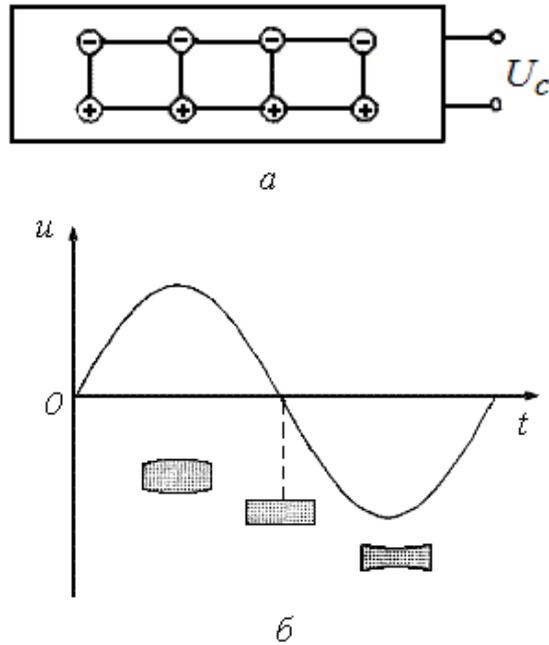


Рис. 55. Изменение формы пьезопластины при воздействии знакопеременного напряжения

Пьезополупроводниковые преобразователи выполняются методами полупроводниковой технологии. Различают преобразователи с диффузионным высокоомным слоем, пленочные (с нанесением на поверхность звукопровода хорошо ориентированных пленок) и эпитаксиальные, полученные наращиванием тонких монокристаллических слоев пьезоэлектрика. Пьезополупроводниковые преобразователи относятся к резонансным устройствам и, следовательно, к узкополосным. Наиболее перспективным пьезополупроводниковым материалом является поливинилиденфторид (ПВДФ) – полимер, обладающий сравнительно большим дипольным электрическим моментом. ПВДФ представляет собой композицию из мелких кристаллических пластинок в аморфной фазе диполи. Поляризованный материал обладает хорошими пьезоэлектрическими свойствами. Для поляризации проволочное острие помещают на расстоянии 10 мм от пленки и подают на него постоянное напряжение 10 кВ в течение 10 мин при нормальных условиях. Нанесенные подобным образом пленки проверены до частот порядка 10 ГГц (при толщине пленки 1,5 мкм). При удельной поверхностной электрической мощности возбуждения до 100 Вт/см² не наблюдалось деполяризации и разрушения.

Из пьезодиэлектрических материалов наиболее широкое распространение получили пьезоэлементы из синтетических пьезоматериалов на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС), а также естественного пьезоэлектрика – монокристаллического кварца (горного хрусталя).

Пьезокерамика – наиболее широко используемый класс пьезоэлектрических материалов, получаемых методами керамического производства. Ее свойство можно изменять в широких пределах соответствующим изменением технологии. Отличительная особенность пьезокерамики – ее высокие пьезоэлектрические характеристики и диэлектрическая проницаемость.

Процесс изготовления пьезокерамики состоит в получении изделий с последующей их поляризацией электрическим полем порядка 2 кВ/мм. Остаточная после снятия внешнего поля поляризация определяет пьезоэлектрические свойства пьезокерамики. Поскольку значение остаточной поляризации и пьезоэффект зависят от способа получения материала и режима поляризации, то значения физических параметров пьезокерамики одного состава могут иметь довольно большой разброс: характеристик упругости – до 5 %, пьезоэлектрических характеристик – до 10 %, диэлектрической проницаемости – до 20 %.

Пьезокерамические материалы представляют собой твердые растворы, в которых подбором соотношения компонентов и введением модифицирующих добавок достигается некоторый оптимальный набор свойств материала. Пьезокерамика – материал неизотропный. Его свойства по осям X , Y одинаковы, а по оси Z отличается от свойств по первым двум осям.

Исторически первым промышленным пьезокерамическим материалом был титанат бария. Пьезокерамические материалы классифицируются по двум основным признакам: назначению и электромеханическим свойствам. В зависимости от электрофизических параметров применяемых пьезоэлектриков преобразователи можно условно разделить на пьезодиэлектрические и пьезополупроводниковые. Пьезодиэлектрические пластинчатые преобразователи изготавливаются из пьезокерамики. Они используются в диапазоне частот до 100 МГц. Конструктивно представляют собой отдельную пластину, наклеенную на прочную основу, одновременно служащую «тыльной» акустической нагрузкой пьезоэлектрического слоя.

Пьезоэлектрический кварц – природный пьезоэлектрик не утратил своего значения до сих пор благодаря сравнительно высокой температуре Кюри (576 °С), хорошим физико-механическим и химическим свойствам и стабильности характеристик.

Сегнетоэлектрики наиболее распространены в современных пьезоэлектрических преобразователях. Наличие в них спонтанной поляризации создает в кристалле предпочтительное направление, т. е. отсутствует центр симметрии, уничтожающий пьезоэффект. Сегнетоэлектрические материалы: ниобат лития, танталат лития и т. д. Для получения пьезокера-

мики в настоящее время используют другие сплавы, так называемые ЦТС (цирконат-титанат свинца) с высокими пьезоэлектрическими свойствами.

Ниобат лития (LiNbO₃) имеет высокую точку Кюри, в связи с чем привлекает внимание исследователей и разработчиков в области реакторной технологии. Пьезоэлементы вырезают из монокристаллов и поляризуют при температуре, близкой к точке Кюри, полем напряженностью порядка 0,2 В/см (для ЦТС она составляет около 20 кВ/см).

Также используются в качестве пьезоэлемента *дигидрофосфат аммония* [7].

При выборе материалов для пьезопреобразователя следует учитывать такие их характеристики, как коэффициент электромеханической связи, диэлектрическую проницаемость, пьезомодули, а также температуру Кюри (температура исчезновения пьезоэффекта), механическую прочность и другие эксплуатационные характеристики.

Коэффициент электромеханической связи определяют как отношение взаимной упругой электрической энергии к среднему геометрическому значению упругой и электрической энергии. Для пластины, колеблющейся по толщине, он равен:

$$\beta = \sqrt{e^2 / \rho \cdot c^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon},$$

где e – пьезоконстанта, ρ – плотность, c – скорость звука, ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала пьезопластины, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная [27].

Минимальное смещение, которое может быть определено пьезоэлектрическим датчиком при регистрации сигналов АЭ:

$$\delta_{\min} = u_{\min} / (\beta \cdot E_x),$$

где u_{\min} – напряжение, соответствующее шумовому уровню тока системы, β – коэффициент электромеханической связи, E_x – пьезомодуль.

В табл. 6 приведены краткие характеристики пьезоматериалов, которые находят применение в приемных преобразователях АЭ.

Характеристики ПЭП можно разделить на следующие группы:

- характеристики передаточных функций;
- акустического поля;
- электрического сопротивления;
- временные и общетехнические.

Передаточная функция любого преобразователя – это отношение сигнала на выходе к сигналу на входе при определенной нагрузке. В ПЭП (в зависимости от режима работы) различают передаточные функции излучения, приема и двойного преобразования.

Таблица 6

Основные характеристики пьезоэлектрических материалов

Материал, марка	Коэффициент электромеханической связи	Пьезомодуль, м/В·10 ⁻¹²	Относительная диэлектрическая проницаемость	Температура Кюри, °С	Предел прочности сжатия, МПа
Сегнетовая соль	0,65	275	350	-18...+24	14
Дигидрофосфат аммония, АДР	0,28	24	15,3	150	30
Цирконат-титанат свинца					
ЦТС-19	0,4	200	1500	290	30
ЦТС-21	0,21	67	550	410	30
ЦТС-23	0,43	75–150	1050	285	70
PZT-4*	–	280	1300	328	–
PZT-5A*	0,39–0,75	–	374	365	–
Ниобат лития	0,24	16,2	30	1210	–
Кварц	0,095	2,31	4,5	576	95
Титанат бария	0,2–0,5	45–100	1500	120	–
ПВДФ	0,10–0,14	1	11–15	120	–

В режиме излучения входным параметром является напряжение и ток, протекающий через преобразователь, а в качестве выходного – механическое напряжение и давление. Эти величины можно рассматривать в точке рабочей поверхности преобразователя или на каком-то расстоянии от него. Кроме того, эти величины могут быть интегральными, например, средними по площади. Коэффициент электромеханического преобразования характеризует эффективность работы ПЭП в режиме излучения:

$$L = P_{cp} / u_0,$$

где P_{cp} – среднее значение амплитуды акустического давления излученной волны, u_0 – амплитуда электрического напряжения, возбуждающего ПЭП в режиме излучения.

Для приема акустических колебаний используется прямой пьезоэффект. При этом в результате деформации пьезопластины на электродах появляется электрический заряд. В этом режиме к выходным сигналам относится электрическое напряжение и ток, протекающий через электрическую нагрузку преобразователя, а входным сигналом служит механическое давление и смещение. Коэффициент обратного преобразования M определяет эффективность работы ПЭП в режиме приема:

$$M = u / P_{cp},$$

где u – напряжение, возникающее между электродами ПЭП в режиме приема, P_{cp} – среднее значение давления волны, проходящей на ПЭП.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ПЭП показывает изменение модуля коэффициента преобразования в зависимости от частоты. На рис. 56, *а* показана АЧХ резонансной пьезопластины, а на рис. 56, *б* – АЧХ широкополосного ПЭП.

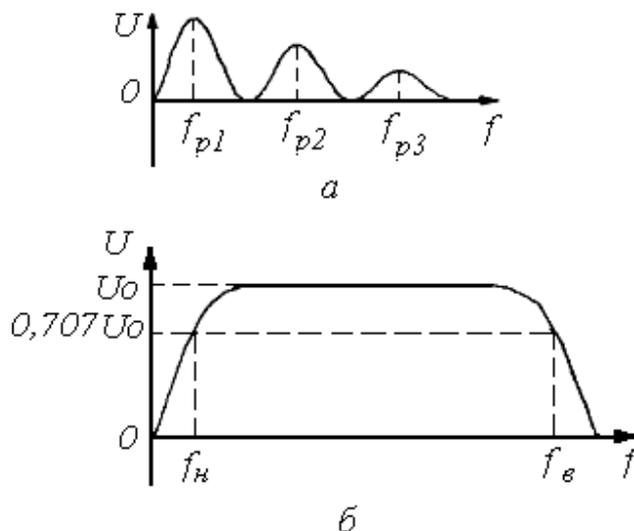


Рис. 56. Амплитудно-частотная характеристика:
а – резонансной пьезопластины; *б* – широкополосного ПЭП

Акустический импульс оказывает давление на переднюю грань ПЭП, смещая ее, и на выходе появляется импульс электрического напряжения. Датчик представляет собой инерционную систему, из-за чего проходящие через него сигналы существенно искажаются. Практически все ПЭП работают в импульсном режиме. Их важнейшей характеристикой является ширина полосы пропускания, так как только при широкой полосе пропускания удастся с минимальными искажениями осуществлять прием и передачу сигнала. Решение задачи создания широкополосного устойчивого ПЭП сводится к выбору способа расширения его полосы пропускания (рис. 56, *б*). Резонансная АЧХ датчика позволяет получить высокую чувствительность, однако при этом он обладает повышенным уровнем радиальных колебаний. Это вызывает в выходном сигнале ПЭП серию низкочастотных колебаний. Для сокращения уровня радиальных колебаний широко используют механическое и электрическое демпфирование. Кроме того, часто для сокращения длительности низкочастотных колебаний используют пьезокерамику специальной формы.

Зависимость чувствительности от частоты лежит в основе классификации датчиков АЭ и определяет область их применения. По частотным свойствам ПАЭ можно разделить на *узкополосные* (полоса пропускания $0,2F_p$, где F_p – рабочая частота ПАЭ), *полосовые* (полоса пропускания – $0,8-0,2F_p$) и *широкополосные* (полоса пропускания более

$0,8F_p$) (рис. 57). Для полосовых и широкополосных преобразователей рабочая частота соотносится с верхней – $F_в$ и нижней – $F_н$ частотами полосы пропускания посредством выражения:

$$F_p = \sqrt{F_н \cdot F_в}$$

и является среднегеометрической частотой ПАЭ [33].

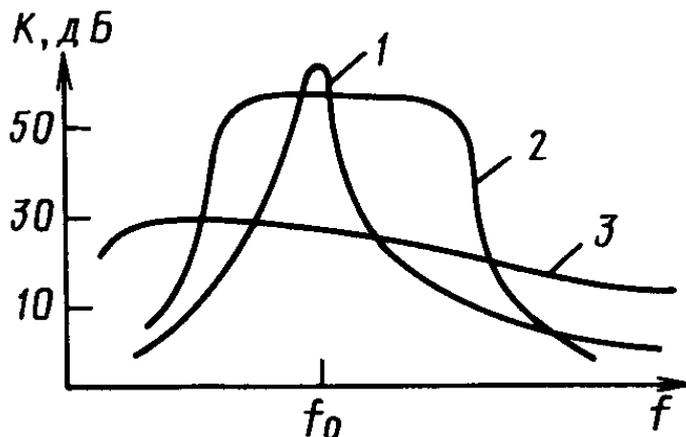


Рис. 57. Частотные зависимости чувствительности различных типов преобразователей акустической эмиссии:
1 – резонансный; 2 – полосовой; 3 – широкополосный

Узкополосные ПАЭ являются, как правило, резонансными системами и имеют максимум чувствительности на рабочей частоте, выбранной из условий эксперимента. Максимальная чувствительность узкополосных ПАЭ значительно (на 20–40 дБ) превосходит максимальную чувствительность широкополосных датчиков. ПАЭ с узкой полосой пропускания могут быть применены в тех случаях, когда основное требование сводится к необходимости обнаружить момент возникновения дефекта или начало его роста. Поскольку сигнал АЭ является широкополосным, при прохождении через узкополосную систему он искажается, появляются осцилляции, поэтому достоверное определение параметров процесса роста дефектов в данном случае затруднительно.

Широкополосные ПАЭ должны применяться при исследованиях явления АЭ. В форме сигналов АЭ содержится значительная информация о параметрах исследуемого процесса и поэтому акустико-электрический канал должен обеспечить передачу формы сигнала с минимальными искажениями. При этом неизбежны потери, обусловленные уменьшением чувствительности возрастания уровня шумов.

Полосовые ПАЭ являются промежуточными между широкополосными и узкополосными и обладают преимуществами тех и других.

3.2.2. Сравнительная характеристика ПАЭ

Достоинством *емкостных преобразователей* является практическая независимость выходного напряжения от частоты и простота определения чувствительности. В то же время при анализе акустических колебаний на высоких частотах (0,1–10 МГц) для получения удовлетворительной чувствительности необходимо обеспечить зазор между обкладками конденсатора порядка нескольких микрометров и прикладывать напряжения, близкие к пробному (50 кВ/мм). Это требует высокой точности изготовления преобразователя и температурной стабильности элементов его конструкции.

Принцип действия емкостного преобразователя заключается в следующем. Конденсатор выполнен в виде двух металлических плоских поверхностей, разделенных малым (несколько микрометров) диэлектрическим (в частности, воздушным) зазором, и между ними существует разность потенциалов. При движении одной поверхности относительно другой на поверхностях возникают дополнительные компенсирующие заряды, изменяющие свою величину в соответствии с движением поверхностей.

Чувствительность конденсаторного преобразователя рассчитывается [10]:

$$\frac{dq}{dh} = \frac{\varepsilon \cdot S \cdot u}{4 \cdot \pi \cdot h^2},$$

где q – заряд конденсатора, h – зазор между пластинами конденсатора, ε – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками, S – площадь обкладок, u – электрическое напряжение, подаваемое на обкладки конденсатора.

Чувствительность конденсаторного преобразователя, полученная в лабораторных условиях, позволяет обнаружить импульсное смещение поверхности объекта порядка 10^{-12} м (0,01 Å), с длительностью импульса 20 нс и менее. Отсюда следует, что частотная полоса пропускания данных конденсаторов простирается от нуля (постоянное смещение поверхности) до нескольких десятков мегагерц.

Указанные достоинства и недостатки обусловили преимущественное использование преобразователей емкостного типа при лабораторных исследованиях, для определения энергетических характеристик процессов и градуировки преобразователей других типов. При измерении энергии АЭ необходимо учитывать дополнительную емкость соединительных цепей, а также то, что значительная часть энергии может быть сконцентрирована в низкочастотной области спектра, где преобразователь теряет чувствительность и градуировка по ширине зазора между электродами требует коррекции [7, 13].

Несмотря на высокую точность измерения амплитуды колебаний поверхности, *оптические методы* не получили широкого распространения ввиду сложности аппаратуры. В связи с этим лазерная интерферометрия в основном применяется в лабораторных экспериментах только для абсолютной градуировки пьезопреобразователей. Возможность измерения АЭ оптическими методами, которые являются практически безынерционными, не требуют акустического контакта с объектом контроля, позволяют проводить измерения на достаточно малой площадке. Воспроизводимость результатов измерений высокая. Тем не менее, чувствительность оптических методов недостаточна.

Магнитострикционные преобразователи редко применяются для регистрации сигналов АЭ, что связано с их конструктивной сложностью и невысокой чувствительностью. Достоинство – отсутствие механических резонансов в широком диапазоне частот, высокие рабочие температуры, возможность обеспечения низкого выходного сопротивления датчика. Например, чувствительность электромагнитного преобразователя в $10 \text{ мВ/МГц} \cdot \text{Å} \cdot \text{Т}$, что при магнитной индукции $0,5 \text{ Т}$ (5 кГс) в случае регистрации колебаний с амплитудой 10^{-2} Å приводит к значению выходного электрического напряжения 50 мкВ на частоте 1 МГц и 5 мкВ на частоте 100 кГц (напряжение выходного сигнала электромагнитного преобразователя пропорционально скорости колебательного движения, которая при неизменной амплитуде колебаний пропорциональна их частоте). Для сравнения укажем, что пьезопреобразователь в аналогичных условиях обеспечивает получение сигнала порядка 1 мВ , т. е. на несколько порядков большего. Достоинством электромагнитных преобразователей является отсутствие механических резонансов, что упрощает их градуировку. Тем не менее, преимущества пьезопреобразователей обусловили их преобладающее использование в АЭ исследованиях. Преимущества магнитострикционных преобразователей: их легче согласовывать по механическому импедансу с изделиями из металла, относительно высокая точка Кюри (температура исчезновения эффекта магнитострикции): железо – $768 \text{ }^\circ\text{C}$, никель – $358 \text{ }^\circ\text{C}$, кобальт – $1131 \text{ }^\circ\text{C}$.

Искусственная пьезокерамика находит наиболее широкое применение в преобразователях АЭ вследствие больших пьезомодулей и диэлектрической проницаемости (последняя облегчает согласование преобразователя с аппаратурой), высокой прочности и стабильности свойств, малой гигроскопичности, сравнительно высоких температуры Кюри и коэффициента электромеханической связи. Максимальное применение нашла пьезокерамика типа цирконат-титанат свинца (ЦТС). Этот материал обладает большими пьезомодулями, высокой прочностью и стабильностью свойств, имеет относительно высокую точку Кю-

ри (290–400 °С). Для контроля на повышенных температурах до 1000 °С иногда применяют ниобат лития ($LiNbO_3$), но чувствительность этого материала несколько меньше. В ряде случаев находят применение сегнетовая соль, кварц и другие пьезоэлектрические материалы.

Кварц имеет высокие значения пьезоконстант давления и деформации, что позволяет создать высокочувствительные преобразователи сигналов АЭ, пригодные для работы при высокой температуре. Реализация высокой чувствительности пьезокварцевого преобразователя сложна из-за его небольшой электрической емкости, составляющей в общем случае единицы пикофарад. Это означает, что даже без соединительного кабеля, при непосредственном подключении усилительной схемы к преобразователю, из-за входной емкости последней могут быть реализованы лишь 25–30 % потенциальной чувствительности преобразователя. При наличии между преобразователем и усилителем даже короткого отрезка кабеля чувствительность уменьшится еще больше. Поэтому использование кварцевых пьезоэлементов в условиях реакторных излучений затруднительно, хотя и не исключено.

Основной недостаток ниобата лития – выделение из него кислорода при высокой температуре. Поэтому преобразователи с пьезоэлементами из ниобата лития при высокой температуре должны работать в атмосфере с определенной концентрацией кислорода, что усложняет их конструкцию. Диэлектрическая проницаемость $LiNbO_3$ значительно меньше, чем у пьезокерамики, хотя и больше, чем у кварца. Следовательно, возникают трудности согласования преобразователей с электронными схемами. Значения пьезоконстант, характеризующих ниобат лития как приемник колебаний, примерно те же, что и у пьезокерамики, или несколько выше.

Наиболее высоким коэффициентом электромеханической связи обладает сегнетовая соль. Для приема продольных волн используется ее 45° X-срез. Она обладает пьезоэлектрическими свойствами лишь в узком интервале температур, легко обезвоживается при малой влажности и, наоборот, при большой влажности (более 85 %) активно поглощает воду. Разлагается при температуре 55 °С [26, 33].

Плохими эксплуатационными свойствами обладают и кристаллы дигидрофосфата аммония. Они растворимы в воде и при влажности 93 % начинают поглощать воду. При температуре 100 °С разлагаются (улетучивается аммиак). Поэтому указанные материалы можно применять лишь в лабораторных условиях при ограничении указанных вредных воздействий.

Обычно пленочные преобразователи обладают по сравнению с другими преобразователями следующими преимуществами: имеют малую толщину, податливы, могут механически сопрягаться с поверхностью любой конфигурации, имеют низкую добротность и малый элек-

трический импеданс. Пьезополимеры могут быть растворены и в виде вязкой массы нанесены на поверхность любого профиля с образованием пленки произвольной толщины. Наконец, на них можно подать большое электрическое напряжение без опасности вызвать деполяризацию. Основные их недостатки – меньший, чем у лучших пьезоэлектриков, коэффициент электромеханической связи и невысокая термостабильность поляризации. Пленочные преобразователи обладают малыми массогабаритными характеристиками. В выходных сигналах таких преобразователей отсутствуют реверберационные (многократные отражения от конструктивных элементов ПАЭ) колебания. По чувствительности они уступают ПЭП на основе пьезокерамики [13].

Пьезокерамические материалы устойчивы к воздействиям ионизирующих излучений и агрессивных сред (разрушаются только в плавиковой кислоте).

3.2.3. Конструкции ПАЭ

На рис. 58 показаны типичные конструкции преобразователей АЭ. Корпус датчика предназначен для защиты пьезоэлемента от механических повреждений и для экранирования от электромагнитных помех.

Применяются корпуса двух типов: с закрытым дном и без него. Первые дают возможность полностью изолировать пьезоэлемент от внешней среды, что способствует более долгому сроку службы датчика, так как защищают от преждевременного износа. К недостаткам таких преобразователей следует отнести сложность конструкции и потери энергии в промежуточных слоях (дно, клеевая прослойка). Корпус ПАЭ может быть выполнен из латуни, стали или другого металла [13].

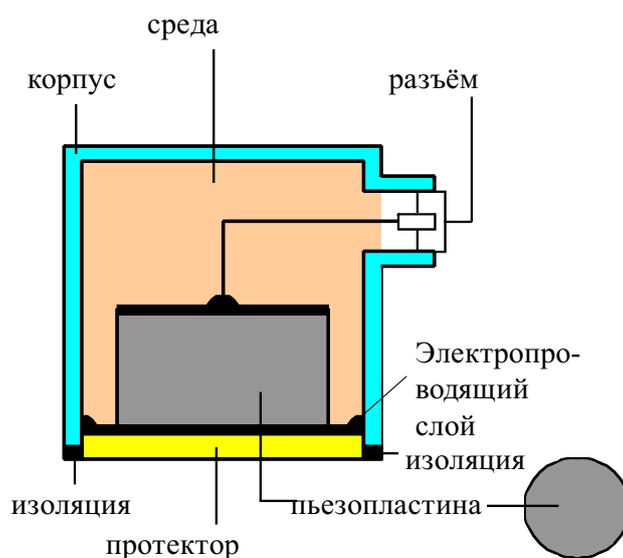


Рис. 58. Конструкции датчиков акустической эмиссии

В качестве активного преобразующего элемента наиболее часто используют пьезоэлектрические пластины или цилиндрические элементы. При применении пьезопластин на частотах 100 кГц – 1 МГц их размеры выбирают таким образом, чтобы использовался резонанс по диаметру. В стержневых или цилиндрических преобразователях используется резонанс по толщине.

Пьезоэлектрическую пластину выбирают такой, чтобы ее толщина d была равна $\lambda_n/2$ и собственная частота соответствовала частоте возбужденных или принимаемых колебаний, т. е.

$$d = \lambda/2 = c_n/2 \cdot f_p,$$

где f_p – резонансная частота ПЭП, λ_n – длина волны в материале пьезопластины, c_n – скорость звука в материале пьезопластины [26].

Диаметр пьезопластины должен быть значительно меньше, чем длина волны. В противном случае, силы, действующие на пьезоэлемент одновременно, взаимно компенсируются и сокращают чувствительность преобразователя (рис. 59).

Пример. Диаметр пьезопластины 10 мм, скорость звука 5000 м/с. Длины волн в 10 мм достигают уже при частоте 500 кГц ($f = c/\lambda = 5000/0,01 = 500$ кГц).

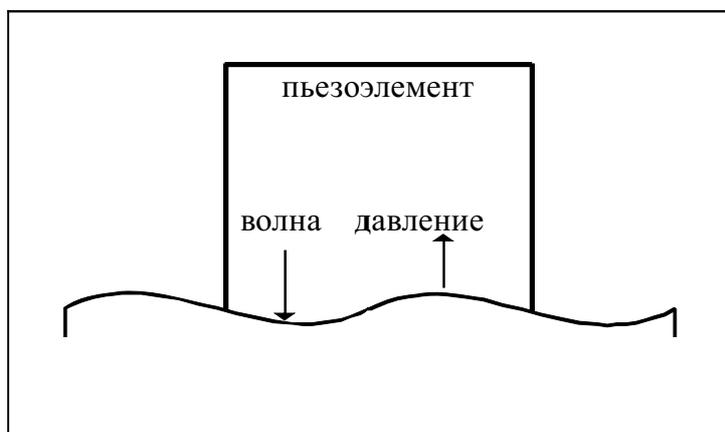


Рис. 59. Принцип работы пьезопластины

Для акустической связи активного элемента с корпусом ПАЭ используют клей или жидкую контактную среду, например, эпоксидную смолу без отвердителя, масло, глицерин и др.

Ширина полосы рабочих частот – одна из важнейших характеристик преобразователей. Она определяет информативность, разрешающую способность, точность измерения параметров, чувствительность неразрушающего контроля и время реверберации. Для неискаженного приема сигналов АЭ необходимо обеспечить равномерную АЧХ прием-

ного тракта, в том числе и приемного преобразователя. Существуют различные способы расширения полосы пропускания: механическое и электрическое демпфирование, использование специальных технологий для изготовления пьезоэлементов и выбор их геометрии, применение корректирующих электрических цепей.

В большинстве ПАЭ, используемых для контроля производственных объектов, демпфер не применяется, поскольку он несколько уменьшает его чувствительность. Демпфер используется для расширения полосы пропускания ПАЭ. Демпфирование пьезоэлементов приводит к тому, что за счет потерь энергии в демпфере время реверберации преобразователя резко уменьшается. Происходит также сглаживание АЧХ. В качестве демпфера наиболее часто используются различные компаунды с наполнителями в виде порошка вольфрама или свинца. В зависимости от весовых частей компаунда и наполнителя в широких пределах можно менять волновые сопротивления демпфера. При механическом демпфировании пьезоэлементов происходит резкое уменьшение чувствительности.

В зависимости от особенностей контролируемого изделия и условий контроля такие преобразователи имеют конструктивные модификации по способу крепления к изделию (с магнитным креплением, с креплением винтами, приклеиваемые), форме протектора (плоские, профилированные под форму изделия), геометрическим размерам и т. д.

Для работы в условиях сильных электромагнитных помех применяется дифференциальный пьезоэлектрический преобразователь (рис. 60).

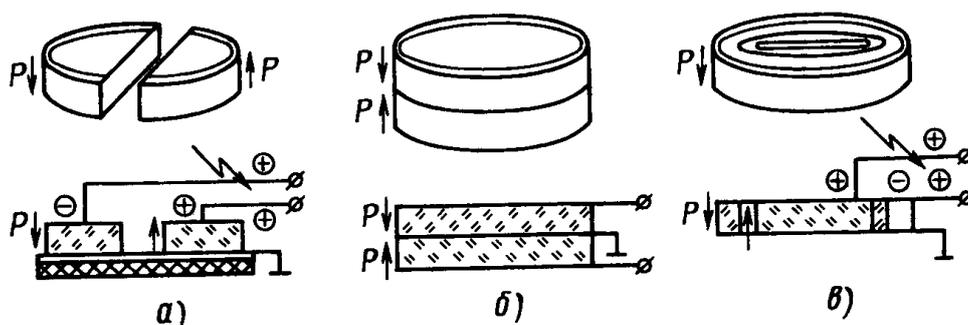


Рис. 60. Различные схемы дифференциального выполнения активного элемента ПАЭ

Один из более простых дифференциальных преобразователей состоит из половинок диска, противоположно поляризованных, которые лежат на общем заземленном электроде (рис. 60, а). Акустическая волна, возбуждающая преобразователь, в каждый момент времени генерирует на пластинах равные, но противоположные по знаку заряды. В ре-

зультате двойного изменения фаз сигналы АЭ сохраняются. Сигналы электромагнитных помех, прошедшие два канала усилителя, оказываются в противофазе и подавляются [14].

В сложных условиях распространения акустических волн необходимо использование датчиков, обеспечивающих в процессе приема селективную регистрацию определенных типов волн. Они бывают следующих конструкций.

Преобразователь «клинового» типа (рис. 61, а) наиболее пригоден для приема поверхностных волн в виде импульсных сигналов, так как в этом случае электрический отклик не затягивается во времени по сравнению с акустическим воздействием. Принцип действия преобразователя следующий: нормальные смещения в распространяющейся поверхностной волне в каждый момент времени возбуждают продольные волны в материале клина, время распространения которых обратно пропорционально задержке, связанной со временем распространения звука по поверхности. Чтобы возмущения одинаковых знаков из разных точек основания клина приходили синфазно к пьезоэлементу, необходимо обеспечить выполнение равенства температур.

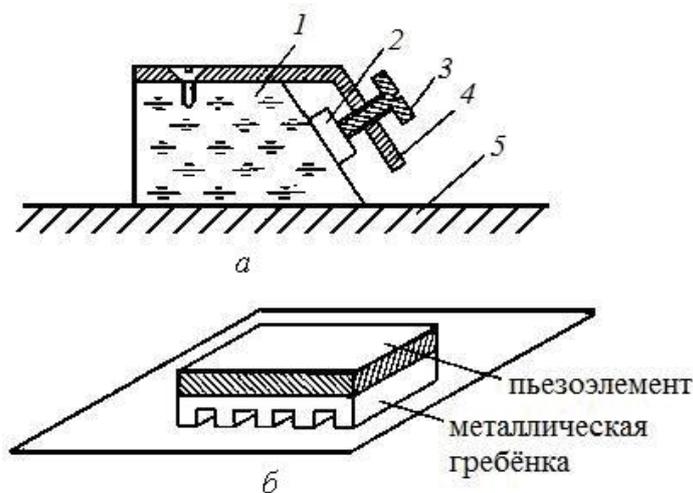


Рис. 61. Преобразователи поверхностных волн «клиновидного» типа (а) и типа «гребенчатая структура» (б):

- 1 – клин; 2 – пьезоэлемент; 3 – поджимной винт; 4 – корпус;
5 – среда распространения волн

Хорошо принимает поверхностную волну преобразователь типа «гребенчатая структура» (рис. 61, б). Такой преобразователь представляет собой металлическую пластину с чередующимися пазами и выступами, период которых равен длине поверхностной волны. На пластине сверху находится пьезоэлемент, чувствительный к продольным колебаниям. Эта конструкция имеет ряд недостатков: если преобразователь предназначен

для приема импульсных сигналов, то электрический импульс на его выходе будет «затянут» на время, равное удвоенному времени распространения волны по длине преобразователя, кроме того, при такой конструкции принимаются продольные волны, приходящие из глубины материала, а поверхностные волны регистрируются не совсем эффективно, так как «активны» только выступы пластины, пазы же не участвуют в преобразовании энергии поверхностной волны. Затухание сигнала увеличивает и согласующий слой на границе металлическая пластинка – пьезоэлемент [33].

3.2.4. Установка ПАЭ на объект контроля

Акустический контакт при использовании контактных ПАЭ обеспечивает передачу акустических волн из объекта в ПАЭ. Контакт обеспечивается прижатием ПАЭ к объекту силовой нагрузкой. Наиболее эффективным способом контакта датчика с деталью является соединение посредством вязкой среды (консистентные связки). Для этой цели пригодны любые связующие вещества, используемые в ультразвуковой дефектоскопии: вазелин, глицерин, смазочное масло, литол, высоковакуумная смазка, обеспечивающую передачу акустических волн и малое их затухание (непревышающее 6 дБ). Прижатие обеспечивается пружиной, дополнительным весом или магнитом. Следует избегать создания чрезмерного или слишком малого давления. Оптимальная величина силы прижатия составляет 1–20 Н. Твердотельный контакт реализуется с использованием клея, обеспечивающего передачу акустических волн с низким их затуханием [7, 13].

Влияние контактного слоя на прием акустических сигналов определяется совокупностью условий: материалами акустического объекта и контактного слоя, резонансной частотой преобразователя, классами чистоты обработки контактирующих поверхностей.

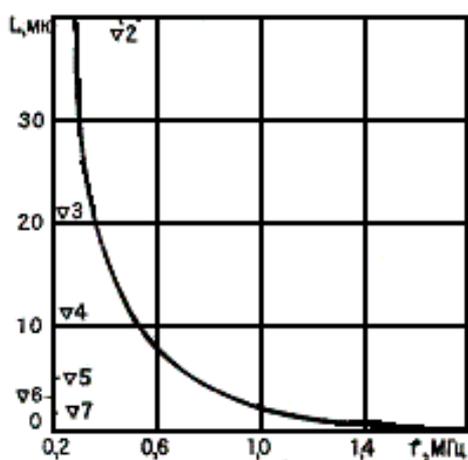


Рис. 62. Оптимальный класс чистоты обработки в зависимости от резонансной частоты преобразователя

На рис. 62 показана зависимость между резонансной частотой преобразователя и классом чистоты обработки поверхности, при которой изменение частотных характеристик не превышает 5 %. При более низком классе чистоты поверхности необходимо учитывать влияние контактного слоя на характеристики преобразователя, которое может быть достаточно велико.

Таким образом, чистота поверхности объекта контроля должна быть не хуже Rz40. При наличии окраски и защитных покрытий, а также кризисы и неровностей поверхности объекта, в зоне контакта возможно уменьшение амплитуды сигнала АЭ и искажение его формы. Если уменьшение амплитуды сигнала АЭ превышает 6 дБ, поверхность объекта в месте установки ПАЭ должна быть очищена от краски или покрытия.

При регистрации АЭ в реакторных материалах установка преобразователя на объект часто невозможна из-за высокой температуры, радиоактивности, воздействия на объект ионизирующих излучений. Наиболее целесообразным способом передачи акустических колебаний на преобразователь, в этом случае является использование волноводов в виде тонких длинных стержней и пластин.

Чаще используют волноводы в виде стержней и проволок, в которых возбуждают продольные волны. В диапазоне частот, в котором между диаметром волновода d_g , с частотой f и скоростью звука в стержне c_0 справедливо соотношение $d_g \cdot f / c_0 \leq 0,4$, распространяется только одна продольная волна, при этом определение амплитуды колебаний по сечению достаточно равномерно (при $d_g \cdot f / c_0 \leq 0,1$ однородно), т. е. сечение звукопровода эффективно участвует в передаче сигналов. Отсутствие других нормальных волн позволяет обеспечить неискаженную передачу сигналов. Волновод при регистрации сигналов АЭ обычно используется в режиме, когда диапазон рабочих частот находится намного выше его нижней резонансной частоты.

3.2.5. Соединение ПАЭ с усилителем

При испытании крупногабаритных конструкций расстояние от ПАЭ до предварительного усилителя может составлять десятки сантиметров и более. В этом случае емкость кабеля может оказывать влияние на амплитуду сигналов АЭ. Этот недостаток практически устраняется, если ПАЭ и предварительный усилитель совмещены в одном корпусе [20].

3.3. Аппаратура для предварительной обработки АЭ сигналов

3.3.1. Предусилители

Одной из основных функций предусилителя (ПУ) является согласование высокого характеристического сопротивления датчика с низким характеристическим сопротивлением последующих блоков аппаратуры. На вход ПУ поступает сигнал с соответствующего ПЭП. Выход усилителя подключен к кабелю длиной 50–100 м. ПУ располагают на конструкции в непосредственной близости от ПЭП, так как емкость кабеля может оказывать влияние на амплитуду сигналов ПЭП. Этот недостаток устраняется, если ПЭП и ПУ совмещены в одном корпусе. Выходное сопротивление ПУ должно быть согласовано с волновым сопротивлением кабеля. ПУ выполняется в металлическом корпусе, благодаря чему значительно ослаблены электромагнитные помехи и имеет небольшое усиление 20–40 дБ, низкий уровень собственных шумов [7, 20].

3.3.2. Усилители

Основной усилитель (ОУ) предназначен для усиления сигналов АЭ до уровня, достаточного для работы анализирующей аппаратуры в необходимом динамическом диапазоне. Обычно ОУ имеет регулируемый коэффициент усиления и конструктивно выполнен совместно с блоком подготовки сигналов к измерению и анализу их параметров [17].

Сигналы АЭ, в зависимости от удаленности датчика от места возникновения дефекта, могут отличаться по амплитуде в 1000 и более раз. Минимальная амплитуда сигнала АЭ на входе усилителя должна быть не ниже уровня собственных шумов усилителя, приведенных ко входу. Для большинства современных усилительных схем уровень собственных шумов ~ 10 мкВ. При нормированном сигнале на выходе усилителя до 5–10 В общее усиление тракта должно быть не менее 10^6 . Такое усиление обеспечивает уверенный прием сигналов АЭ от источников сигналов, удаленных на расстоянии не менее 50 м.

Динамический диапазон усилителя характеризует свойство усилителя выдерживать перегрузки по входному сигналу. Например, динамический диапазон 40 дБ означает, что усилитель без искажений передает сигналы, отличающиеся по амплитуде в 100 раз. При этом от импульса АЭ амплитудой 10 мкВ или 1000 мкВ на входе формирователя должен формироваться только один импульс, что обеспечивает безошибочную регистрацию событий АЭ, происходящих на большом удалении. С учетом максимального удаления источника сигнала от датчика рекомендуется иметь запас по динамическому диапазону. Полный динамический диапазон должен быть не менее 60 дБ.

Усилитель обычно обладает равномерной АЧХ в диапазоне наблюдаемых частот при коэффициенте усиления 60–80 дБ. Характеристика усиления – линейная либо (в случае большого динамического диапазона) логарифмическая [7, 13].

3.3.3. Фильтры

Фильтром устанавливают спектр частот принимаемых сигналов. Оптимально условие, чтобы спектр частот приемника совпадал со спектром сигналов АЭ, но этот спектр очень широк, поэтому частоту приемника выбирают выше частот помех.

3.3.4. Пороговые устройства

После того, как сигнал был принят датчиком и усилен предусилителем, он поступает в основную систему, где вновь усиливается и фильтруется. На следующем важном этапе происходит непосредственно выделение сигнала. Этап заканчивается тем, что когда сигнал превышает установленный порог, в компараторной цепи в цифровом виде генерируется выходной импульс. Связь между сигналом, порогом и импульсом с компаратора проиллюстрирована на рис. 63. Уровень порога обычно регулируется оператором; этот параметр является ключевой переменной, которая определяет чувствительность АЭ метода при испытании.

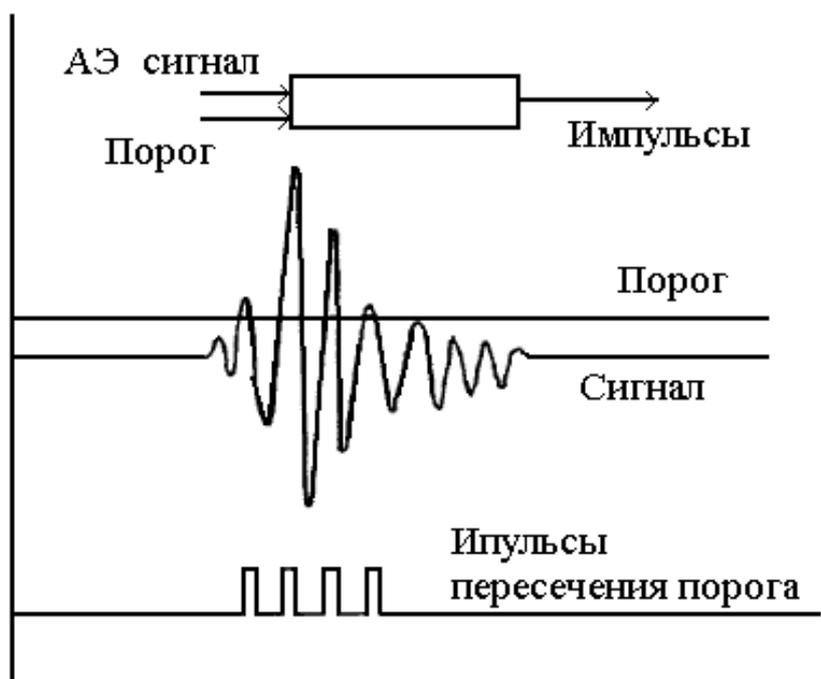


Рис. 63. Принцип регистрации АЭ сигнала

Кроме того, в зависимости от типа АЭ оборудования, чувствительность можно контролировать путем регулирования усиления основного усилителя.

Пороговое устройство является обязательным элементом аппаратуры АЭ, так как в любом случае на вход аппаратуры (наряду с полезными сигналами) может поступать и шум, вызванный эксплуатационными и технологическими причинами. В аппаратуре должна быть предусмотрена регулировка уровня ограничения.

Компараторы используются для отпираания соответствующих схем на протяжении интервалов времени, в течение которых амплитуда АЭ сигналов превышает ранее заданное пороговое значение. Оно задается ЦАП, а в компараторе происходит сравнение амплитуд поступившего сигнала и порогового. С компаратора импульс может поступать на счетчик импульсов АЭ [7, 9].

3.3.5. Аналогово-цифровые и цифроаналоговые преобразователи

Наиболее результативной методикой АЭ контроля является запись сигналов от нескольких ПЭП, установленных на конструкции, с помощью быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Это позволяет при последующем анализе полностью восстановить последовательную картину излучения сигналов АЭ [36].

При обработке сигнала в вычислительных устройствах его отсчеты представляются в виде двоичных чисел, имеющих ограниченное число разрядов. Процесс преобразования отсчетов сигнала в числа называется квантованием по уровню.

Сигнал, дискретный во времени, но не квантованный по уровню, называется *дискретным сигналом*. Сигнал, дискретный во времени и квантованный по уровню, называют *цифровым сигналом*. Сигналы, квантованные по уровню, но непрерывные во времени, на практике встречаются редко. Разницу между аналоговыми, дискретными и цифровыми сигналами иллюстрирует рис. 64.

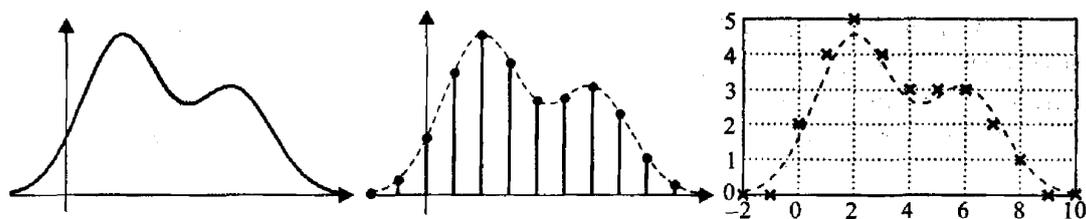


Рис. 64. Аналоговый, дискретный и цифровой сигналы

Обобщенная структура системы цифровой обработки сигналов приведена на рисунке. На вход поступает аналоговый сигнал. Его временная дискретизация и квантование по уровню производятся в *аналого-цифровом преобразователе* (АЦП).

Вообще эти два процесса – дискретизация и квантование – являются независимыми друг от друга, но они, как правило, выполняются внутри одной микросхемы. Выходным сигналом АЦП является последовательность чисел, поступающая в цифровой процессор ЦП, выполняющий требуемую обработку. Процессор осуществляет различные математические операции над входными отсчетами. Ранее полученные отсчеты и промежуточные результаты могут сохраняться в памяти процессора для использования в последующих вычислениях. Результатом работы процессора является новая последовательность чисел, представляющих собой отсчеты выходного сигнала. Аналоговый выходной сигнал восстанавливается по этой последовательности чисел с помощью *цифроаналогового преобразователя* (ЦАП). Напряжение на выходе ЦАП имеет ступенчатую форму (это также показано на рис. 65), при необходимости оно может быть преобразовано в плавно меняющийся выходной сигнал с помощью сглаживающего фильтра Φ .

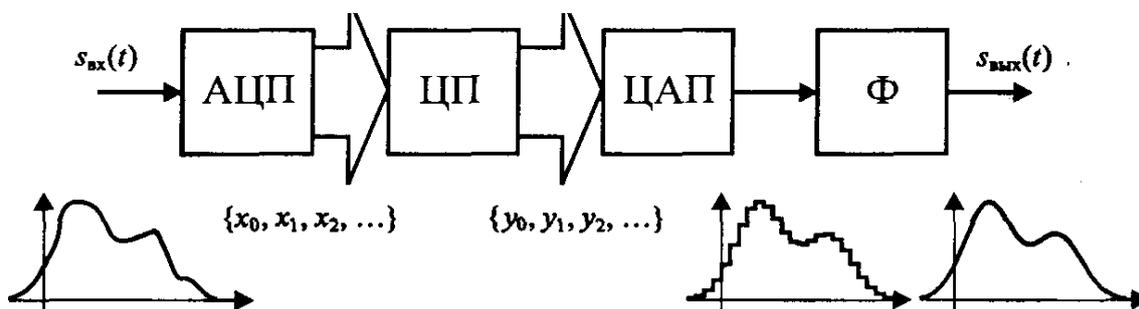


Рис. 65. Структурная схема системы цифровой обработки сигналов

3.3.6. Устройства предварительной обработки информации: дискриминаторы уровня, длительности и других параметров сигналов и другие устройства аналоговой обработки

После усиления сигналы АЭ поступают на устройства накопления и обработки информации и на осциллограф для непрерывного визуального контроля за сигналами.

Временной анализатор определяет разницу во времени прибытия каждого выделенного сигнала от нескольких датчиков АЭ. Анализатор также выполняет функцию накопителя данных для последующей обработки на ЭВМ с целью определения местоположения источника в произвольный момент времени [7].

Измерение амплитуд сигналов АЭ

Учитывая, что основная информация о процессах развития повреждений содержится в огибающей акустического сигнала, для ее выделения необходимо использовать *амплитудный детектор* и после этого производить разделение сигнала по каналам.

Амплитудный детектор осуществляет выделение огибающей акустического сигнала и разделение его на постоянную и переменную составляющие. Под постоянной составляющей подразумевается усредненное значение амплитуды, являющейся функцией энергии АЭ. Постоянная составляющая подается на канал регистрации амплитуды осциллографа и на преобразователь энергии. Переменная составляющая огибающей акустического сигнала поступает на амплитудный дискриминатор-формирователь (или пороговое устройство и формирователь), преобразующий сигналы произвольной формы в прямоугольные импульсы, калиброванные по амплитуде и длительности.

Преобразователь энергии, вырабатывающий аналоговый сигнал, пропорциональный квадрату входного процесса, может содержать перемножитель, дискриминатор уровня, фильтр, усредняющий результат за определенный промежуток времени. Таким образом, на выходе получают сигнал постоянного тока, пропорциональный энергии АЭ, превышающей заданное пороговое значение.

Амплитудный дискриминатор-формирователь (АДФ) предназначен для отделения сигналов АЭ от создаваемых шумов по амплитудному признаку. При превышении сигналом установленного порога ограничения АДФ вырабатывает на выходе прямоугольный импульс, нормированный по длительности, который затем поступает на обработку в счетные устройства для измерения параметров сигналов.

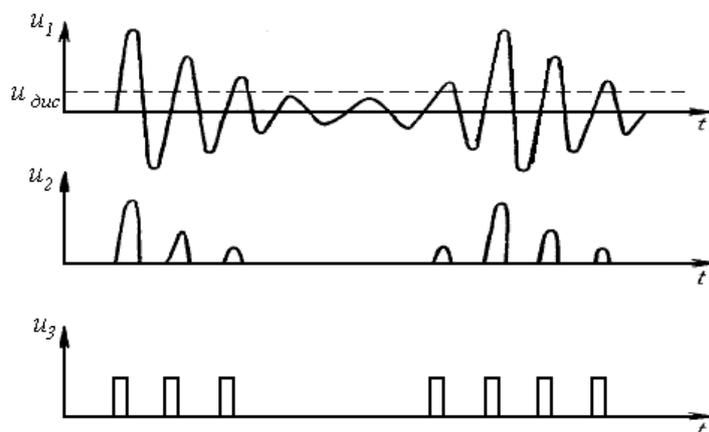


Рис. 66. Временная диаграмма работы АДФ

Порог ограничения (дискриминации) обычно устанавливается ступенчато с постоянным шагом. Используют также логарифмические ступени ограничения.

На рис. 66 приведена временная диаграмма, иллюстрирующая работу АДФ в режиме подготовки сигналов для измерения суммарной АЭ или скорости счета. При измерении таких параметров АЭ, как общее число импульсов или активность, перед дискриминатором устанавливают дополнительное устройство выделения огибающей сигналов АЭ (детектор).

С формирователя сигнал подается на интенсиметр, регистрирующий скорость счета.

Интенсиметр предназначен для измерения числа статистически распределенных импульсов, приведенных к единице времени. Таймер вырабатывает синхронизирующие импульсы для получения интенсивности АЭ. Блок может работать в двух режимах: в одном он осуществляет сброс показаний счетчика импульсов через выбранные промежутки времени, в другом режиме вырабатывается управляющий импульс, при воздействии которого показания счетчика передаются в запоминающее устройство. Информация выводится на осциллограф и счетчик импульсов. Информация со счетчика регистрируется цифропечатающим устройством.

Логарифмический преобразователь вырабатывает напряжение, пропорциональное логарифму полного числа импульсов, поступивших на вход, или логарифму числа импульсов в единицу времени (скорость счета АЭ).

Регистрация амплитуд сигналов в логарифмическом масштабе более эффективна, чем в линейном. При использовании линейного масштаба концевая часть импульсов часто не регистрируется из-за малости амплитуд. При логарифмическом масштабе все сигналы полностью попадают в рабочий диапазон, так как коэффициент усиления сигнала возрастает с уменьшением его амплитуды. Это позволяет регистрировать без потери стабильности и точности АЭ сигналы, имеющие большое различие по амплитуде.

Нормализатор импульсов формирует для анализа импульсы из сигналов (рис. 67), конструктивно выполнен в виде самостоятельного блока.

Амплитудный анализатор выполняет распределение импульсов АЭ по амплитудам.

Спектроанализаторы

Одной из наиболее информативных характеристик излучения является спектральная плотность сигнала АЭ. АЭ представляет собой нестационарный случайный процесс, статистические характеристики которого изменяются во времени. Для частотного анализа таких процессов применяют спектроанализаторы параллельного действия, видеоманитовфон или спектроанализатор последовательного действия.

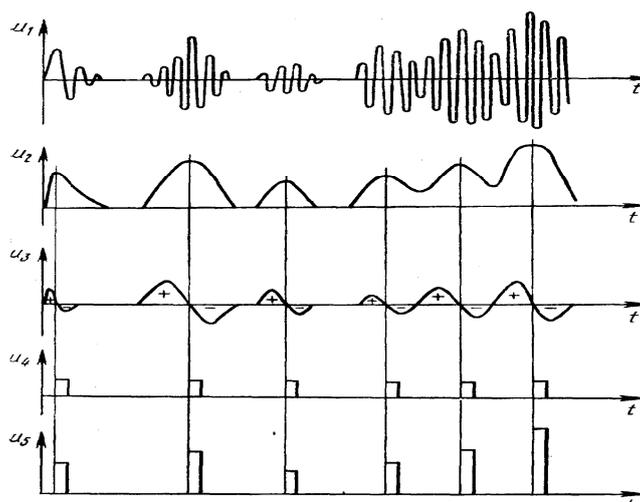


Рис. 67. Временная диаграмма работы нормализатора импульсов:
 u_1 – напряжение на выходе усилителя; u_2 – напряжение огибающей на выходе детектора; u_3 – напряжение первой производной на выходе дифференциатора;
 u_4 – импульсы на выходе ждущего мультивибратора;
 u_5 – импульсы на выходе модулятора

Для измерения спектров акустических сигналов разработано несколько модификаций спектроанализаторов параллельного действия. Анализаторы оснащены блоками накопления и индикации спектров, которые позволяют заполнить некоторое количество спектрограмм и выводить их для наблюдения на экран. Возможность регулировки коэффициентов передачи каналов позволяет при измерениях спектров автоматически учитывать АЧХ исследуемого объекта и ПЭП [33].

Наиболее распространенными на практике информационными параметрами являются сумма импульсов АЭ и скорость счета. Это объясняется тем, что для их регистрации требуется выполнить только одно условие – переход через порог ограничения. Затем все импульсы, превышающие порог ограничения, либо формируются в виде прямоугольных импульсов одинаковой амплитуды и длительности и регистрируются счетчиком, либо преобразуются в цифровую форму и поступают для дальнейшей обработки.

3.4. Аппаратура для отображения и обработки АЭ информации

3.4.1. Акустические сигнализаторы

Звуковые сигнализаторы. Акустический способ представления сигналов удобен для оператора, мобилизуя его внимание при возникновении или проявлении особенностей сигналов АЭ. Для представления сигналов в акустической форме их частотный спектр с помощью вспо-

могательного генератора переносят в область слышимых частот. Может быть использовано и простое амплитудное детектирование сигналов, в результате которого выделяется их огибающая, имеющая составляющие в звуковом диапазоне частот. Также применяется и *световая сигнализация* при превышении определенного уровня амплитуды, активности или эффективного значения [13].

3.4.2. Цифровые регистраторы

Запоминающие устройства современных быстродействующих ЭВМ обеспечивают получение и обработку информации в реальном масштабе времени.

В современных системах обработка и анализ акустических сигналов осуществляются в следующем порядке:

- одновременно с оцифровкой поступающего сигнала АЭ локализуется пространственное положение источника и отбрасываются ложные сигналы;
- импульсы, местоположение которых может быть точно локализовано, поступают в ходе обработки в блок спектрального анализа и блоки определения традиционных параметров АЭ (энергетических характеристик и числа событий АЭ).

Импульсы с системы преобразователей после усиления и определенной предварительной обработки преобразуются в числовой код, содержащий информацию о номерах каналов, в которых приняты сигналы, об амплитуде и времени поступления импульса в канал. Обработка полученной цифровой информации производится с помощью ЭВМ, которая запоминает информацию, локализует источники эмиссии, наблюдает за развитием эмиссии в опасных точках, отображает информацию в форме, удобной для визуального наблюдения, и в случае необходимости выдает сигнал остановки объекта при возникновении опасной ситуации.

Цифровые счетчики осуществляют счет числа импульсов в течение всего времени эксперимента или на отдельных временных отрезках. Современные счетчики обычно комплектуют цифропечатающим устройством, автоматически регистрирующим результаты счета и освобождающим оператора от необходимости записи результатов.

ГЛАВА 4 ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ АЭ КОНТРОЛЯ

Работы по АЭ диагностике проводятся по программе, которая разрабатывается и утверждается исполнителем и согласуется с заказчиком работы. Программа работ разрабатывается индивидуально на каждый обследуемый объект и регламентирует все этапы проведения контроля, критерии оценки качества, способы анализа результатов [22].

Перед проведением АЭ контроля исполнитель должен тщательно изучить объект контроля с целью получения данных для разработки конкретной технологии АЭ контроля данного объекта.

Необходимые акустические и АЭ параметры объекта контроля – это данные о характере посторонних шумов, затухания упругих колебаний в объекте в том диапазоне, который используется для контроля и измерение скорости распространения сигнала АЭ в материале конструкции. Исследование акустических свойств объекта проводится для получения данных, которые используют для составления схемы расстановки ПАЭ, определения их количества, установления критерия, по которому оценивается состояние объекта контроля по результатам АЭ контроля.

4.1. Аттестация аппаратуры

Аттестация аппаратуры – это установление соответствия параметров и характеристик аппаратуры установленным требованиям.

Изготовитель аппаратуры проводит измерение и определение всех параметров и технических характеристик аппаратуры. При эксплуатации аппарата АЭ должна ежегодно проходить аттестацию.

4.1.1. Источники имитационных сигналов

Имитаторы сигналов АЭ используют для оценки точности локации объектов и проверки работоспособности аппаратуры. Эта процедура получила название калибровки (градуировки) [7, 13].

Калиброванный по амплитуде упругий сигнал можно возбудить, бросая на поверхность объекта шарик определенной массы с определенной высоты. Для такого сигнала характерен низкочастотный спектр (не выше 0,15 МГц). Сигналы АЭ имитируют также, царапая поверхность или прижимая к ней вращающуюся металлическую щетку. Таким образом, трудно гарантировать постоянную амплитуду и частотный спектр. В качестве имитатора применяют электроискровой разряд, но здесь мешают возникающие электромеханические помехи.

Имитационным источником возбуждения акустического сигнала в виде ступенчатой функции может служить *излом стеклянной капиллярной трубочки*, изготовленной из боросиликатного стекла. Рекомендуется выбирать внешний диаметр трубочки в диапазоне 0,1–0,3 мм. Диаметр внутреннего канала должен быть равен примерно толщине стенки. Необходимо, чтобы сила, при которой происходит излом трубочки, находилась в диапазоне 1–20 Н.

В качестве источника сигнала используют также излом графитового стержня карандаша (источник Су–Нильсена). Диаметр стержня выбирают в диапазоне 0,2–0,5 мм, твердость ТМ – 2Т (НВ – 2Н) [22].

На наконечник карандаша надевают полимерное кольцо-насадку (рис. 68), чтобы избежать удара металлического наконечника карандаша при сломе грифеля, что позволяет имитировать сигнал АЭ, близкий к истинному.

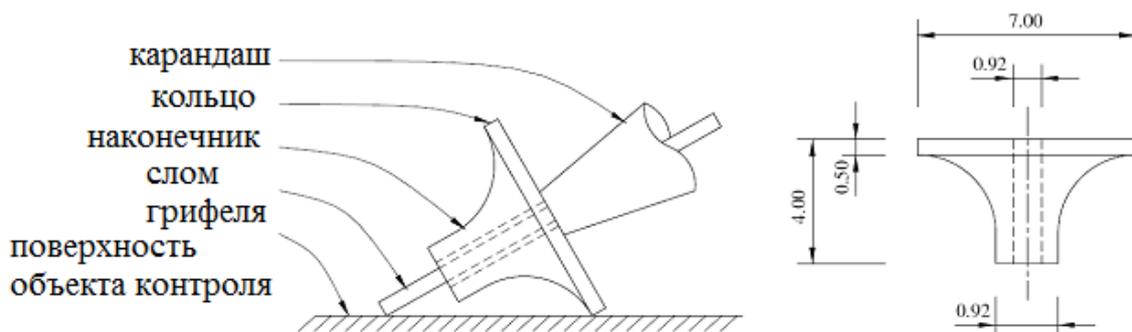


Рис. 68. Схема наконечника на имитатор Су–Нильсена

В качестве источника акустического сигнала используют также *широкополосный пьезоэлектрический преобразователь*, применяемый в ультразвуковом контроле, в частности ПАЭ с пьезоэлементом переменной толщины и (или) диаметра. В этом случае преобразователь возбуждается электрическим импульсом длительностью не более 0,1 мкс, вырабатываемым импульсным генератором.

Калибровочный импульсный сигнал можно получить также с использованием *импульсного лазера*. Энергия излучения лазера может изменяться в широких пределах от 0 до нескольких джоулей. Длительность импульсов составляет 30–50 нс. При плотности энергии 12 Дж/см² амплитуда механических импульсов составляет $3 \cdot 10^{-10}$ м.

Для градуировки ПАЭ разработана также *стержневая цилиндрическая мера* продольной ультразвуковой волны. Мера представляет собой металлический стержень диаметром 4 мм и длиной 400–600 мм, на одном конце которого установлен пьезоэлемент. Его возбуждают в диапазоне частот и бесконтактным, например, лазерным устройством измеряют смещение рабочего

торца стержня. Затем на рабочий торец стержня устанавливают аттестуемый ПАЭ и возбуждают пьезоэлемент меры в рабочем диапазоне частот, измеряют напряжение на излучающем пьезоэлементе и на аттестуемом ПАЭ.

Метод, основанный на возбуждении акустического шума, возникающего при *электрохимическом взаимодействии металла и электролита*. С помощью такого метода можно поддерживать чувствительность прибора постоянной с погрешностью 2–4 %.

Для градуировки преобразователя возможно применение *электроискрового разряда*. При проскакивании электрической искры в воздушном промежутке между двумя электродами возникает ударная волна. При воздействии этой волны на поверхность калибровочного блока или, непосредственно на ПАЭ, в последнем возбуждается упругий импульс длительностью порядка нескольких микросекунд. Этот импульс можно использовать в качестве сигнала, имитирующего импульс АЭ, и с его помощью определить частотную характеристику ПАЭ. Основным недостатком этого метода – высокий уровень электромагнитных помех.

4.1.2. Аппаратура для аттестации

При проведении испытаний аппаратуры АЭ рекомендуется использовать приборы и оборудование, указанные в табл. 7 (ориентировочные типы приборов и их основные параметры) [29].

4.1.3. Контролируемые характеристики

Аттестации подлежат основные параметры и технические характеристики аппаратуры АЭ (в скобках указаны требования к данным параметрам):

- напряжение собственных шумов усилительного тракта, приведенное к входу (не должно превышать 5 мкВ);
- диапазон рабочих частот – это область, лежащая между частотами среза, на которых значения амплитудно-частотной характеристики на 3 дБ меньше ее значения на среднегеометрической частоте (10 кГц – 1 МГц);
- неравномерность амплитудно-частотной характеристики (не более ± 3 дБ);
- ослабление сигнала за пределами диапазона рабочих частот (при расстройке относительно частот среза на октаву (в 2 раза) по каждому каналу АЭ аппаратуры, не менее 30 дБ);
- значение коэффициента усиления усилительного тракта (не менее 60 дБ);
- динамический диапазон усилительного тракта (не менее 60 дБ).

Таблица 7

Средства для аттестации АЭ аппаратуры

№ п/п	Наименование средств измерения	Используемые параметры	Погрешность
1	Генератор сигналов специальной формы	Диапазон частот 1 кГц – 2 МГц	±2 %
2	Осциллограф	Полоса частот 0–10 МГц, диапазон напряжений 10 мВ–40 В	±5 %
3	Вольтметр среднеквадратического сигнала	Диапазон измеряемых напряжений 0,1 мВ–10 В, диапазон частот 1 кГц–2 МГц	±2,5 %
4	Генератор импульсов	Частота повторения 2 Гц–10 кГц, длительность 10 мкс–200мс	±2 %
5	Регулируемый аттенюатор	60 дБ, дискретность 0,5 дБ	0,2 дБ
6	Генератор радиоимпульсов	Частота повторения 2 Гц–10 кГц, частота заполнения 10 кГц–1 МГц	
7	Измеритель временных интервалов	Диапазон интервалов 10 мкс–100 мс	0,01 %
8	Частотомер	Диапазон частот 2 Гц–10 кГц	0,01 %
9	Генератор шума	Диапазон частот 1 Гц–10 кГц	
10	Анализатор спектра	Диапазон частот 2 Гц–10 кГц	
11	Вольтметр постоянного тока	Диапазон напряжений 1 мВ–10 В	0,1 %
12	Электронный имитатор АЭ		

Динамический диапазон в децибелах определяется по формуле:

$$D_d = 20 \cdot \lg \frac{u_{ск}}{u_{ш}}$$

где $u_{ск}$ – среднеквадратическое значение выходного напряжения, $u_{ш}$ – среднеквадратическое значение выходного шума.

Для аппаратуры, которая имеет пороговое устройство, динамический диапазон есть отношение максимального значения неискаженного сигнала к уровню минимального значения порога. Для его определения применяется выражение

$$D = 20 \cdot \lg \frac{u_{max}}{u_n}$$

где D – динамический диапазон прибора, u_{max} – значение сигнала, при котором проходят неискаженными сигналы с наибольшими амплитудами, u_n – значение порога, при котором производится регистрация;

- пороговые уровни (диапазон регулировки порогового напряжения, приведенного ко входу 20–80 дБ, разрешение 1 дБ);
- максимальная скорость обработки импульсов АЭ не менее 1000 1/с при работе в одноканальном режиме;
- измеряемые параметры сигналов АЭ: амплитуда АЭ импульса, длительность, число выбросов, число импульсов, время прихода АЭ импульса.

4.1.4. Контроль работоспособности аппаратуры

После транспортировки, перед выполнением работ на объекте контроля, система АЭ контроля подвергается проверке [22].

Цель проверки: определение работоспособности и качественной работы плат по каждому каналу основного блока и блока расширения, определение амплитудного разброса каждого преобразователя.

Проверка работоспособности и чувствительности всех используемых каналов аппаратуры после установки ПАЭ на объект контроля проводится с использованием имитатора АЭ. На расстоянии 10 см от ПАЭ производится имитация АЭ сигнала. Амплитуда сигнала для каждого датчика не должна отличаться более чем на 4 дБ, т. е. 96 дБ. Фиксируется также амплитуда сигнала на соседних датчиках. Эта информация затем используется для обработки полученной информации. Данные заносятся в таблицу чувствительности (рис. 69). Каналы, которые не проходят такую проверку, должны быть проверены дополнительно, отремонтированы или исключены.

Проверка проводится до и после контроля, чтобы подтвердить неизменное качество соединения преобразователя с объектом и работоспособность остальных составных частей системы.

4.2. Ограничение влияния помех и шумов. Выявление помех и их источники

Энергетический уровень АЭ весьма мал и оценивается величинами 1–10 до 10^{10} – 10^{14} эВ. Энергия сигналов, возникающая при хрупком-разрушении макрообъектов, может достигать значений 10^{18} – 10^{20} эВ [7, 13, 34]. Частотный диапазон сигналов АЭ может достигать от звуковых до сотен МГц. В связи с этим в качестве мешающих факторов при измерении АЭ могут выступать:

- внешние шумы (от движения механизмов и обслуживающего персонала, шумы, связанные с турбулентностью течения, кипением и кавитацией рабочей жидкости в объекте контроля и др.);
- работа насосов, моторов и других механических устройств;
- действие электромагнитных наводок;
- воздействие окружающей среды (дождя, ветра и т. д.);
- шумы электронной аппаратуры.

	1	2	3	4	5	6
1	88	84	80	85	69	77
2	86	88	94	94	94	94
3	80	94	88	94	86	94
4	82	94	93	88	92	92
5	69	93	86	91	88	84
6	73	94	94	90	85	88

Рис. 69. Схема и результат автоматической проверки преобразователей – таблица калибровки

Поэтому при проведении АЭ контроля и диагностики качества материала существенное значение приобретают проблемы борьбы с посторонними шумами и распознавания сигналов АЭ на фоне шумов.

Шумы классифицируются:

- в зависимости от источника происхождения на акустические (механические) и электромагнитные;
- в зависимости от вида сигнала шумов разделяются на импульсные и непрерывные;
- в зависимости от местоположения источника разделяются на внешние и внутренние.

4.2.1. Электромагнитные помехи

Источником электромагнитных помех могут быть электромоторы, люминесцентные лампы [17].

Электромагнитные помехи характеризуются малой длительностью и большой амплитудой более 50 дБ, низким счетом.

Электромагнитные помехи имеют более широкий спектр частот и методами частотной фильтрации от них избавиться невозможно. Поэтому предпринимаются меры по тщательному экранированию элементов аппаратуры АЭ (датчиков, усилителей и др.), снижению уровня помех конструктивными и схемными решениями. Эффективным средством борьбы с электромагнитными помехами является выполнение датчика АЭ в виде дифференциальной конструкции и выполнение преусилителя по дифференциальной схеме. В борьбе с сетевыми помехами, распространяющимися по воздуху, хорошо помогает запираание усилителя во время действия помехи [33].

4.2.2. Акустические помехи

При измерении параметров АЭ в производственных условиях механические шумы представляют собой наиболее распространенный мешающий фактор. Под механическими шумами здесь понимаются колебания поверхности исследуемого объекта под действием внешних причин, не связанных с АЭ материала.

Шумы имеют различное происхождение и, как правило, уменьшаются с частотой. Например, для корпусов атомных реакторов амплитуда гидравлических шумов при частотах ниже 300 кГц обычно намного больше сигналов АЭ, а при частотах выше 800–1000 кГц шумы практически не мешают контролю. Кавитационные шумы, возникающие от захлопывания пузырьков в жидкости, имеют частотный диапазон до 1–1,2 МГц. Они отличаются от сигналов АЭ большим количеством сигналов на единицу времени и не зависят от приложенной нагрузки.

Источниками акустических шумов могут быть подвижки на опорах объекта контроля, вызванные механическим трением при заполнении его испытательной жидкостью из-за изменения давления в объекте. Шум в патрубках при заполнении также является источником помех. В момент заполнения объекта данные не снимаются [22].

4.2.3. Аппаратурные шумы

Любая электрическая цепь является генератором случайного процесса, обусловленного статистическим характером движения электронов, и называется собственным шумом цепи. При измерении сигналов АЭ, также являющейся случайным процессом, уменьшение и учет влияния собственных шумов электронной аппаратуры важны, так как уровень шумов ограничивает чувствительность аппаратуры. Собственные шумы элементов электрических цепей разделяют на тепловые, дробовые и мерцательные. Тепловые шумы возникают из-за хаотического движения свободных электронов в проводниках, а также флуктуацией плотности носителей в полупроводниках. Дробовые шумы связаны с дискретной природой носителей тока и возникают под действием электрического поля. Тепловой и дробовой шумы характеризуются слабой частотной зависимостью. Мерцательный шум имеет частотную зависимость вида $1/f$. Его возникновение связывают с медленными флуктуациями сопротивлений, непостоянством электронной эмиссии с катода, случайными изменениями плотности носителей тока в полупроводниках [7].

4.2.4. Методы ограничения влияния помех

Для подавления шумов используют их различие от регистрируемых сигналов по спектральным, амплитудным, временным и пространственным характеристикам.

Испытания объекта подразделяют на предварительные и рабочие.

Предварительные испытания проводятся при циклическом нагружении объекта (сосуда, трубопровода и т. д.) в диапазоне давлений до четверти рабочего с целью исследования ОК как акустического канала, выбора схемы расстановки преобразователей, анализа источников шумов, установления уровня дискриминации, оценки погрешности определения координат источников АЭ.

Во время рабочих испытаний производится сбор информации контроля. После предварительного нагружения ОК принимаются меры по устранению или минимизации посторонних шумов.

Механический шум имеет характеристики, по которым можно отличить от сигналов АЭ, идущих от растущих дефектов. Шумовые сигналы имеют относительно низкую частоту с небольшим временем нарастания.

Всплески АЭ от трещин в целом имеют время нарастания (от порога до пика) менее 25 мкс, если преобразователь находится рядом с источником. Механический шум редко имеет такое время нарастания.

Время нарастания как от шума, так и сигналов АЭ увеличивается в зависимости от источника до датчика из-за затухания высокочастотных компонентов. В некоторых случаях дискриминация по времени нарастания может быть полезной при отсекании АЭ от механических шумов.

В табл. 8 приведена отличительная характеристика основных источников шума при АЭ контроле.

Таблица 8

Отличительные характеристики некоторых источников шума

	Окружающие условия	Уровень сигнала (частота, амплитуда)	Пространство	Время	Характеристики АЭ сигнала
Активные дефекты			-	+	
Утечки	+	+	+		-
«Машина»		+			
Трение	+	-	-	-	-
Электричество	+	+			+
Атмосферные явления	+	-			+
Вибрация	+				
Кавитация	+				-
Примечание: + – усиленный индикатор – – ослабленный индикатор					

Частотная фильтрация сигналов

Частотная фильтрация основана на различии частотного спектра сигналов АЭ и помех. Метод частотной фильтрации наилучшие результаты дает при выделении сигнала АЭ из механических шумов. Как было показано выше, спектр частот сигналов АЭ весьма широкий и простирается до частот десятков мегагерц. Частотный спектр механических ударов не превышает 200 кГц, спектр шумов трения достигает 1 МГц.

Таким образом, выбор диапазона частот приборов АЭ должен быть в диапазоне нескольких мегагерц. Но на высоких частотах затухание ультразвуковых волн значительно, что ограничивает дальность действия приборов АЭ. На частотах 2–5 МГц дальность действия в объектах из стали не превышает нескольких десятков сантиметров. В связи с этим в большинстве приборов АЭ диапазон частот выбран равным от 20–100 кГц до 2–3 МГц. А для успешной работы в этом диапазоне в каждом конкретном случае стремятся уменьшить уровень шумов [33].

Используя данный метод отстройки от шумов, теряется информация, заключенная в низкочастотной составляющей сигналов АЭ.

Дискриминация сигналов по амплитуде

Распространенным способом выделения сигналов АЭ из шумов является амплитудная дискриминация. В большинстве приборов АЭ имеются пороговые устройства, которые позволяют регулировать пороговое напряжение. Сигналы, амплитуда которых превышает пороговое напряжение, пропускаются для дальнейшей обработки; сигналы с меньшей амплитудой блокируются [14].

В практике АЭ контроля перед проведением испытаний регулировкой порогового напряжения добиваются, чтобы прибор не регистрировал сигнал шумов. При этом те сигналы, которые в процессе контроля превышают пороговый уровень, считаются сигналами АЭ. Большая часть сигналов АЭ отсеивается, теряется значительная информация. Амплитудная дискриминация позволяет выделять только те сигналы АЭ, которые значительно превосходят уровень шумов.

Сигналы АЭ, уровень которых близок к уровню шумов, такими методами невозможно выделить.

В некоторых системах АЭ контроля предусмотрен «плавающий» пороговый уровень (рис. 70). В случае относительно медленного изменения значения шума пороговое напряжение изменяется, сохраняя установленную предварительную разницу напряжений. Импульсы АЭ малой длительности и регистрируемые достаточно редко не влияют на пороговое напряжение. Это достигается выбором постоянной времени де-

тектирующей цепи. Данный метод дает хорошие результаты только в случае значительных статистических параметров шума и импульсов АЭ. Это процессы, возникающие в результате образования микротрещин и регистрируемые на фоне шумов кристаллизации металла сварочной ванны при газоэлектрической сварке.

В многофункциональной многоканальной акустико-эмиссионной системе МАЭС (ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова») в качестве характеристики волновой формы импульсов используется параметр формы, определяемый как отношение средней амплитуды сигнала к его пиковой амплитуде. Для большинства сигналов акустических помех параметр формы находится в диапазоне 40–100 %, соответственно для полезных сигналов (сигналов АЭ природы) указанный параметр находится, как правило, в диапазоне 0–40 %.

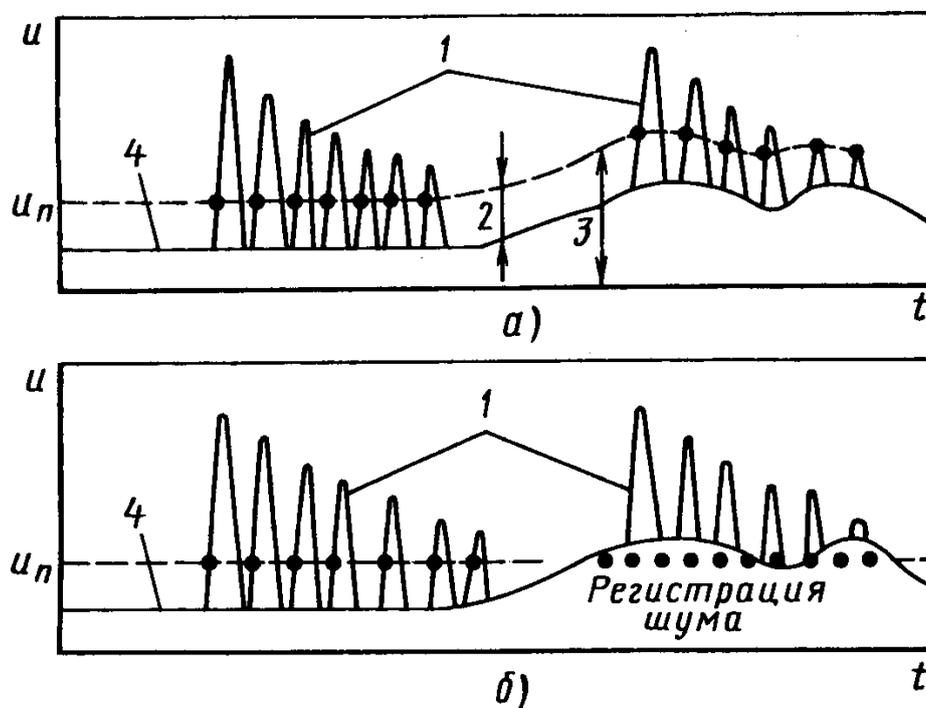


Рис. 70. Увеличение помехоустойчивости с использованием «плавающего» порога: а – регистрация выбросов при «плавающем» пороге; б – регистрация выбросов при фиксированном пороге; 1 – выбросы АЭ; 2 – фиксированная граница; 3 – плавающий порог; 4 – уровень шума

Дискриминация сигналов по времени

Для разделения полезных и мешающих сигналов по временным признакам используют схемы временной селекции. Временная дискриминация и как ее разновидность, параметрическая дискриминация, широко применяемые при усталостных испытаниях, основаны на пропуски сигналов для дальнейшей обработки только при определенных зна-

чениях параметра (нагрузки) или в определенные моменты времени. Таким методом удается избавиться от громадного числа помех, возникающих в результате трения и других причин. Выделение сигналов по местоположению источника широко применяется в аппаратуре с определением координат по разнице во времени прихода сигналов на датчики АЭ. Дискриминация по местоположению также проводится с использованием направленных акустических преобразователей АЭ [7, 14, 33].

К этому виду селекции можно отнести пространственную селекцию. На контролируемом объекте один или несколько преобразователей находятся вблизи зоны возникновения АЭ, и, кроме того, несколько вспомогательных преобразователей установлены симметрично относительно зоны возникновения эмиссии на несколько большем расстоянии от нее. Сигнал АЭ, возникший вне контролируемой зоны, достигает сначала одного из вспомогательных преобразователей. Последний выработывает сигнал, запирающий схему пропускания, нормально открытую при отсутствии блокирующих сигналов. При возникновении сигнала в контролируемой зоне он раньше обнаруживается одним из основных преобразователей и беспрепятственно проходит на регистрацию.

Электромагнитное экранирование

Электромагнитные помехи имеют более широкий спектр частот и методами частотной фильтрации от них избавиться невозможно. Поэтому предпринимаются меры по тщательному экранированию элементов аппаратуры АЭ (датчиков, усилителей и др.), снижению уровня помех конструктивными и схемными решениями. Для электрического экранирования корпус ПЭП изготавливают из металла или диэлектрика с металлической изоляцией изнутри [33].

В борьбе с сетевыми помехами, распространяющимися по воздуху, хорошо помогает заклипирование усилителя во время действия помехи.

При регистрации длительных процессов, сопровождающихся акустическим излучением с малой амплитудой импульсов, например, при коррозии металлов под напряжением или статическом деформировании экранирование входных цепей регистрирующей аппаратуры и применение фильтров в цепях питания не дают ощутимого результата из-за высокой чувствительности усилительной части аппаратуры, которую необходимо обеспечить при регистрации таких сигналов.

Эффективный метод борьбы с электромагнитными помехами – введение в схему прибора дополнительного канала, воспринимающего электромагнитные помехи и управляющего каналом усиления и преобразования сигналов АЭ.

Оптимальная фильтрация сигналов АЭ

Приемник должен быть оптимальным в смысле выделения сигнала из шума. Такой приемник должен дать на выходе максимально возможное отношение пикового значения сигнала к эффективному значению шума. Подобный приемник называют оптимальным приемником обнаружения [14].

Амплитудно-частотная характеристика (передаточная функция) оптимального приемника $K(\omega)$ подобна амплитудно-частотному спектру сигнала $S(\omega)$:

$$\begin{cases} K(\omega) = a \cdot S(\omega), \\ \psi(\omega) = -[\varphi(\omega) + \omega t_0], \end{cases} \quad (9)$$

где a – коэффициент пропорциональности, $\psi(\omega)$ – фазовая характеристика фильтра, $\varphi(\omega)$ – фаза спектральных составляющих сигнала, t_0 – момент времени, в который наблюдается максимум мгновенного значения сигнала.

Оптимальный приемник благодаря тому, что форма его коэффициента передачи совпадает с формой спектра сигнала, обеспечивает максимальное усиление наиболее интенсивных составляющих спектра сигнала. На других участках спектра коэффициент усиления уменьшается, при этом уменьшается и влияние шумов. Происходит увеличение отношения сигнал/шум. Но форма сигнала искажается, информация, заключенная в форме сигнала, теряется.

Оптимальный приемник обнаружения импульсного процесса лучше описывать переходной характеристикой. Для такого приемника импульсная переходная характеристика $h(t)$ повторяет по форме зависимость, являющуюся зеркальным отображением сигнала $s(t)$:

$$h(t) = k \cdot s(t_i - t), \quad (10)$$

где k – постоянный коэффициент усиления, t_i – постоянная задержка отклика фильтра, которую обычно выбирают равной длительности импульса.

Следует отметить, что приемник, оптимальный например, для релаксационного сигнала АЭ будет оптимальным для всякого сигнала той же формы, независимо от амплитуды и моментов проявления.

Оптимальные приемники сигналов АЭ могут иметь различную структуру. Она выбирается в зависимости от степени априорного знания параметров сигнала или простоты реализации схемы приемника. Например, если известен частотный спектр сигнала, то часто оптимальный приемник строят в виде оптимального фильтра, частотная характеристика которого определяется соотношением (10).

Применение звукоизоляции

Звукоизоляцию применяют в местах захвата нагружающих устройств, которые могут создавать дополнительные механические шумы. Чаще всего в качестве звукоизолятора используется резина или другие материалы, имеющие большой коэффициент затухания акустических волн.

4.3. Обработка данных АЭ контроля

В АЭ системах обработка и анализ акустических сигналов осуществляется в следующем порядке:

- одновременно с оцифровкой поступающего сигнала АЭ локализуется пространственное положение источника АЭ и отбрасываются ложные сигналы;
- импульсы, местоположение которых может быть точно локализовано, поступают в ходе обработки в блок спектрального анализа и в блоки определения параметров АЭ (энергетические характеристики и число событий АЭ) [22].

Во время обработки полученной информации о характеристиках зарегистрированных АЭ сигналов используются механизмы фильтрации, заложенные в аппаратуре. Фильтрация может производиться по следующим характеристикам АЭ сигналов: отношение длительности ко времени нарастания сигнала АЭ, амплитуда сигнала, частотный диапазон, амплитуда и скорость счета (корреляция Капистрано), длительность сигнала.

4.3.1. Формы представления данных

Способы представления информации о параметрах сигналов АЭ:

- алфавитно-цифровой на экране ЭЛТ;
- кодовый в виде последовательного кода стандарта RS232, воспринимаемого ЭВМ или принтером;
- аналоговый – напряжения, пропорциональные суммарному счету, числу импульсов, скорости счета, активности АЭ, пиковой амплитуды, средней амплитуды, для регистрации самопишущими устройствами.

АЭ система контроля, основанная на использовании развитого программного обеспечения, позволяет получать большое число типов графиков. Оператор не ограничен в выборе способов графического отображения данных во время сбора, поскольку после проведения послетестовой обработки результаты экспрессной обработки могут быть пересмотрены, отфильтрованы и отображены в другом виде [9].

Общая классификация способов отображения:

- «исторический» график, отображающий весь процесс испытаний от начала до конца в зависимости от времени;

- функции распределения, предназначенные для демонстрации статистических свойств сигналов эмиссии;
- графики по отдельным каналам, показывающие распределения сигналов по каналам;
- графики локации для отображения расположения источников сигналов;
- точечные графики корреляции между различными АЭ параметрами;
- диагностические диаграммы, демонстрирующие степень опасности различных частей конструкции (в соответствии с результатами АЭ анализа).

После испытаний обработка данных производится с помощью набора специальных программ. Определяется локализация источников, оценка уровня опасности. С развертки места локации источники АЭ переносятся на эскиз объекта контроля и определяются места нарушения.

Результаты АЭ контроля представляют в виде перечня зарегистрированных источников АЭ, отнесенных к тому или иному классу в зависимости от значения параметров АЭ. Такую оценку производят для каждого источника АЭ сигналов. Оценка состояния контролируемого объекта производят по наличию в контролируемом объекте источников АЭ того или иного класса.

При принятии решения по результатам контроля используют данные, которые должны содержать сведения обо всех источниках АЭ, их классификации и сведения относительно источников АЭ, параметры которых превышают допустимый уровень.

После обработки принятых сигналов результаты контроля представляют в форме идентифицированных и классифицированных источников АЭ.

В настоящее время существуют приборы, позволяющие регистрировать форму волны сигналов АЭ в реальном масштабе времени. Это дает возможность получения огромного количества дополнительных характеристик, которые могут быть полезны, как на этапе фильтрации, так и в процессе принятия решения о классификации источников и оценки технического состояния установки в целом.

Разработаны специализированные программные продукты, позволяющие вести анализ данных в многопараметрическом пространстве с использованием алгоритмов теории распознавания образов. Пример представления данных с автоматическим разделением их на разные категории показан на рис. 71.

Данные, отмеченные отличающимися цветами, соответствуют разным этапам процесса развития дефекта. В рамках этого программного пакета существует возможность обучения системы автоматически распознавать поисковые объекты.

4.3.2. Сравнение данных контроля с характеристиками имитационных сигналов

Оценка измеряемых параметров сигналов АЭ по каждому каналу производится сравнением значений параметров сигнала, задаваемого имитатором, со значением, измеренным аппаратурой.

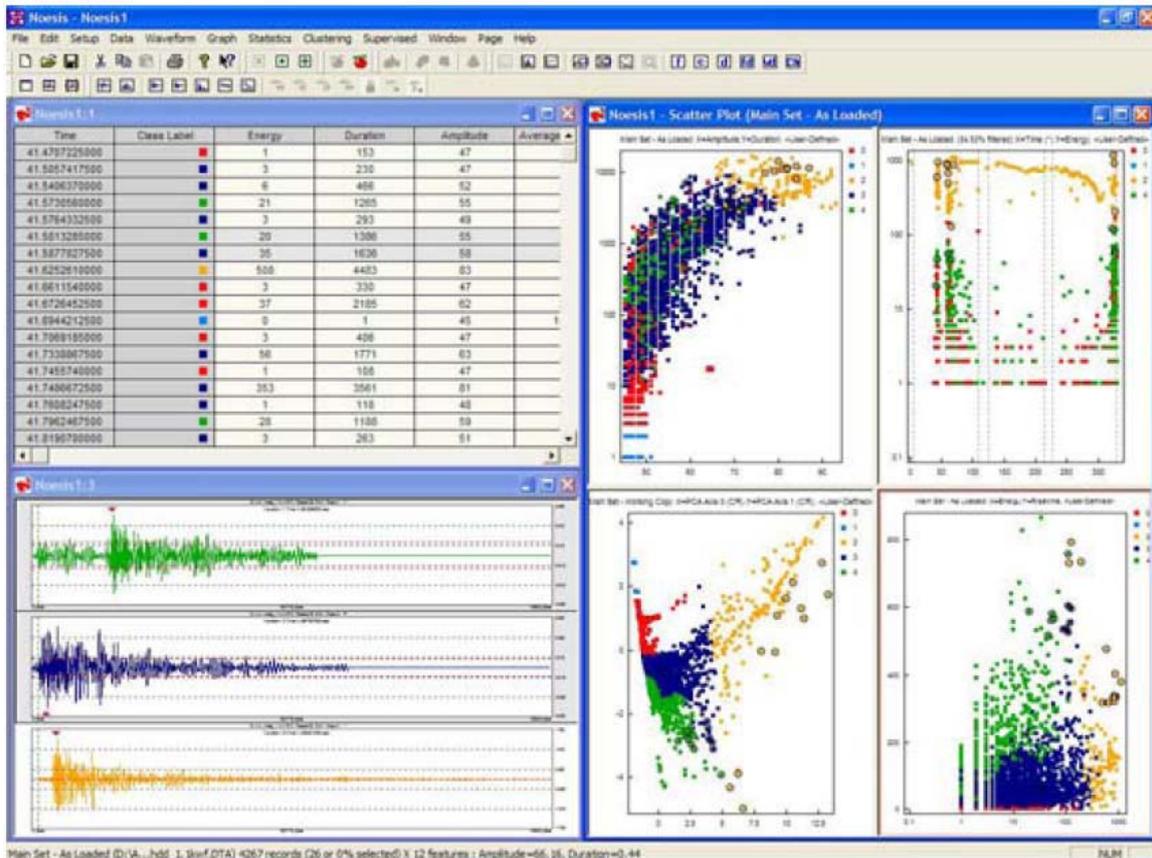


Рис. 71. Пример отображения АЭ данных после автоматической классификации

4.3.3. Статистическая обработка данных – вычисление средних значений, среднеквадратических отклонений, построение гистограмм

До приема сообщения (до испытания) сигнал рассматривается как случайный процесс, представляющий собой совокупность (ансамбль) функций времени, подчиняющихся некоторой общей для них статистической закономерности. Одна из этих функций, ставшая полностью известной после приема сообщения, называется реализацией случайного процесса. Эта реализация является уже не случайной, а детерминированной функцией времени [13, 36].

Физические явления и порождаемые ими процессы называются случайными, если будущее поведение реализации, полученной в ре-

зультате эксперимента, нельзя предсказать с точностью, лежащей в пределах ошибок измерения. Такая реализация представляет лишь одно событие из множества событий, которые могли бы осуществиться при данном эксперименте. Для того, чтобы получить полное представление о процессе, нужно исходить из свойств всего ансамбля реализаций, соответствующих процессу.

На рис. 72 изображена совокупность функций $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)$, образующих случайный процесс $\{x(t)\}$. Значения, которые могут принимать отдельные функции в момент времени t_1 , образуют совокупность случайных величин $x_1(t_1), x_2(t_1), \dots, x_N(t_1)$.

Для практических приложений наибольшее значение имеют следующие параметры случайного процесса.

Математическое ожидание служит оценкой среднего взвешенного значения случайного процесса в момент времени t_1 :

$$m_x(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_1).$$

Дисперсия характеризует среднюю мощность отклонений случайного процесса от его среднего значения $m_x(t)$:

$$D_x(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{x_i(t_1) - m_x(t_1)\}^2.$$

Среднее квадратическое отклонение представляет собой квадратный корень из дисперсии и служит амплитудной мерой разброса значений случайного процесса в момент времени t относительно математического ожидания:

$$\ddot{\sigma}_x(t) = \sqrt{D_x(t)}.$$

Среднее произведение значений процесса в моменты t_1 и $t_1 + \tau$ называется *ковариационной функцией* при сдвиге τ , задается формулой:

$$R_{xx}(t_1, \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_1)x_i(t_1 + \tau).$$

Если все средние значения зависят от времени t_1 , процесс называется *нестационарным*. Если же все средние значения не зависят от момента t_1 , то случайный процесс называется *стационарным*. Средние характеристики стационарного процесса для любого момента времени можно определить путем усреднения по ансамблю реализаций только в момент времени t_1 .

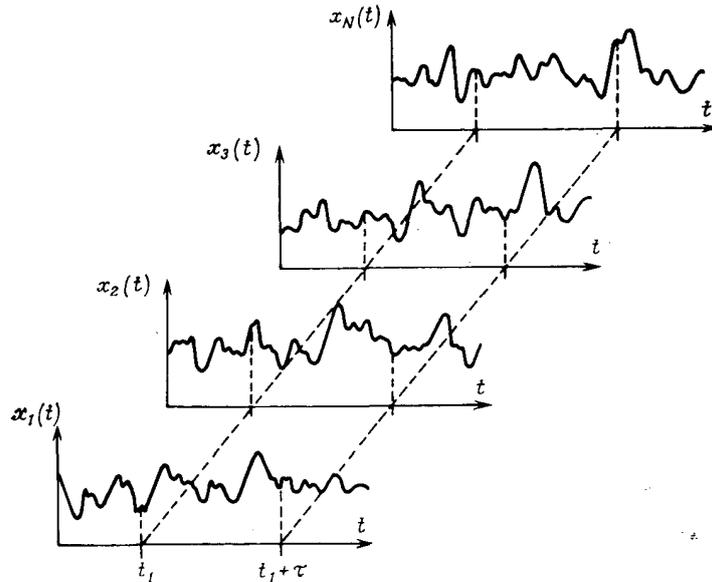


Рис. 72. Ансамбль реализаций случайного процесса

Стационарный случайный процесс является *эргодическим*, если при определении любых его статистических характеристик усреднение по ансамблю реализаций эквивалентно усреднению по времени одной, теоретически бесконечно длинной реализации. Характеристики эргодического случайного процесса описываются следующими выражениями по единственной его реализации $x(t)$;

$$m_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) dt,$$

$$D_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{x(t) - m_x\}^2 dt,$$

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau) dt.$$

Математическое ожидание эргодического случайного процесса равно постоянной составляющей любой его реализации, а дисперсия имеет физический смысл мощности флуктуационной составляющей.

При большом объеме выборки часто прибегают к группировке данных, заключающейся в объединении нескольких соседних результатов в группы (интервалы). Ширина последних выбирается по возможности одинаковой для всех интервалов, число интервалов k рекомендуется выбирать, руководствуясь соотношением $k = 5 \cdot \lg N$. Для выборки объемом $N = 50$ измерений $k = 8$, если $N = 100$, то $k = 10$ и т. д. Сгруппированные данные можно представить в виде гистограммы распределения.

4.3.4. Проверка статистических гипотез

Заключения о результатах контроля строятся на основании аппарата *проверки статистических гипотез*. Под статистической гипотезой подразумевают любое утверждение (подлежащее проверке) о виде или свойствах распределения значений измеренных величин [13].

Если для исследуемого явления или процесса сформулирована та или иная гипотеза (ее обычно называют основной и обозначают символом H_0), необходимо сформулировать правило, согласно которому гипотеза H_0 должна быть проверена на состоятельность, т. е. принята или отвергнута. Это правило называется *статистическим критерием* (или просто критерием). В общем случае на основе экспериментальных данных строят некоторую статистику, значение которой при состоятельности гипотезы H_0 с большой вероятностью находится в некотором интервале значений. Выпадение значения статистики из этого интервала маловероятно, если гипотеза H_0 состоятельна. Соответствующую малую вероятность называют *уровнем значимости* и обычно обозначают через α , а множество выпадающих значений носит название *критической области* в отличие от *области допустимых значений*, при которых гипотеза не отвергается. Ошибку, связанную с отклонением верной нулевой гипотезы из-за попадания статистики в критическую область, называют ошибкой первого рода. Вероятность ее, как следует из изложенного, равна α .

Критерии, определяющие критическую область, могут быть одно- и двусторонними, что поясняет рис. 73. Если основная гипотеза заключается в том, что наблюдаемое значение отличается от среднего значения с уровнем значимости α , то критическая область K_1 состоит из двух подобластей: подобласть слева соответствует вероятности $\alpha/2$ того, что наблюдаемое значение меньше, подобласть справа – вероятности $\alpha/2$ того, что оно больше x_0 . При проверке того, что наблюдаемое значение не больше x_0 , должен использоваться односторонний критерий. Критическая область K_1 теперь является неразрывной. Это же справедливо при проверке того, что результат не меньше x_0 . Во всех случаях речь идет о *статистически значимом* различии величин. На рис. 73 через z_α , z_α' и z_α'' обозначены квантили распределения, соответствующие границам указанных критических областей. Заметим, что $z_\alpha''/2 = z_\alpha$.

Принятие неверной нулевой гипотезы носит название ошибки второго рода, соответствующую вероятность обозначают через β . Вероятность $\pi = 1 - \beta$ отклонения основной гипотезы при верной альтернативной носит название функции мощности критерия. Чем больше значение π , тем более мощным считается критерий. Обычно задают значение α и стремятся получить возможно большее значение π . Если проверяемая гипотеза со-

стоит в том, что некоторый параметр распределения или их совокупность (среднее значение, дисперсия и др.) имеют наперед заданные значения или множество значений, гипотеза носит название *параметрической*.

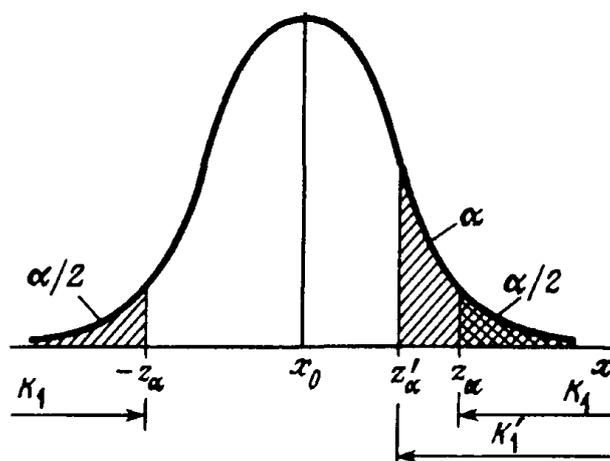


Рис. 73. Распределение вероятностей

Часто сталкиваются с ситуацией, когда необходимо сделать заключение вида «да – нет» («годен – не годен»), т. е. принять одну из альтернативных (взаимоисключающих) гипотез. Поясним это на примере, когда на основе анализа двух выборок необходимо сделать вывод о том, различаются ли они статистически.

Примем одну из возможных гипотез в качестве основной и обозначим ее через H_0 , альтернативную (конкурирующую) гипотезу через H_1 . С точки зрения статистики безразлично, какую гипотезу считать основной, а какую альтернативной. С целью единообразия в статистике принято считать основной (H_0) гипотезу, согласно которой результат контроля согласуется с заданным распределением (генеральной или иной заданной выборкой). Например, H_0 может состоять в том, что контролируемая выборка не отличается от ранее предъявленной.

Таким образом, приходим к формулировке задачи: на основании сравнения двух выборок определить, какую из двух гипотез – H_0 или H_1 следует принять. При этом возможны решения четырех типов (табл. 9).

Ошибка первого рода (ложная тревога) приводит к напрасному прекращению эксплуатации объекта, его браковке, в связи с чем эту ошибку называют также перебраковкой. *Ошибка второго рода* – пропуск сигнала, т. е. разрешение к дальнейшему применению негодного материала, изделия, объекта. Тяжесть, а следовательно, стоимость ошибок второго рода, обычно неизмеримо более высоки по сравнению с тяжестью ошибок первого рода. Если, например, стоимость напрасно забракованного сварного шва принять равной некоторой условной едини-

це, то согласно имеющимся оценкам стоимость ошибки второго рода, т. е. пропуска дефектного сварного шва, в топливно-энергетическом комплексе обходится в пятьдесят тысяч раз дороже в результате разрыва дефектного шва при эксплуатации.

Таблица 9

Характеристика решений по результатам сравнения выборки с эталоном

Истинное событие	Принятое решение	Характеристика решения
A_0 – не различаются (объект годен)	H_0 – не различаются (объект годен)	Правильное
A_0	H_1 – различаются (объект поврежден)	Ошибка первого рода – ложная тревога
A_1 – различаются (объект поврежден)	H_0	Ошибка второго рода – пропуск сигнала опасности
A_1	H_1	Правильное

При прогнозе динамики аварийности, наряду со стандартными методами математической статистики, следует применять анализ конкретной ситуации.

Результаты оценки степени риска суммируются по каждому типу причины аварии – коррозия, воздействия сторонней организации, качество сварки, качество проекта, материал и пр.

По каждому возможному типу аварии устанавливается вероятность ее возникновения. Например, риск по каждому участку трубопровода определяется путем умножения риска на частоту отдельных аварий и на стоимость последствий. Результаты такого анализа позволяют проводить ранжирование риска для всех элементов системы.

4.3.5. Определение координат источника

Расчет координат дефектов основан на определении *разности времени прихода* (РВП) фронта акустической волны к нескольким ПЭП. Для определения координат источника сигналов АЭ на поверхности конструкции, как минимум, необходимо иметь три ПЭП. При этом измеряются два независимых значения РВП волны напряжения. Используя их, можно построить две гиперболы, в фокусах которых расположены приемники. Пересечение гипербол дает положение источника. Но двух РВП недостаточно для однозначного определения координат источника. Однозначное вычисление координат возможно только внутри треугольника, образованного приемными ПЭП (рис. 74). Введение четвертого ПЭП дает возможность измерять три значения РВП. Причем третье значение устраняет неоднозначность в определении координат. Четырехточечное расположение ПЭП (рис. 75) повышает помехоустойчивость, обеспечивает более гибкое их размещение при контроле больших поверхностей сложной формы [14, 33].

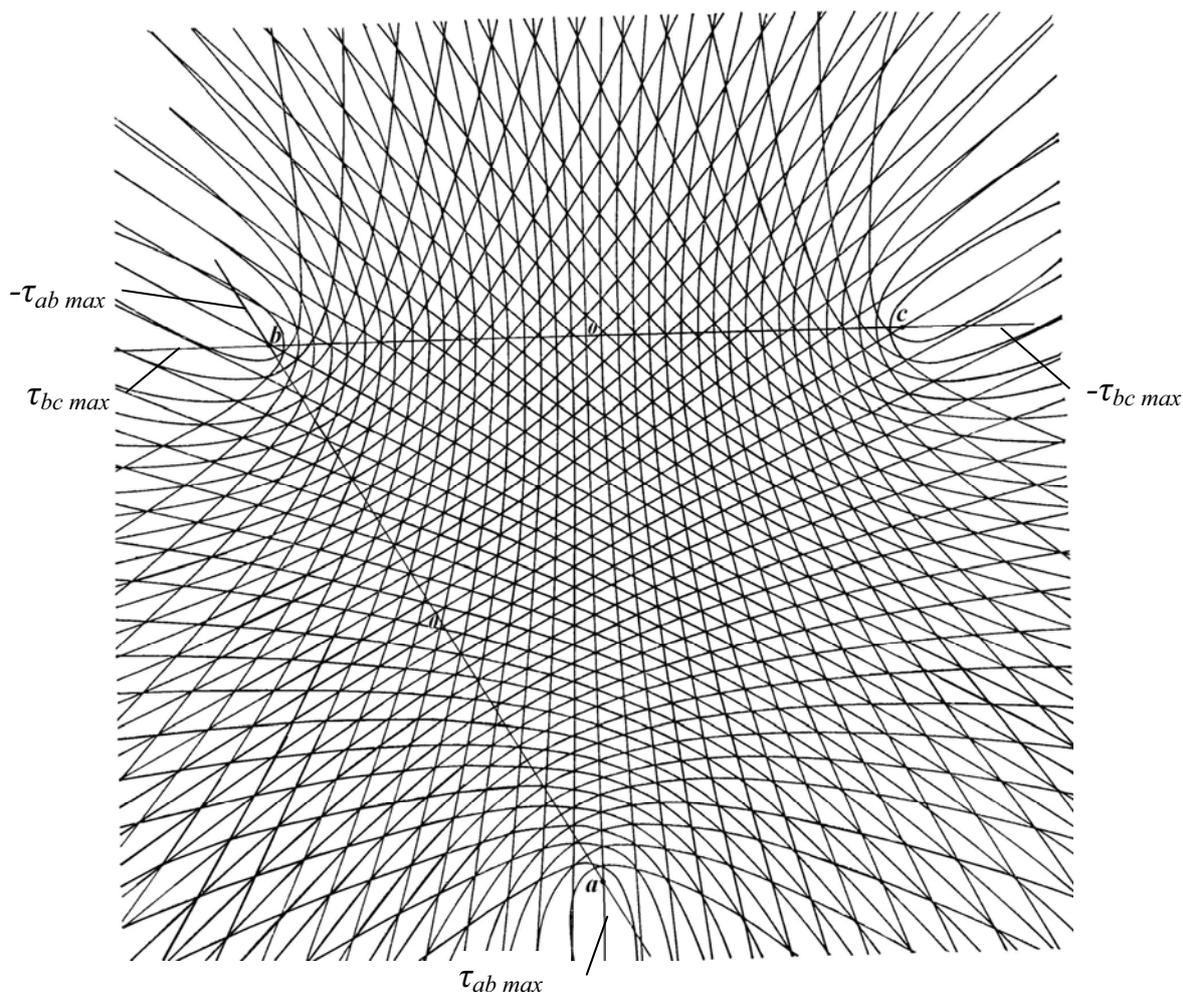


Рис. 74. Гиперболическая координатная сетка при локации тремя преобразователями

Базис вычислительной локации основан на связи время–расстояние, при известной скорости распространения звуковой волны. Абсолютное время прихода импульса t , в комбинации со скоростью звуковой волны c , даёт расстояние d от датчика до источника.

$$d = c \cdot t.$$

Расстояние между двумя точками зависит от геометрии объекта. Большинство режимов локации – это вариации локации по плоскости, хотя во многих случаях двумерная плоскость является развёрткой трёхмерного объекта. Для двух точек на плоскости расстояние между ними в декартовых координатах, согласно теоремы Пифагора:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (11)$$

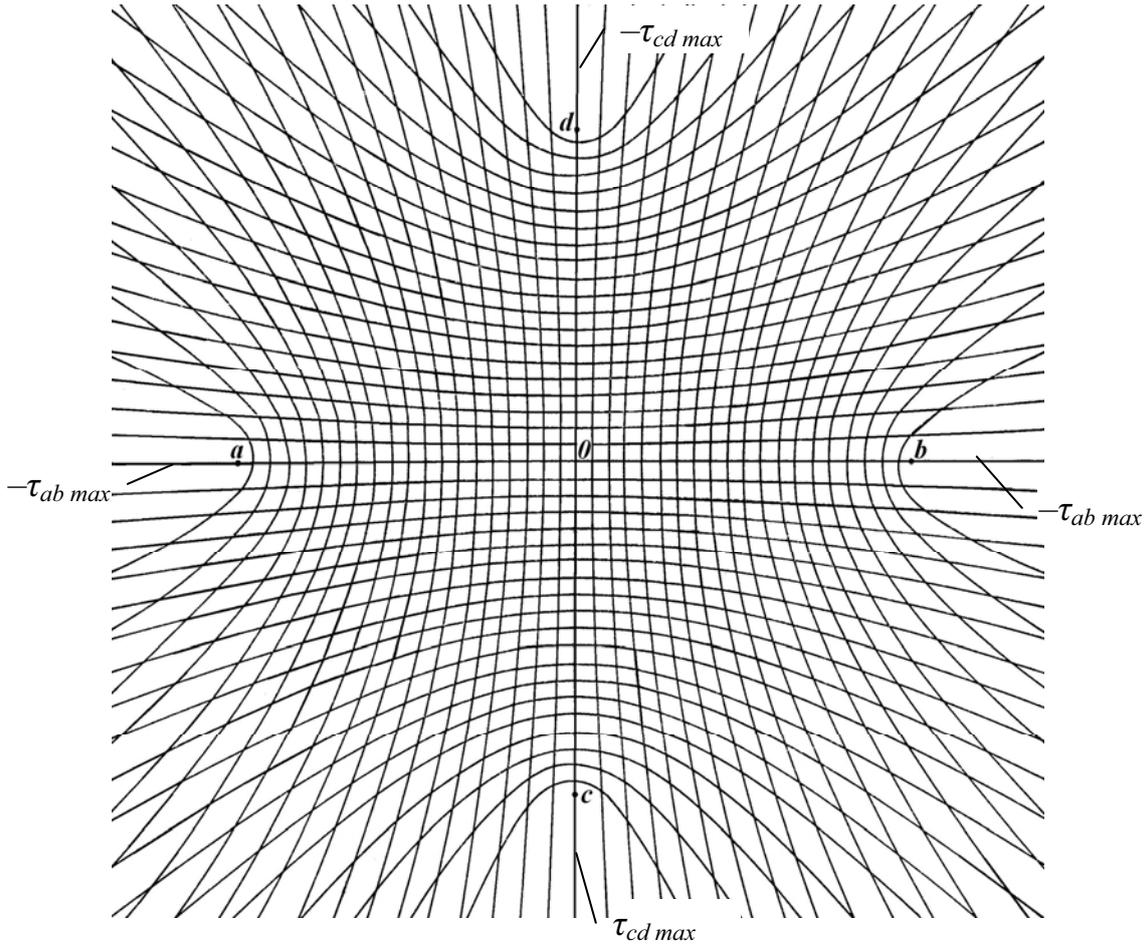


Рис. 75. Гиперболическая координатная сетка при локации четырьмя преобразователями

Вычисления осложняются тем, что неизвестно абсолютное время возникновения события. Чтобы обойти эту проблему, все времена прихода импульсов рассматриваются относительно прихода первого импульса в событии. Каждая разность времён прихода подразумевает разность в расстоянии до преобразователя по отношению к расстоянию до преобразователя, к которому сигнал пришёл первым. Для преобразователя, к которому импульс пришёл вторым, по отношению к преобразователю, к которому импульс пришел первым, разностное уравнение можно записать так:

$$t_2 - t_1 = (d_2 - d_1) / c.$$

Комбинация последнего с выражением (11) дает:

$$t_2 - t_1 = \left(\sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2} \right) / c, \quad (12)$$

где x_s и y_s – это неизвестные координаты источника. Это уравнение содержит два неизвестных и не может быть решено. Для того, чтобы до-

бавить второе уравнение с теми же двумя неизвестными, необходимо добавить третий импульс, образующий событие, для которого уравнение выглядит аналогично (12):

$$t_3 - t_1 = \left(\sqrt{(x_3 - x_s)^2 + (y_3 - y_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2} \right) / c. \quad (13)$$

Система уравнений (12) и (13) может быть решена относительно x_s и y_s .

Если имеются дополнительные импульсы в событии, то возникает вопрос, как использовать эту дополнительную информацию. В случае локации днища резервуара, алгоритм просто берет дополнительные импульсы и пытается из каждых 3-х вычислить дополнительные локации. То есть, он совершает итерации из всех комбинаций импульсов в событии 3 раза, пока не переберет все, или будет достигнут максимум итераций, установленный пользователем. Проблема такого подхода в том, что вычисляет более чем один источник на событие, и, если имеются какие-либо ошибки в значениях времен прихода, то локации источников могут быть существенно некорректны. Лучшим способом было бы усреднение данных каким-либо способом для определения одной локации. Анализ множественной регрессии дает это, хотя в действительности он не усредняет непосредственно множественные данные по 3-м импульсам. Каждый дополнительный импульс вносит дополнительное уравнение к системе уравнений (12) и (13). Это может быть обобщено как:

$$t_i - t_1 = \left(\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2} \right) / c. \quad (14)$$

Если определить

$$\Delta t_i = t_i - t_1 \quad (15)$$

можно записать:

$$\Delta t_i = \left(\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2} \right) / c. \quad (16)$$

Уравнения 15 и 16 дают два пути вычисления Δt для i -го датчика. Используя известные времена прихода импульсов, уравнение 16 дает наблюдаемые разности времен прихода $\Delta t_{i,наб}$. Для заданного набора координат источников, по уравнению 16 вычисляются разности времен прихода импульсов $\Delta t_{i,выч}$. Основные значения алгоритма множественной регрессии – минимизировать разницу между двумя величинами, которые в данном случае являются наблюдаемыми и вычисленными значениями Δt . Для реализации этого вычисляется величина, называемая χ^2 (хи-квадрат). В нашем случае она вычисляется как сумма по всем преобразователям в событии:

$$\chi^2 = \sum (\Delta t_{i,наб} - \Delta t_{i,выч})^2.$$

Эта величина также называется подгонным значением и зависит от координат x , y источника. Сумма вычисляется заново для каждой потенциальной локации источника. В предположении, что ошибки отсутствуют, значение χ^2 было равно 0. Алгоритм ищет значения координат источника x_s и y_s , которые минимизировали бы χ^2 . Процесс поиска итеративный, поскольку невозможно прямо записать простые уравнения x_s и y_s , которые минимизировали бы χ^2 .

Поиск выполняется с использованием 2-х алгоритмов, либо симплексный поиск (3D или 2D плоскостные режимы локации), либо метод Пауэлла (сферическая, коническая и цилиндрическая локации).

Прежде чем обсуждать расположение датчиков, важно понять некоторые физические аспекты размещения датчиков и применять эти правила для всех регрессионных режимов локации. Можно располагать датчики как угодно, но при регрессионных режимах локации получить лучшие результаты можно, если расположение датчиков представляет собой равномерно распределенные треугольные фигуры. Оптимальным расположением является треугольная сетка из равносторонних треугольников, хотя регрессионный режим не требует точного равенства сторон треугольников и даже одинаковых расстояний между датчиками. Лучше избегать треугольников с очень длинными или очень короткими сторонами, поскольку они не будут давать хороших локаций источников.

Итак, расчет координат дефектов будет достоверен, если соблюдаются следующие условия:

- скорость распространения поверхностных акустических волн однозначна во всех направлениях (либо известна модель скорости распространения этих волн);
- акустический сигнал от дефекта в любой точке ОК дойдет до каждого датчика, не встречая на своем пути каких-либо препятствий (сварные швы, отверстия, полости и т. д.);
- погрешность в определении РВП сигналов АЭ на соответствующие датчики пьезоантенны должна быть минимальна.

Существует несколько основных принципов локации. Прежде всего – это зонная локация, при которой источники относят к сравнительно большим по площади зонам (окружающим определенным датчики).

Второй способ – точечная локация, при которой координаты источника рассчитываются достаточно точно с помощью разностей времен прихода (РВП) сигналов на различные датчики, объединенные в антенну. При расчетах в формулу локации в качестве параметра вводится скорость распространения волны. Достигаемая в расчетах точность кон-

тролируется этим параметром, который в свою очередь зависит от геометрии и толщины объекта, а также свойств вещества, наполняющего объект контроля. Именно эти факторы способствуют неточности в оценке скорости распространения волн, что в свою очередь приводит к ошибкам определения координат источника. В благоприятных случаях погрешность локации может достигать 1 % от расстояния между датчиками, в неблагоприятных – 10 % [9].

Из других источников, погрешность определения местоположения источника составляет обычно 3–5 % от максимального расстояния между преобразователями, но не менее чем значение порядка толщины стенки ОК. Последнее связано с тем, что местоположение источника по толщине ОК обычно не определяют. Локации подлежат только место эпицентра («следа») источника на поверхности [7,14].

Сторожевые датчики могут использоваться для блокировки событий от выделенных локационных групп, если датчик, к которому сигнал пришел первым, является защитным датчиком. Это сделано для ситуаций, при которых желательно игнорировать сигналы извне локационной группы.

Схема расстановки датчиков определяется задачей контроля, требуемой точностью локации источников АЭ. Типы локации разделяются на линейную и пространственную. Существуют следующие схемы локации:

- независимое размещение позволяет одновременно контролировать несколько образцов, не опасаясь того, что информация с одного образца перепутается с информацией с другого;
- зональное размещение дает наиболее точную информацию об источнике АЭ события. Регистрирует источник АЭ датчик, который является самым близким к источнику АЭ. Часто АЭ события достигают многих датчиков, и графическое отображение всех индивидуальных импульсов на том же графике может быть нежелательным. При зональной группировке можно графически отобразить только информацию с датчика первой регистрации. В зональном алгоритме все датчики в группе сохраняются до момента обнаружения первой регистрации, воспринимается только эта информация. Другие датчики в группе затем блокируются или не воспринимаются. Таким образом, можно графически отобразить информацию о первой регистрации и установить, какой датчик или датчики ближе всего находятся к источнику АЭ или источникам АЭ;
- линейное размещение: ПАЭ размещаются в линию. Можно обнаружить точное размещение источников АЭ событий для любого числа датчиков. Источник АЭ от одного события лоцируется при попадании на два датчика;

- прямоугольное размещение: датчики устанавливаются в решетку прямоугольников, и таким образом можно более эффективно охватить поверхность объекта контроля. Решетку из прямоугольников можно свернуть вокруг поверхности, чтобы охватить цилиндр. Датчики можно поместить на шляпках и сводах, которые могут быть на цилиндрах. Источник АЭ лоцируется при попадании на четыре ПАЭ;
- треугольное размещение (схема триангуляции): поверхность объекта контроля покрывается треугольниками ПАЭ. Данный метод аналогичен прямоугольному размещению, но при локации необходимо, чтобы сигнал от источника АЭ попал на три датчика. Результаты контроля также точны, как и при прямоугольном размещении [33].

Независимая и зональная схемы расстановки ПАЭ не дают точного определения координат источников АЭ. Прямоугольное и треугольное размещение ПАЭ дает более точное определение координат источников АЭ. Достоинством треугольной схемы расстановки датчиков является меньшее количество датчиков по сравнению с прямоугольной и в связи с этим алгоритм локации более простой, т. е. источник лоцируется более легко даже при большом затухании волн в материале. Но по точности локации АЭ сигналов треугольная схема уступает прямоугольной, так как локация происходит по меньшему числу разности времени прихода сигнала на датчик. В прямоугольной схеме локации вероятность зарегистрировать источник меньше, так как импульс должен прийти на четыре датчика (а не на три). Если амплитуда сигнала от источника имеет значение меньше порогового, он не будет зарегистрирован и источник будет пропущен.

После обработки сигналы АЭ подаются на экран ЭЛТ, на котором одновременно представлена развертка, соответствующая поверхности изделия, и показано расположение на ней преобразователей. Источник сигналов АЭ появляется на экране в виде светящейся точки. Таким образом, получается картина сигналов. На рис. 76 показана карта локации дефектов в сосудах давления, которая представляет собой развертку цилиндрической части с нанесенной схемой расположения датчиков и картой объекта – схемой мест расположения сварных швов, патрубков и т. п. Для контроля крышки и дна сосуда устанавливаются датчики в их центре (на рисунке датчик № 10 установлен на крышке сосуда). Источники акустической эмиссии на локационной карте представляются точками. Локальные скопления источников акустической эмиссии называются кластерами (на рисунке кластер выделен прямоугольником) [33].

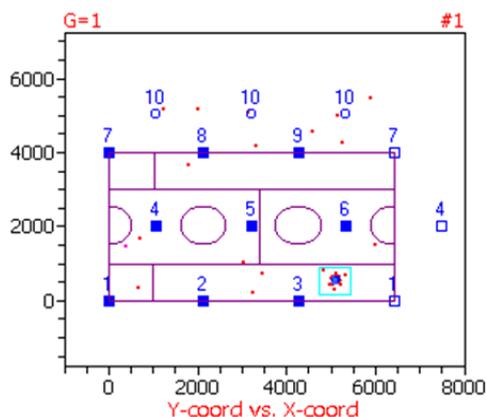


Рис. 76. Карта локации АЭ источников в сосуде давления

Для объектов простой геометрии места возникновения источников АЭ могут располагаться примерно на одной прямой, что характерно, например, для элементов конструкций, в которых длина значительно превосходит другие размеры (рис. 77). При этом задача определения координат дефектов решается наиболее просто. Начало координат помещается в середине базы (половина расстояния между преобразователями), а измерение временной задержки Δt прихода сигнала к ПЭП дает возможность определить координату как

$$l_1 = 0,5 \cdot c \cdot \Delta t,$$

где Δt – временная задержка, c – скорость распространения сигнала в конструкции.

Пример: схема контроля технологического трубопровода жидкого аммиака (рис. 78). Трубопровод изготовлен из углеродистой стали марки 20 $\text{Ø}133 \times 5$. Использовались широкополосные преобразователи с полосой частот 20–200 кГц. Расстояния между преобразователями выбирали исходя из среднего значения коэффициента затухания АЭ сигнала, измеренного при сломе карандаша Су–Нильсена.

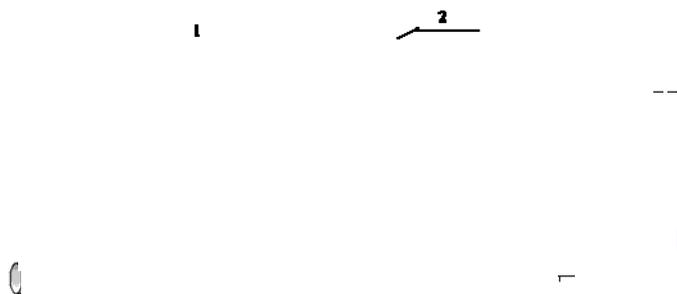


Рис. 77. Локализация дефектов на трубопроводах и гистограмма локации течи в трубопроводе датчиками, установленными на расстоянии 50 метров: 1 – акустико-эмиссионная система, 2 – монитор, 3 – преобразователь АЭ

4.3.6. Определение характеристик дефекта альтернативными неразрушающими и разрушающими методами

Дополнительные виды контроля используются с целью уточнения размеров дефектов или при неопределенности интерпретации результатов АЭ контроля. Чаще всего используются ультразвуковой метод и радиографический [22].



Рис. 78. Схема контроля трубопровода жидкого аммиака с указанием ПАЭ, расстояний между ними

ГЛАВА 5

ПРИМЕНЕНИЕ АЭ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ

АЭ контроль проводится при нагружении: внутренним давлением при гидро- и пневмоиспытаниях и используя другие методы. При испытании очень важно выделить и записать истинную эмиссию. Для этого необходимо минимизировать шумы. Для этого предварительное определение уровня шумов осуществляется при нагруженном состоянии объекта до давления $0,25 \cdot P_{\text{раб}}$ в течение 15 мин. Устанавливается ориентировочный пороговый уровень отстройки от шумов [22].

5.1. Объекты контроля

Явление акустической эмиссии наблюдается в широком диапазоне материалов, структур и процессов. Наиболее крупномасштабная АЭ связана с существованием сейсмических волн, в то время как наименьший масштабный уровень эмиссии вызывается дислокационным движением в нагруженных металлических структурах. Между этими двумя видами АЭ существует широкий диапазон областей применения АЭ, от лабораторных испытаний до промышленного контроля.

При лабораторных испытаниях использование АЭ контроля ставит своей целью изучение процессов деформации и разрушения материала. Метод позволяет в реальном времени по сигналам эмиссии наблюдать за поведением материала при нагружении. Поскольку АЭ отклик зависит от структуры материала и режима деформирования, разные материалы при различных способах нагружения в сильной степени отличаются друг от друга по своему АЭ поведению.

Существует два основных фактора, приводящих к высокой эмиссивности – это хрупкость и гетерогенность материала. Вязкие механизмы разрушения, например, слияние пор в мягких сталях, напротив, приводят к низкой эмиссивности (по энергии и числу сигналов).

Метод АЭ используется для проверки и контроля сварных соединений. Метод также используется во время операций, связанных с формообразованием, таких как уплотнение или при прессовании. В целом АЭ контроль может применяться во всех случаях, когда имеют место процессы нагружения, приводящие к постоянному деформированию материалов.

АЭ используется для контроля сосудов давления, хранилищ, труб и трубопроводов, авиационных и космических аппаратов, электрических аппаратов, мостов, железнодорожных цистерн и вагонов, грузовых

транспортных средств, а также многих других типов объектов. АЭ контроль производится и на новом, и на бывшем в эксплуатации оборудовании. Он включает обнаружение трещин, сварных дефектов и других.

АЭ аппаратура способна регистрировать не только рост трещин или развитие пластической деформации, но и процессы затвердевания, кристаллизации, трения, ударов, течеобразований и фазовых переходов. Ниже перечислены основные приложения, в которых используется АЭ метода контроля:

- контроль процесса сварки;
- контроль износа и соприкосновения оборудования при автоматической механической обработке;
- контроль износа и потерь смазки на объектах, связанных с вращением и трением компонент;
- детектирование потерянных частей и частиц оборудования;
- обнаружение и контроль течей, кавитации и потоков жидкости в объектах;
- контроль химических реакторов, включающий контроль коррозионных процессов, жидко-твердого перехода, фазовых превращений.

Когда процессы типа ударов, трения, течей и другие возникают на фоне контроля развития трещин и коррозии, они становятся источниками нежелательных шумов. Было предложено множество различных технических решений с целью снижения и избавления от этих шумовых помех. Следует заметить, что шумы являются основной преградой на пути широкого использования АЭ в качестве метода контроля. Важной задачей является их исследование и по возможности устранение с целью повышения чувствительности метода [9].

5.1.1. Трубопроводы различного назначения

Трубопроводы (ТП). Нефтепроводы. Техническое обследование ТП с применением метода АЭ осуществляется в тех случаях, когда внутритрубная дефектоскопия невозможна, или для подтверждения результатов внутритрубной дефектоскопии и оценки степени опасности обнаруженных дефектов. Обнаруживаются следующие дефекты: трещины, коррозия, утечки. Нагружение осуществляется за счет снижения или поднятия давления в нефтепроводе [37, 38].

При ремонте нефтепровода АЭ контроль осуществляется для исключения разрушения нефтепровода и утечки нефти при извлечении его из траншеи. Обнаруживаются любые изменения размеров ранее обнаруженных дефектов и дефекты, которые могут возникнуть при изгибе трубопровода. Нагружение трубопровода происходит за счет собственного веса трубопровода и транспортируемого продукта.

Магистральный газопровод в оползнеопасной зоне. АЭ контроль служит для оценки технического состояния ТП (метод особенно актуален при многониточной прокладке). Датчики АЭ устанавливаются на ТП с интервалом 50–75 м. Обнаруживаются дефекты сварных швов, коррозия и металлургические дефекты металла ТП. Напряжение осуществляется путем снижения или повышения внутреннего давления. Наиболее эффективен АЭ мониторинг данного участка [38].

ТП в зоне карстовых явлений. АЭ контроль служит для обнаружения дефектов в ТП от действия значительных нагрузок при проседании грунта. Обнаруживаются области пластической деформации трубопровода и дефекты от превышения нормированных значений напряжения текучести. Напряжение ТП происходит под действием собственного веса трубопровода и транспортируемого продукта. Целесообразен АЭ мониторинг данного участка ТП. Используется главным образом на участках подземной прокладки ТП. Обнаруживаются развивающиеся дефекты, представляющие наибольшую опасность для конструкции.

Топливопроводы автозаправочных станций (АЗС). Доступ к топливопроводам отсутствует. АЭ контроль служит для обнаружения деформации, коррозионных дефектов, трещин и сквозных повреждений трубопроводов. Напряжение трубопровода осуществляется при отборе топлива и движении автотранспорта по территории АЗС над контролируемым трубопроводом.

Переходы ТП через естественные и искусственные препятствия. Переходы через автомобильные и железные дороги. Доступ к трубопроводу штатными средствами НК невозможен. АЭ контроль обеспечивает обнаружение следующих видов дефектов: смыкание защитного футляра и трубопровода, коррозии и трещин в стенке трубопровода. Напряжение трубопровода осуществляется за счет увеличения (снижения) внутреннего давления или за счет веса проходящего транспорта.

Подводные переходы. Доступ к ТП возможен только при водолазном обследовании. Надежность такого обследования очень низка, а стоимость весьма высока. АЭ контроль служит для обнаружения освобождения ТП из траншеи, утечек, коррозии и трещин. Напряжение ТП осуществляется за счет повышения (снижения) внутреннего давления. При оголении ТП, кроме того, действуют нагрузки от потока воды [45].

По результатам АЭ диагностики общая закономерность поведения недопустимых по нормам дефектов в сварных швах ТП состоит в том, что дефекты наиболее активны при первом нагружении, причем на стадиях подъема и выдержки при максимальном давлении. При последующих повторных нагружениях активность дефектов резко уменьшается или прекращается полностью. При первом нагружении АЭ дефектов нестабильна,

имеет тенденцию к возрастанию с увеличением нагрузки. Это связано с тем, что при первом нагружении в местах локализации дефектов напряжения достигают или превышают предел текучести материала шва, что вызывает протекание пластической деформации, разовую, кратковременную активность дефектов из-за микроразрушений, сдвигов и трения поверхностей дефектов. При повторных нагружениях поле напряжений вокруг дефектов выравнивается и стабилизируется. Стабилизируется и поведение дефектов, что приводит к снижению уровня и прекращению сигналов АЭ.

5.1.2. Сосуды давления

Акустическую эмиссию в настоящее время широко используют при гидравлических испытаниях сосудов давления. Эти испытания проводят при приемке сосуда после изготовления или при плановом перерыве эксплуатации. Цель испытаний: оценка прочности и герметичности сосуда. Технология проведения гидроиспытаний обеспечивает сравнительно низкий уровень посторонних шумов. Основными их источниками в этом случае являются работающий насос, а также турбулентность течения и кавитация рабочей жидкости [7].

Основными местами локализации источников являются участки швов сварных конструкций, линии сплавления и перекрестия швов. Это означает, что при первом нагружении в теле, перекрестиях, линиях сплавления в сварных швах и при отсутствии дефектов протекают в той или иной мере процессы перераспределения напряжений, пластической деформации, микроповреждений, что вызывает АЭ швов при первом нагружении. При наличии активных и растущих дефектов уровень АЭ швов при первом и последующих нагружениях существенно возрастает. Это обеспечивает высокую чувствительность и способность АЭ определять дефектность сварных швов, обнаруживать и выявлять активности, растущие и опасные дефекты в сварных швах на самых начальных стадиях.

При контроле сварных конструкций, находящихся под высоким давлением, необходимо учитывать механизмы образования дефектов и возникновения АЭ. К основным дефектам относятся: поры, включения, непровары, несплавления, усталостные трещины, уменьшение размеров стенки емкости, коррозионные поражения и т. д. Поры являются одним из основных дефектов сварных швов. Образование их связано с условиями насыщения металла шва газами и их выделения при кристаллизации. Оценка процесса образования пор в сварных швах показывает, что в момент их формирования трудно ожидать появления АЭ. Поры являются концентраторами напряжений и при определенных условиях могут вызвать появление холодных трещин, а следовательно АЭ.

Механические шумы можно в этом случае существенно снизить несложными конструктивными мерами (установкой насоса на отдельном основании, применением гибких трубопроводов высокого давления, рациональной геометрией гидравлических каналов для исключения кавитации и др.), а также выбором режимов течения в гидравлических каналах.

При отсутствии посторонних шумов критерием развития какого-либо дефекта в сосуде давления служит возникновение сигналов АЭ и увеличение их параметров. На рис. 79 показано повышение интенсивности АЭ при гидроиспытании модели цилиндрического сосуда давления из Ст. 3, когда в стенке сосуда появляются и развиваются пластические деформации. Пульсирующий характер кривых связан с особенностями гидравлической системы нагружения. Для идентификации дефекта использовали визуальный контроль, а также регистрацию деформаций сосуда – появление нелинейности зависимостей радиальной деформации $\Delta R(t)$ и осевого удлинения $\Delta l(t)$ свидетельствовало о начале пластической деформации. Критерием обнаружения развития трещины может служить повышение скорости счета импульсов АЭ.

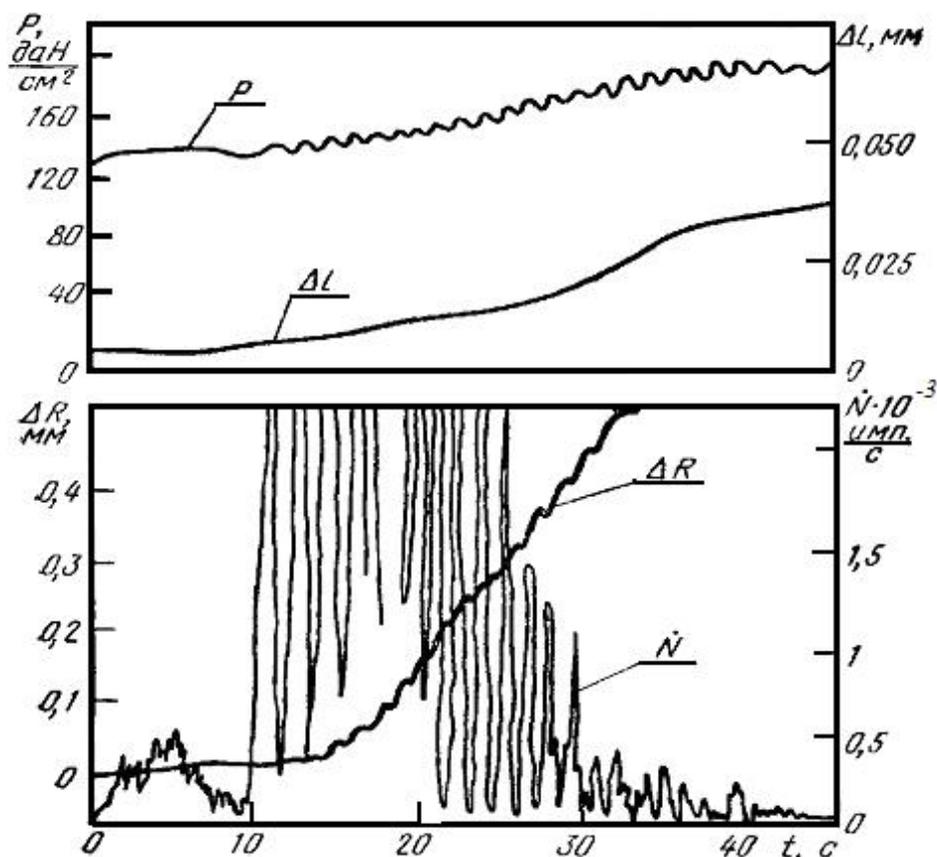


Рис. 79. Скорость счета АЭ при испытании модели сосуда давления

При сравнительных испытаниях указанный критерий можно использовать для сортировки сосудов давления на группы по степени дефектности – при прочих равных условиях сосуду с большими дефектами соответствует раннее появление сигналов АЭ, раннее и более резкое увеличение значений параметров сигналов.

Практическое применение указанного критерия осложняется не только в силу необходимости отсутствия посторонних шумов, но и возможным наличием в сосудах давления достаточно мощных источников АЭ, не связанных с развитием опасных для прочности дефектов.

Сложность и многообразие конструкций реальных промышленных сосудов давления, многообразие источников АЭ существенно затрудняют идентификацию этих источников с помощью только акустической информации.

Наличие дополнительных источников АЭ, не связанных с развитием опасных для прочности дефектов, осложняет также определение размеров дефекта и степени их опасности. Рассмотренные ранее корреляции параметров дефектов и сигналов АЭ нарушаются или искажаются сигналами дополнительных источников. К тому же приводит и одновременное излучение сигналов от нескольких дефектов. Поэтому оценить размеры дефекта и степень его опасности пока можно только в частных случаях. По виду функции $\dot{N}(t)$ можно оценить время, оставшееся до разрушения (рис. 80).

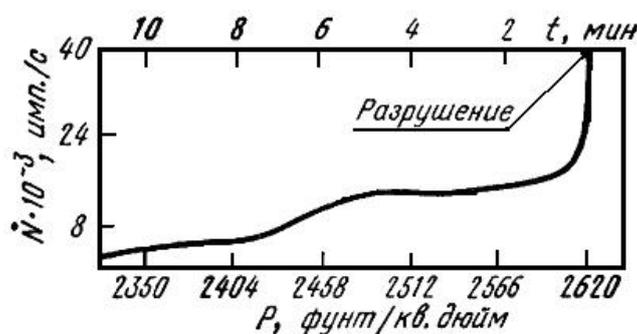


Рис. 80. Интенсивность АЭ в функции давления при гидроиспытании отсека трубы

Поэтому при гидроиспытаниях сосудов давления обычно стремятся обеспечить бесшумность системы нагружения, а идентификацию источников АЭ, оценку размеров и степени опасности дефектов выполняют другими методами и средствами неразрушающих испытаний после определения координат источников с помощью АЭ.

В процессе гидростатического нагружения высокопрочного стального баллона (рис. 81) по амплитудному распределению АЭ сигнала

лов был обнаружен производственный дефект, который впоследствии вызвал его преждевременное разрушение.

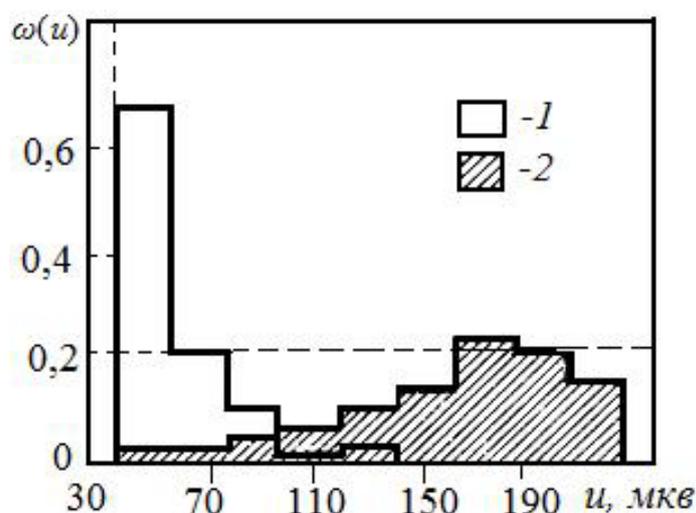


Рис. 81. Гистограммы амплитудного распределения импульсов АЭ при гидростатическом нагружении баллона из стали С60:
1 – бездефектный баллон; 2 – дефект в виде раковины

В результате эксплуатационных нагрузок в нескольких точках по периметру перегородки произошла ее перфорация: в сварном шве между корпусом и перегородкой появились сквозные трещины. Эти трещины раскрывались только в результате воздействия внутреннего давления и поэтому не были обнаружены традиционными методами контроля во время остановки сосуда.

Применение АЭ во время гидроиспытаний сосуда позволило выявить данные дефекты. Импульсные характеристики сигналов некоторых датчиков из нижнего пояса имели вид, характерный для сигналов, регистрирующих утечки (некоторые импульсные характеристики представлены на рис. 83). Однако, визуально – с внешней стороны корпуса – утечки отсутствовали. Кроме того, предварительный контроль другими методами сварных соединений перегородки и корпуса дефектов не обнаружил.

Дополнительная информация для решения проблемы была получена при помощи функций визуализации формы сигнала, которые были использованы для качественной оценки типа источника АЭ по форме сигналов.

На рис. 84 представлен пример регистрации типичных сигналов для двух разных датчиков от источников разной природы [39].

Датчик № 4 находился возле участка сварного шва с небольшими коррозионными дефектами. Датчик № 3 был расположен возле перегородки (рис. 82) и регистрировал периодические утечки через сквозные трещины соединительного шва.

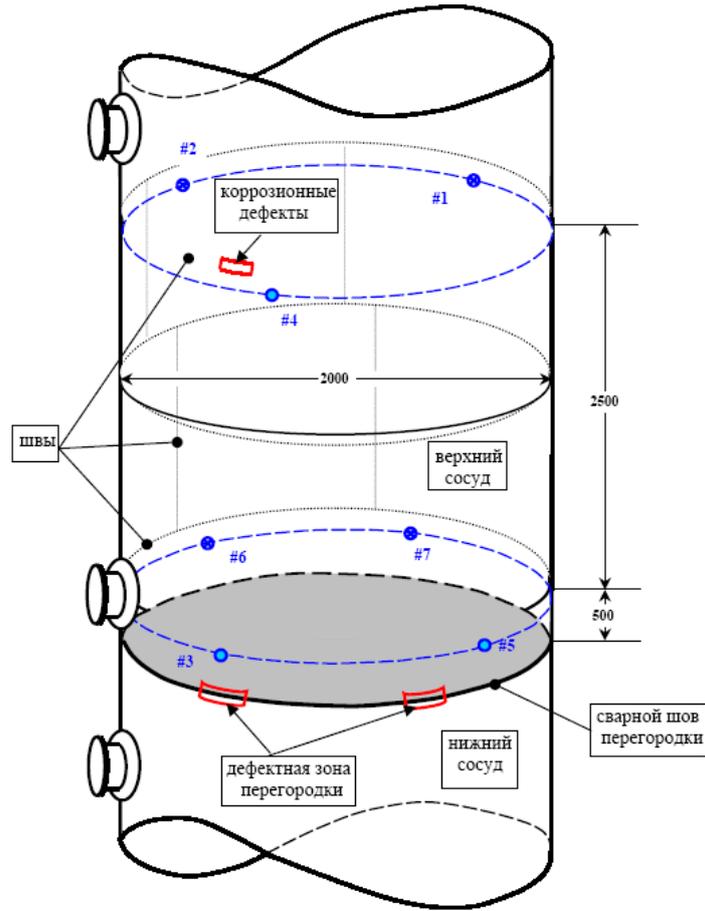


Рис. 82. Схема объекта контроля: два вертикальных сосуда, разделенных перегородкой, 1–7 – места установки преобразователей

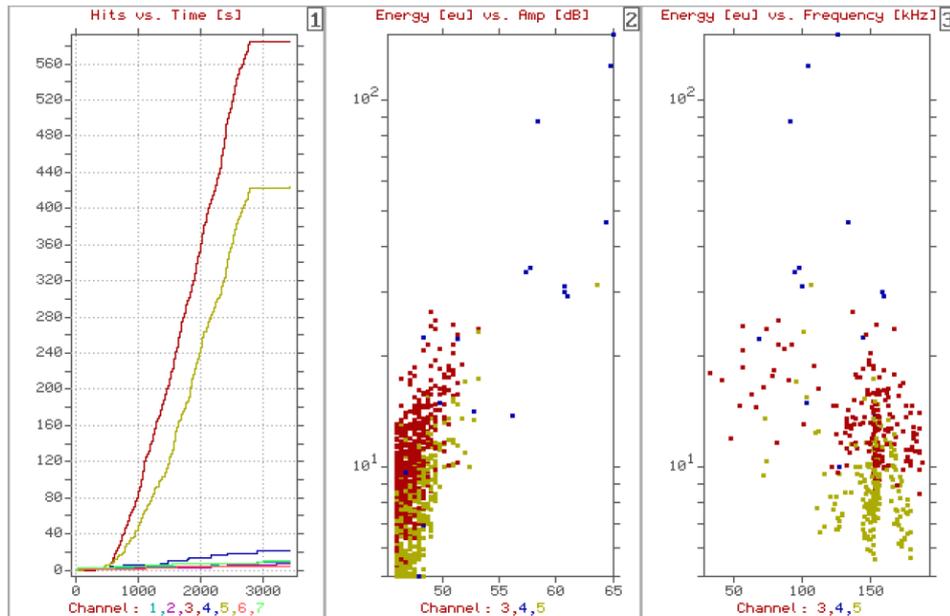


Рис. 83. Некоторые графические формы для импульсных параметров, которые были использованы при анализе данных

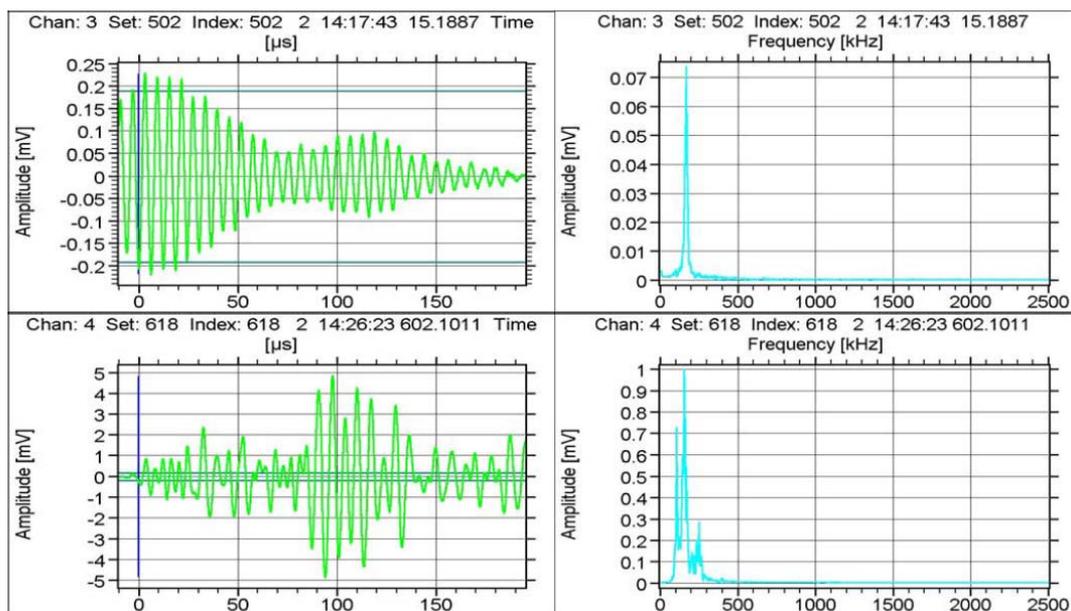


Рис. 84. Примеры сигналов, зарегистрированы от утечки (канал № 3) и от коррозионного растрескивания (канал № 4)

В результате через трещины вода из верхнего сосуда поступала в нижний и повышало в нем давление до того же значения, что и в верхнем сосуде. Это обстоятельство внесло дополнительные возмущения в структуру данных. Однако, использование АЭ для решения подобных проблем, возможно, является оптимальным. Во всяком случае, в рассмотренном примере удалось успешно определить тип всех дефектов и место их расположения.

5.1.3. Строительные сооружения

Метод АЭ используется во многих различных испытаниях строительных конструкций, в частности:

- тонкостенных стальных листов (главным образом – частей мостов) при испытаниях на циклическую усталость, метод АЭ регистрирует первые трещины в структуре прежде, чем их можно обнаружить визуально;
- деревянных и стеклянных панелей различных конструкций;
- плоской черепицы при контроле качества при различных температурах;
- кирпича при контроле качества и проверке кладки (кирпич со слоями бетона);
- армированного бетона при контроле коррозии;
- железобетонной градирни АЭС;
- мостов при контроле качества под нагрузкой;

- крупногабаритных промышленных конструкций, таких как коробчатых блоков пролетных строений мостов, перекрытий цехов и т. д. [7, 14].

Датчики сигналов АЭ устанавливаются на узлах конструкции, находящихся (согласно расчетным эпюрам напряжений) в напряженно-деформированном состоянии. Мосты контролируются при нагружении движущимся транспортом, который обеспечивает деформирование. Если в контролируемом блоке есть трещины, то появляется существенная АЭ (до 1000 импульсов). В бетоне в ненагруженном состоянии непрерывно происходят деструктивные процессы, вызывающие АЭ, активность которой не превышает 4–5 имп/ч. При проведении нескольких обследований, метод АЭ позволяет с хорошей воспроизводимостью сравнивать напряженно-деформированное состояние идентичных узлов конструкции при отсутствии в них дефектов.

Нагруженность *мостовых конструкций* напрямую связана с конструктивным исполнением моста. Нагрузки растягивающего типа присутствуют в конструкциях балочного (фермового) типа, нагрузки сжатия и изгиб в мостах арочного или комбинированного типа.

Статические нагрузки могут приводить к изменению проектного положения элементов конструкции и, соответственно, к дополнительным нерасчетным нагрузкам. Периодические, эксплуатационные нагрузки приводят к появлению усталостных трещин в местах геометрических концентраторов напряжений. Коррозионные процессы, являющиеся непременным спутником всех других видов повреждений моста, протекают, как правило, в труднодоступных местах и со временем могут привести к снижению несущей способности элементов конструкции. Наличие пор, включений в бетонных конструкциях могут приводить к существенному снижению остаточной прочности моста.

При разнообразии типов дефектов и мест их возникновения невозможно обеспечить достоверный контроль технического состояния моста каким-то одним методом неразрушающего контроля. Эта задача может быть решена на основе апробированного в различных условиях и на различных конструкциях метода АЭ позволяющего дать интегральную оценку состояния моста в совокупности с другими методами неразрушающего контроля. Такими дополнительными методами контроля могут быть методы измерения напряженно-деформированного состояния элементов моста с помощью тензометрии, методы измерения изменений проектного положения элементов конструкции моста с помощью датчиков больших линейных перемещений и методы оценки коррозионного состояния конструкции на основе образцов-свидетелей и других способов оценки коррозионного состояния (рис. 85) [30].

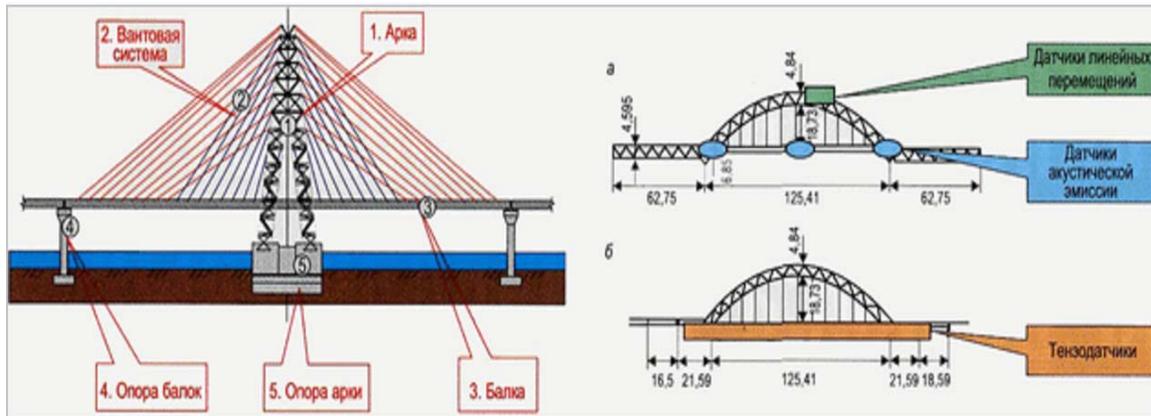


Рис. 85. Комплексный мониторинг мостов

На рис. 86 приведена схема размещения мониторингового комплекса в центральной части здания библиотеки МГУ им. Ломоносова.

Целью проведения данных работ являлось:

- выявление имеющихся дефектов и повреждений в основных несущих конструкциях и установление отступлений от проекта;
- анализ данных предоставленных специалистами, принимавшими участие в проектировании и строительстве здания библиотеки, и экспертная оценка по результатам данного анализа;
- создание расчетной схемы здания библиотеки и определение перечня контролируемых конструкций и элементов здания, а также установление расчетных предельных значений по деформациям несущих конструкций и устойчивости здания.

5.1.4. Шахты и рудники

АЭ может применяться для прогноза динамических явлений в угольных шахтах и рудниках. Во время проведения горных работ внутри породы происходят изменения структуры на различных уровнях, которые характеризуются развитием процесса трещинообразования, сопровождаемого высвобождением энергии в виде АЭ. Появление АЭ наиболее характерно на тех участках горных пород, которые активно реагируют на изменение напряжений и могут разрушаться под влиянием горного давления [7].

При бурении буровой инструмент в первом приближении представляет собой плоский клин, который, непрерывно вращаясь, наносит удары по забою шпура, последовательно разрушая все новые и новые его участки. При этом происходит передача энергии удара разрушаемой породе, в результате чего разрушение возникает непосредственно под площадкой контакта инструмента с массивом трещин, ориентированных вглубь массива. После многократного воздействия на забой ударного

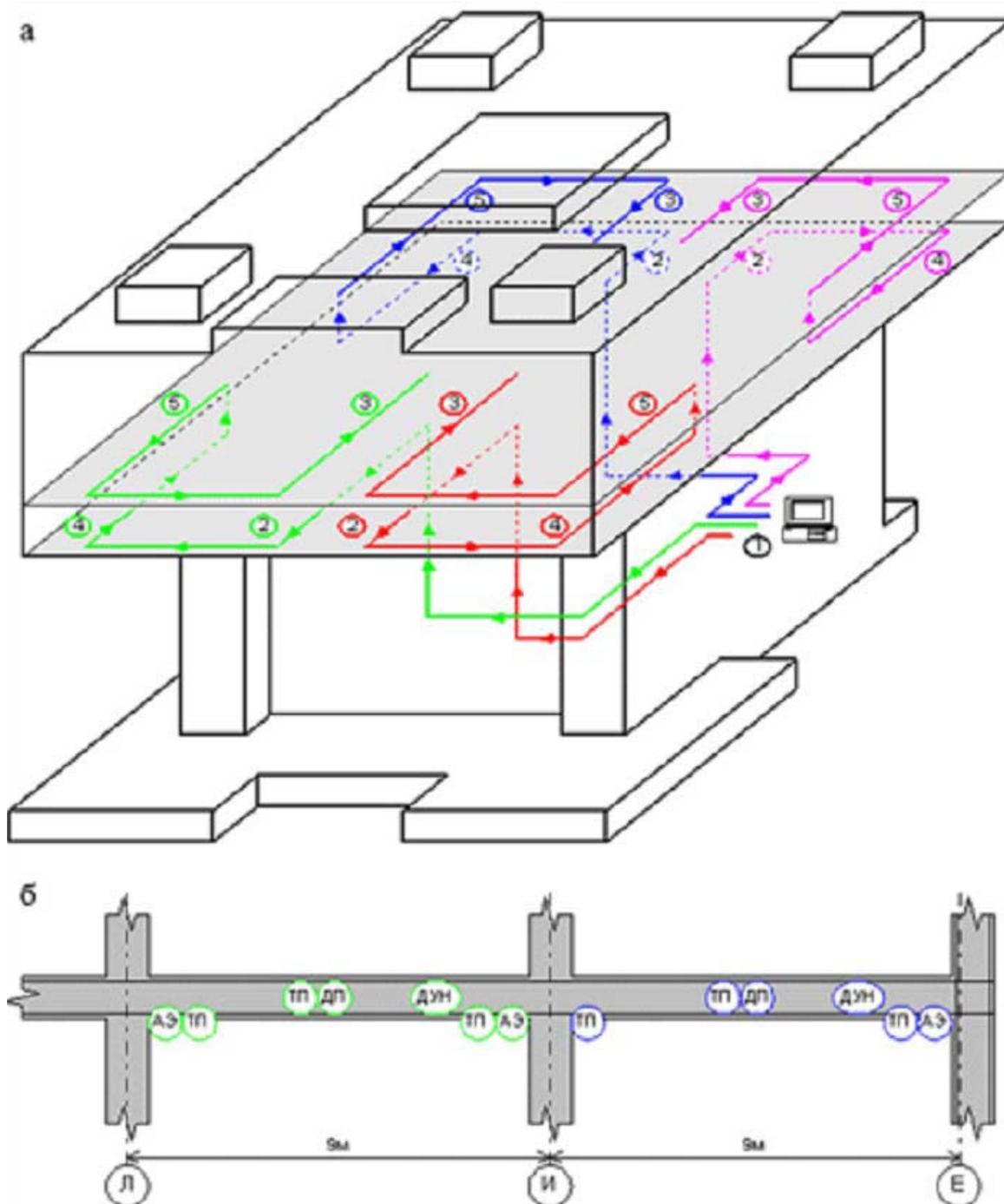


Рис. 86: а – схема размещения мониторингового комплекса в блоке «Б» библиотеки МГУ: 1 – центральная вычислительная станция; 2 – 9-ти метровые пролеты железобетонных балок на отметке 24,0 м; 3 – 9-ти метровые пролеты железобетонных балок на отметке 28,8 м; 4 – стены диафрагм жесткости на отметке 24,0 м; 5 – стены диафрагм жесткости на отметке 28,8 м; б – схема расстановки датчиков на балках (в осях Е-И и И-Л) на отметке 28,8 м (АЭ – преобразователи акустической эмиссии, ДП – датчики перемещения, ДУН – датчики угла наклона, ТП – тензопреобразователи)

механизма в зоне шпура появляются трещины усталости, которые, развиваясь, ведут к хрупкому разрушению. Таким образом, при бурении в скальных породах хрупкое разрушение обусловлено ударными и вибрационными нагрузками и уровнем напряженного состояния участка массива. При перемещении инструмента вглубь массива очаги разрушения, несколько опережая его, также перемещаются, играя роль центра возбуждения АЭ, распространяющихся в окружающем массиве.

Разрушение значительных масштабов возникает не внезапно, а подготавливается мелкомасштабным трещинообразованием, вызываемым неравномерностями поля напряжений или неоднородностью прочностных свойств породы.

Хрупкая порода хорошо накапливает упругую энергию и выделяет ее большими порциями в моменты образования крупных трещин. Пластично деформирующаяся порода, вязко разрушающаяся порода типа каменной соли и мрамора, рассеивает подводимую извне энергию одинаково хорошо в течение всего деформирования.

Вход горной выработки в опасную зону прогнозируется по обнаружению хотя бы одного всплеска активности АЭ, вероятность которого при ранее наблюдаемом ее значении не превышает 2 % (рис. 87).

В качестве прогностического параметра динамических явлений можно использовать спектр сигналов. В периоды, предшествующие развязыванию динамических явлений и характеризующиеся возрастанием напряжений вблизи краевой части пласта, частоты спектральных максимумов АЭ существенно повышаются [34].

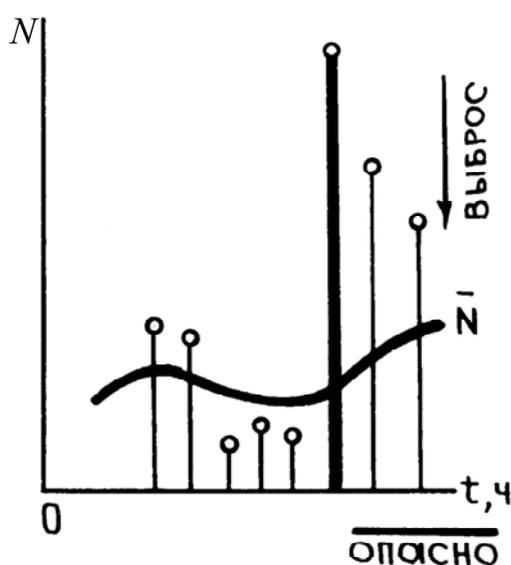


Рис. 87. Активность АЭ: утолщенной вертикальной линией показан всплеск, горизонтальной линией отмечена опасная зона

5.1.5. Механизмы и машины

Подъемные механизмы. АЭ контроль используется для инспекции кранов мостового типа, кранов железнодорожных, порталных и кранов-перегрузателей. Обнаруживаются дефекты в сварных швах, в основном металле балок крана, зоны пластического деформирования конструкций от нерасчетных нагрузок. Нагружение конструкции происходит при контрольном статическом и динамическом воздействии в соответствии с правилами Госгортехнадзора. Визуальный осмотр конструкции проводится в ограниченном числе зон. Не требуется осуществлять стопроцентного инструментального контроля сварных швов крана, а производить только уточнение в зонах, выявленных при АЭ измерениях.

Обнаруживаются дефекты в сварных швах, в основном металле балок крана, зоны пластического деформирования конструкций от нерасчетных нагрузок. Нагружение конструкции происходит при контрольном статическом и динамическом воздействии (рис. 88).

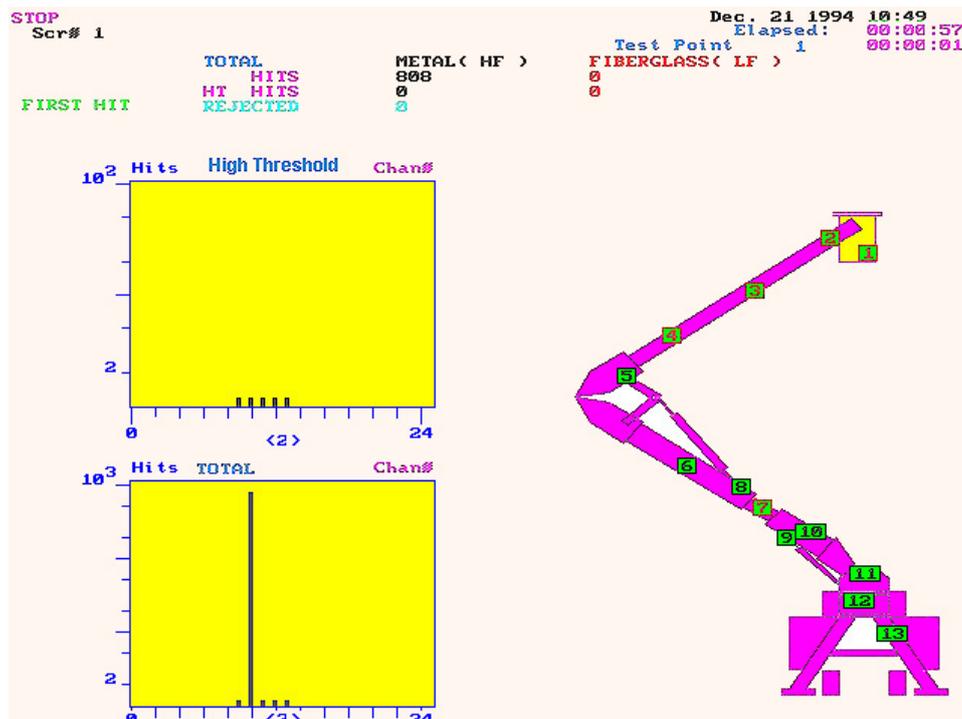


Рис. 88. Карта локации и данные предварительного и основного цикла нагружения железнодорожного крана

Имеется положительный опыт применения АЭ метода для диагностики металлических конструкций подъемников для ремонта нефтяных скважин [40]. Методические указания МУ-01-003-01 «Проведение акустико-эмиссионного контроля металлоконструкций подъемников для ремонта скважин» разработаны по заданию ОАО «Лукойл» в ООО

«Диапак». Исследования показали, что уверенный прием сигналов АЭ, при использовании датчиков типа R15I с резонансной частотой 150 кГц со встроенными предусилителями на 40 дБ, и при пороговом значении 40 дБ, достигается, когда расстояние между датчиками не превышает 6 дБ. Характерные примеры установки датчиков, предусилителей и имитатора даны на рис. 89.

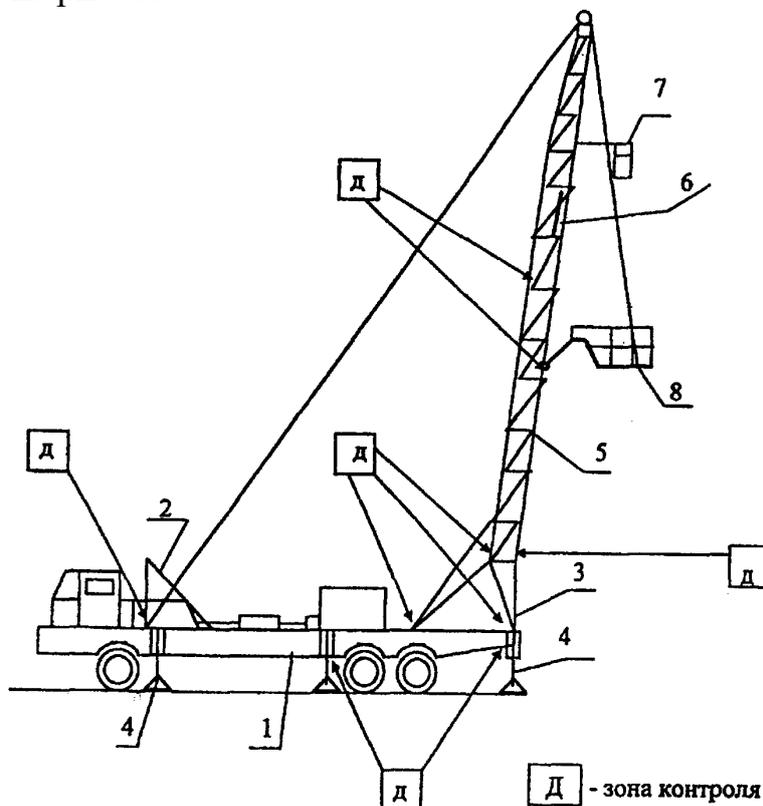


Рис. 89. Подъемник для капитального и текущего ремонта скважин:
 1 – рама шасси; 2 – транспортная опора мачты; 3 – опора мачты;
 4 – аутригеры гидравлические; 5 – опорная секция мачты; 6 – выдвигная секция мачты; 7 – балкон верхового рабочего; 8 – балкон для работы с трубами

5.1.6. Технологические процессы

Контроль сварных соединений. АЭ возникает как непосредственно в процессе сварки, так и после ее окончания – при охлаждении сварного шва и в последующие несколько десятков или сотен минут, в течение которых материал шва и околошовной зоны стремится к равновесному состоянию. В первую очередь, это связано с тем, что возникающие при сварке термические напряжения пластически деформируют материал или вызывают его растрескивание. АЭ от дефектных сварок характеризуется значительным числом импульсов взрывной АЭ. Обнаружение различий между характером эмиссии дефектных и бездефектных сварок затруднено наличием мешающих шумов, которые можно разделить на две группы:

- шумы сварочной установки – электрической дуги, истечения защитного газа, механического движения отдельных частей установки, плавления, затвердевания и растрескивания флюса, некоторые другие;
- шумы, связанные с процессами сварки, – пластическая деформация шва в околошовной зоне, фазовые превращения в материале.

Характеристиками, по которым можно разделить сигналы о дефектности сварки и шумы, являются спектральная плотность, амплитудное и временное распределения. Оптимальная полоса частот регистрации принята равной 450–1500 кГц. Каналы, регистрирующие импульсы большой амплитуды, заполняются только при прослушивании дефектных сварок. Основная доля импульсов зарегистрирована в течение первого часа после окончания сварки. Временной анализ с использованием двух преобразователей позволяет локализовать место возникновения сигнала и таким образом отфильтровать внешние шумы [7, 14].

При образовании сварочных трещин эмиссия имеет большие амплитуды по сравнению со случаем качественных швов. Отклонения в режиме работы сварочного аппарата от заданного приводят к интенсивной АЭ в процессе сварки, что может служить показателем качества работы сварочного агрегата.

Измерения параметров АЭ при сварке качественных и дефектных сварных швов показали следующее: уровень сигналов АЭ в процессе сварки очень велик (до 35–40 дБ) и вызван наличием флюса. Основная часть мешающих сигналов создается растрескиванием шлаковой корки. Излучение наблюдается как в процессе сварки, так и длительное время после ее окончания. В этих условиях выделить сигналы АЭ, связанные с развивающимися дефектами шва, не представляется возможным. Для качественных швов уровень сигналов АЭ невелик (в основном до 10 дБ). Образование и развитие трещин во всех случаях сопровождалось сигналами с высоким уровнем (до 30–45 дБ). При выполнении многопроходных швов дефекты, заложенные на первом проходе, надежно обнаруживались по указанному признаку и после наложения остальных слоев в процессе последующего охлаждения шва.

Анализ амплитудных распределений показывает, что основное число импульсов выделяется в течение первого часа. Для дефектных швов в большинстве каналов накапливается большее число импульсов, чем для качественных швов.

АЭ аппаратура применяется для мониторинга трубопроводных обвязок предприятий различных отраслей, которые находятся под постоянным внутренним давлением. Датчики устанавливаются в особо опасных местах, при достижении параметрами АЭ сигналов критического уровня сигнализирует о наличии опасной ситуации.

5.1.7. Объекты специального назначения

При прочностных исследованиях *авиационных конструкций* метод АЭ находит весьма ограниченное применение. Вызвано это тем, что такие конструкции представляют собой многосвязные объекты с различной конфигурацией деталей. Используя метод АЭ, следят за состоянием отдельных узлов авиационной техники в реальном времени без демонтажа [24].

При испытании натуральных авиационных конструкций в основном приходится ограничиваться контролем отдельных однородных деталей, таких как стойки шасси, различные панели и т. д. Объясняется это тем, что авиационные металлические конструкции являются тонкостенными оболочечными, что приводит к полимодальности и быстрому затуханию сигнала АЭ. Для таких конструкций характерна дисперсия акустических сигналов, трансформация одного типа колебаний в другой и переотражение. К тому же множество заклепок, сварных швов, подкрепляющих элементов создают дополнительный шум во время испытаний.

Для конструкций самолетов, состоящих из композиционных материалов, типичными повреждениями являются растрескивание матрицы, разрыв упрочняющих волокон, расслоение композиционного материала, трещины в металле и разрушения крепежа. Главными причинами таких повреждений могут быть удар, перегрузка и усталость материала. На рис. 90 приведены графики активности сигналов АЭ и нагрузки, полученные при испытаниях до разрушения лонжерона крыла легкого спортивного самолета, выполненного из углепластика.

Метод АЭ используется для создания бортовых систем, контролирующих структурные дефекты и усталостные повреждения в виде трещин на крыльях самолета. Специфической проблемой в построении таких бортовых систем является получение высокого отношения полезный сигнал/шум с учетом высоких уровней последнего. На рис. 91 показана упрощенная схема с основными функциональными блоками:

1 – пилот, 2 – объект контроля, 3 – преобразователь, 4 – индикаторное устройство.

Применение АЭ систем в качестве бортовой аппаратуры требует решения сложных задач по обеспечению ее совместимости с другими системами самолетного оборудования. Основными трудностями при АЭ контроле целостности самолета в полете является получение однозначной идентификации источников сигналов (роста трещин, трения поверхности трещин, структурных шумов). Основными источниками помех в полетных условиях являются: шумы реактивных двигателей; шумы гидравлических систем; шумы от трения.

Шумы механических и гидравлических систем являются низкочастотными и относительно просто фильтруются.

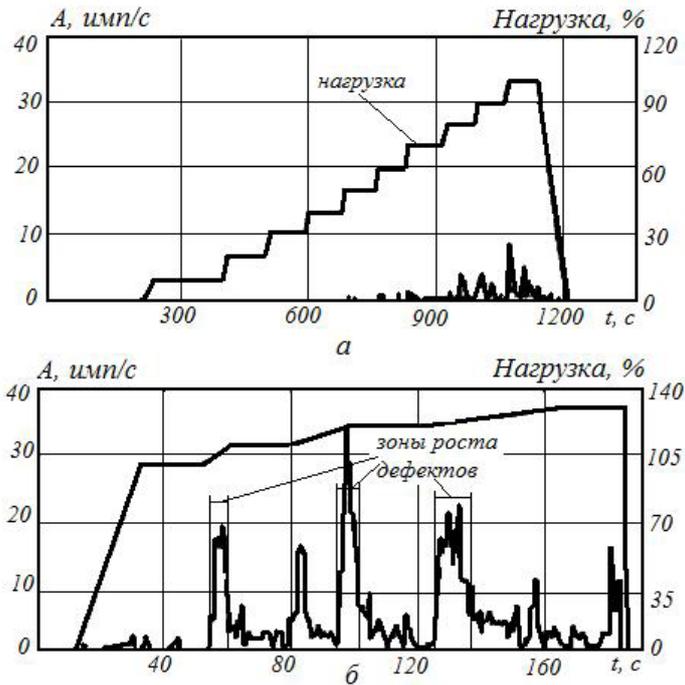


Рис. 90. Активность сигналов АЭ, полученная при испытаниях до разрушения лонжерона крыла легкого спортивного самолета из углепластика

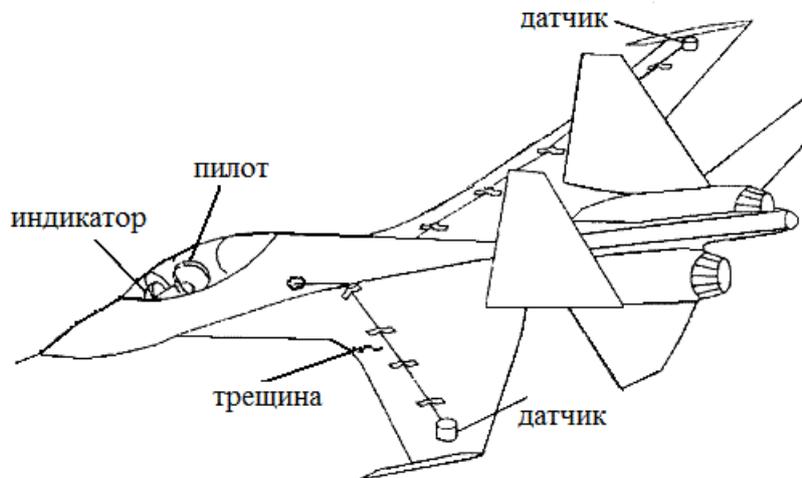


Рис. 91. Упрощенная схема размещения основных функциональных узлов бортовой диагностической АЭ системы

Шумы от трения являются типичными для авиационной техники. Наибольший уровень этих шумов создается на участках крепления крыла к корпусу. К тому же сигналы от трения подобны сигналам АЭ и их подавление вызывает определенные трудности. Большие сигналы от шумов за счет трения являются признаками неисправности в самолете и их необходимо тщательно регистрировать.

Шумы механических и гидравлических систем являются низкочастотными и относительно просто фильтруются.

Шумы от трения являются типичными для авиационной техники. Наибольший уровень этих шумов создается на участках крепления крыла к корпусу. К тому же сигналы от трения подобны сигналам АЭ и их подавление вызывает определенные трудности. Большие сигналы от шумов за счет трения являются признаками неисправности в самолете и их необходимо тщательно регистрировать.

Бортовая подсистема является автономным устройством, предназначенным для автоматической регистрации АЭ сигналов в течение продолжительного промежутка времени и содержит ПЭП, предусилители, центральный блок сбора и обработки данных. В центральном блоке осуществляется запись моментов времени поступления сигналов АЭ, нагрузок, а также число накопленных сигналов и полетного времени. Вторая подсистема обеспечивает проверку работоспособности первой подсистемы с помощью имитатора сигналов АЭ, а также осуществляет градуировку системы. Третья подсистема обеспечивает получение карт расположения источников АЭ и оценку их значимости. Ею производится определение и анализ корреляционных зависимостей сигналов АЭ (скоростей роста усталостных трещин) с числом циклов нагружения и величинами нагрузок.

Проводятся также прочностные испытания *объектов железнодорожного транспорта* (карданные валы электровозов, оси колесных пар, серповидных подвесок электровозов, боковых рам и надрессорных балок тележки грузового вагона) с использованием метода АЭ. Такие объекты контроля работают в сочленении с другими деталями. Сигналы АЭ от трения из области сочленения обладают таким же спектром и формой, как и АЭ системы от дефектов. Поэтому для их отбраковки следует применять локализацию паразитных сигналов.

Для различных областей применения АЭ диагностики диапазоны частот распределяются следующим образом [32]:

0,02	0,2	2	20	200	2000 кГц
<u>подвижки горных пород</u>					
<u>строительные конструкции</u>					
<u>магистральн. трубопроводы</u>					
<u>течи</u>					
<u>круп. установки</u>					
<u>физика тв. тела</u>					
<u>сварка</u>					
<u>малогабаритные изделия</u>					

5.2. Обнаруживаемые дефекты

5.2.1. Трещины

Образование и развитие трещин в конструкционных материалах определяются различными факторами (свойства материала, вид напряженно-деформированного состояния, скорость нагружения, температура, среда и т. д.).

При развитии трещины происходит концентрация напряжений вблизи острого края дефекта. В этом месте образуется локальная зона пластической деформации, объем которой пропорционален коэффициенту интенсивности напряжений K -величине, характеризующей сложное напряженное состояние. Например, для тонкой пластины с трещиной длиной $2l$ $K = \sigma\sqrt{\pi \cdot l}$. От этой зоны появляются импульсы АЭ, число которых также связано с K . Когда напряжение превосходит предел прочности, происходит микроразрыв – скачкообразное увеличение дефекта. Он проходит через эту зону, в результате чего появляются сигналы АЭ. При дальнейшем нагружении процесс повторяется. Таким образом, число импульсов N АЭ должно расти с ростом K . Связь эту определяет формула:

$$N = A \cdot K^m, \quad (17)$$

где – N суммарная АЭ, A , m – константы материала, K – коэффициент интенсивности напряжений, причем m колеблется для различных материалов от 1 до 20. Нижние значения показателя соответствовали образцам, разрушившимся вязко, верхние – хрупко. Разрушение, сопровождающееся деформацией двойникования, а также хрупкое разрушение даст показатель степени, превышающее 4 [24].

Таким образом, информативный параметр, сигнализирующий о приближении разрушения – это рост суммарного числа импульсов N с начала испытаний. В пользу такого подхода говорит тот факт, что каждый импульс АЭ – это, как правило, единичный акт разрушения. Коэффициент интенсивности напряжения в формуле (17) растет при каждом новом разрушении. Отсюда для разрушающегося объекта:

$$N = A' \cdot \Pi^m, \quad (18)$$

где показатель степени m аналогичен входящему в (16), A' – константа, а Π – параметр нагружения. Он может соответствовать механическому напряжению, числу циклов испытаний, времени испытаний при коррозионном растрескивании и т. д.

На рис. 92 показана характерная кривая роста числа импульсов в режиме увеличения статической нагрузки объекта. На первом участке

до P_1 рост определяется зависимостью (18), $m < 1$. На участке $P_1 - P_2$ показатель $m \approx 1$. Локальная область, где происходит такой рост, соответствует активному источнику, требующему внимания. Участок $P_2 - P_3$ соответствует упрочнению материала. На участке $P_3 - P_4$ дефект преодолел зону упрочнения и развивается. Здесь $m \approx 2$, источник АЭ критически активен. При дальнейшей нагрузке источник становится катастрофически активным, $m \geq 6$. При сохранении режима нагружения объект обязательно разрушится по участку, где был источник эмиссии. Ступенчатый характер кривой соответствует скачкообразному росту трещин.

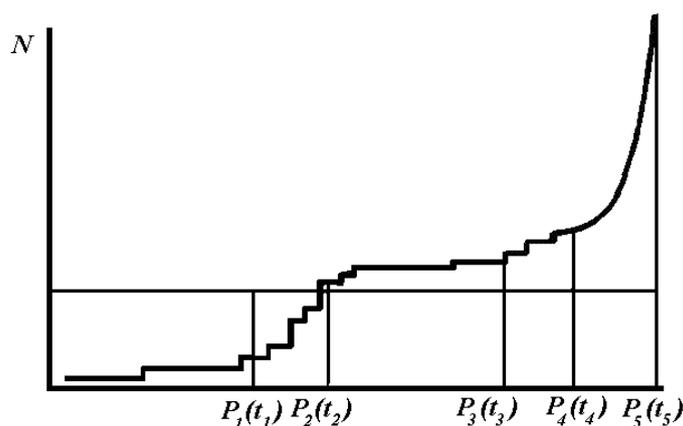


Рис. 92. Характерная зависимость числа импульсов от статической нагрузки

При образовании и развитии трещин сигналы АЭ вызываются пластической деформацией материала в вершине надреза или трещины, образованием или слиянием микротрещин в окрестности вершины трещины, скачкообразным продвижением трещины на докритической стадии ее развития.

На рис. 93 показано изменение параметров АЭ при развитии трещины в образце из сплава Д16АТ.

Первый скачок трещины, связанный с заметной релаксацией нагрузки, надежно обнаруживается по появлению сигнала с большой амплитудой (превышающей малые амплитуды на порядок и более) [7].

Таким образом, также критерий обнаружения продвижения трещины – сигналы АЭ с большими амплитудами. Их значение устанавливается экспериментально для каждого конкретного материала. Продвижение трещины отражается на виде амплитудного распределения сигналов АЭ. Если при пластической деформации амплитудное распределение близко к экспоненциальному, то развитие трещины характеризуется более равномерным амплитудным распределением с увеличением

относительной доли больших амплитуд. Следовательно, устанавливая определенные уровни дискриминации, можно выделять сигналы, связанные с продвижением трещины.

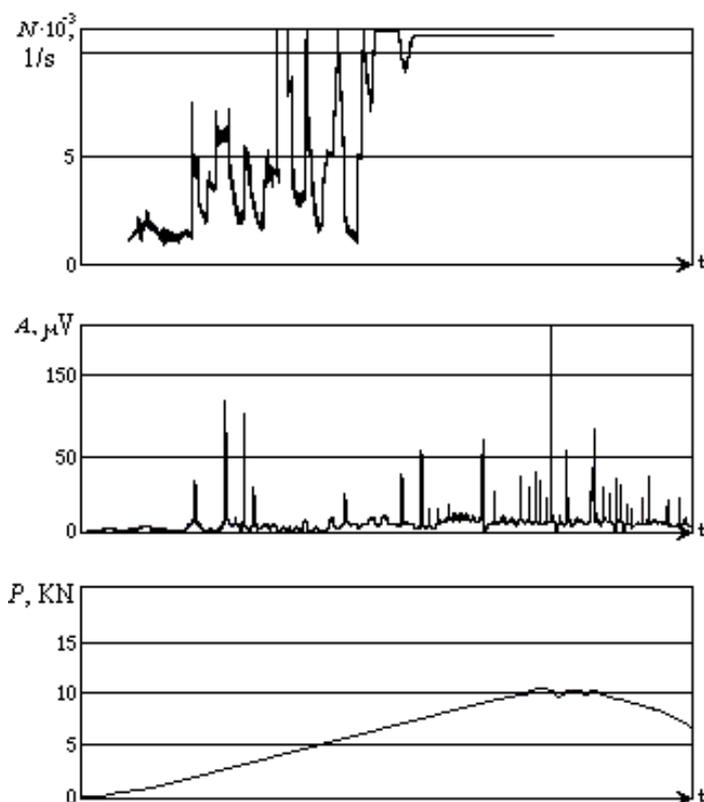


Рис. 93. Зависимость скорости счета \dot{N} – (а), амплитуды и сигналов АЭ – (б) и нагрузки P (в) от времени t для образца из сплава Д16АТ с надрезом и начальной трещиной

Для усталостных трещин характерны следующие параметры:

- 1) в момент зарождения трещин наблюдается повышенная активность сигналов АЭ, увеличивается их амплитуда. Максимальная энергия при этом находится в диапазоне частот до 400 кГц. После зарождения усталостной трещины наблюдается большой промежуток времени, когда сигнал АЭ излучает незначительные амплитуды;
- 2) при переходе к моменту предкритического развития трещины наблюдается повышение активности сигнала АЭ, хотя сами сигналы АЭ обладают незначительной энергией;
- 3) в момент перехода усталостной трещины в критическую область, снова начинается резкое увеличение активности и амплитуды сигналов АЭ. При этом максимум парциальной энергии смещается в область низких частот [19].

Использование метода АЭ менее эффективно при циклических нагрузках по сравнению с монотонным. Это вызвано как усложнением механизма роста усталостной трещины. Если при монотонном нагружении главный вклад в АЭ излучение дают увеличение пластической зоны и рост трещины, то при циклическом появляется дополнительная генерация сигналов АЭ от трения берегов трещины.

При циклических нагрузках претерпевает изменение и формулировка эффекта Кайзера: в процессе повторного нагружения значительно снижается энергия сигналов АЭ по сравнению с зарегистрированными при первом нагружении. Это объясняется тем, что при длительных статических нагрузках для некоторых материалов происходит изменение внутренней структуры. Такие изменения порождают сигналы АЭ, что приводит к отклонению от эффекта Кайзера.

5.2.2. Расслоения

Расслоения являются одним из опаснейших дефектов для конструкции. При развитии расслоения сопровождаются пластической деформацией и трещинообразованием у концов дефекта и характерной для этих процессов акустической эмиссией.

5.2.3. Коррозия

Большинство объектов АЭ контроля работают под напряжением и для них в большей мере характерна коррозия под напряжением.

В процессе коррозии под напряжением повторяющиеся циклы диффузии водорода впереди вершины трещины сопровождаются непрерывным излучением, скол по наводороженной зоне – взрывной АЭ. Можно выделить три стадии процесса коррозионного повреждения под напряжением (рис. 94). На первой происходит диффузия водорода через окисную пленку на поверхности металла. Процесс сопровождается резким возрастанием энергии АЭ относительно фоновых значений (в 100–200 раз), в излучении присутствуют, в основном, непрерывные и частично дискретные сигналы АЭ. Затем изменяются внутренние напряжения в металле, скорость эмиссии падает. Сигналы излучения следуют более равномерно, чем на первой стадии, реализуются пакетами по 50–200 импульсов.

На третьей стадии (доллом) энергия АЭ от степени наводороживания не зависит, так как этот процесс практически не меняет сопротивление материала динамическому разрушению. Сигналы излучения при долломе, как правило, дискретные [15]. Дискретные высокочастотные импульсы с частотой 400–500 кГц отвечают пластическим деформациям в вершине подрастающей трещины. Высвобождение энергии при скачке магистрального разрыва и образование вторичных микротрещин в охрупченной зоне сопровождается высоко амплитудной АЭ с доминантной частотой сигнала, изменяющейся от 150 до 300 кГц.

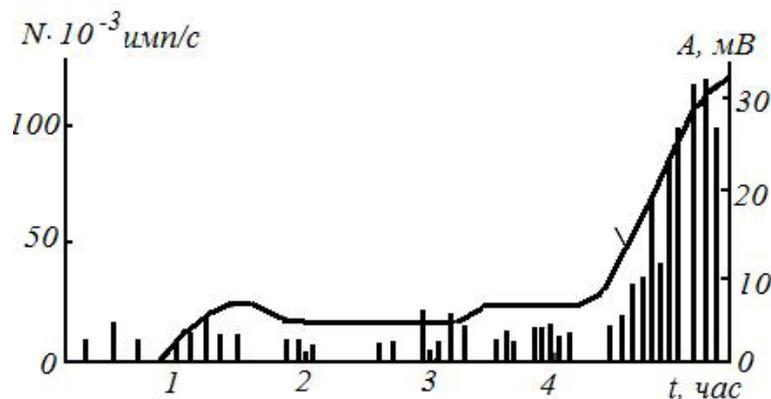


Рис. 94. Характер сигналов АЭ при разрушении компактного образца из стали 45 в газообразном водороде

Образование трещин больших, чем размер зерна, сопровождается появлением сигналов с амплитудами в несколько десятков милливольт. Деформация скольжения и электрохимическое растворение металла проявляется в виде непрерывной АЭ с амплитудами в несколько десятков микровольт. При двойниковании и пластическом деформировании в вершине трещины наблюдается АЭ с амплитудами, достигающими 200 мкВ. Разрыву окисных пленок отвечают импульсы до 10 мкВ.

У материалов, склонных к водородному охрупчиванию, рост коррозионной трещины происходит по водородному механизму. В этом случае перед вершиной трещины при совместном воздействии максимальных напряжений, деформаций и критической концентрации водорода возникают микротрещины, которые впоследствии сливаются с макротрещиной. В этом случае сигналы АЭ будут генерироваться как образованием микротрещины, так и ростом магистральной макротрещины. Возможны также сигналы с малыми амплитудами при диффузии водорода в зону максимальных напряжений и деформаций.

Прерывистый характер развития коррозионной трещины объясняется также чередованием электрохимического и чисто механического пути ее развития. На основании этой концепции старт трещины происходит под действием электрохимических процессов, а непосредственный рост трещины обусловлен механическими факторами. Величина скачка при таком развитии определяется расстоянием до границы зерна или включения.

5.2.4. Трение

Акустические колебания при трении инициируются ударным взаимодействием микровыступов сопрягаемых поверхностей, процессами разрушения фрикционных связей и структурно-фазовой перестройки материалов, образования и развития трещин и микротрещин в поверхностных слоях взаимодействующих тел, отделения частиц износа [15, 46].

АЭ при трении рассматривается на микро- и макроуровнях. В первом случае акустический сигнал обусловлен дислокационными явлениями, локальной перестройкой дефектов в поверхностных слоях взаимодействующих материалов, во втором – источниками излучения являются трансформации фрикционных связей.

Для правильного понимания процесса излучения существенным является вид разрушения фрикционных связей. Если действующая нагрузка и адгезия не приводят к возникновению в зоне контакта напряжений, превышающих предел текучести, то имеет место упругое отеснение материала выступами контртела, сопровождающееся незначительной интенсивностью акустического излучения. При увеличении циклов воздействия активность эмиссии возрастает, так как в результате фрикционной усталости наблюдается разрушение (износ) материала. Если контактные напряжения достигают разрушающих значений, т. е. происходит микрорезание, то оно сопровождается значительной интенсивностью эмиссий, так как в этом случае с первых актов взаимодействия активируются наиболее энергоемкие источники излучения, обусловленные разрушением материала.

Существенно влияет среда, в частности, адсорбированные и хемосорбированные вещества. Хемосорбция атомов кислорода на металлической поверхности трения, приводящая к образованию окисной пленки, способствует изменению энергетических параметров АЭ. С одной стороны, пленка окислов является барьером для выхода дислокации на поверхность трения, т. е. уменьшает амплитуду АЭ, с другой – окисные пленки, несмотря на высокую прочность, легко разрушаются, что приводит к инициированию наиболее энергоемких источников эмиссии и повышению активности акустического излучения.

Акустические колебания при трении инициируются вследствие одновременного протекания трех взаимосвязанных процессов: адгезионно-деформационного взаимодействия поверхностей; изменения под влиянием фрикционного взаимодействия физико-механических свойств поверхностей и присутствующих на них пленок; разрушения поверхности трения. В результате этого параметры возникающего излучения определяются свойствами исходных материалов, режимом работы трибосистемы.

Энергетические параметры АЭ определяются не только механической прочностью фрикционного контакта, но и динамической неоднородностью структуры поверхностного слоя. Окружающая среда влияет на акустическое излучение посредством изменения микроструктуры поверхностного слоя. Пространственно-временная локализация единичных источников эмиссии определяется дискретностью и неоднородностью реального контакта.

Стимулированная фрикционным взаимодействием АЭ, в свою очередь, вызывает акустическое возбуждение поверхности трения и сопутствующие ему дифракционные, интерференционные явления, процессы контактного и внутреннего демпфирования [13, 15].

Особенности частотного спектра АЭ при трении:

- наличие характерной частоты, излучение на которой максимально;
- линейный с увеличением частоты рост интенсивности в низкочастотной области спектра и кубический спад ее в высокочастотной области.

Амплитудное распределение АЭ при фрикционном взаимодействии твердых тел обусловлено изменением энергии упругости поверхностных и приповерхностных слоев и существенным образом зависит от их свойств – параметров шероховатости, наличия микроповреждений, наличия и качества смазочного слоя и др. Поэтому характеристики амплитудного распределения могут являться эффективными диагностическими параметрами при контроле узлов трения.

Амплитуда сигналов АЭ определяется изменением давления на площадках микроконтакта – пятнах контакта, в процессе взаимного перемещения поверхностей. Поэтому амплитудное распределение АЭ сигналов связано с распределением напряжений на участках контактного взаимодействия поверхностей.

Контроль приработки пар трения. Под приработкой понимается процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-механических свойств поверхностных слоев материала в начальный период эксплуатации узла. Методы определения момента окончания приработки по параметрам АЭ основаны на регистрации момента времени, начиная с которого тот или иной параметр АЭ перестает изменяться во времени. Наиболее просто применение скорости счета, дисперсии амплитуд импульсов АЭ и коэффициента корреляции.

Резкое (на 20 % и более) увеличение скорости счета указывает на начало разрушения покрытия или смазочного слоя на поверхностях трения.

Дальнейшему трению соответствует нестационарное поведение скорости счета АЭ со значительными колебаниями относительно среднего значения. Более точное определение момента появления нарушения смазочного слоя можно установить, проверив наличие тренда в выборке значений регистрируемой скорости счета АЭ.

5.2.5. Утечки жидкости и газа

Акустический метод течеискания основан на анализе параметров акустических колебаний, генерируемых течью в окружающей ее среде. Струя жидкости, выходя из отверстия, возбуждает акустические шумы, главным образом, на звуковых частотах, распространяющиеся по стенкам

объекта и возникающие при движении продукта истечения через течь под действием перепада давления. Регистрируемые течеискателем сигналы, возникающие при утечке, аналогичны сигналам непрерывной АЭ [7, 16].

Первым признаком появления утечки является активизация одного или двух близко расположенных каналов с плавным нарастанием числа импульсов при практически отсутствующей реакции на это других каналов. Вторым признаком служит характер акустических сигналов: генерируются однотипные импульсы средней и малой амплитуды.

Общее ослабление звука в столбе жидкости с упругим обновлением слагается из двух составляющих затухания: поглощением в жидкой среде, из-за трения жидкости о стенки трубы. В жидкости не содержится пузырей газа, влияние двух первых составляющих незначительно. Затухание возрастает пропорционально коэффициенту потерь и частоте, уменьшаясь с увеличением отношения толщины стенки трубы к ее внутреннему диаметру. Длина пробега звуковой волны в стальной трубе диаметром 1000 мм с толщиной стенки 20 мм составляет на частотах 0,1; 1; 10 кГц, соответственно, 65; 8 и 1 км. Измеряя уровень шума и сдвиг по фазе между сигналами в местах установки приемников, можно определить место и величину утечки.

Эффективная ширина полосы частот типовых помех (от работающих насосов, протечек жидкости в трубопроводах и др.) может достигать 100 кГц; их мощность с повышением частоты снижается. В то же время спектры сигналов, генерируемых течью, занимает более широкую полосу, поэтому переход в область частот выше 100 кГц позволяет в значительной мере уменьшить влияние помех. В зависимости от спектра сигнала и акустических свойств объекта верхнюю границу выбирают в пределах 200–600 кГц.

На рис. 95 показано изменение параметров АЭ при образовании утечки воды в процессе гидравлических испытаний трубчатых изделий. При подъеме давления образовалась течь в уплотнении арматуры подсоединения манометра. Преобразователь АЭ находился от места течи на расстоянии 5 м. Сигналы АЭ имели непрерывный характер и отличались повышенными значениями параметров (слева на графике). После сброса давления течь была ликвидирована, и при последующем нагружении были зарегистрированы лишь сигналы, поступающие от развивающихся дефектов [7].

Максимальная интенсивность шумов от течи наблюдается в диапазоне до 100 кГц. На возможность обнаружения утечки из трубопровода влияют величина утечки, среда, в которую истекает продукт, его параметры, геометрия канала течи. Основными причинами генерации звука являются переход от ламинарного течения к турбулентному и возникновение кавитации [45].

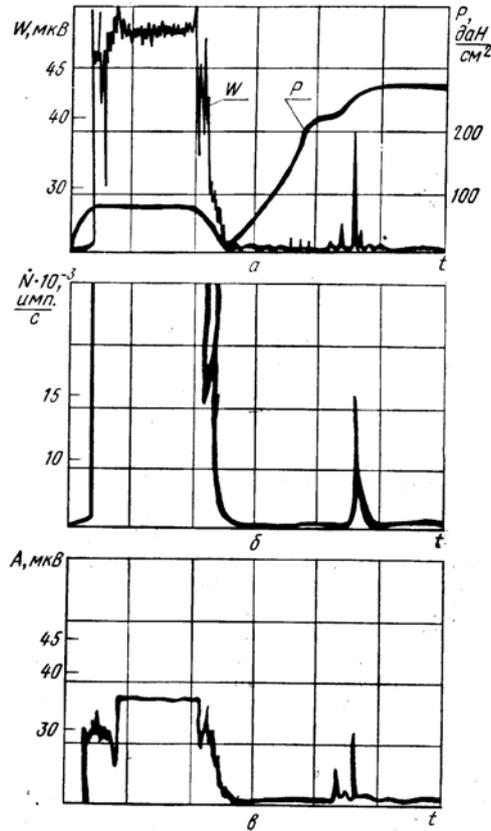


Рис. 95. Параметры АЭ при гидравлическом нагружении трубчатого изделия

Первым признаком появления утечки является активизация одного или двух близко расположенных каналов с плавным нарастанием числа импульсов при практически отсутствующей реакции на это других каналов. Вторым признаком служит характер акустических сигналов: генерируются однотипные импульсы и малой амплитуды.

В серийных испытательных машинах потенциальными источниками шумов являются гидравлические эффекты в сервоклапанах, работа приводов и трение в подвижных соединениях. Многие машины из-за этих причин вообще не пригодны в определенных частотных диапазонах для акустико-эмиссионных исследований без соответствующей модернизации. Для этого, исходя из конструкционных особенностей машины, определяют источники шумов, которые по возможности устраняются. Так, при проектировании испытательных машин избегают применения гидравлических насосов с возвратно-поступательным движением.

Для уменьшения силы ударных явлений при пульсации давления используют гидроаккумуляторы, причем насос для их подзарядки выносят за каркас машины. В механических нагружающих устройствах для уменьшения фоновых помех от трения частей и узлов машины применяются антифрикционные прокладки и тефлоновые покрытия подвижных деталей. Иногда при нагружении происходит соударение некоторых дета-

лей машины, генерирующее низкочастотные фоновые шумы в диапазоне 200 Гц – 200 кГц. Это значительно усложняет расшифровку акустико-эмиссионных данных, так как эти частоты часто включаются в рабочий диапазон прибора АЭ. С целью отстройки от таких помех используются специальные звукоизоляторы, предотвращающие попадание импульсов на образец, или шарикоподшипниковые направляющие. Важный фактор снижения неинформативных сигналов АЭ – правильное крепление образца в захватах машины и обеспечение отсутствия пластического течения образца в местах контакта с опорами и захватах. Для улучшения звуко- и электропомехозащиты всю машину или ее рабочую часть помещают в специальный блок. При этом между соединительными частями машины размещают звукопоглощающие прокладки. Перечисленные способы защиты от помех можно применять как для отечественных, так и зарубежных испытательных машин при акустико-эмиссионных исследованиях.

Даже после модернизации многие серийные машины остаются мало пригодными для прецизионных акустико-эмиссионных исследований. Поэтому для таких исследований создаются машины со специальными малошумящими устройствами. К ним относятся машины с ручным приводом и силовым нагружающим устройством, термическим нагружением и нагрузкой под действием собственного веса груза и т. д. Эти устройства имеют свои недостатки. Так, механические (ручные) машины мало мощные, что значительно ограничивает их применение при экспериментальных исследованиях. Более распространено устройство, в котором нагрузка создается под действием веса бака с водой. К недостатку такой конструкции следует отнести ее громоздкость. В экспериментальных исследованиях применяются также термические установки Тэтро и нагружающее устройство, создающее напряжение под действием груза (установка Скофилда). Общим их недостатком является то, что на них реализуются лишь простые законы нагружения.

Форма и размеры исследуемых образцов выбираются с учетом минимума внутренних отражений сигналов АЭ, а также необходимости разместить приемный пьезодатчик и устранить собственные резонансные частоты образца из рабочего диапазона частот приемной аппаратуры.

5.2.6. Построение моделей АЭ на основе лабораторных данных

Многие АЭ исследования предусматривают развитие методик контроля, которые могли бы использоваться в промышленных условиях. Эта работа является весьма ценной, однако существует немало трудностей, связанных с имитацией промышленных дефектов в лабораторных условиях.

Лабораторные испытания обычно проводятся путем приложения одноосных растягивающих нагрузок, в то время как при промышленной

эксплуатации конструкции подвергаются воздействию сложных двух или трехосных нагрузок. В этих случаях результаты лабораторных АЭ испытаний образцов могут служить в качестве моделей для материалов, используемых в промышленности [9].

Чтобы связать АЭ с параметрами разрушения материала было разработано множество моделей.

Один из первых подходов заключался в том, чтобы связать АЭ с размером пластической зоны и впоследствии с коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) вокруг дефекта. В других моделях устанавливалась связь АЭ с движением вершины трещины в условиях циклического нагружения и с коррозионным растрескиванием под напряжением для различных материалов.

Эти модели, в основном, имеют вид степенных соотношений, причем базовым АЭ параметром выступает акустический счет N . Более поздние и сложные модели позволили получить абсолютную связь прироста трещины с формой начального участка зарегистрированной волны.

Наиболее правдоподобной моделью сигнала АЭ можно считать стохастический импульсный процесс, который можно представить выражением:

$$u(t) = \sum_{i=1}^n u_i \cdot f(t - t_i, \tau_i),$$

где u_i – амплитуда i -го импульса, $f(t - t_i, \tau_i)$ – характеристика формы i -го импульса, t_i – момент появления импульса; τ_i – длительность импульса [12].

Параметры этого процесса: амплитуда, характеристика формы, момент возникновения импульсов, случайные величины, описываемые собственными законами распределения, связанными с характером динамических процессов в твердом теле.

5.2.7. АЭ мониторинг

На настоящий момент накоплен не малый опыт по созданию и использованию систем для мониторинга опасных технических объектов на основе акустической эмиссии. Рассмотрим некоторые из них.

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины совместно с АО «Видеотон» разработана стационарная система непрерывного мониторинга ЕМА-3S, позволяющая вести оценку фактического состояния объекта контроля без остановок и вмешательства персонала, в полном автоматическом режиме. В составе системы – технология принятия решения о степени опасности состояния контролируемого объекта, которые позволяют своевременно предотвращать аварийные ситуации (рис. 96) [41].

В США стандарт ASTM «Standart Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metall Pressure Bouldaries» действует с 1987 г. и был обновлен в 1992 г. Это значит, что с начала 80-х годов непрерывно накапливается опыт создания и эксплуатации комплексов АЭ мониторинга [42].



Рис. 96. Непрерывный мониторинг трубы аммиакопровода на мосту через реку Днепр

По заказу Федеральной администрации автострад в США реализуется программа установки комплексов АЭ мониторинга на мостах.

В Финляндии и в Австрии на двенадцати предприятиях, в числе которых нефтехимические и бумагоделальные заводы, в период с 1992 по 1997 гг. установлено 45 комплексов АЭ мониторинга. Эти комплексы установлены на резервуарах, реакторах, теплообменниках, турбинах, компрессорах и др. объектах.

В России работы по созданию комплексов АЭ мониторинга особо опасных промышленных объектов, таких как крупнотонажные изотермические хранилища сжиженных газов, начинались в конце 80-х начале 90-х гг. несколькими предприятиями.

Первые в России комплексы АЭ мониторинга типа «Ресурс-М» были созданы НПО «Алькор» в 1992–1993 гг. Эти комплексы работают непрерывно с января 1994 г. на заводе окиси этилена и гликолей, входящего в состав ОАО «Сибур-Нефтехим» [43]. Развитием комплекса «Ресурс-М» являются комплекс «Эксперт-20NN».

Система мониторинга LAM (Local Area Monitor) фирмы PAC предназначены для мониторинга мостов, трансформаторов, сосудов.

ГЛАВА 6

ПРИНЦИПЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЭ ДАННЫХ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ

6.1. Принципы и правила классификации объектов на основании данных технического контроля

Принципы и правила оценки состояния объекта контроля зависят от схемы применения АЭ контроля, результатов изучения ОК как акустического канала, особенностей условия проведения контроля, возможностей применяемой аппаратуры.

6.1.1. Классификация источников АЭ

Выявленные и идентифицированные источники АЭ делятся на четыре класса:

- источник I класса – пассивный источник;
- источник II класса – активный источник;
- источник III – критически активный источник;
- источник IV – катастрофически активный источник.

Катастрофически активный источник АЭ сигнализирует о необходимости немедленной остановки и сбросе нагрузки. Если источник попадает под определение критически активного, то считается, что конструкция находится в критической ситуации и необходимо применить другие методы контроля. Если источник является активным, то возможен дальнейший рост дефекта. Параметры этого дефекта также должны быть оценены другими методами НК. Пассивный источник регистрируют для анализа динамики его последующего развития.

6.1.2. Критерии оценки источников АЭ

Применение конкретных систем классификации источников АЭ и критериев оценки состояния объектов зависит от механических и акустико-эмиссионных свойств материалов контролируемых объектов. Выбор системы классификации и критериев оценки состояния объекта проводят, используя перечисленные ниже системы классификации и критерии оценки состояния контролируемого объекта [22]. Выбор критериев классификации источников АЭ и соответствующих уровней браковки рекомендуется осуществлять каждый раз при разработке программы работ.

1. *Амплитудный критерий* – регистрация в источнике, по меньшей мере, 2 импульсов с амплитудой, удовлетворяющей условию затухания распространения сигнала от источника.

2. *Локально-динамический критерий (критерий Иванова–Быкова, кинетический)* – ускоренный рост числа импульсов, суммарного счета, либо другого суммарного параметра АЭ в источнике, либо по ближайшему к нему датчику (каналу) относительно параметра нагружения (давления, времени и др.).

Оценку производят в реальном масштабе времени с использованием следующих параметров АЭ:

N_{i+1} – число выбросов в последующем событии;

N_i – число выбросов в предыдущем событии, либо

E_{i+1} – энергия последующего АЭ события;

E_i – энергия предыдущего АЭ события.

Вместо энергии может быть использован параметр U^2 – квадрат амплитуды. Для каждого события вычисляют величины:

$$V_{i+1} = \left(1 + \frac{P_{i+1} - P_i}{P_{i+1}} \right)^4 - 1;$$

$$W_{i+1} = \frac{N_{i+1}}{N_i}, \quad W_{i+1} = \frac{E_{i+1}}{E_i}, \quad W_{i+1} = \frac{U_{i+1}^2}{U_i^2},$$

где P_{i+1} – значение внешнего параметра в момент регистрации последующего события (если в качестве параметра используют время, тогда это – промежуток времени от начала интервала наблюдения), P_i – значение внешнего параметра в момент регистрации предыдущего события (если в качестве параметра используют время, тогда это промежуток времени от начала интервала наблюдения).

Далее производят классификацию источника:

I класс (пассивный) – $W_{i+1} \ll V_{i+1}$,

II класс (активный) – $W_{i+1} \approx V_{i+1}$,

III класс (критически активный) – $W_{i+1} > V_{i+1}$,

IV класс (катастрофически активный) – $W_{i+1} \gg V_{i+1}$.

Задача: После проведения контроля участка трубопровода и необходимой фильтрации АЭ данных был выявлен ряд источников. Провести оценку источника с максимальной амплитудой $A = 68$ дБ, зарегистрированного в зоне 1 по локационно-динамическому критерию. За время проведения контроля из этого источника пришли три импульса. Первый импульс с амплитудой $A = 50$ дБ пришел на 260-й секунде с момента начала контроля, тогда, когда осуществлялся подъем давления

с 5,0 до 10,0 кгс/см². Второй ($A = 53$ дБ) и третий ($A = 68$ дБ) импульсы пришли на 1210 и 1760, соответственно.

Решение: Для первого и второго импульсов вычислим величины W_{i+1} , V_{i+1} , характеризующие изменение источника во времени: $W_{i+1} = 1,12$, $V_{i+1} = 9,15$. Рассматриваемый источник на момент регистрации второго импульса относился к I-му классу, то есть был пассивным. Теперь отследим динамику данного источника, проведя вычисления, указанные выше для значений параметров второго и третьего импульсов.

$$W_{i+1} = \frac{68^2}{53^2} = 1,64; \quad V_{i+1} = \left(1 + \frac{1760 - 1210}{1760}\right)^4 - 1 = 1,85.$$

W_{i+1} лишь незначительно отличается от V_{i+1} и можно принять $W_{i+1} \approx V_{i+1}$. Следовательно, после регистрации третьего импульса источник перешел в разряд активных (II класс) и нуждался в дополнительной проверке одним из методов НК. [47].

3. *Критерии кода ASME.* Оценка результатов контроля производится в соответствии с таблицами, указывающими предельные значения изменения параметров АЭ в процессе контроля. Конкретные значения параметров зависят от условий контроля, материала контролируемого объекта и его состояния.

4. *Система классификации источников АЭ в технологии MONPAS.* Источники АЭ разделяются на классы в соответствии со значениями параметров: силовой индекс и исторический индекс.

Силовой индекс и исторический индекс определяются с помощью термина относительная энергия импульса – это энергия на выходе датчика, на который попал импульс АЭ. Относительная энергия измеряется как площадь под огибающей линией выпрямленного напряжения сигнала. Показатель опасности характеризует серьезность наиболее интенсивных событий, собранных во время испытаний и определяется выражением:

$$S = \frac{1}{J} \sum_0^N E_i,$$

где E_i – для J наиболее мощных событий – их относительная энергия или непосредственно энергия среди N импульсов за время испытаний. Если N находится между 1 и 9, тогда $N = J$, если $N > 9$, тогда $J = 10$.

Исторический индекс показывает, становится ли эмиссия более интенсивней с течением времени или с повышением нагрузки и представляет собой отношение средней относительной энергии самых последних импульсов к средней относительной энергии всех импульсов за время теста, определяется выражением:

$$H(t) = \frac{1}{K} \sum_{N-K+1}^N E_i \bigg/ \frac{1}{N} \sum_1^N E_i,$$

где E_i – относительная энергия i -го события, K является функцией N .

Силовой индекс и исторический индекс вычисляются для данных конкретного датчика. Результаты показывают степень поврежденности в окрестностях датчика. Положение датчика на графике зависимостей силовой индекс и исторический индекс используется для определения серьезности повреждений.

После вычисления значений индексов для каждого зарегистрированного импульса АЭ, производят следующую классификацию:

А – незначительный источник – регистрируется для учета в будущих испытаниях;

В – источник регистрируется для учета в будущих испытаниях, осматривается поверхность объекта для выявления поверхностных дефектов вида коррозии, питтинга, трещин и др;

С – источник свидетельствует о наличии дефекта, требующего последующего анализа данных АЭ контроля, повторного АЭ контроля или контроля с использованием других методов;

Д – источник свидетельствует о наличии значительного дефекта, требующего последующего контроля с использованием других методов;

Е – источник свидетельствует о наличии большого дефекта, требующего немедленного прекращения нагружения и контроля другими методами.

График (рис. 97) отражает тенденцию: дефекты, соответствующие точкам около нижнего левого угла менее серьезны, чем дефекты, соответствующие точкам правого верхнего угла. Метод МОНРАС разделяет интенсивность на пять областей, от А до Е. Если датчик имеет $S < 0,1$ вольт/осцилляцию, трещина не является серьезной и ей не приписывается класс. Если $S > 2$ вольт/осцилляцию и $H > 10$, то данным назначается интенсивность Е.

5. *Локационный критерий* – регистрация источника АЭ, т. е. не менее 2 импульсов из зоны, эквивалентной погрешности определения координат.

6. *По признакам развивающихся усталостных трещин* – регистрация на первом цикле нагрузки выбросов (значительного мгновенного приращения) АЭ, воспроизводимых при той же нагрузке на следующем цикле повторно-статического нагружения.

7. *Интегральный критерий.*

8. *Интегрально-динамический критерий.*

9. *Критерий непрерывной АЭ.*

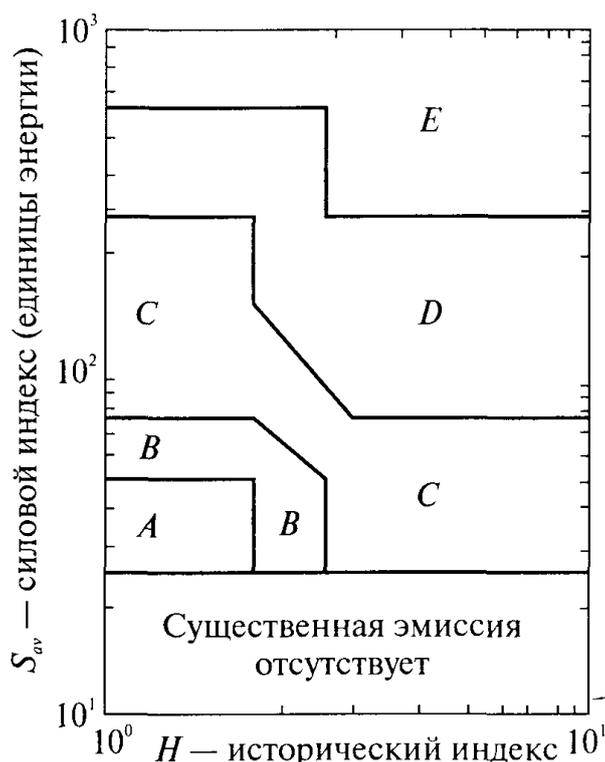


Рис. 97. Диаграмма классификации источников АЭ в технологии MONPAS

Регистрация непрерывной АЭ, уровень которой превышает пороговый уровень системы контроля, свидетельствует о наличии течи в стенке контролируемого объекта. По критерию непрерывной АЭ ситуация классифицируется следующим образом:

I – отсутствие непрерывной АЭ;

IV – регистрация непрерывной АЭ.

Более подробно критерии изложены в ПБ 03–593.

Допускается использование других обоснованных критериев активности источников. Рекомендуется комплексное использование разных критериев активности, при этом для окончательных выводов рекомендуется руководствоваться тем из них, для которого получена наибольшая активность источников.

6.1.3. Выбор системы классификации источников АЭ и критериев браковки

Весьма важным моментом при выполнении АЭ контроля является правильный выбор системы классификации источников АЭ и критериев браковки. На рис. 98 приведены четыре характерные зависимости суммарной АЭ от параметра нагружения. Материалы, имеющие большую вязкость, показывают, как правило, невыразительную зависимость суммарной АЭ от параметра нагружения.

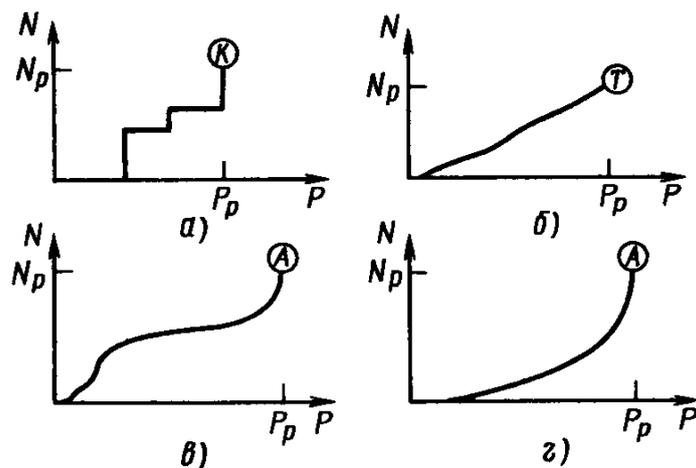


Рис. 98. Характеристики зависимости суммарной АЭ N для разных материалов при развитии трещины:

а – в хрупком материале, *б* – в вязком материале,
в – в вязко-хрупком материале при наличии двух этапов, *г* – в вязко-хрупком материале,
 P – нагрузка, P_p – нагрузка в момент разрушения, N_p – суммарная АЭ в момент разрушения

Амплитуды сигналов АЭ для таких материалов обычно невелики и находятся в диапазоне 5–50 мкВ, кривая амплитудного распределения круто идет вниз после значения порога. Быстрого и масштабного разрушения при этом, как правило, не происходит, а имеет место течь перед разрушением, которая в механике разрушения полагается критерием некатастрофического отказа. Образующаяся течь легко регистрируется аппаратурой.

Для хрупкого материала характерно небольшое число импульсов, после чего происходит быстрое разрушение объекта. Амплитуда импульсов достигает значений нескольких единиц или десятков милливольт. На диаграмме амплитудного распределения эти сигналы имеют значение порядка 80 дБ.

Поэтому при контроле объекта из хрупкого материала или с охрупченными зонами, например со сварными соединениями, выполненные с нарушением технологии, или с охрупчиванием, вызванным условиями эксплуатации, то регистрация небольшого числа сигналов должна серьезно насторожить оператора. В этом случае необходимо использовать амплитудные критерии и браковать контролируемый объект при регистрации небольшого числа импульсов АЭ большой амплитуды.

Наиболее часто встречается ситуация, соответствующая зависимости на рис. 98, *в*. В этом случае применяют все критерии или их комплекс. Для таких материалов метод АЭ в полном объеме может реализовать свой прогностический потенциал. Приведенные на рис. 98 зависимости не исчерпывают всего разнообразия зависимостей параметров АЭ от параметра нагружения [10].

6.1.4. Оценка остаточного ресурса

Для всех ответственных сооружений, находящихся в эксплуатации, существуют различные формы контроля несущих элементов металлоконструкций, чаще всего представляющие собой периодические обследования. Метод АЭ позволяет накапливать информацию о динамике возникновения и развития повреждений непосредственно в процессе нагружения и деформирования исследуемых объектов. При сложноподвижном состоянии металла, характерном для условий службы сварных конструкций, важно знать, подвижен ли дефект и с какого момента эксплуатации трещина начинает развиваться. Начало развития трещины и определяет ресурс долговечности сварного соединения. К тому же сварное соединение (в отличие от клепанного) не является препятствием для развития трещины на всю глубину металла [20].

Изменение скорости счета актов сигналов АЭ и их общего количества позволяет исследовать кинетику накопления повреждений. Зная кинетику повреждений, можно определить долговечность изделия и прогнозировать поведение сложных конструкций с целью диагностики их предразрушающегося состояния.

Особенности усталостного разрушения (отсутствие заметных остаточных деформаций, внезапный характер заключительной стадии разрушения, разброс параметров и т. д.) чрезвычайно затрудняют предсказание момента разрушения конкретного объекта.

Для вычисления размеров трещины при оценке предельного состояния элементов металлоконструкций по сигналам АЭ принимаются следующие допущения:

- образование сигналов АЭ происходит как при статическом нагружении в пределах цикла, так и в момент подрастания трещины;
- нарастание суммарного счета сигналов АЭ происходит по некоторым функциональным зависимостям (например, $N = f(\text{КИН})$), которые определяют на образцах-фрагментах конструкции при статическом и циклическом нагружении в лабораторных условиях (градуировочная зависимость).

Для отработки методики определения остаточного ресурса конструкций, в реальных объектах создаются искусственные дефекты, после чего проводятся ресурсные испытания. В результате получают серию кривых зависимости скорости счета АЭ от числа проводимых тестовых циклов. Затем эти кривые наносятся на один график, вид которого показан на рис. 99, на котором различают следующие зоны:

- 1) зона приработки;
- 2) зона эксплуатации исправного изделия;
- 3) зона начала трещинообразования;
- 4) зона роста магистральной трещины.

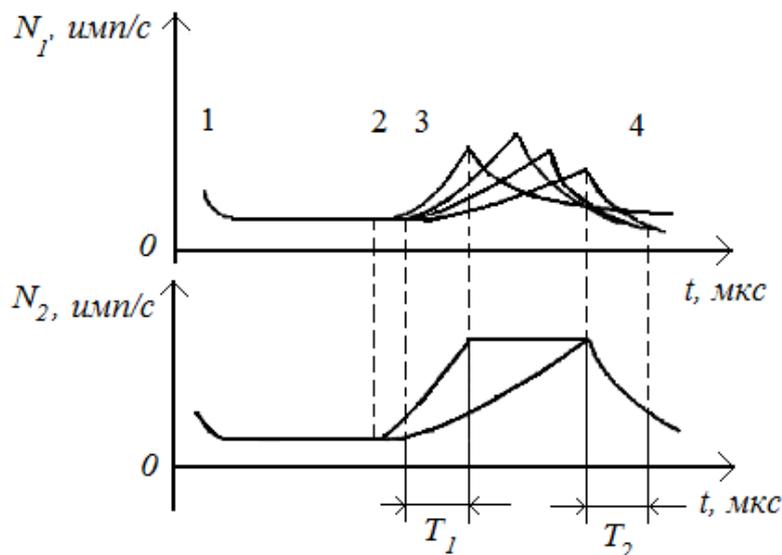


Рис. 99. Кривые прогноза: 1 – зона приработки; 2 – зона эксплуатации исправного изделия; 3 – зона начала трещинообразования; 4 – зона роста магистральной трещины

Из графиков рис. 99 видно, что в момент роста магистральной трещины происходит снижение интенсивности сигналов АЭ. На разных моделях характерные точки имеют разброс, но при определении критериев диагностирования он не учитывается. От начала эксплуатации до начала роста скорости счета АЭ следует считать изделия сохраняющими работоспособность в течение следующего за моментом диагностирования промежутка времени $T_1 + T_2$. После начала роста скорости счета АЭ до достижения его максимального значения можно гарантировать сохранение работоспособности изделия за период времени, следующий за периодом диагностирования длительностью T_2 . После получения хотя бы двух точек со значениями скорости счета меньшими, чем при предыдущих испытаниях, эксплуатацию следует прекратить.

Таким образом, критерием предельного состояния диагностируемого ОК является устойчивое уменьшение значений скорости счета сигналов АЭ, полученных при нескольких проводимых (в промежутках между эксплуатационными циклами) режимах каких-либо параметров.

Исходную экспериментальную информацию необходимо подвергать предварительной статистической обработке для сглаживания и устранения аномальных наблюдений и расчета основных выборочных статистик и их доверительных интервалов. Для получения прогнозирующей информации о состоянии сварной конструкции в процессе ее испытания или эксплуатации необходимо знать технологические параметры конструкции, изучить процессы разрушения, определить факторы, влияющие на них.

ГЛАВА 7

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АЭ

В АЭ системах для управления сбором, накоплением, представлением и анализом данных используются процессоры (мини- и микрокомпьютеры) и периферийные устройства. Применяемые вычислительные блоки системы АЭ рассматриваются как самостоятельные блоки – неспециальная часть аппаратуры АЭ. В этой связи при аттестации АЭ систем, включающих ЭВМ, следует использовать рекомендации изготовителя вычислительных и периферийных устройств.

ПАЭ является одним из основных элементов технических средств АЭ контроля. Они определяют чувствительность контроля и рабочий частотный диапазон. В связи с этим особое внимание уделяется калибровке ПАЭ.

7.1. Калибровка ПАЭ. Снятие АЧХ ПАЭ

Калибровка ПАЭ – это установление пригодности ПАЭ к применению и определение его основных параметров [6].

При решении многих задач акустических измерений достаточно определить АЧХ и ограничиться измерением относительных изменений коэффициента преобразования при изменении частоты возбуждения. Такая градуировка получила название *относительной* [7, 13].

Значительно сложнее *абсолютная градуировка*, при которой требуется определить абсолютные значения чувствительности преобразователя в широкой полосе частот. В некоторых случаях можно во всем интервале исследуемых частот провести *относительную градуировку*, осуществив абсолютную градуировку на одной частоте и рассчитав чувствительность на других частотах по результатам относительной градуировки. Однако возможно изменение характеристик взаимодействия преобразователя с объектом, на котором он установлен для градуировки, при изменении частоты возбуждения. Изменение объекта, места и способа закрепления преобразователя на нем могут существенно изменить характер реакции системы и привести к ошибкам. Поэтому наиболее корректны измерения, проводимые с преобразователем, установленным непосредственно на объекте исследования или на адекватной ему модели.

Определение основных параметров ПАЭ основано на регистрации импульсной характеристики ПАЭ, измерении и определении ее параметров: максимального значения импульсной характеристики – u_m (рис. 96) [35]:

- 1) коэффициент преобразования ПАЭ – s , определяемый как отношение u_m – максимального значения импульсной переходной характеристики ПАЭ к u_1 , – максимальному значению акустического сигнала (смещению частиц поверхности стандартного блока или контролируемого объекта) эталонного источника непосредственно под ПАЭ либо вблизи него, $s = u_m/u_1$. Коэффициент преобразования ПАЭ имеет размерность (В/м), u_m имеет размерность (В), u_1 – (м);
- 2) n_u – число выбросов импульсной характеристики положительной полярности, превышающее уровень $0,1 \cdot u_m$. Измеряется числом выбросов. Типичная импульсная характеристика ПАЭ с обозначением основных измеряемых параметров приведена на рис. 100;
- 3) T_0 – период основных колебаний импульсной характеристики. Измеряется в секундах;
- 4) E_u – энергия импульсной характеристики оценивается в джоулях. Энергия рассчитывается с использованием интеграла:

$$E_u = Z^{-1} \int u^2 dt,$$

где Z – импеданс (сопротивление) цепи, в которой определяется энергия импульсной характеристики ПАЭ, u – мгновенное значение импульсной характеристики ПАЭ.

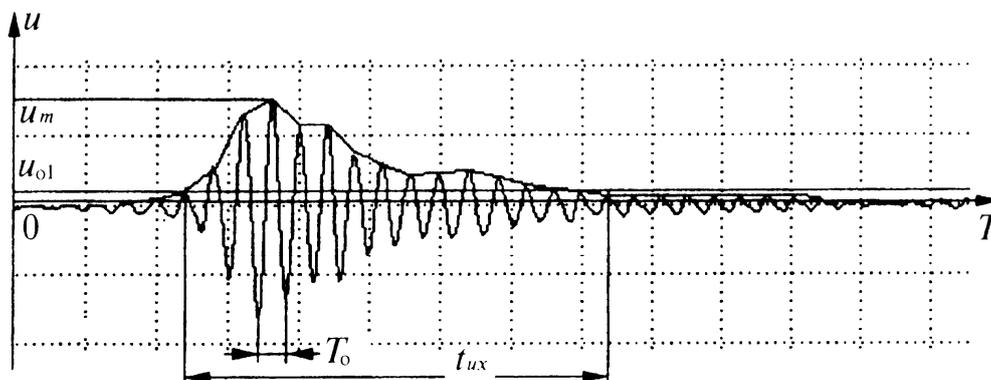


Рис. 100. Типичная импульсная характеристика ПАЭ

Определение совокупности амплитудно- и фазочастотной характеристик ПАЭ производится расчетным путем с использованием Фурье-преобразования импульсной характеристики ПАЭ. Допускается определение АЧХ другими методами, согласованными с Госстандартом России.

В основу экспериментальных методов определения параметров положена реакция ПАЭ на динамическое смещение, нормальные поверхности калибровочного блока (объекта), на который устанавливается ПАЭ.

В качестве генератора упругих колебаний, вырабатывающего имитационный сигнал, можно использовать любой возбудитель механических импульсов, длительность которых не превышает 0,1 мкс, с уровнем вторичных колебаний, не превышающих $0,1 \cdot u$, где u – амплитуда импульса генератора либо ступенчатых импульсов с длительностью переднего фронта, не превышающей 0,1 мкс.

Методы абсолютных измерений используют для определения коэффициента преобразования ПАЭ, числа выбросов импульсной характеристики (длительности импульсной характеристики), длительности периода основных колебаний импульсной характеристики.

При калибровке рабочего ПАЭ используют эталонный ПАЭ, аналогичный по виду и типу калибруемому рабочему. Определение коэффициента преобразования проводится обычно методом сличения с применением образцовых преобразователей, коэффициент акустико-электронного преобразования известен.

Число выбросов импульсной характеристики определяют с использованием зарегистрированной импульсной характеристики ПАЭ на экране цифрового осциллографа путем подсчета числа выбросов положительной полярности над уровнем $0,1 \cdot u_m$.

Длительность импульсной характеристики t_u определяют путем измерения промежутка времени между моментами пересечения уровня, равного $0,1 \cdot u_m$ на подъеме огибающей импульсной характеристики и на ее спаде. Измерение производится на экране цифрового запоминающего осциллографа. Результат представляется в секундах.

Период основных колебаний T_0 определяют путем измерения на экране осциллографа интервала времени, через который повторяются мгновенные значения импульсной характеристики в области ее максимума. Для повышения точности длительность периода вычисляют по формуле $T_0 = t_u / n_u$.

Для резонансных ПАЭ период основных колебаний связан с резонансной частотой выражением $f_0 = 1/T_0$.

Метод относительных измерений используют как в лабораторных, так и в полевых условиях. Относительные измерения в лабораторных условиях проводят с использованием калибровочных блоков, а в полевых условиях – как с использованием калибровочных блоков, так и с использованием натуральных объектов.

Допускается проводить измерения параметров ПАЭ без использования калибровочных блоков, по схеме «лицом к лицу», когда калибруемый ПАЭ и эталонный пьезоэлектрический преобразователь акустически контактируют с излучающим пьезопреобразователем рабочими поверхностями.

В качестве регистрирующей аппаратуры используют цифровой запоминающий осциллограф. Допускается использование непосредственно прибора АЭ, который должен обеспечить измерение всех необходимых параметров – максимального значения импульса, числа выбросов n_u через порог $(0,1 \cdot u_m)$, длительности импульсной характеристики t_u .

Порядок проведения калибровки ПАЭ.

1. Определение коэффициента электроакустического преобразования эталонного ПАЭ осуществляется путем измерения амплитуды динамического смещения поверхности твердого тела и амплитуды импульсной характеристики лаборатории, имеющие лицензию Госгортехнадзора России, с использованием образцовых средств измерений.
2. Калибровку рабочих ПАЭ производят организации, имеющие лицензию Госгортехнадзора России, с использованием эталонных ПАЭ.
3. Определение основных параметров рабочих ПАЭ осуществляют владельцы ПАЭ с использованием метода относительных измерений и эталонных ПАЭ.
4. Калибровку эталонных ПАЭ проводят один раз в год. Определение основных параметров рабочих ПАЭ проводят перед каждым контролем, но не реже одного раза в год.

Результаты калибровки ПАЭ оформляются в форме сертификата калибровки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грешников В.А., Болотин Ю.И., Дробот Ю.Б., Ченцов В.П. Применение эмиссии волн напряжения для неразрушающего контроля и технической диагностики качества материалов и изделий: Материалы семинара. – Хабаровск, 1971.
2. Иоффе А.Ф. Физика кристаллов. – М.; Л.: Госиздат, 1929.
3. Борьба с внезапными выбросами в угольных шахтах. – М.: Госгортехиздат, 1962.
4. Константинова А.Г., Петросян Э.В. Сейсмоакустические исследования устойчивости потолочин в камерах. – М.: Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1963.
5. Финкель В.М. Физика разрушения. – М.: Металлургия, 1970.
6. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
7. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. Применение ее для испытания материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976.
8. Работнов Ю.Н. Соппротивление материалов. – М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1962.
9. Поллок А. Акустико-эмиссионный контроль. Physical Acoustics Corporation (PAC) //Авторская перепечатка из книги «Металлы» (Metals Handbook), 9-е изд., Т. 17, ASM International, 1989. – С. 278–294.
10. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т / под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. Т. 7: в 2 кн.; кн. 1: Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии; кн. 2: Балицкий Ф.Я., Барков Н.А. и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.
11. Бунина Н.А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990.
12. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. – М.: Наука, 1982.
13. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса: монография / В.М. Баранов и др.– М.: Наука, 1998.
14. Иванов В.И., Белов В.М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981.
15. Андрейкив А.В., Лысак Н.В. Методы акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. – Киев: Наукова думка, 1989.
16. Акустическое контактное течеискание / Ю.Б. Дробот, В.А. Грешников, В.Н. Богачев. – М.: Машиностроение, 1989.

17. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1986.
18. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / под ред. К.Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980.
19. Муравин Г.Б., Лезвинская Л.М., Макарова Н.О., Павловская Г.С. Задачи акустико-эмиссионной диагностики процесса коррозии (обзор) // Дефектоскопия. – 1990. – № 2. – С. 18–29.
20. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций. А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др. – М.: Радио и связь, 2000.
21. Acoustic Emission: Special Technical Publication STP 505. Philadelphia: ASTM, 1972. – 337 p.
22. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. ПБ 03-593-03: Утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 9.06.02, № 77. – 24 с.
23. Авербух И.И., Вайнберг В.Е. Зависимость акустической эмиссии от деформации в разных материалах // Дефектоскопия. – 1973. – № 4. – С. 25–32.
24. Количественные оценки возможностей неразрушающего контроля на базе явления акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 2001. – №5. – С. 50–67.
25. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995.
26. Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля: практическое пособие: в 5-ти книгах / под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1991.
27. Крауткремер И. Ультразвуковой контроль материалов: справочник. – М.: Металлургия, 1991.
28. Ультразвук / под ред. И.П. Голяминой. – М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с.
29. Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов. РД 03-299-99: Утв. постановлением Госгортехнадзора России от 15.07.99, № 52: введ в действие 01.10.99. – 18 с.
30. Харемов В.Г., Бородин Ю.П., Шапорев В.А Система комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов. [Электронный ресурс] [http://www.interunis.ru/publikacii/statuya_12].
31. Система регистрации АЭ «Радиоканал» [Электронный ресурс] [<http://www.diapac.ru/Wireless.php>]

32. Тутнов А.А., Тутнов И.А., Чуварин А.Н. Диагностика разрушений материалов на основе анализа формы сигналов акустической эмиссии // 1-я Всесоюзная конференция. – Ч.1. – Ростов-на-Дону, 1989. – С. 59–63.
33. Баранов В.М., Молодцов К.И. Акустико-эмиссионные приборы ядерной энергетики. – М.: Атомиздат, 1980.
34. Манохин А.И., Маслов Л.И., Белов А.В. и др. Энергетический анализ природы сигналов акустической эмиссии. – (как в 32). – С. 154–161.
35. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов. РД 03-300-99: Утв. постановлением Госгортехнадзора России от 15.07.99, № 53: срок введения в действие с 01.10.99. – 20 с.
36. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003.
37. Шумайлов А.С., Гумеров А.Г., Молдаванов О.И. Диагностика магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1992.
38. Шип В.В., Муравин Г.Б., Чабуркин В.Ф. Вопросы применения метода акустической эмиссии при диагностике сварных трубопроводов // Дефектоскопия. – 1993. – № 3. – С. 17–23.
39. Использование метода акустической эмиссии для диагностики сосудов давления на нефтеперерабатывающем заводе / Б.С. Кабанов, В.П. Гомера, В.Л. Соколов, А.А. Охотников «Киришинефтеоргсинтез».
40. Акустико-эмиссионная диагностика металлоконструкций подъемников для ремонта нефтяных скважин / А.А. Зарецкий, С.А. Стрижков, В.В. Шемякин, Д.А. Егоров // Бурение и нефть. – 2003. – № 2. – С. 37–39.
41. Экологическая безопасность и диагностический мониторинг // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, № 1, 2003.
42. Разуваев И.В. Новые цифровые акустико-эмиссионные комплексы НПО «Алькор» // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 12. – С. 39–43.
43. Гриб В.В. Диагностика технического состояния оборудования нефтегазохимических производств. Обзор НТД. – М, 1998. – 202 с.
44. Чахлов В.Л., Лапшин Б.М., Малов Е.А. Акустико-эмиссионная аппаратура для непрерывного контроля герметичности речных переходов магистральных нефтепроводов // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – № 8. – С. 32–34.
45. Кирякин А.В., Железная И.Л. Акустическая диагностика узлов и блоков РЭА. – М.: Радио и связь, 1984.
46. Мисейко А.Н., Сазонов А.А. Применение метода акустической эмиссии для обнаружения коррозионных повреждений технологических трубопроводов // Дефектоскопия. – 2003. – № 6. – С. 48–54

КНИГА 2

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

ВВЕДЕНИЕ

В связи с быстрым развитием современной техники в последнее время возросли и усложнились проблемы, обуславливаемые механическими колебаниями все более сложных и деликатных конструкций и все более быстродействующего и эффективного машинного и другого оборудования. Дальнейшему усложнению этих проблем содействуют возрастающие требования к снижению издержек и к повышению производительности и эффективности. Высокоактуальными также являются вопросы влияния шума и вибрации на организм человека и на качество и срок службы разного рода изделий. Следовательно, аналогичным образом возросли и требования к более глубокому пониманию причин возникновения механических колебаний и к исследованиям динамических характеристик, находящихся под воздействием колебательных сил конструкций. Основным условием приобретения нужных знаний в области виброметрии является применение эффективной измерительной, анализирующей и регистрирующей аппаратуры.

Инженеры и техники занимаются вопросами, связанными с уменьшением механических колебаний и виброизоляцией, уже с времени разработки и производства первых машин и станков, в частности, машин с механическим приводом.

Необходимость точного измерения и анализа механических колебаний возникла с первых шагов разработки и конструирования машин, учитывающих вопросы амортизации механических колебаний и виброизоляции. Исследование механических колебаний прочных машин медленного действия в прошлом основывалось на опыте инженеров-конструкторов и применении несложных оптических приборов, измеряющих смещение механических колебаний.

В последние года произошло быстрое развитие техники измерения и анализа механических колебаний (виброметрии) с тем, чтобы удовлетворить всем требованиям исследования и испытания новых, легких и быстродействующих машин и оборудования. Применение пьезоэлектрических акселерометров, преобразующих механические колебания в электрические сигналы, раскрыло новые возможности точного измерения и анализа механических колебаний электронными измерительными приборами.

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

1.1. Цели контроля и диагностического анализа вибрации работающего оборудования

Назначением технической диагностики является не только определение причин отказов машинного оборудования, но и предупреждение отказов благодаря временному обнаружению повреждений и отслеживанию характера их развития, поддержание нормальных регулировок эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование изменения состояния в целях полного использования доремонтного и межремонтного ресурса. Этим требованиям в полной мере отвечает виброакустическая диагностика машинного оборудования, базирующаяся на принципе бездемонтажного определения технического состояния оборудования в рабочих условиях по параметрам колебательных процессов, сопровождающих его функционирование.

Назначение виброакустической диагностики машинного оборудования – оценка степени отклонения параметров технического состояния от нормы по косвенным признакам, а именно, по изменению свойств виброакустических процессов, зависящих от характера взаимодействия комплектующих узлов и деталей.

Поскольку виброакустический сигнал несет в себе информацию о состоянии машинного оборудования в закодированном виде и является результатом не прямых измерений структурных параметров машины, а косвенной оценки некоторой области значений этих параметров, использование виброакустических методов требует разработки определенной процедуры диагностирования, обеспечивающей извлечение из виброакустических сигналов информации, необходимой для постановки диагноза.

В зависимости от способа воздействия на объект методы технической диагностики подразделяются на функциональные и тестовые.

Тестовые методы диагностирования относятся к категории методов неразрушающего контроля (дефектоскопии) состояния неподвижных элементов механических конструкций. Среди акустических методов дефектоскопии наиболее эффективны ультразвуковые (УЗ) методы, которые позволяют не только обнаружить наличие повреждения (например, трещину), но и оценить его размеры, ориентацию, глубину расположения. Эффективным методом диагностики возникновения и раз-

вита повреждений конструкции является метод акустической эмиссии. Тестовые методы позволяют получить информацию о техническом состоянии неподвижных элементов конструкции объекта, однако их применение возможно только при проведении профилактики или ремонта объекта. Низкая помехозащищенность и специфика подачи на объект тестового воздействия делают эти методы трудно реализуемыми в рабочих условиях машинного оборудования.

Функциональное диагностирование осуществляется во время работы объекта и характеризуется тем, что на объект поступают только рабочие воздействия. Оно дает возможность выявить повреждения и нарушения правильности функционирования отдельных узлов, а также немедленно реагировать на них путем перехода на другой режим, останова или подключения резерва.

Основной отличительной особенностью виброакустической диагностики является использование в качестве источника информации не статических параметров, характеризующих состояние механизма: температуры, давления, качества смазки и т. п., а динамических, вызывающих появление и распространение акустических волн, как в самом механизме, так и в окружающей его среде. В современных высокооборотных машинах, таких как газотурбинные двигатели, компрессоры, энергетические установки и т. п., возбуждаются быстропеременные процессы, параметры которых циклически изменяются во времени. Важной особенностью подобных процессов является волновой характер их распространения в соответствующих средах. Быстропеременные процессы несут богатую информацию не только о динамических свойствах самой машины, но и о дефектах, возникающих при ее эксплуатации.

Для обнаружения дефектов в работающей машине необходимо использовать информацию, заключенную в колебательных процессах объекта диагностирования при испытаниях на режимах, предусмотренных условиями эксплуатации. Эта особенность является определяющей в формировании алгоритмов и процедур диагностирования машинного оборудования [5].

К перечню задач виброакустической диагностики относятся не только поиск и разработка оптимальных методов выделения компонентов сигнала, несущих информацию об изменении технического состояния объекта, не только построение диагностической модели и оптимальных алгоритмов диагностирования, но и разработка средств диагностирования, позволяющих с наименьшими затратами времени и средств реализовать применение этих методов на практике. Качество средств диагностирования, включающих математическое, программное и аппаратное обеспечение процедур диагностирования, в значительной степени определяется уровнем технологии электронного машиностроения.

В теоретическом плане задача вибродиагностики при мониторинге парка агрегатов может рассматриваться как часть задачи управления случайным процессом повреждаемости оборудования с потенциально ненадежными узлами и деталями на основе косвенной информации о его параметрах. При этом управление процессом или наблюдение за ним во многих случаях начинается не с начала эксплуатации агрегата, а по событию – проявлению неисправности, и проводится зачастую в условиях неполноты и неопределенности информации.

Косвенность информации заключается в том, что для определения состояния деталей используют вибрационные сигналы, прошедшие через динамическую систему и преобразованные ею. Неполнота информации обусловлена ограниченной возможностью получить все необходимые сведения, а неопределенность – неточностями постановки задачи, некорректным описанием диагностируемых состояний и влиянием помех.

Как известно, роль диагностики в управлении процессом заключается в установлении границ и условий, в которых допускается или происходит протекание процесса, обнаружении и прогнозе выхода параметров процесса за установленные границы. При этом существенно то, что к функции диагностики следует отнести уточнение и изменение границ состояний по мере получения дополнительной информации о процессе.

Основной подход к решению поставленных задач состоит в следующем. Используя упрощенные математические модели колебаний в динамических системах, ранее накопленный опыт и широкие, достаточно тонкие экспериментальные исследования единичных объектов, получают информацию о диагностических признаках, например опасных колебаниях. На этой основе оценивают состояние всего парка эксплуатируемых машин. В дальнейшем используют статистику парка машин и результаты их диагностирования, проводя коррекцию критериев оценки состояний исследуемой системы, параметров ее состояний и их диагностических признаков, т. е. реализуют обратную связь на основе диагностирования парка машин.

Решение указанной общей задачи складывается из поэтапного решения нескольких задач более низкого уровня.

Признаками состояний диагностируемых элементов агрегатов служат характеристики переменных напряжений в деталях, характеристики колебаний деталей, геометрические погрешности изготовления деталей и сборки узлов, параметры рабочих процессов, протекающих в агрегатах и т. п. Признаки состояния могут быть количественными или качественными, ранговыми или качественными классификационными (не связанными с естественным упорядочением). Характер признаков распознаваемых состояний в значительной степени определяет особен-

ности методов выявления диагностических параметров и методов принятия решений при диагностировании.

С точки зрения вибрационной прочности в агрегатах наиболее опасны колебания периодического характера, имеющие спектры с явно выраженными дискретными составляющими. Подобные опасные колебания, в основном, являются сильными диагностическими сигналами (т. е. хорошо выделяются на фоне помех).

При возникновении и развитии дефектов с малой вибрационной активностью возбуждаются колебания, которые, как правило, являются слабыми диагностическими сигналами. Неисправности порождают узкополосные и широкополосные сигналы стационарного и нестационарного характера.

Ввиду сложности определения неисправностей и дефектов в машинах и необходимости анализа слабых сигналов в качестве диагностических параметров используют большое число количественных характеристик сигналов и их комбинаций. Кроме того, в качестве диагностических параметров используют различные комбинации количественных характеристик процессов, например, уровни отдельных составляющих в спектрах детерминированных и случайных сигналов, а также характеристики изменения перечисленных выше параметров.

Для обоснования выбора диагностических параметров в каждом конкретном случае необходимы экспериментальные исследования агрегатов в рабочем и неисправном состояниях. При этом следует учитывать, что дефекты обычно характеризуются комплексом диагностических параметров.

Вибрация агрегатов, рассматриваемая при диагностических исследованиях в широком диапазоне изменения частоты и амплитуды, является комплексным диагностическим признаком, представляющим собой совокупность аддитивных и мультипликативных комбинаций сложных и элементарных диагностических сигналов, возбуждаемых различными источниками колебаний. При этом частотный состав большинства элементарных сигналов может значительно изменяться даже на установившихся режимах работы агрегата.

Разнообразие дефектов, обнаруживаемых методами вибрационной диагностики, и сложность сигналов, порождаемых неисправностями и колебаниями деталей агрегатов, заставляют при выявлении и измерении диагностических параметров проводить разнообразную обработку сигналов:

- разделение вибрационного сигнала в частотной и временной областях на элементарные сигналы, т. е. на компоненты, обусловленные различными факторами, каждый из которых является самостоятельным источником, вызывающим колебания;
- пространственное разделение вибрационных сигналов;
- восстановление форм выделенных элементарных сигналов;

- линейные и нелинейные преобразования сигналов (фильтрацию, нормализацию, интегрирование, дифференцирование и т. д.);
- измерение отдельных параметров и статистических характеристик сигналов;
- измерение характеристик взаимосвязи сигналов.

Выбор способа обработки сигнала и соответствующей структурной схемы измерительного канала определяется постановкой диагностической задачи, особенностями исследуемого и выделяемого сигналов, особенностями конструкции обследуемого оборудования и прочими факторами.

Успех решения задач вибродиагностики при эксплуатации парка оборудования во многом зависит от контролепригодности конкретных агрегатов [4].

1.2. Этапы жизненного цикла машинного оборудования

Методология диагностирования эксплуатационных дефектов машин и механизмов определяется необходимой в конкретной ситуации глубиной диагностирования:

- обнаружение разладки в механизме, т. е. установление самого факта зарождения какой-либо неисправности без уточнения ее вида и дефектного узла;
- обнаружение дефектов на ранней стадии их развития;
- определение только грубых дефектов, когда параметры состояний приближаются к предельно допустимым;
- диагностирование предаварийных состояний, когда дальнейшая эксплуатация агрегата неминуемо приведет к катастрофическим последствиям.

Для решения первых двух задач, когда изменения параметров состояния и, соответственно, параметров акустического сигнала незначительны, необходимо применять тонкие методы анализа сигналов.

В двух последних ситуациях можно ограничиться анализом энергетических характеристик сигнала (спектрально-корреляционных), которые в соответствии с концепцией «отклонения» определяются кинетической энергией взаимодействия деталей, возрастающей по мере деградации узлов механизмов.

Если назначением системы диагностирования является обнаружение предаварийных состояний, то в качестве диагностического признака можно использовать даже общий уровень сигнала в широкой полосе. Однако необходимость детализации вида неисправностей заставляет искать более чувствительные характеристики виброакустических про-

цессов. Наиболее простой путь – сужение полосы спектрального анализа с привязкой компонентов спектра к определенному виду дефекта.

Как показано на рис. 1, наименее чувствительным признаком является уровень сигнала в широкой полосе. Видно, что закономерность его изменения не совпадает с изображенными на рис. 1, например, локальный износ контактирующих поверхностей вызывает сначала падение уровня вибрации (этап приработки), затем этот уровень практически остается неизменным на достаточно большом интервале времени (нормальная работа), и только на третьем этапе (интенсивный износ) наработки уровень начинает расти по экспоненте почти до момента отказа, когда нередко можно наблюдать его падение. [5]

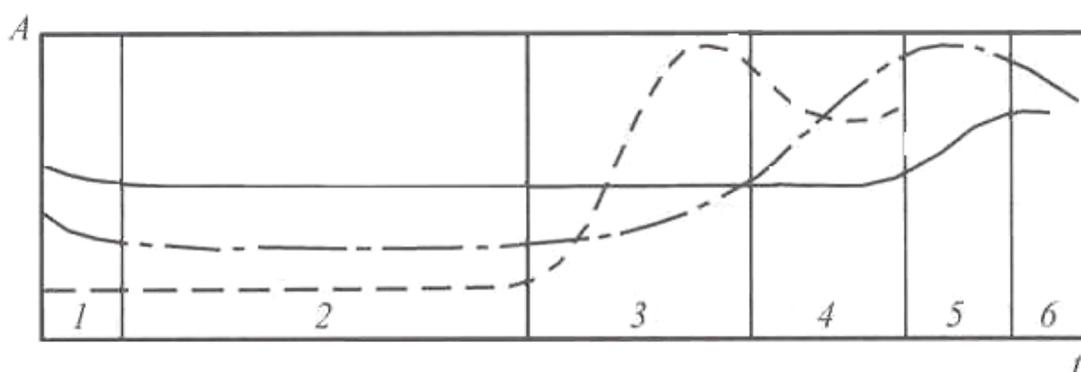


Рис. 1. Поведение различных характеристик виброакустического сигнала в зависимости от времени наработки механизма. Этапы деградации механизма: 1 – приработка; 2 – нормальное состояние; 3 – зарождение дефекта; 4 – допустимый уровень дефекта; 5 – предварийное состояние; 6 – разрушение (— – общий уровень сигнала в широкой полосе частот; ---- – глубина модуляции; - · - · – число выбросов сигнала в единицу времени)

1.3. Источники механических колебаний

Избежать механических колебаний на практике почти нельзя, так как они обусловлены динамическими явлениями, сопровождающими присутствие допусков, зазоров и поверхностных контактов отдельных деталей машин и механизмов и сил, возникающих при вращении и возвратно-поступательном движении неуравновешенных элементов и деталей. Даже механические колебания с малой амплитудой часто вызывают резонансные колебания других элементов конструкций, усиливаются и становятся важным источником вибрации и шума.

Однако, механические колебания могут также быть полезным помощником человека. На применении искусственно генерируемых механических колебаний основываются, например, вибрационные питатель-

ные устройства, уплотнители для бетона, ультразвуковые ванны для очистки деталей, пневматические дрели и другие инструменты. Вибростенды, вибраторы и другие возбуждители механических колебаний находят широкое применение при исследованиях и испытаниях изделий, узлов и деталей, подвергаемых воздействию точно определенных механических колебаний с целью измерения и анализа их физической и эксплуатационной характеристики и оценки их стойкости в отношении влияний механических колебаний и ударов.

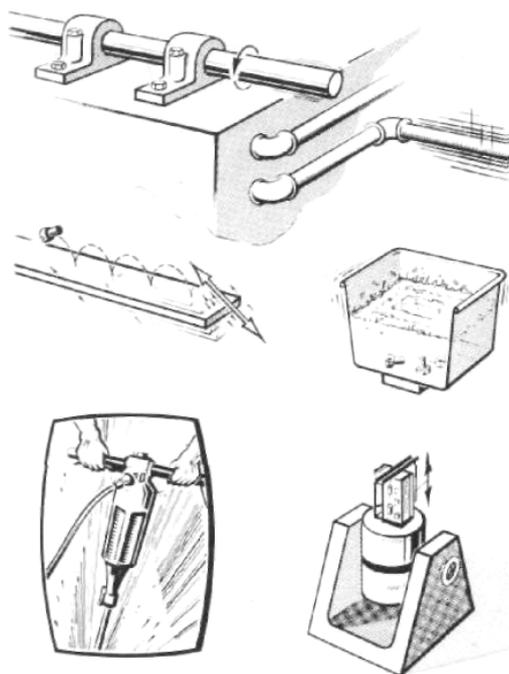


Рис. 2. Примеры источников механических колебаний

Основным предположением успеха какой-либо работы, относящейся к механическим колебаниям, т. е. работы, целью которой является разработка машин и механизмов или эксплуатация и обслуживание находящегося на ходу оборудования, является точное определение параметров этих механических колебаний путем их измерения и анализа.

1.4. Природа механических колебаний

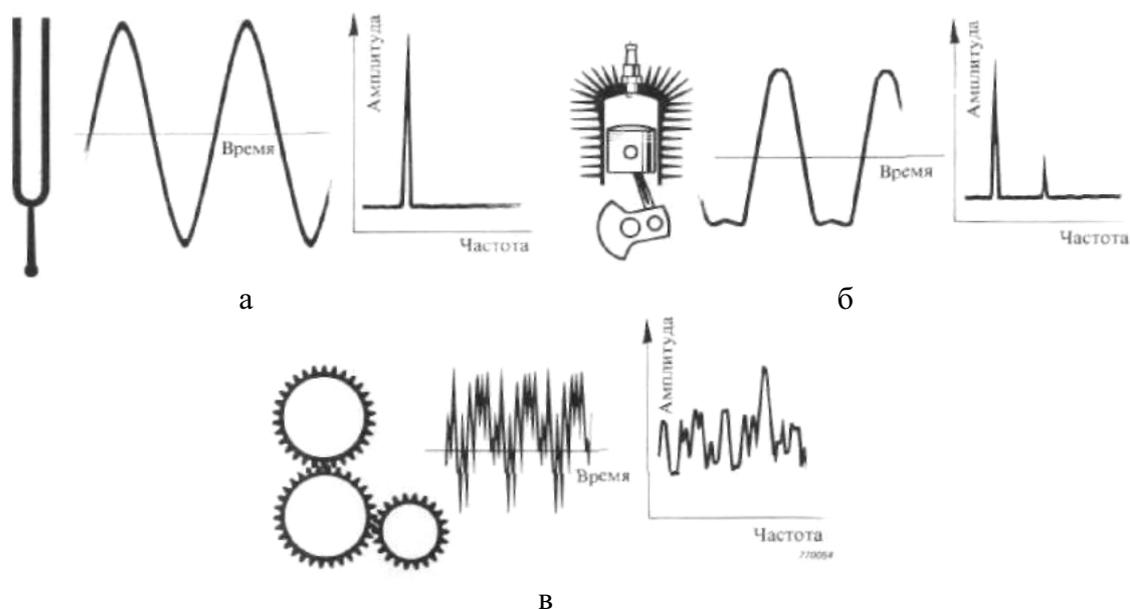
Тело считают вибрирующим, если оно совершает колебательное движение относительно опорного положения равновесия. Число полных циклов движения тела за единицу времени, т. е. за секунду, называется частотой и выражается в единицах Гц (герц).

Движение может быть простым и содержать лишь составляющую с одной частотой, например, движение камертона, или более сложным с несколькими составляющими, развивающимися одновременно на не-

скольких частотах. Примером здесь может служить движение поршня двигателя внутреннего сгорания.

Встречающиеся на практике вибрации обычно являются сложными механическими колебаниями с многими составляющими на разных частотах. Следовательно, на основе лишь амплитудно-временной диаграммы нельзя определить ни число, ни частоты отдельных составляющих сложного колебательного процесса.

Отдельные составляющие сложных механических колебаний можно обнаружить и определить путем исследования зависимости их амплитуд от частоты. Разложение механических колебаний в индивидуальные частотные составляющие называется частотным анализом. Частотный анализ является основным методом диагностики, основанием которой является исследование механических колебаний. График зависимости амплитуды или уровня определенной величины механических колебаний от частоты называется частотной спектрограммой.



*Рис. 3. Примеры различных видов движений с амплитудно-частотными характеристиками:
а – движение с одной частотой; б, в – движение с несколькими составляющими*

Частотный анализ механических колебаний машин и механизмов нормально обнаруживает ряд выраженных частотных составляющих периодического характера, непосредственно связанных с основными движениями отдельных узлов и деталей исследуемой машины или механизма. Следовательно, частотный анализ дает возможность обнаружения отдельных источников механических колебаний.

1.5. Основные понятия теории колебаний

Колебание – это циклическое движение точки среды вокруг среднего положения равновесия. В зависимости от того, какие силы вызывают колебательные процессы, их можно разделить на классы.

Простейшими и наиболее важными являются *гармонические колебания* (рис. 4), то есть такие колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса или косинуса. Этот вид колебаний особенно важен по следующим причинам: во-первых, колебания в природе и технике очень часто имеют характер, очень близкий к гармоническим, и, во-вторых, периодические процессы иной формы могут быть представлены как наложение нескольких гармонических колебаний.

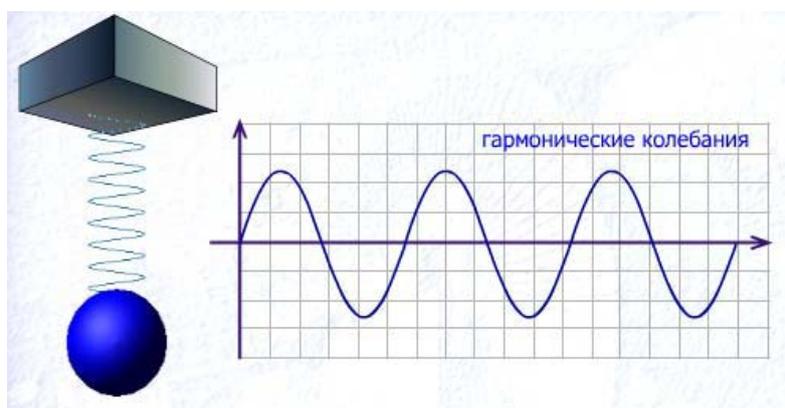


Рис. 4. Гармонические колебания

Уравнение гармонических колебаний можно записать в виде:

$$x = A \cdot \sin(\omega t + f_0), \quad (1)$$

где x – смещение точки от положения равновесия, A – амплитуда колебаний, $(\omega t + f_0)$ – фаза колебаний, f_0 – начальная фаза, ω – частота, t – время.

Свободные колебания (рис. 5) характеризуются отсутствием переменного внешнего воздействия.

Наиболее широкий класс вибраций – это *вынужденные колебания* (рис. 6), которые вызываются переменным внешним воздействием. Вибрация простого роторного агрегата, вызванная дисбалансами, относится именно к этому классу.

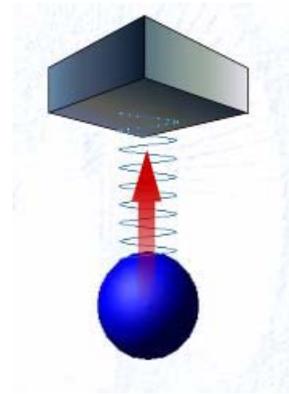
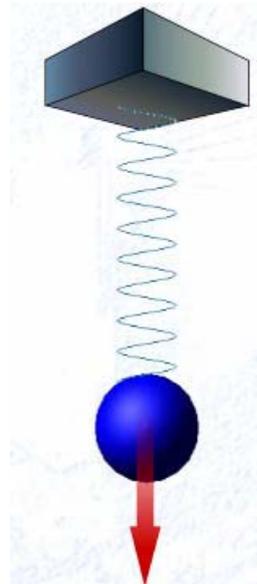
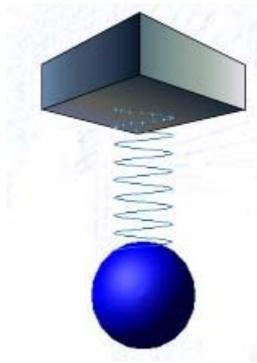


Рис. 5. Свободные колебания

Рис. 6. Вынужденные колебания

Колебания, возникающие под влиянием случайных внешних воздействий, называются *случайными колебаниями*.

Если колебания системы вызваны изменением во времени параметров системы, такие колебания называются *параметрическими колебаниями*.

Предмет нашего изучения – совокупность колебаний, возникающих в механических системах. Механические колебания тела – это и есть **вибрация**.

Анализируя график, показывающий положение колеблющейся точки во времени, мы можем выделить основные параметры, характеризующие колебательный процесс.

Амплитуда – это значение максимального отклонения точки от положения равновесия, измеренное в *микрометрах* (рис. 8).



Рис. 7. Автоколебания

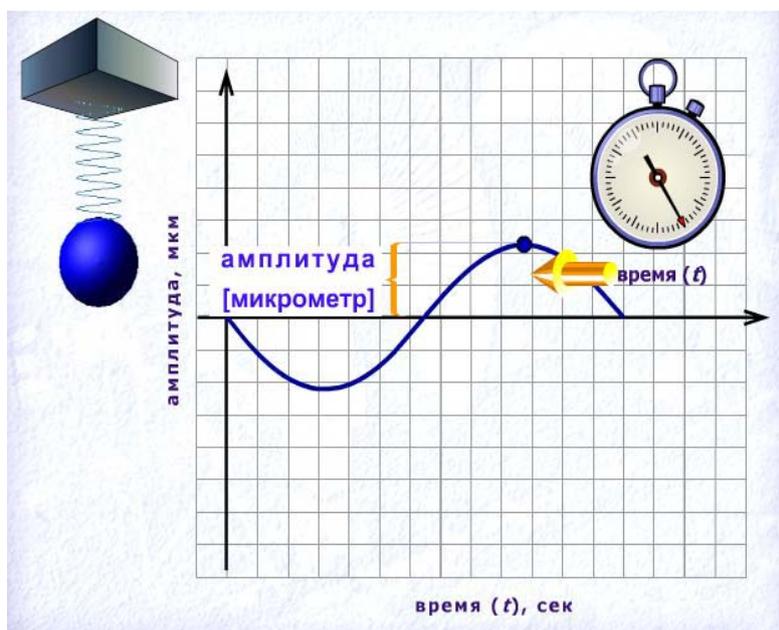


Рис. 8. Амплитуда колебаний

Период – это минимальный интервал времени, необходимый для совершения одного полного колебания. Период измеряется в *секундах* или производных единицах – *миллисекундах* (рис. 9).

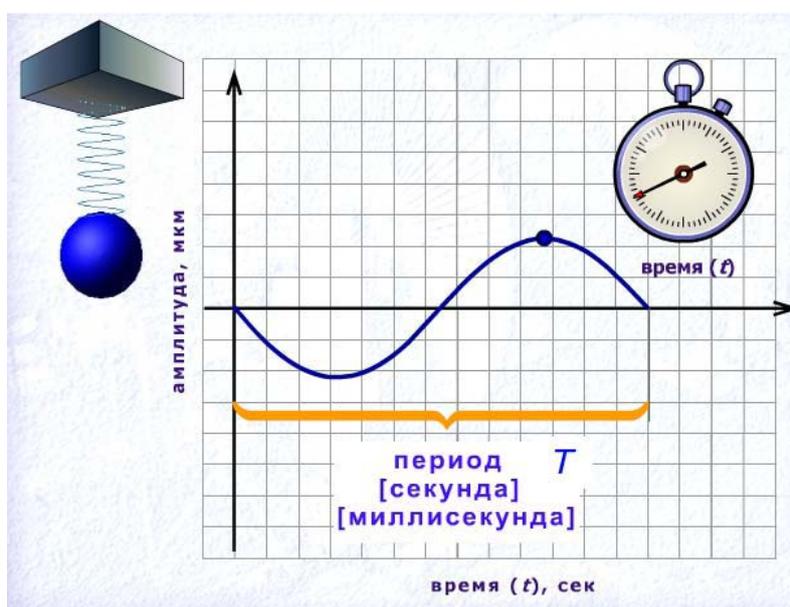


Рис. 9. Период колебаний

Частота – это число колебаний в секунду. Единица измерения частоты – *герц* – одно полное колебание в секунду. Соответственно, *килогерц* – это производная единица, равная тысяче колебаний в секунду (рис. 10).

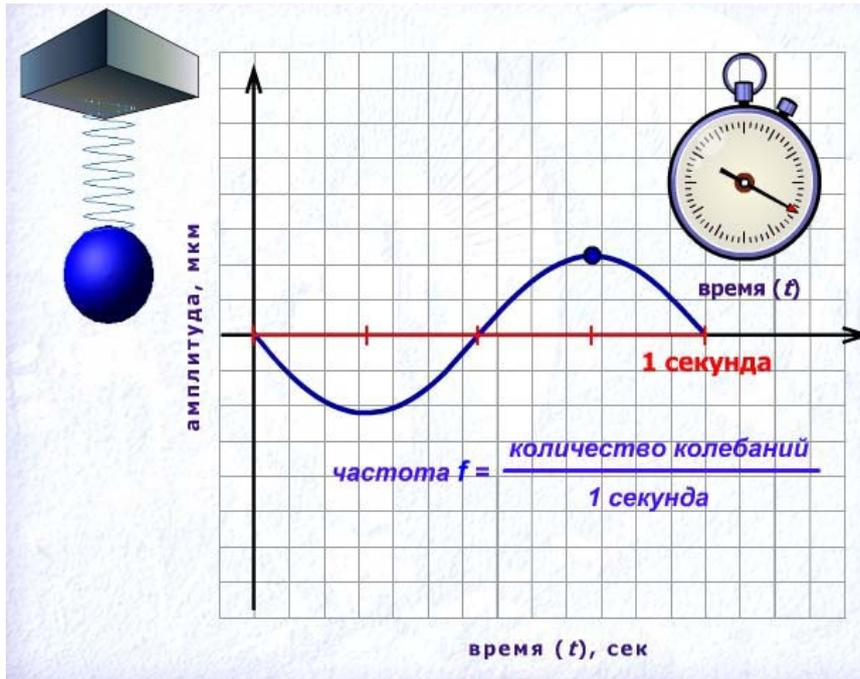


Рис. 10. Частота колебаний

Частота и период колебаний связаны обратной зависимостью.

Для описания колебательных процессов удобно пользоваться понятием *угловой частоты*, которая равна числу колебаний за 2π секунд:

$$\omega = 2\pi f, \quad (2)$$

где f – частота.

Фаза – это состояние колебательного процесса в определенный момент времени. Начальная фаза характеризует состояние колебательного процесса в начальный момент времени (рис. 11).

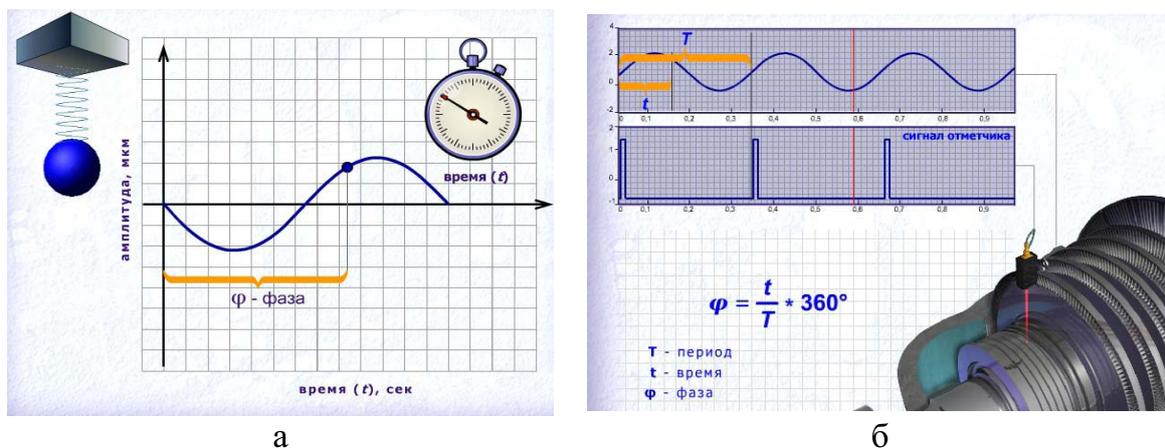


Рис. 11. Фаза колебаний

Понятие фазы часто употребляется по отношению к взаимному состоянию нескольких процессов, например, когда нас интересует начальная фаза колебания на оборотной частоте ротора по отношению к метке, закрепленной в произвольном месте на роторе. Несмотря на то, что фаза является разницей во времени, ее удобно измерять в угловых единицах, которые представляют собой доли цикла колебания или градусы.

До сих пор мы рассматривали гармонические колебания механической системы. Однако на практике чаще всего бывает, что вибрация агрегата состоит из нескольких гармонических составляющих – или гармоник. В таких случаях говорят, что вибрация является полигармонической.

Полигармоническая вибрация не всегда выглядит во временной области как периодический процесс, даже если она состоит только из гармонических составляющих (рис. 12). Колебательный процесс, состоящий из суммы двух гармоник, отношение частот которых является иррациональным числом – например, если оно равняется ровно корню квадратному из двух – будет непериодическим.

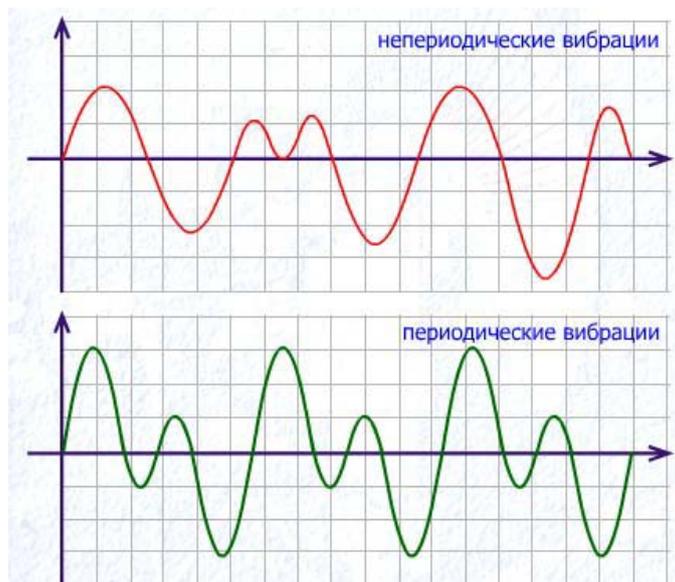


Рис. 12. Виды полигармонических вибраций

1.6. Кинематические характеристики колебательного процесса

Наиболее важными характеристиками колебательного процесса, с точки зрения изучения параметров вибрации, являются его кинематические характеристики: вибросмещение, виброскорость и виброускорение.

Вибросмещение определяется как размах колебания в обе стороны от среднего положения, то есть, для гармонического колебания, равно двойному значению амплитуды. На практике, значения вибросмещений

при работе роторных агрегатов, лежат в диапазоне сотых и тысячных долей миллиметра, и поэтому измеряются в микрометрах.

Виброскорость мы называем скоростью, с которой изменяется положение точки. Проанализируем изменение виброскорости во времени. Когда точка достигает положения максимального отклонения, направление ее движения меняется на противоположное, и в этот момент ее скорость равна нулю. По мере приближения к среднему положению, скорость точки растет и достигает своего максимума в момент прохода среднего положения. Далее ее скорость падает, и весь процесс повторяется вновь. Как видим, виброскорость также ведет себя по синусоидальному закону, с той лишь разницей, что ее фаза относительно виброперемещения сдвинута вперед на 90 градусов. Виброскорость измеряют в миллиметрах в секунду.

Поскольку скорость смещения точки тоже изменяется, необходимо проанализировать еще один параметр колебательного процесса – виброускорение.

Виброускорение – это скорость изменения скорости. Рассмотрим это подробнее.

Когда скорость точки падает до нуля, ускорение приобретает максимальное значение, так как в момент начала обратного движения скорость будет нарастать максимально быстро. Достигнув максимальной скорости в среднем положении, точка будет замедляться, т. е. ускорение, пройдя нулевое, примет отрицательное значение. Таким образом, ускорение опережает скорость также на 90 градусов.

Виброускорение измеряют в метрах на секунду в квадрате.

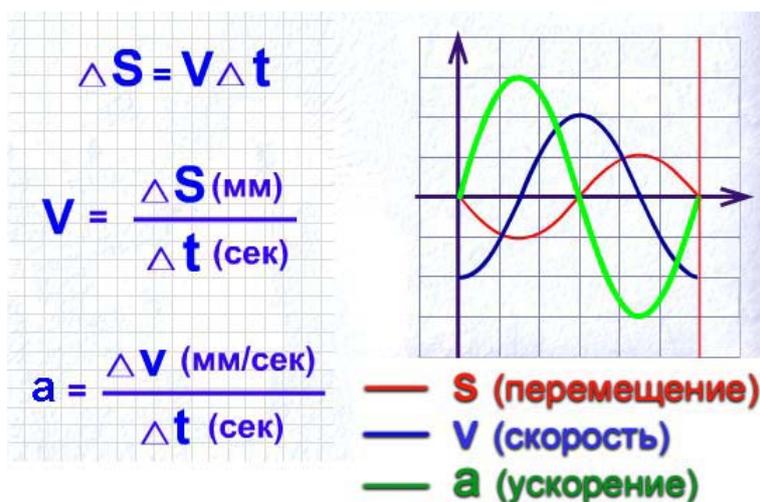


Рис. 13. Зависимости между перемещением, скоростью и ускорением вибросигнала

Таблица представления единиц измерения показывает физический смысл и математическую модель основных вибрационных характеристик.

При анализе виброперемещения мы оцениваем размах колебаний, то есть фактическое расстояние, которое проходит точка в процессе колебания.

При анализе действующих в агрегате сил, нас интересует прежде всего их максимальное значение, независимо от направления приложения. А поскольку сила пропорциональна ускорению, то и измерения сил проводят в ускорении, а для представления единиц измерения используют пик.

Среднеквадратичное значение – это усредненная энергетическая оценка процесса. Поскольку кинетическая энергия процесса пропорциональна квадрату его скорости, то измеряя СКЗ виброскорости, мы получаем значение, пропорциональное кинетической энергии процесса.

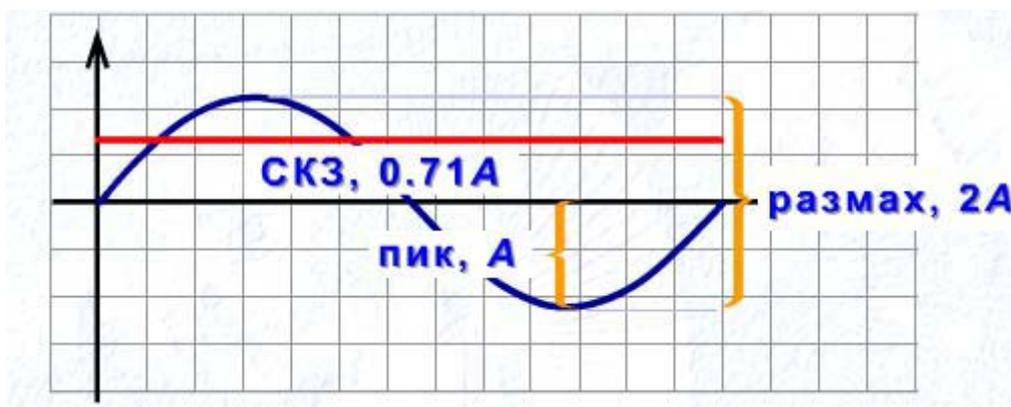


Рис. 14. Пик, размах и среднеквадратичное значение вибросигнала

Физический смысл	Единица измерения	Представление	Вычисление
Размах колебаний	мкм, мм	Размах	2A
Силы	м/с ²	Пик	A
Энергия	мм/с	СКЗ	$\frac{\sqrt{2}}{2} A$

Рис. 15. Таблица представления единиц измерения параметров вибросигнала

1.7. Критерии оценки вибрационного состояния машин

1.7.1. Виды критериев

Рассматриваются критерии двух видов, распространяющиеся на эксплуатационный контроль и приемочные испытания и предназначенные для оценки уровней вибрации машин различных типов. Критерий 1 связан со значениями измеряемых параметров вибрации, а критерий 2 – с изменениями этих значений (независимо от направления изменений).

1.7.2. Критерий 1

Зоны вибрационного состояния

Критерий 1 связан с определением границ для абсолютного значения параметра вибрации, соответствующих допустимым динамическим нагрузкам на подшипники и допустимой вибрации, передаваемой вовне через опоры и фундамент. Максимальное значение, полученное в результате измерения на каждом подшипнике или опоре сравнивают с границами четырех зон, установленных исходя из международного опыта проведения исследований и эксплуатации. Данные зоны предназначены для качественной оценки вибрационного состояния машин и принятия решения о необходимых мерах. Иное (сравнительно с приведенным ниже) число зон и их расположение может быть использовано для машин специальных типов, которые рассматриваются в соответствующих стандартах.

Примерные значения границ зон приведены в табл. 1.

- Зона А – В эту зону попадают, как правило, новые машины, только что введенные в эксплуатацию.
- Зона В – Машины, попадающие в эту зону, обычно считают пригодными для дальнейшей эксплуатации без ограничения сроков.
- Зона С – Машины, попадающие в эту зону, обычно рассматривают как непригодные для длительной непрерывной эксплуатации. Обычно данные машины могут функционировать ограниченный период времени, пока не появится подходящая возможность для проведения ремонтных работ.
- Зона D – Уровни вибрации в данной зоне обычно рассматривают как достаточно серьезные, для того чтобы вызвать повреждение машины.

Числовые значения границ упомянутых зон не предназначены служить в качестве технических условий при приемочных испытаниях, это является предметом соглашения между производителем машины и потребителем. Однако данные границы могут служить в качестве руко-

водства с тем, чтобы избежать чрезмерно завышенных и нереалистиче-ских требований. В определенных случаях для машин некоторых типов могут быть установлены особенности, которые потребуют изменения значений границ зон (в большую или меньшую сторону). Тогда производителю машин, как правило, следует объяснить причину данных изменений и, в частности, подтвердить, что машину не следует подвергать опасности, эксплуатируя при более высоких уровнях вибрации.

Таблица 1

Примерные границы зон для машин различных классов

$v_{r.m.s}$, мм/с	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B			
1,8		B		
2,8	C		B	
4,5		C		B
7,1	D		C	
11,2		D		C
18			D	
28				D
45				D

Критерии оценки для машин конкретных типов должны быть установлены в соответствующих отдельных стандартах. В табл. 1 приведены только временные, примерные критерии, которыми можно пользоваться при отсутствии подходящих нормативных документов. По ней можно определить верхние границы зон от А до С, выраженные в средних квадратических значениях виброскорости $v_{r.m.s}$, мм/с, для машин различных классов:

Класс 1 – Отдельные части двигателей и машин, соединенные с агрегатом и работающие в обычном для них режиме (серийные электрические моторы мощностью до 15 кВт являются типичными машинами этой категории).

Класс 2 – Машины средней величины (типовые электромоторы мощностью от 15 до 875 кВт) без специальных фундаментов, жестко установленные двигатели или машины (до 300 кВт) на специальных фундаментах.

Класс 3 – Мощные первичные двигатели и другие мощные машины с вращающимися массами, установленные на массивных фундаментах, относительно жестких в направлении измерения вибрации.

Класс 4 – Мощные первичные двигатели и другие мощные машины с вращающимися массами, установленные на фундаменты, относительно податливые в направлении измерения вибрации (например, турбогенераторы и газовые турбины с выходной мощностью более 10 МВт).

Границы зон состояний

Вибрация конкретной машины зависит от ее размеров, динамических характеристик вибрирующих деталей, способа монтажа и назначения. При выборе зон допустимой вибрации машины необходимо учитывать также условия, влияющие на ее вибрационное состояние. Независимо от типа подшипников среднее квадратическое значение виброскорости статорных элементов (например, опор подшипников) машин большинства типов, как правило, адекватно характеризует условия работы роторов, их воздействие на опорные элементы и соседние механизмы, а также состояние самих машин в широком диапазоне рабочих скоростей. Однако для некоторых машин, например с очень низкими рабочими скоростями, применение одного параметра – среднего квадратического значения виброскорости – без учета значения рабочей скорости может узаконить недопустимые высокие виброперемещения, в частности, когда доминируют колебания с оборотной частотой. С другой стороны, применяя принцип постоянства виброскорости к машинам с высокими рабочими скоростями или наличием высокочастотных спектральных составляющих вибрации, возбуждаемых некоторыми узлами машины, можно прийти к недопустимо высокому уровню виброускорений.

С учетом вышеизложенного критерии приемки, основанные на использовании среднего квадратического значения виброскорости, должны иметь общую форму, приведенную на рис. 16, на котором указаны границы частотного диапазона измерений f_u и f_l и показано, что ниже частоты f_x и выше частоты f_y допустимое значение виброскорости является уже функцией частоты f вибрации. Для зоны от f_x до f_y применим критерий постоянной виброскорости – именно для данного критерия приведены значения границ в таблице 1. Более точное определение критериев приемки и значений f_b, f_u, f_x, f_y должно быть дано в стандартах на машины конкретных типов.

Вибрация многих машин содержит доминирующую частотную составляющую, нередко на частоте вращения вала. Для таких машин допустимые значения вибрации могут быть получены из рис. 16 как значения для данной доминирующей частоты.

Если же для некоторой машины значительная часть вибрационной энергии сосредоточена за пределами диапазона частот $f_x \dots f_y$, возможны следующие решения:

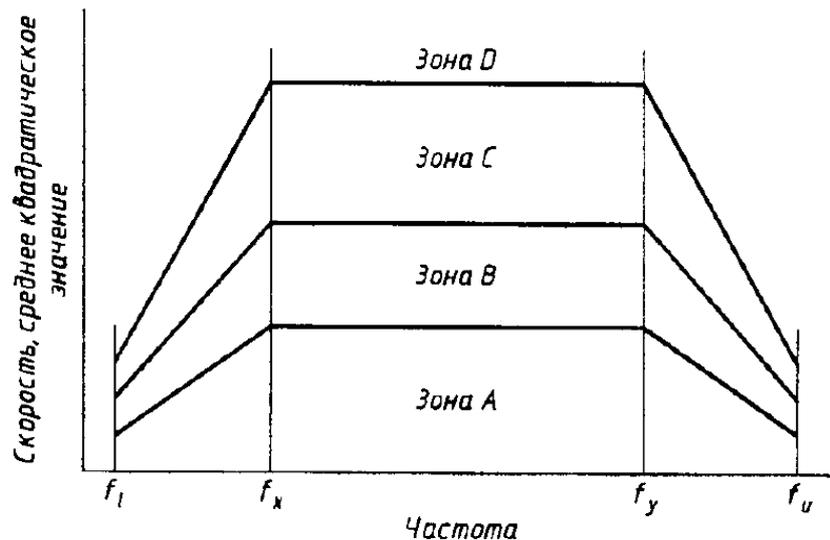


Рис. 16. Общий вид кривых для критерия на основе среднего квадратического значения виброскорости

- а) помимо измерений виброскорости проводят измерения в широкой полосе частот виброперемещения (если основная часть энергетического спектра лежит ниже f_x) или виброускорения (если основная часть энергетического спектра лежит выше f_y). Допустимые значения параметров виброперемещения или виброускорения получают из рис. 16, переводя значения виброскорости на края кривых (т. е. в диапазонах $f_l \dots f_x$, $f_y \dots f_u$) в постоянные значения виброскорости и виброускорения, соответственно. Вибрацию можно считать допустимой, если она является таковой по всем критериям (перемещения, скорости и ускорения);
- б) с помощью анализатора спектра в спектре вибрации выделяют все мощные частотные составляющие и определяют для них значения виброперемещения, виброскорости и виброускорения. После этого рассчитывают эквивалентное значение параметра виброскорости; для частотных составляющих, лежащих ниже f_x и выше f_y . Окончательную оценку делают на основе сравнения со значениями границ в диапазоне $f_x \dots f_y$. Следует иметь в виду, что, кроме случая единственной доминирующей составляющей, непосредственное сравнение составляющих частотного спектра с границами, определяемыми кривыми на рис. 16, приведет к ошибочным заключениям;
- в) используют измерительный прибор, форма частотной характеристики которого в области, где сосредоточена вибрационная энергия машины, совпадает с формой кривых на рис. 16. Окончательную оценку также делают на основе сравнения со значениями границ в диапазоне $f_x \dots f_y$.

1.7.3. Критерий 2

Данный критерий основан на оценке изменения значения параметра вибрации по сравнению с предварительно установленным эталонным значением в установившемся режиме работы машины. Значительные изменения (увеличение или уменьшение) значения параметра широкополосной вибрации могут потребовать принятия определенных мер даже в том случае, когда граница зоны С в соответствии с критерием 1 еще не достигнута. Такие изменения могут иметь внезапный характер или постепенно нарастать во времени и указывают на возможное возникновение повреждения машины в начальной стадии или другие неполадки.

При использовании критерия 2 важно, чтобы измерения значений параметров вибрации, подлежащие впоследствии сравнению, проводили при одном и том же положении и ориентации преобразователя вибрации и приблизительно в одном и том же режиме работы машины. Необходимо определить очевидные изменения значения параметра вибрации независимо от его общего значения, чтобы предотвратить возникновение опасной ситуации. Насколько данное изменение является значительным, должно быть определено в соответствующих стандартах на машины конкретных типов.

1.7.4. Предельные уровни вибрации

Общие положения

Как правило, для машин, предназначенных для длительной эксплуатации, устанавливают предельные уровни вибрации, превышение которых в установившемся режиме работы машины приводит к подаче сигналов ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ или ОСТАНОВ:

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ – для привлечения внимания к тому, что вибрация или изменения вибрации достигли определенного уровня, когда может потребоваться проведение восстановительных мероприятий. Как правило, при появлении сигнала ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ машину можно эксплуатировать в течение некоторого периода времени, пока исследуют причины изменения вибрации и определяют комплекс необходимых мероприятий.

ОСТАНОВ – для индикации уровня вибрации, при превышении которого дальнейшая эксплуатация может привести к повреждениям. При достижении уровня ОСТАНОВ следует принять немедленные меры к снижению вибрации или же остановить машину.

Вследствие разницы в динамических нагрузках и жесткостях опор для различных положений и направлений измерения могут быть установлены разные предельные уровни вибрации. Определение таких уровней для машин конкретных типов должно быть приведено в соответствующих стандартах.

Установка уровня ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ может существенно изменяться в сторону возрастания или уменьшения от машины к машине. Обычно данное значение устанавливают относительно некоторого базового значения, полученного для каждого конкретного экземпляра машины при фиксированном положении и направлении измерения на основе накопленного опыта эксплуатации.

Рекомендуется устанавливать уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ выше базового значения на некоторую долю, в процентах, значения верхней границы зоны В. Если базовое значение мало, уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ может лежать ниже зоны С.

В том случае, если базовое значение не определено, например для новых машин, начальную установку положения ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ следует выполнить либо исходя из опыта эксплуатации аналогичных машин, либо на основе соглашения. Спустя некоторое время следует установить постоянное базовое значение и соответствующим образом скорректировать положение ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ.

Если произошло изменение постоянного базового значения (например, вследствие капитального ремонта машины), может потребоваться соответствующее изменение положения ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ. Вследствие разницы в динамических нагрузках и коэффициентах жесткости опор для различных опор машины могут быть установлены свои предельные уровни.

Установка уровня ОСТАНОВ

Уровень ОСТАНОВ, который обычно связывают с необходимостью сохранения механической целостности машины, может зависеть от различных конструктивных особенностей, применяемых для того, чтобы машина могла противостоять возникновению аномальных динамических сил. Таким образом, данное значение, как правило, будет одним и тем же для машин аналогичных конструкций и не будет связано с базовым значением, как это имело место для уровня ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ.

Вследствие многообразия машин различных конструкций не представляется возможным дать четкое руководство для точного установления уровня ОСТАНОВ. Обычно положение ОСТАНОВ устанавливают в пределах зон С или D.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ВИБРАЦИИ

2.1. Основные виды анализа и области их применения

Под анализом вибрации принято понимать исследование функциональных зависимостей измеряемых параметров вибрации от одной или нескольких независимых переменных. Наиболее часто в качестве переменных используют время, частоту, пространственную координату или порядковый номер в группе независимых измерений вибрации.

При исследовании вибрации как функции времени чаще всего на практике анализируют форму временного сигнала вибрации, орбиту движения центра вала, а также параметры плотности распределения вероятностей мгновенных ее значений. Из частотных видов анализа наиболее широко используют спектральный, следящий и синхронный частотный анализ вибрации. Большинство задач пространственного анализа вибрации связано с определением формы колебаний машин и оборудования или координат дефектов в протяженных системах, например трубопроводах. И, наконец, групповой анализ параметров сигнала вибрации чаще всего используют для определения пороговых значений в диагностических моделях.

Вибрация работающих машин и оборудования обычно содержит большое количество компонентов разного происхождения. Поэтому для ее изучения используют либо статистические методы анализа сигналов, либо предварительно выделяют отдельные компоненты вибрации, которые затем исследуют детерминистскими или статистическими методами анализа. Что касается вибрации неработающих машин и оборудования, возбуждаемой искусственными источниками колебательных сил, то ее чаще всего исследуют методом анализа детерминированных колебаний.

Сигнал вибрации электрической машины, измеренной на одном из ее подшипниковых щитов (рис. 17), – типичный пример сложной формы вибрации роторной машины – убедительно иллюстрирует необходимость разделения его при диагностическом анализе на отдельные компоненты.

Большое количество составляющих в сигнале вибрации большинства объектов диагностики чаще всего определяется тем, что в каждом объекте существует много разных источников колебательных сил разной природы и с разными свойствами. Результат диагностики, в том числе и по форме вибрации, напрямую зависит от того, насколько успешно решена задача разделения сигнала вибрации на компоненты разной природы. Так, если из выше-

приведенного сигнала вибрации предварительно выделить высокочастотные (ультразвуковые) компоненты, возбуждаемые микроударами, например, при разрывах смазки в подшипнике качения, форма обработанного сигнала представляет диагностическую информацию значительно нагляднее (рис. 18).

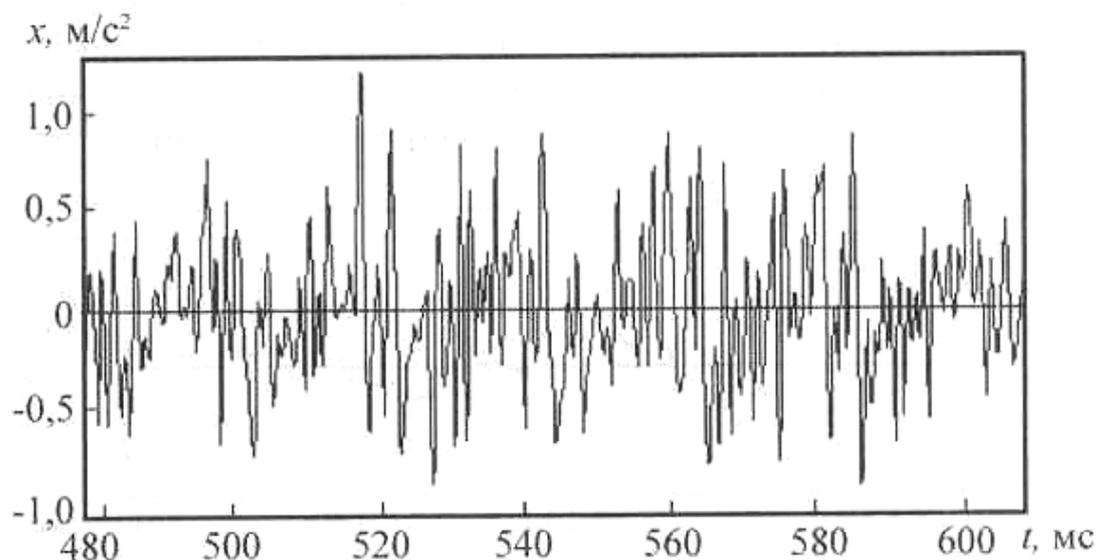


Рис. 17. Форма сигнала вибрации работающей электрической машины

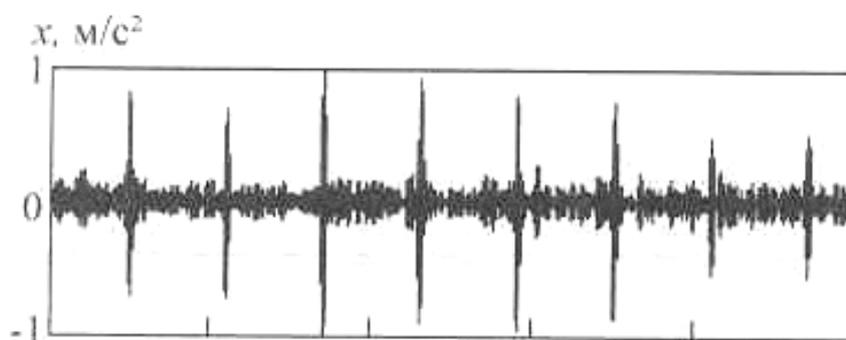


Рис. 18. Форма сигнала ультразвуковой вибрации, измеренной на корпусе дефектного подшипника качения

Весьма информативным является метод анализа (особенно применительно к данным относительной вибрации), использующий пространственно разделенные, но характеризующие колебания узла в одной плоскости компоненты вибрации.

Примером может служить анализ орбит движения вала в подшипниках, для которого производится измерение вибрации вала относительно неподвижной части подшипника в двух взаимно-перпендикулярных направлениях [4]. На рис. 19 приведены результаты измерения вибросмещений вала в двух направлениях и построенная по ним орбита движения вала.

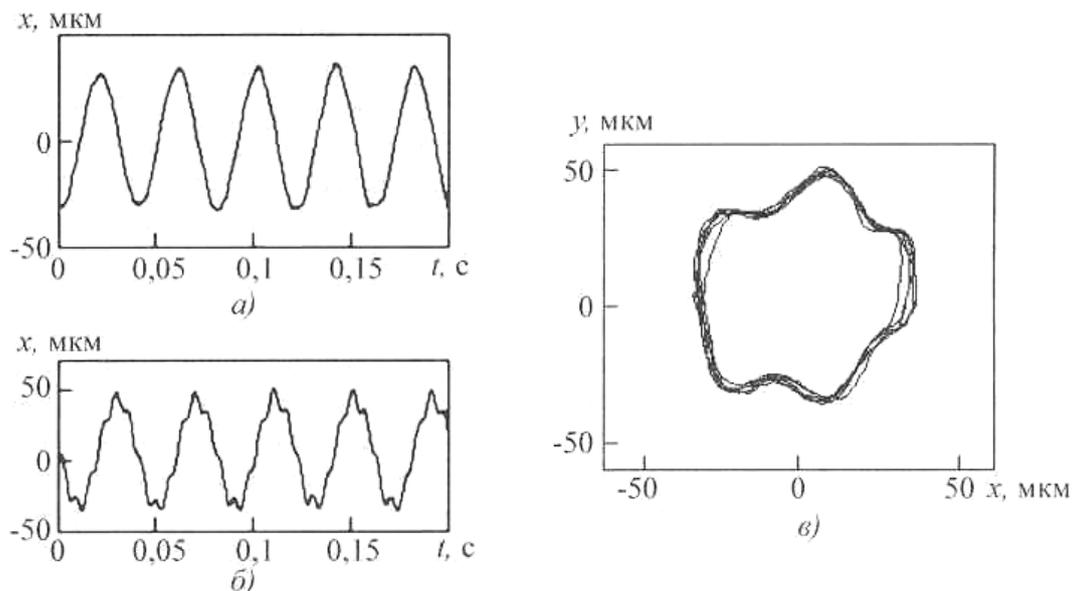


Рис. 19. Зависимость вибросмещения вала относительно опоры вращения от времени в двух направлениях (а, б) и орбита движения вала в подшипнике качения, имеющего значительный износ (в)

Форма орбиты движения вала в подшипнике зависит от многих факторов, в том числе от дефектов вала и подшипника, а также от количества и качества смазки. Ее анализ позволяет обнаружить несколько видов дефектов и определить степень их опасности за несколько оборотов вала.

Одним из таких методов, нашедшем наиболее широкое применение, является частотный (спектральный) анализ вибрации, позволяющий разделить ее на компоненты разной частоты, возбуждаемые разными источниками колебательных сил и имеющие разную природу и разные свойства [10].

Чаще всего спектральные методы анализа вибрации используются для изучения вибрации машин и оборудования периодического действия. Физически спектральный анализ можно рассматривать как параллельную фильтрацию сигнала с помощью большого количества фильтров разной частоты и определение мощности его отдельных компонентов или их среднеквадратичного значения на выходе каждого из фильтров.

Кроме высокой разрешающей способности по частоте, позволяющей разделить несколько близких по частоте компонентов в сигнале вибрации, преимуществом спектрального анализа является и высокий динамический диапазон, позволяющий одновременно измерять разные (до 10 000 раз и более) по величине компоненты вибрации, если их частоты не полностью совпадают.

Методы спектрального анализа используют для изучения многих видов колебательных процессов, а не только сигнала с выхода измерительного преобразователя вибрации. Таким процессом может быть часть сигнала

вибрации или один из ее параметров, если он периодически меняется во времени. Наиболее важной характеристикой вибрации является мощность, причем не всего сигнала вибрации, а лишь тех составляющих, которые имеют одну природу, и предварительно выделяются из сигнала вибрации. Если мощность выделенных составляющих постоянна во времени, тогда в спектре колебаний мощности не будет никаких составляющих. Если предварительно выделенные составляющие вибрации представляют собой сумму двух близких по частоте компонентов, мощность вибрации изменяется с частотой биений, в спектре колебаний этой мощности появляется одна составляющая с частотой биений. Если выделенная часть вибрации имеет много разных компонентов, и среди них присутствует доминирующий компонент ударного вида, возбуждаемый периодическими ударами, то мощность выделенных составляющих вибрации меняется периодическими скачками, как это показано, например, на рис. 18. В последнем случае в спектре колебаний мощности высокочастотной вибрации появляется большое число кратных гармоник, которых нет в спектре сигнала высокочастотной вибрации [4]. Именно такой вид анализа колебаний мощности предварительно выделенных составляющих вибрации одной природы, называемый спектральным анализом огибающей вибрации, получил широкое распространение в вибрационной диагностике машин. Однако исторически получилось так, что спектральным анализом огибающей вибрации стали называть анализ колебаний не мощности, а среднеквадратичного значения высокочастотной вибрации одной природы, что никак не меняет физической основы получаемых результатов. Основные ошибки в использовании спектрального анализа огибающей вибрации связаны с тем, что многие средства анализа не имеют возможности предварительного разделения сигнала вибрации на составляющие разной природы. Основные достижения этого вида анализа связаны с его использованием для исследования свойств случайной вибрации, возбуждаемой силами механического, аэродинамического и гидродинамического трения [3].

Проблемы исследования формы колебаний машин и оборудования на частоте вынужденных колебаний чаще всего определяются сложностью создания колебательных сил на исследуемой частоте. Если вибрация роторных машин на частоте вращения ротора и ее гармониках возбуждается естественным образом во время его вращения, то для исследования форм колебаний на других частотах используют источники гармонических колебательных сил, часто называемые вибраторами. Их крепление к исследуемому объекту изменяет механические свойства объекта и, как следствие, форму его колебаний. В связи с этим приходится принимать специальные меры по компенсации влияния вибратора на механические свойства исследуемого объекта [10].

Несколько проще решается задача исследования формы колебаний различных объектов на резонансных частотах. Подобные вопросы решают методом и техническими средствами модального анализа, предназначенного, в первую очередь, для исследования форм собственных колебаний объектов. В основе метода лежит принцип взаимности, позволяющий заменить местами точку приложения колебательной силы и точку измерения вибрации. Вибрация объекта возбуждается ударными импульсами последовательно во всех точках, в которых необходимо определить форму колебаний объекта, а отклик на ударное возбуждение измеряется датчиком вибрации, установленном в том месте, где в рабочем состоянии на объект действует колебательная сила.

Весьма важным разделом вибрационного анализа является статистическое описание результатов измерения различных параметров вибрации по группе независимых измерений. В такую группу чаще всего включаются либо данные периодических измерений вибрации одного и того же объекта контроля, либо измерения, выполненные в одних и тех же точках большого количества идентичных объектов, работающих в идентичных условиях. Задачей такого анализа обычно является идентификация закона распределения значений контролируемых параметров вибрации и определение основных моментов распределения, от которых зависят величины порогов в диагностических моделях. Кроме того, задачей статистического анализа периодически измеряемых параметров вибрации одного и того же объекта может быть построение трендов, характеризующих изменение контролируемых параметров во времени и краткосрочный прогноз этих изменений [4].

Как правило, результаты статистического анализа различных параметров вибрации, периодически измеряемой на бездефектном оборудовании, хорошо укладываются в нормальный закон распределения случайных величин, который характеризуется лишь двумя количественными оценками: средним значением и центральным моментом второго порядка, т. е. дисперсией.

При наличии в объекте контроля развитых дефектов закон распределения периодически контролируемых параметров вибрации может отличаться от нормального из-за появления определенных тенденций изменения во времени значений этих параметров. В таких случаях анализируются тренды изменений контролируемых параметров вибрации. На рис. 20 приведен график изменения во времени уровня вибрации мощного вентиляционного агрегата на частоте его вращения. Измерения вибрации проводились в течение пяти лет, вплоть до аварийного выхода агрегата из строя. Как видно из графика, за это время проявлялись разные тенденции изменения вибрации, и лишь в последние три-

четыре месяца, когда данные диагностики стали указывать на наличие нескольких одновременно развивающихся дефектов, появилась тенденция быстрого и монотонного роста вибрации.

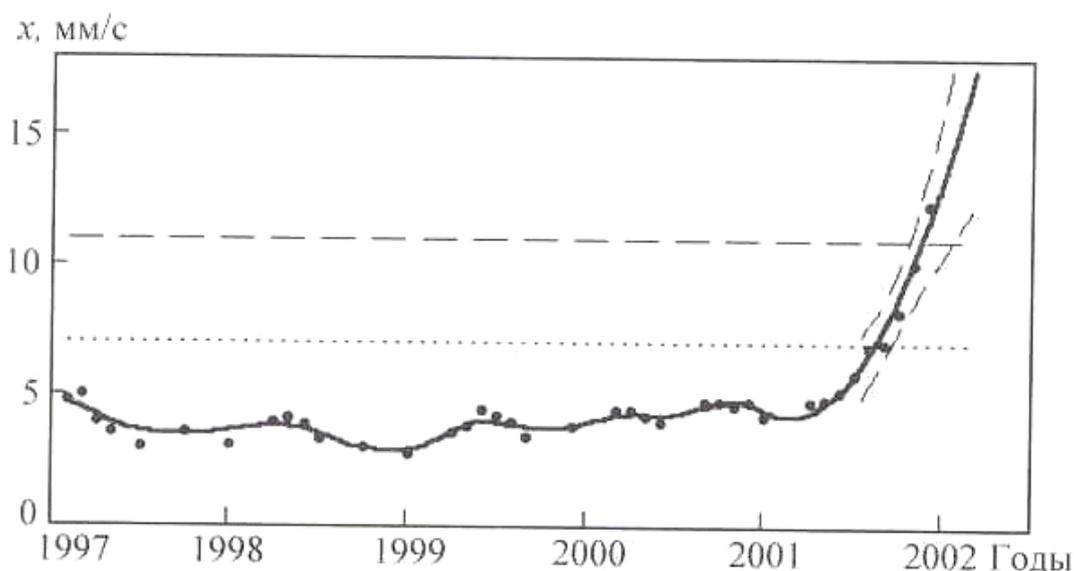


Рис. 20. Пример изменения уровня вибрации вентиляционного агрегата на частоте его вращения от времени

2.2. Анализ формы сигнала

Вибрация машин и оборудования имеет, как правило, сложную структуру и состоит из детерминированных и случайных компонентов разной формы. Простейшим видом анализа вибрации во времени является определение формы отдельных компонентов сигнала вибрации, которые либо значительно превышают по величине остальные компоненты, либо их предварительно выделяют из сигнала вибрации.

Простейшим детерминированным сигналом вибрации (или его компонентом) является гармонический сигнал, показанный на рис. 21, а:

$$x(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3)$$

где $x(t)$ — текущее значение сигнала в момент времени t ; A_0 — амплитуда сигнала; ω_0 — круговая частота сигнала; φ_0 — начальная фаза сигнала.

Каждый из указанных трех параметров гармонической вибрации, определяющих ее форму, может нести в себе диагностическую информацию. Исключение составляет лишь начальная фаза вибрации, так как информацию несет обычно не ее значение, а разность фаз колебаний одной частоты (синхронных колебаний), измеренных в двух разных точках или направлениях.

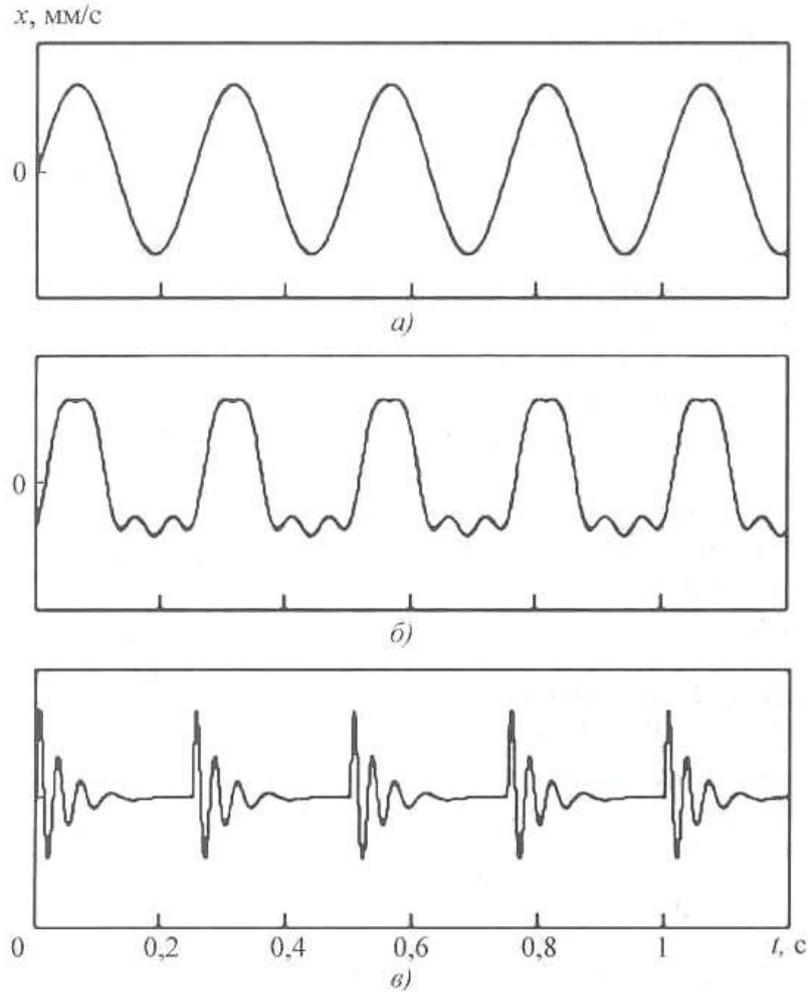


Рис. 21. Разные формы периодического сигнала вибрации

Период гармонической вибрации связан с круговой частотой и равен $T_0=2\pi/\omega_0$. Аналогичный период может быть и у более сложной, полигармонической вибрации, содержащей ряд кратных частоте ω_0 гармонических составляющих. Примеры такой вибрации также приведены на рис. 21.

Если сигнал вибрации мало отличается от гармонического (рис. 21, б), и в его составе лишь несколько гармоник, то диагностическая информация может содержаться в ранее рассмотренных параметрах каждой из этих гармоник:

$$x(t) = \sum_{k=1}^n A_k (\cos k\omega_0\tau + \phi_k). \quad (4)$$

Если длительность сигнала мала по сравнению с периодом его следования, как это показано на рис. 21, в, то информация чаще всего содержится в других параметрах сигнала, таких, как амплитуда (размах), частота следования (период T_0), скважность (отношение длительности сигнала к периоду следования), время нарастания τ_n и время спада

$\tau_{ср}$. Интегральной оценкой такого сигнала может быть и величина пик-фактора, представляющего собой отношение максимальной величины импульсного сигнала к его среднеквадратичному значению.

Достаточно часто приходится анализировать форму детерминированных колебаний, представляющих собой сумму периодических сигналов близкой частоты, например сумму гармонических сигналов вида

$$x(t) = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + A_2 [\cos(\omega_0 t + \varphi_1)t + \varphi_2], \quad (5)$$

где $\Delta\omega = \omega_0$.

Форма таких колебаний представлена на рис. 22. Амплитуда суммарных колебаний изменяется от максимальной величины $A_1 + A_2$ до минимальной, равной $A_1 - A_2$.

Такая форма представляет собой биения двух колебаний с периодом $T_0 = 2\pi/\Delta\omega$. Диагностическая информация может содержаться в параметрах, характеризующих эти биения, а именно: в частоте биений и значениях максимальной и минимальной амплитуд суммарных колебаний.

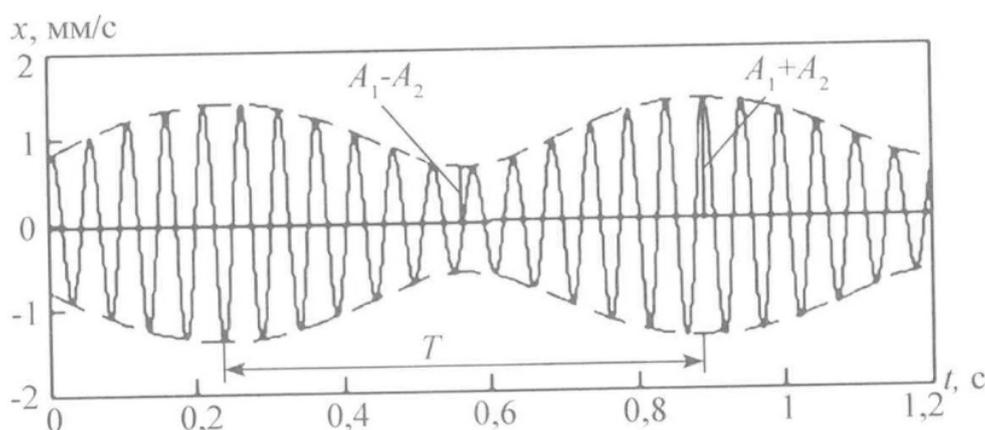


Рис. 22. Сигнал биений двух составляющих вибрации с близкими частотами

Период модуляции сигнала вибрации может совпадать с периодом биений, и тогда отличить сигнал биений от амплитудно-модулированного сигнала по их форме крайне сложно. В то же время амплитудно-модулированные детерминированные сигналы вибрации дают гораздо больше диагностической информации, чем сигналы биений, но для ее извлечения приходится использовать более сложные методы частотного анализа сигналов.

Кроме детерминированных составляющих вибрация машин и оборудования содержит еще и случайные составляющие. В отличие от детерминированных сигналов в случайных сигналах не могут быть определены ни амплитуда, ни частота, ни фаза. Физическими параметрами случайной вибрации являются мощность и эффективная ширина полосы

частот, в которой сосредоточена большая часть (более 70 %) ее мощности. Если диапазон частот, занимаемый сигналом вибрации, оказывается большим, и мощность сигнала распределена по частотам неравномерно, дополнительную информацию может дать форма распределения спектральной плотности сигнала по частоте. А для того чтобы единицы измерения детерминированной и случайной вибрации совпадали, вместо мощности случайного сигнала для ее описания используется параметр, представляющий собой квадратный корень из мощности и называемый среднеквадратичным значением (отклонением) сигнала вибрации (СКЗ).

2.3. Спектральный анализ

Спектральный анализ используется для разделения сигналов на простейшие составляющие в частотной области. Он эффективен, прежде всего, в тех случаях, когда сигналы имеют аддитивные периодические компоненты.

В вибрационной диагностике существует еще одна существенная область применения спектрального анализа – разделение на простейшие частотные составляющие сложных сигналов, являющихся произведением двух стационарных компонентов, хотя бы один из которых содержит периодические составляющие. Подобную сложную структуру имеют многие колебательные силы во вращающемся оборудовании, и для обнаружения отдельных видов дефектов необходимо по сигналу вибрации определять параметры мультипликативных составляющих колебательных сил. Естественно, сначала необходимо выполнить операции выделения из измеряемой вибрации мультипликативных компонентов одной природы, затем операции разделения их на стационарные сомножители, и лишь после этого проводить спектральный анализ того из них, который содержит периодические составляющие.

Особенности спектрального анализа хорошо видно на примере анализа периодических сигналов, и прежде всего гармонического вида. Любой периодический сигнал с периодом T раскладывается в ряд Фурье по кратным частотам [20].

Важной особенностью спектрального анализа сигналов вибрации является возможность накопления (усреднения) спектров, полученных из разных по времени выборок одного и того же стационарного сигнала. При анализе периодических сигналов вибрации необходимость такого усреднения отсутствует, однако при наличии в сигнале случайных компонентов точность определения их спектральной плотности в процессе усреднения растет, в \sqrt{n} раз, где n – число усредняемых независимых спектров. Обычно в задачах вибрационного мониторинга рекомендуется

линейно усреднять около четырех спектров, что минимизирует время измерений, однако при решении диагностических задач часто необходимо обеспечить более высокую точность определения амплитуд гармонических составляющих на фоне случайной вибрации, поэтому приходится увеличивать число усредняемых спектров до 10...20. Сокращать время измерения в этих случаях можно за счет использования перекрывающихся выборок. При применении окна Ханнинга перекрытие выборок на 20...30 % практически сохраняет независимость результатов измерения всех усредняемых спектров.

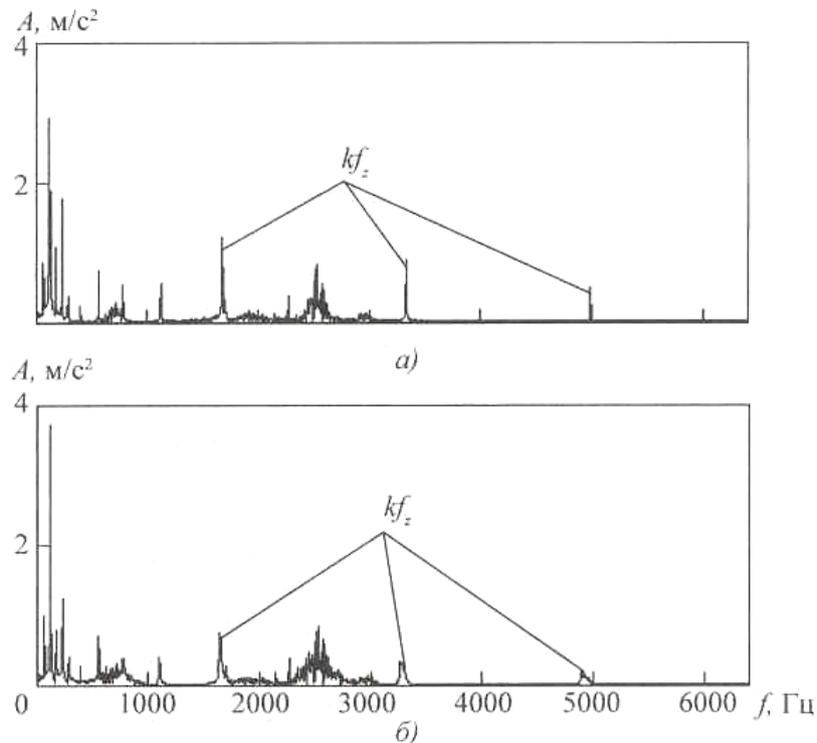


Рис. 23. Спектры вибрации электродвигателя постоянного тока

Важнейшей характеристикой спектрального анализа является частотное разрешение, позволяющее разделить в спектре близкие по частоте гармонические составляющие анализируемого сигнала. Частотное разрешение определяется шириной $\Delta\omega$ полосы спектра, которая связана с длительностью временного окна T соотношением $\Delta\omega = 2\pi/T$. Оно уменьшается при использовании функции окна, отличного от прямоугольного.

Для большинства задач вибрационного мониторинга и диагностики вращающегося оборудования достаточным является частотное разрешение $\Delta\omega = 2\pi \approx f_{вр}/10$, где $f_{вр}$ – циклическая частота вращения ротора. Учитывая возможность использования перекрывающихся времен-

ных выборок в задачах построения усредненных спектров, физическое время измерений сигнала вибрации можно снизить до 40...50 оборотов ротора. Это время на порядок больше того, которое необходимо для анализа формы сигнала, зато диагностической информации, получаемой из спектров вибрации, во много раз больше.

Спектральный анализ вибрации вращающегося оборудования может проводиться и при нестабильной частоте его вращения, например в режимах его пуска или выбега. В этих случаях дискретные значения сигнала во временной выборке корректируются во времени таким образом, чтобы за один оборот ротора, независимо от его периода вращения, количество отсчетов сохранялось постоянным. Естественно, что для построения синхронных спектров необходима информация о частоте вращения и фазе ротора в любой момент накопления дискретных значений сигнала. Эта информация может поступать с датчика оборотов ротора, датчика частоты электрической сети генератора или других средств ее контроля.

ГЛАВА 3 СБОР ВИБРАЦИОННЫХ ДАННЫХ

3.1. Выбор точек измерения

Давайте теперь поговорим о том, где на агрегате нужно выбирать места для установки датчиков. Для многих машин результаты измерения вибрации статорных элементов (неподвижных частей агрегата) являются достаточными для адекватной (правильной) оценки условий их надежной эксплуатации. Результаты измерений вибрации могут быть использованы при эксплуатационном контроле, приемочных испытаниях, диагностических и аналитических исследованиях.

Ниже приводятся отрывки из ГОСТа ИСО 10816-1-97, в которых даны основные указания по выбору измерительных точек для контроля вибрации [7].

3.1.1. Контролепригодность оборудования

Контролепригодность – это пригодность агрегата для вибродиагностики. Она должна обеспечиваться при проектировании агрегата, в ходе его доводки, при монтаже или эксплуатации путем принятия конструктивных решений, выбора диагностических средств и проведением специальных испытаний.

Пригодность эксплуатируемого агрегата для вибродиагностики определяется возможностями использования штатных и дополнительных средств. При конструировании, доводке, монтаже и эксплуатации агрегатов наибольшие затруднения обычно вызывает определение мест установки вибродатчиков, которые требуется размещать на агрегате с учетом местонахождения устраняемой неисправности.

Основное правило размещения вибродатчиков – максимально возможное их приближение к диагностируемому узлу и установка на жесткие элементы конструкции с подготовленной поверхностью. Желательно, чтобы число стыков деталей на пути прохождения вибрационного сигнала от диагностируемого узла (источника колебаний) к месту установки датчика было минимальным. При выборе этого места учитывают также резонансные свойства конструкции в требуемой полосе частот. Направление измерительной оси вибродатчика желательно ориентировать по линии действия силы, возбуждающей механические колебания.

Значительную часть потенциально ненадежных деталей выявляют ускоренными эквивалентными и циклическими испытаниями агрегатов

еще в ходе отработки опытных образцов. При доработке конструкции по выявленным «слабым местам» предусматривают конструктивные решения, обеспечивающие выполнение требований и условий измерения вибрационного сигнала. Однако иногда ненадежные детали со значительно укороченным (по сравнению с другими деталями агрегата) ресурсом проявляются лишь на этапе эксплуатации и требуют особого наблюдения.

Возможность установки вибродатчика обеспечивается созданием соответствующих площадок (на фланцах, бобышках, приливах и т. д.), либо установкой специальных крепежных элементов (болтов, гаек с площадками под вибропреобразователи) взамен штатных, либо установкой специальных кронштейнов.

В вибродиагностике машин широко используют пьезоэлектрические вибропреобразователи (пьезодатчики), обычно малогабаритные, что облегчает задачу по выбору мест их установки.

Места установки вибродатчиков, которые будут использоваться только в случаях необходимости для специальных исследований при возникновении неисправностей во время эксплуатации, следует указывать в технической документации машины и регламенте предприятия по проведению виброизмерений. Кроме того, должны быть указаны способы крепления преобразователей, технология прокладки электропроводки от вибродатчика к средствам диагностики и возможности использования других сигналов, например сигналов частоты вращения роторов.

В связи с тем, что техническое обслуживание эксплуатируемых агрегатов иногда проводится по «непредусмотренным» при проектировании агрегата отказам, требуется реализация принципа адаптации контролепригодности к отказам, возникающим в ходе эксплуатации.

3.1.2. Контрольные точки измерений вибрации

Поскольку реакции механических систем на возбуждение механическими колебаниями определяются сложными физическими процессами, то при измерении даже на одном элементе агрегата в близких друг к другу точках ввода может наблюдаться различный характер исследуемых колебаний. Вышесказанное особенно актуально для высокочастотной составляющей вибросигнала, что часто определяется различными типами распространения высокочастотных колебаний по поверхности.

Важно производить замеры вибрации в одних и тех же местах, называемых контрольными (штатными) точками измерения вибрации.

Обычно измерения параметров вибрации в контрольных точках производятся на подшипниковых опорах агрегата, корпусе агрегата и на анкерных фундаментных болтах.

Абсолютную вибрацию (при диагностировании большинства механических дефектов) рекомендуется измерять в трех взаимно перпендикулярных направлениях:

- вертикальном, горизонтальном (поперечном) и осевом на агрегатах с горизонтальной осью вращения;
- двух радиальных, расположенных под прямым углом в горизонтальной плоскости, и осевом – на агрегатах с вертикальной осью вращения.

Преобразователи для измерения горизонтальной (поперечной) составляющей вибрации крепят на уровне оси вала напротив середины длины опорного вкладыша. Осевую составляющую вибрации следует измерять в точке, максимально приближенной к оси вала на корпусе опоры подшипника вблизи горизонтального разъема между крышкой и корпусом. Вертикальную составляющую вибрации измеряют на верхней части крышки подшипника над серединой его вкладыша (рис. 24).



Рис. 24. Типичные контрольные точки измерений вибрации

Допускается измерение вертикальной, горизонтальной и осевой составляющих вибрации путем установки на верхнюю часть крышки подшипника трехкомпонентного вибродатчика для измерений вибрации во взаимно перпендикулярных направлениях, совпадающих с главными осями агрегата.

В силу экономических соображений при изучении контролепригодности каждого конкретного агрегата и подготовке контрольных точек

всегда возникает вопрос о пространственном направлении измерений, оптимальном с точки зрения распознавания технического состояния конкретного узла агрегата. Решающего правила или общего ответа на этот вопрос нет, но если невозможно проведение измерений по трем главным направлениям в зоне одного подшипника или требуется минимизация количества замеров, то допускается измерение вибрации в двух направлениях: осевом и одном из поперечных. Предпочтение отдается поперечному направлению, как правило, соответствующему направлению минимальной жесткости системы. Допускается также осевую вибрацию измерять только на подшипниках свободных концов валопровода.

Измерение вибрации при диагностировании подшипников качения производится на подшипниковых щитах в поперечном направлении, желательно в нижней части щита, как показано на рис. 25, а.

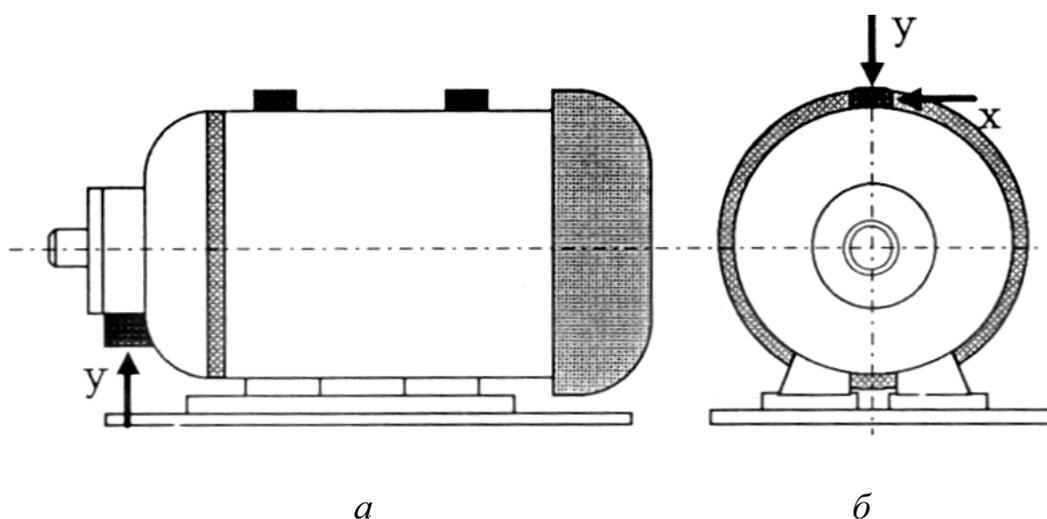


Рис. 25. Направления и точки измерения вибрации электрической машины при диагностировании механической (а) и электромагнитной (б) систем

Точки и направления измерения сигнала вибрации для диагностирования моделей механической и электромагнитной систем электрических машин различны. На рис. 25, б показаны основные точки измерения сигнала вибрации на корпусе машины при вибродиагностировании ее электрической асимметрии. В ряде случаев эти точки при измерении поперечной составляющей вибрации могут совпадать с точками измерения вибрации на подшипниковых щитах.

Нарушения гидродинамики потока, например кавитацию, во многих случаях следует контролировать, измеряя сигнал вибрации на корпусе в районе входного патрубка насоса.

3.1.3. Места установки датчиков

Датчик следует закреплять так, чтобы его измерительная ось совпадала с нужным при измерении направлением. Как правило, измерительная ось перпендикулярна плоскости крепления датчика (его рабочей поверхности). Цель измерения и анализа вибрации обычно диктует расположение мест крепления пьезодатчика на исследуемом объекте (см. приведенный на рис. 26 пример).

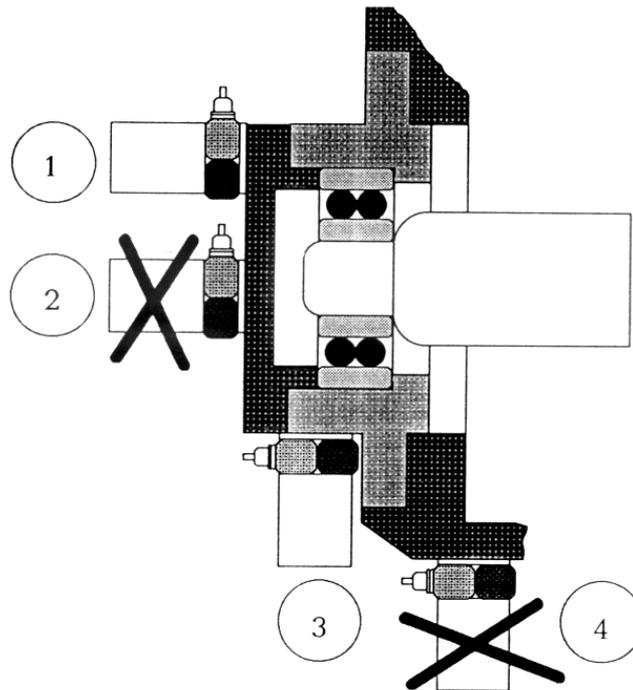


Рис. 26. Рекомендуемые места крепления датчика

В большинстве случаев целью измерений вибрации является контроль условий работы вала и подшипника. Датчик следует устанавливать так, чтобы на его рабочую поверхность непосредственно действовали механические колебания подшипника. Датчик 3 воспринимает механические колебания подшипника при меньшем влиянии вибрации, возбуждаемой другими узлами и деталями агрегата, по сравнению с датчиком 4, который воспринимает преобразованные при прохождении через разъемное соединение колебания подшипника и механические колебания, генерируемые другими узлами агрегата. Аналогично датчик 1 расположен более целесообразно с точки зрения распространения механических колебаний, чем датчик 2. Измерение вибрации на тонкостенных участках корпусов и крышек недопустимо [4].

При эксплуатационном контроле выполняют измерения только на полностью собранной, на штатных опорах машине на месте ее эксплуатации. Результаты сравнения вибрационного состояния однотипных

машин, установленных на различных фундаментах сопоставимы лишь при условии сходства жесткостных и массовых свойств фундаментов.

Оценка уровня вибрации должна быть проведена после достижения нормальных условий эксплуатации.

Расположение точек измерения для машин конкретных типов должно быть приведено в соответствующих стандартах на машины этих типов [7].

3.2. Выбор частотного диапазона измерений

Прежде чем выбрать рациональные для анализа полосы, нужно изучить конструкцию машины. Цель анализа заключается в поиске возможных источников вибрации. Ими в агрегате могут быть ротор, муфты, подшипники, зубчатые передачи и т. п. Определившись с источниками, мы можем выбрать частотные диапазоны, необходимые для контроля вибрации от потенциальных дефектов находящихся на отдельных узлах агрегата.

Достаточно большое число элементов машины дает вибрацию на оборотной частоте. Так, например, дисбаланс, остаточный прогиб вала, пониженная жесткость опорной системы и тепловые дисбалансы проявляются на оборотной составляющей. Для их контроля необходимо измерять амплитуду и фазу оборотной составляющей вибрации. Или, при невозможности ее измерения, можно контролировать вибрацию в узкой полосе частот около оборотной составляющей (например, $\pm 10\%$).

Большую диагностическую ценность представляет вторая гармоника от оборотной составляющей. Есть большое число дефектов, которые легко диагностировать, используя данные о второй гармонике. Например, дефекты муфт, нарушение центровки, пониженная жесткость опор, трещины в роторе и т. д. Для их контроля необходимо измерять амплитуду и фазу 2-й гармоники от оборотной составляющей вибрации. Или, при невозможности ее измерения, можно контролировать вибрацию в узкой полосе частот возле оборотной составляющей (например, $\pm 10\%$).

При наличии в машине таких узлов как подшипники скольжения, необходимо следить за низкочастотной составляющей вибрации. Контролируемый диапазон частот составляет 25–75 % от оборотной составляющей.

Если в машине используются подшипники качения, зубчатые передачи, а также возможны задевания и кавитация, то необходимо следить за высокочастотной составляющей вибрации. Подшипники качения удобно диагностировать по вибрации, сосредоточенной на частотах порядка килогерц (50–70 гармоники от оборотной частоты). Дефекты зубчатых передач локализуются на частотах «зацепления», равных произведению частоты вращения шестерни на число зубьев, находящихся на ней. Контролируемая полоса должна включать в себя частоту зацеп-

ления. При вероятности возникновения задеваний, вибрация, так же как и при дефектах подшипников качения имеет всплеск на нескольких килогерцах. При наличии лопаточного аппарата, при возникновении кавитации, появляется высокочастотная вибрация с «лопаточной» частотой равной произведению числа лопаток на частоту вращения ротора [7].

3.3. Использование датчика оборотов

Одна из важнейших задач при измерении вибрации роторных агрегатов состоит в точном определении частоты вращения ротора. Для этого мы используем синхронизирующий сигнал, источником которого служит специальное устройство – лазерный отметчик.

Лазерный отметчик состоит из двух элементов – излучающего лазерного светодиода и реагирующего на луч фотодиода. Оба диода имеют общую оптическую ось, поэтому если лазерный луч от светодиода встретит отражающую поверхность и пойдет в обратном направлении, он вызовет сигнал на выходе фотодиода.

На поверхность ротора наносят специальную световозвращающую метку, а отметчик закрепляют таким образом, чтобы луч лазера падал на эту метку. При прохождении метки под отметчиком, в нем формируется короткий импульс, длительность которого соответствует ширине метки, передний фронт этого импульса соответствует началу оборота ротора. Понятно, что этот импульс жестко привязан к определенному месту на поверхности ротора и поэтому мы можем принять передний край метки за нулевой градус.

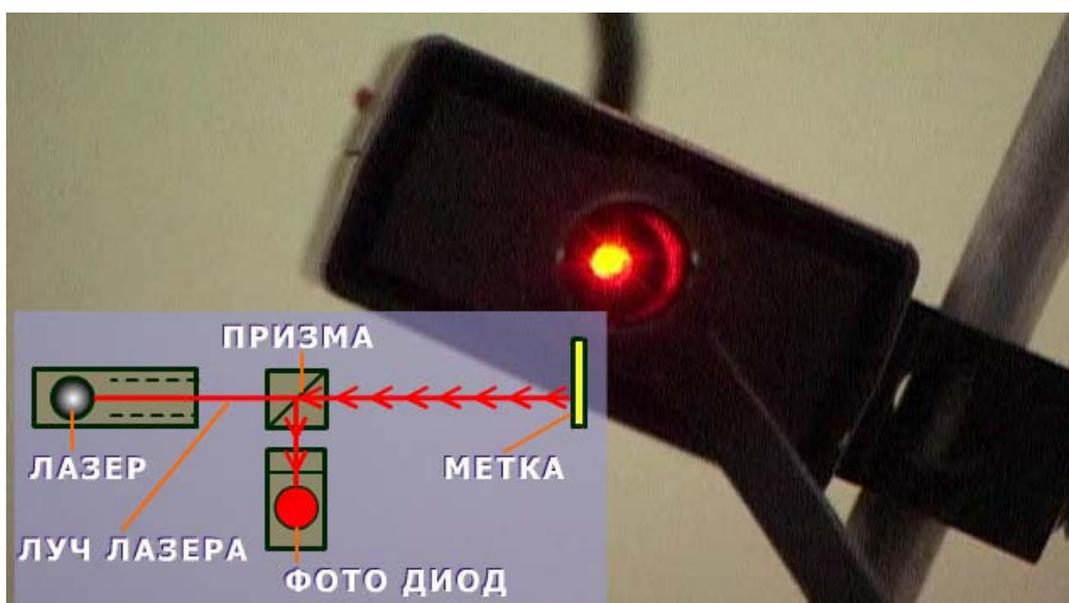


Рис. 27. Схема работы лазерного отметчика

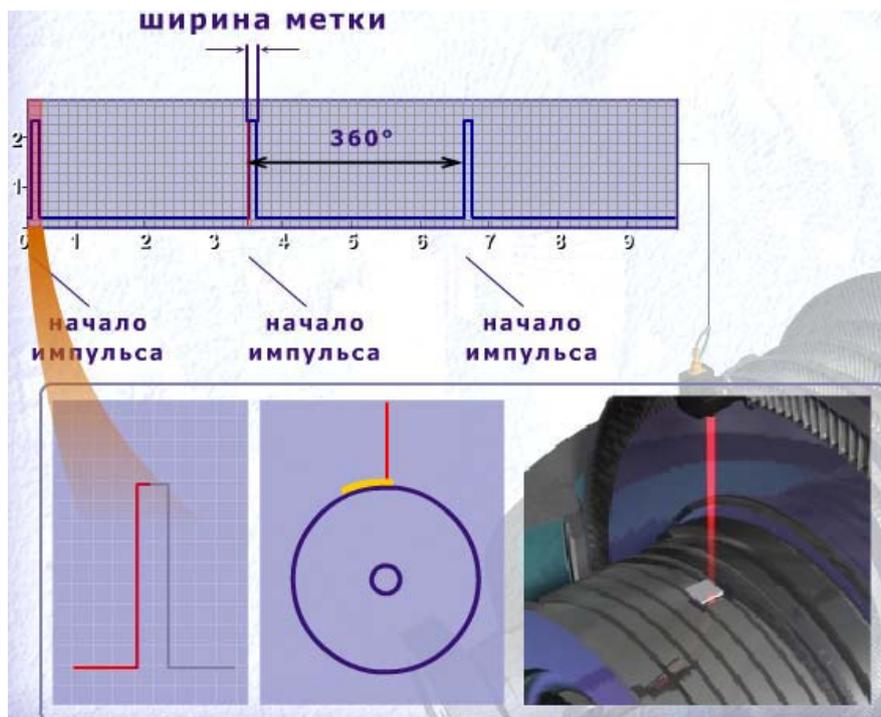


Рис. 28. Схема использования световозвращающей метки

Итак, поскольку световозвращающая метка имеет определенную ширину, то и формируемый отметчиком импульс будет иметь соответствующую длительность. Поэтому при синхронизации мы учитываем только начало импульса, а все углы отсчитываем от переднего края метки в направлении, противоположном вращению.

ГЛАВА 4 АППАРАТУРА, ПРИМЕНЯЕМАЯ ДЛЯ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

4.1. Виды датчиков

Датчиком, или измерительным преобразователем, называют средство измерения, которое преобразует измеряемую физическую величину в электрический сигнал, предназначенный для дальнейшей обработки в измерительном приборе. Измерения параметров колебательных процессов в механических системах выполняют с помощью вибродатчиков или вибропреобразователей.

В зависимости от того, какую именно механическую величину измеряет датчик, их можно разделить на три типа:

- 1) акселерометры, измеряющие виброускорение;
- 2) велометры, предназначенные для измерения виброскорости;
- 3) проксиметры, которые используют для получения сигнала, пропорционального вибросмещению.

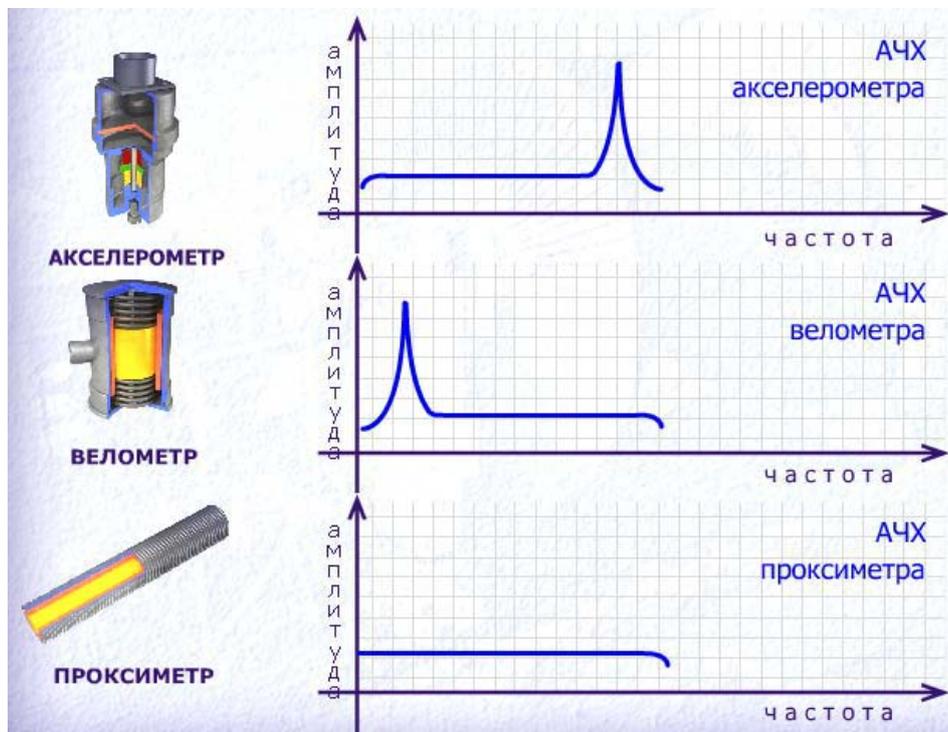


Рис. 29. Вибродатчики: акселерометр, велометр и проксиметр

Современные измерительные приборы способны измерять все три параметра, преобразовывая одну полученную с датчика кинематическую характеристику в другую.

Но, как правило, выполняется преобразование из ускорения (при использовании пьезодатчика) в скорость или смещение (т. е. осуществляется интегрирование входного сигнала). Обратное преобразование (т. е. дифференцирование) на практике не выполняется из-за плохого соотношения сигнал/шум.



Рис. 30. Примеры исполнения вибродатчиков

4.2. Обзор крепления датчиков

Крепление датчика на шпильке

Диапазон измеряемых частот: 0–20000 Гц (рис. 31, *а*). С точки зрения метрологии – этот способ крепления вибродатчика является самым качественным и надежным.

Крепление датчика на магните

Диапазон измеряемых частот: 0–4500 Гц (рис. 31, *б*). Наиболее распространенный способ крепления датчиков при использовании переносных виброметров и виброанализаторов.

Крепление датчика на ручном щупе

Диапазон измеряемых частот: 0–200 Гц (рис. 31, *в*). Подходит для проведения оперативных замеров низкочастотной вибрации в труднодоступных местах агрегата или на немагнитных поверхностях.

Оказывается, результаты измерения вибрации существенно зависят от способа крепления датчика на исследуемой поверхности.

Эти рассуждения применимы только к датчикам скорости и ускорения, т. к. в них вибрация измеряется контактным способом. Для проксиметра эти рассуждения не имеют смысла, поскольку датчик при работе не имеет механического контакта с исследуемой поверхностью.

Соединение измерительного преобразователя с колеблющейся поверхностью обладает определенной «жесткостью», которая в совокупности с массой датчика, оказывает уровни и частотный состав вибрации.

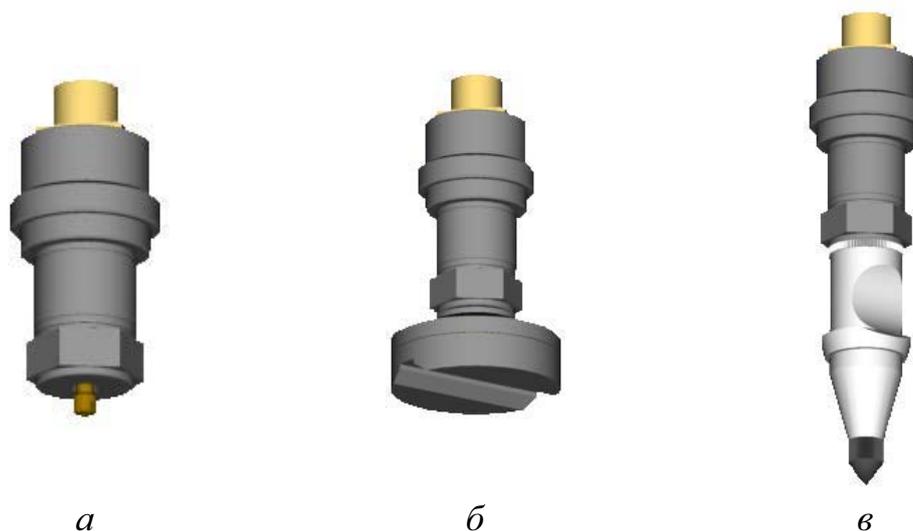


Рис. 31. Примеры конструкций вибродатчиков для крепления:
а – на шпильке; б – на магните; в – на ручном щупе

Эквивалентная схема крепления датчика на исследуемой поверхности показана на рисунке. Мы имеем одномассовую механическую систему, резонансная частота ω_p которой определяется массой датчика m и жесткостью k его крепления на измеряемом объекте:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (6)$$

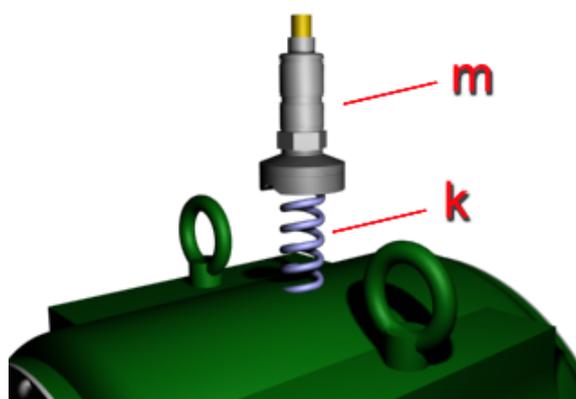


Рис. 32. Эквивалентная схема крепления датчика

Подготовка поверхности

В области анализируемых частот ниже резонансной, амплитуда и фаза вынужденной вибрации резонансной области, совпадают с истинными значениями на объекте с более низкими уровнями и отставанием силы по фазе на 180° . Другими словами метрологически правильными будут замеры только в дорезонансной области. Важно также отметить, что на резонансную частоту также влияет шероховатость, твердость и форма поверхности, на которой проводят измерения.

Место установки датчика должно быть чистым и плоским. Шероховатость поверхности должна быть минимальной. Краска в месте установки датчика должна отсутствовать и место установки датчика должно быть промаркировано соответствующим образом.

Все рассматриваемые способы крепления датчиков одинаково хорошо работают на очень низких частотах (порядка единиц Герц) и основная разница будет в верхних границах измеряемого диапазона.



Рис. 33. Примеры подготовки поверхности для крепления на ней вибродатчиков

4.2.1. Крепление датчика с помощью шпильки

При креплении датчика на шпильку обеспечивается максимальная жесткость крепления (за счет затяжки резьбового соединения), при этом колеблющаяся масса преобразователя является минимальной и определяется только весом датчика. Поэтому, при таком креплении, обеспечиваются частотные характеристики датчика, заявленные в его паспорте. Например, для датчика РА023 резонансная частота составляет ~ 27 кГц (на 20 % больше верхней частоты рабочего частотного диапазона).



Рис. 34. Крепление вибродатчика при помощи шпильки

Такой способ крепления неудобен тем, что на исследуемой поверхности необходимо иметь постоянно установленную шпильку и необходимо провести большую подготовительную работу по установке шпилек. Также этот способ требует определенных временных затрат при установке/снятии датчика в процессе измерений. К достоинствам крепления датчика на шпильку можно отнести высокую стабильность измерений (за счет точной установки датчика всегда в одно и то же место) и самый широкий частотный диапазон измеряемой вибрации.

4.2.2. Крепление датчика при помощи магнита

Установка измерительного преобразователя с помощью магнита на сегодняшний день является наиболее удобным и распространенным способом крепления. Очевидно, что резонансная частота крепления будет зависеть от силы и массы магнита, и собственно, массы самого датчика. Однако, анализируемый частотный диапазон обычно не превышает нескольких килогерц.

Крепление датчика с помощью магнита имеет несколько существенных недостатков. Преобразователь невозможно установить на немагнитную поверхность. Датчик на таком креплении неудобно размещать в труднодоступных местах. У пользователя могут быть проблемы с повторяемостью измеряемой вибрации, вследствие того, что, при установке возникают трудности с «попаданием» датчика в одну и ту же контролируемую точку. Необходимо принять меры к маркировке места установки датчика. Но тем не менее, в 90 % случаев погрешности, вносимые этим обстоятельством пренебрежимо малы.

Для датчика и магнита, входящего в стандартный комплект виброанализатора, резонансная частота составляет порядка 4,5 кГц. Вплоть до этой частоты мы будем получать метрологически верные результаты.



Рис. 35. Крепление вибродатчика при помощи магнита

4.2.3. Крепление датчика с помощью щупа

Ручным щупом пользуются тогда, когда жесткая установка датчика невозможна. Это может произойти в случае, если нам необходимо установить измерительный преобразователь в труднодоступном месте или на немагнитном материале. Такой способ крепления также поможет выполнить замер на горячей поверхности. При измерениях с помощью ручного щупа, частота установочного резонанса оказывается равной нескольким сотням герц, точно ее определить затруднительно, так как сила, с которой специалист прижимает датчик к поверхности, сильно разнится от человека к человеку. Обратите внимание на несколько рекомендаций, которые желательно выполнять при проведении измерений с помощью ручного щупа.

Место установки должно быть накернено и смазано консистентной смазкой. Это делается для того, чтобы измерения проводились всегда в одном и том же месте. Кроме того, при этом улучшается контакт

между измерительной поверхностью и щупом, а смазка уменьшает величину резонансного пика. Следует устанавливать щуп всегда в одном и том же положении, относительно перпендикуляра к поверхности. Очевидно, что при изменении положения, результаты измерения будут разные. Не следует прижимать щуп к измерительной точке с большой силой, так как при этом растет амплитуда поперечных колебаний датчика. Помимо увеличения резонансной частоты и расширения частотного диапазона мы получим рост измеренной вибрации.

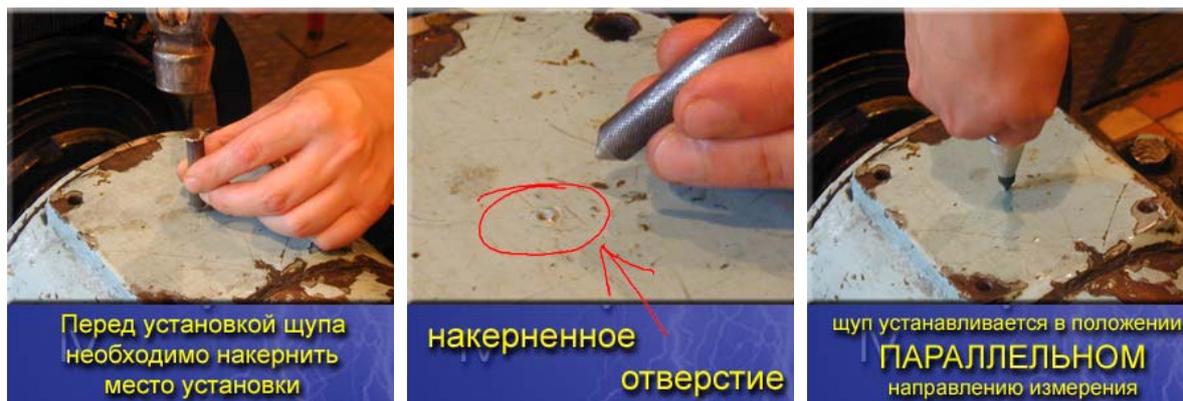


Рис. 36. Крепление вибродатчика при помощи магнита

4.3. Средства сбора и обработки данных

Современный комплекс средств измерений и диагностики (измерительная система) для проведения работ по периодическому вибромониторингу состоит из следующих частей: аппаратные средства измерений (приборы для измерения и анализа вибрации), вспомогательные устройства и каналы связи, программное обеспечение для обработки измерительной информации и ЭВМ.

Вибрация измеряется, контролируется и анализируется в большинстве случаев с применением двух типов аппаратуры: стационарной и переносной (мобильной). Передвижные лаборатории условно включены в мобильные средства.

4.3.1. Стационарная аппаратура

Стационарная аппаратура контроля состояния оборудования применяется для непрерывного контроля параметров вибрации, температуры, давления, числа оборотов и др. Стационарная аппаратура делится на два основных класса: контрольно-сигнальная аппаратура (контроля текущего уровня параметра) и аппаратура для мониторинга (анализа тенденций изменения параметра). Первая служит для сигнализации или отключения агрегата при превышении контролируемым параметром (в т. ч. вибрацией)

некоторых пороговых уровней (например, допустимых значений вибрации). Вторая позволяет анализировать тенденции и проводить диагностику, т. е. выявлять причины изменения состояния агрегата. Как правило, аппаратура непрерывного мониторинга в качестве основы содержит в своем составе контрольно-сигнальную аппаратуру.

Контрольно-сигнальная аппаратура включает следующие составные части: первичный вибропреобразователь (датчик), крепящийся на контролируемом объекте, предусилитель, соединительный кабель, вторичный блок контроля. Вторичный блок может располагаться в непосредственной близости от агрегата (полевое исполнение) или выноситься на пульт управления (щитовое исполнение). Вторичный блок служит для индикации, сигнализации или отключения агрегата в случае достижения уровня вибрации аварийных уставок. Обычно аппаратура может:

- измерять СКЗ (амплитуду, размах) виброскорости (виброперемещения) полигармонической вибрации с непрерывной индикацией в аналоговой (цифровой) форме;
- индицировать значение контролируемого параметра, соответствующее предупредительному и аварийному уровням вибрации;
- индицировать состояние превышения предупредительного или аварийного уровней вибрации;
- управлять внешними устройствами (средствами защиты).

Аппаратура для мониторинга, кроме вышеупомянутых блоков, обычно включает компьютерный блок, содержащий программное обеспечение, позволяющее собирать, хранить, обрабатывать и отображать информацию по алгоритмам мониторинга.

4.3.2. Переносная аппаратура

Переносная аппаратура применяется для периодического контроля и мониторинга уровней измеряемых параметров. Переносная аппаратура условно может быть разделена на два класса: аппаратура для измерения общего уровня вибрации (виброметры) и аппаратура для измерения, сбора и анализа вибрации (виброанализаторы и сборщики данных).

Виброметры состоят из первичных вибропреобразователей (датчиков), предусилителей и вторичных блоков. Вторичный блок позволяет измерять общий уровень вибрации агрегата. Некоторые модели позволяют хранить данные.

Виброанализатор, кроме вышеупомянутых блоков, содержит в себе микропроцессорный блок с программным обеспечением, позволяющий измерять, хранить, обрабатывать и отображать информацию на местах измерений, а также пересылать информацию в персональный компьютер.

4.4. Вторичные блоки контроля вибрации

Вторичные блоки предназначены для первичной обработки сигналов вибродатчиков, устанавливаемых на оборудовании, индикации параметров вибрации, индикации уставок предупредительной и аварийной сигнализации и индикации срабатывания защиты (рис. 37). Вторичные блоки обычно имеют выходы по току и напряжению, а также контакты, срабатывающие при достижении контролируемого параметра вибрации уровня уставок. Часто для повышения надежности работы аппаратуры блоки имеют автономные источники питания и индикаторы состояния измерительной (кабельной) линии. Выходы по переменному и постоянному току могут служить для автоматизации процесса контроля и защиты, а также для подключения анализаторов спектра или ЭВМ.

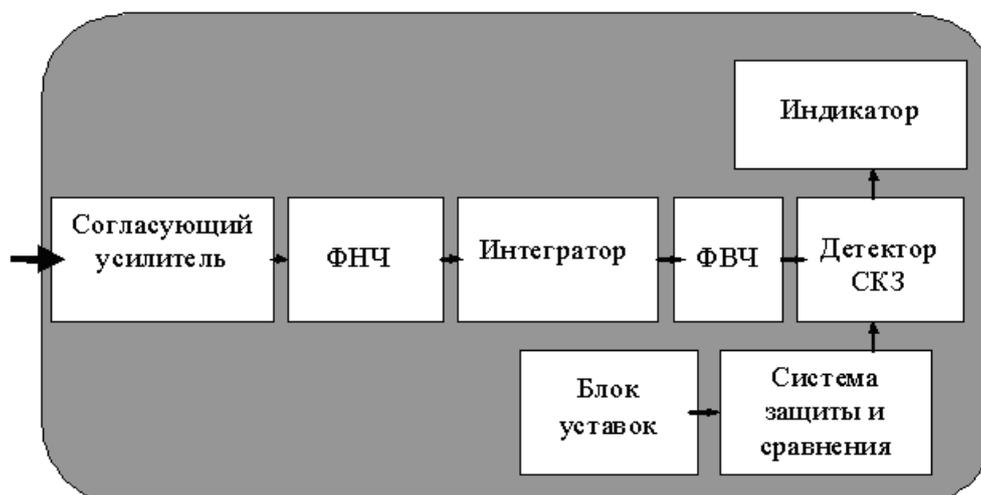


Рис. 37. Структурная схема вторичного блока контроля

Во вторичном блоке контроля виброскорости напряжение, пропорциональное виброускорению усиливается, проходит полосовую фильтрацию, интегрируется. Фильтр нижних частот обеспечивает требуемую неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) измерительного тракта в полосе частот до 1000 Гц. Фильтр верхних частот имеет срез на частотах ниже 10 Гц. На выходе интегратора вырабатывается напряжение, пропорциональное виброскорости. Далее детектор среднеквадратического значения (СКЗ) преобразует это напряжение в напряжение постоянного тока, которое поступает на индикатор. Одновременно производится сравнение сигнала с аварийными уставками, в случае превышения которых срабатывает предупредительная или аварийная сигнализация.

Если вторичный блок контроля вибрации имеет интерфейс для соединения с ЭВМ, то появляется возможность компьютерного мониторинга состояния оборудования. При выборе оборудования рекомендуется пользоваться услугами квалифицированных специалистов в области вибродиагностики и мониторинга.

Компьютерный блок со специализированным программным обеспечением позволяет собирать данные измерения вибрации от группы контрольных точек агрегата в синхронном или асинхронном режимах, хранить большие объемы измерительной информации, обрабатывать и отображать данные измерения вибрации во временной и частотной областях и наблюдать за изменением параметров вибрации по алгоритмам мониторинга. Основным отличием от контроля СКЗ виброскорости в этом случае будет способность наблюдать за изменениями отдельных спектральных составляющих с течением времени и создавать индивидуальные пределы тревожной сигнализации (уставки) для отдельных параметров вибросигнала. Более детально возможности программного обеспечения рассмотрены в соответствующем разделе.

4.4.1. Переносные виброметры

Приведенная на рис. 38 структурная схема иллюстрирует конструкцию и принцип действия виброметра. Пьезодатчик соединяется с усилителем заряда (напряжения), образующим входной каскад измерительного устройства, отличающийся высоким импедансом. В этом случае отпадает необходимость применения внешнего предусилителя. Если применяется усилитель заряда, то появляется возможность применения относительно длинного кабеля без заметной потери чувствительности.

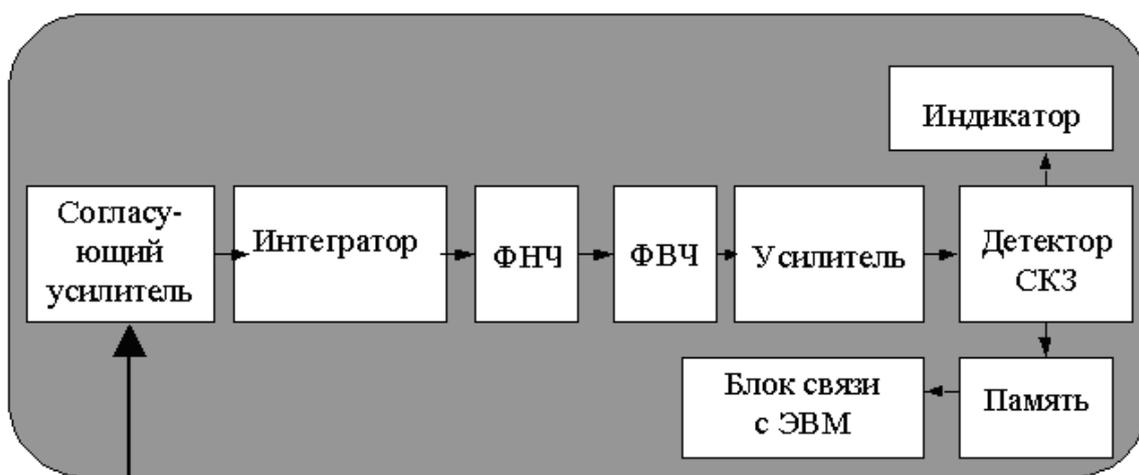


Рис. 38. Структурная схема виброметра

Каскад интеграторов обеспечивает измерение виброускорения, виброскорости или виброперемещения. Предусмотренные фильтры верхних и нижних частот можно настраивать согласно требованиям к ширине анализируемой полосы частот и/или диапазону измерений используемого датчика. С выходом усилительного каскада, обеспечивающего нужное усиление сигнала, соединен детектор, вырабатывающий пропорциональное измеряемой величине постоянное напряжение, подающее затем на индикатор (аналоговый или цифровой). Детектор определяет амплитуду, размах или СКЗ измеряемой величины. Если предусмотрено запоминающее устройство, то измеренные значения вибрации можно просмотреть позднее или переслать в ЭВМ. Запоминающее устройство особенно эффективно при измерении механических ударов и кратковременных (переходных) процессов. Виброметры могут иметь выход для подключения внешних приборов.

Некоторые, наиболее современные модели виброметров позволяют подключать (или имеют встроенные) датчики температуры, числа оборотов и др., а также определяют состояние подшипников качения (используя метод ударных импульсов) и наличие кавитации (измеряя высокочастотные импульсы, характеризующие кавитацию), сохраняя при этом компактность и длительный срок автономной работы. Ввод собранных данных в ЭВМ (с учетом времени сбора информации) позволяет использовать такие виброметры для автоматизированного анализа тенденций.

4.4.2. Переносные одноканальные виброанализаторы

Условно одноканальные виброанализаторы (анализаторы) можно разделить на две группы: сборщики данных (коллекторы) и просто анализаторы. Поскольку их основное различие заключается в том, что в сборщик данных можно загрузить маршруты обхода оборудования и уровни тревог, то мы рассмотрим свойства именно коллектора данных.

Приведенная на рис. 39 структурная схема иллюстрирует принцип действия сборщика данных. Пьезодатчик соединяется с входным согласующим усилителем заряда (напряжения) или может иметь собственный предусилитель, питание которого осуществляется от сборщика данных. Входной усилитель с переменным коэффициентом усиления должен обеспечивать подключение внешних источников сигналов не только со стандартными (контрольными) выходами. В этом случае обеспечивается возможность подключения сборщика данных к контрольно-сигнальной аппаратуре, термометрам, толщиномерам и др., а также к некоторым типам не вибрационных датчиков, например таким, как токовый пробник, микрофон, стробоскоп или штрихсканер. Обычно

сборщик данных автоматически сканирует входной сигнал и устанавливает пределы измерений для максимизации разрешающей способности динамического аналогово-цифрового преобразователя АЦП.

Сборщик данных содержит включаемые по желанию оператора каскады аналоговых интеграторов и фильтров верхних и нижних частот, которые можно настраивать согласно требованиям к измерению. В то же время могут обеспечиваться и цифровая фильтрация, и интегрирование.

Современный сборщик данных может предоставить следующие возможности анализа: отображение в реальном времени и хранение формы сигнала, спектра, каскадного спектра, третьооктавного спектра (со взвешиванием или без), орбиты, диаграммы Боде, диаграммы Найквиста, кепстра, спектра огибающей и др. Он должен осуществлять проведение синхронного накопления. Должна быть обеспечена и возможность запуска от внешнего источника.

Важнейшей функцией сборщика данных является способность загрузки маршрутов обхода и уровней тревог (для оперативного распознавания состояния на месте измерения) из базы данных, хранящейся в ЭВМ. При этом должна обеспечиваться возможность выбора маршрутов обхода, отдельных агрегатов и точек и т. д. После проведения измерений на месте должна обеспечиваться возможность оперативного просмотра собранных данных о состоянии агрегатов, а также сигнализации о превышении текущего уровня контролируемого параметра соответствующих уставок как в частотной полосе, так и по общему уровню. Некоторые модели сборщиков данных позволяют на месте оценивать состояние подшипников качения.

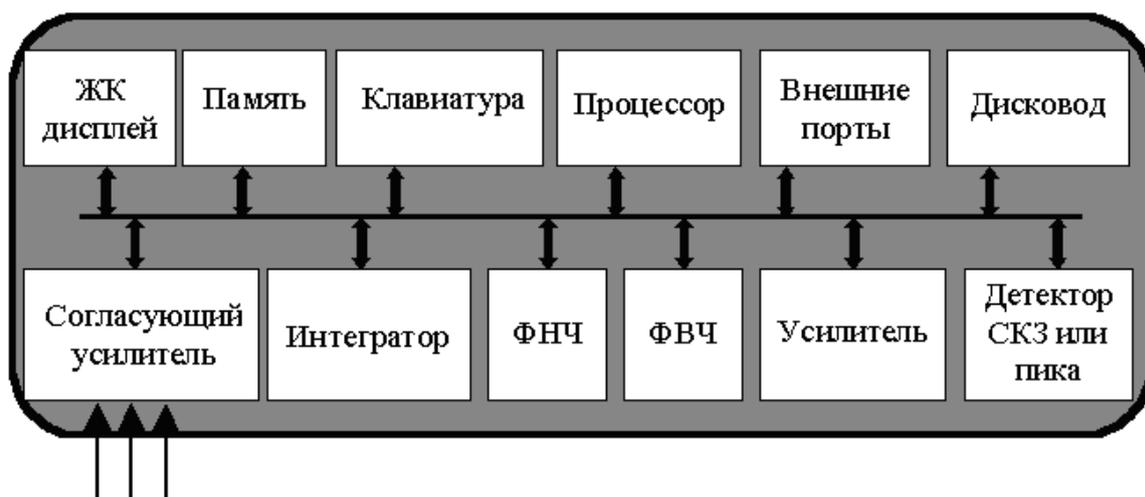


Рис. 39. Структурная схема сборщика данных

Удобными, а иногда и необходимыми, функциями сборщика данных являются:

- балансировка роторов в собственных подшипниках;
- центровка валопровода агрегата.

4.4.3. Многоканальные виброанализаторы

Иногда применение одноканальных виброанализаторов не позволяет однозначно установить причины повышенной вибрации оборудования, и могут потребоваться специальные методы исследования вибросигналов, полученных из различных контрольных точек агрегата. В этом случае применяют двух- или многоканальные анализаторы. Однако подготовка опытных специалистов для работы с таким оборудованием трудоемка и длительна, оборудование это достаточно дорого, исследования и анализ могут потребовать длительного времени. Для решения такой проблемы экономически целесообразно приглашать специализированную организацию, имеющую такое оборудование и опыт работы с ним.

ГЛАВА 5

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ И АППАРАТУРЫ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

5.1. Пьезоэлектрический акселерометр

Пьезоэлектрический акселерометр является универсальным вибродатчиком, в настоящее время применяемым почти во всех областях измерения и анализа механических колебаний. Эксплуатационная характеристика пьезоэлектрических акселерометров, в общем, лучше характеристики любого другого вибродатчика. Пьезоэлектрические акселерометры отличаются широкими рабочими частотным и динамическим диапазонами, линейными характеристиками в этих широких диапазонах, прочной конструкцией, надежностью и долговременной стабильностью параметров.

Так как пьезоэлектрические акселерометры являются активными датчиками, генерирующими пропорциональный механическим колебаниям электрический сигнал, при их эксплуатации не нужен источник питания. Отсутствие движущихся элементов конструкции исключает возможность износа и гарантирует исключительную долговечность пьезоэлектрических акселерометров. Отметим, что отдаваемый акселерометром сигнал, пропорциональный ускорению, можно интегрировать с целью измерения и анализа скорости и смещения механических колебаний.

Пьезоэлектрический акселерометр в настоящее время является наилучшим вибродатчиком для абсолютных измерений механических колебаний и ударов. Сказанное непосредственно вытекает из следующих свойств пьезоэлектрических акселерометров:

- широкий рабочий частотный диапазон;
- линейная характеристика в широком динамическом диапазоне;
- выходной электрический сигнал, пропорциональный ускорению механических колебаний, можно преобразовать электронным путем в сигнал, пропорциональный виброскорости или виброперемещению;
- высокая стойкость в отношении воздействий окружающей среды и сохранение высокой точности даже в неблагоприятных эксплуатационных условиях;
- активный преобразователь, не нуждающийся в применении источника питания;
- конструкция без движущихся деталей гарантирует исключительную долговечность;
- малогабаритная, компактная конструкция и большое значение отношения чувствительности к собственной массе.

5.1.1. Принцип действия пьезоэлектрического акселерометра

На рис. 40 показана упрощенная и содержащая лишь основные элементы модель акселерометра. Активные элементы этого акселерометра, изготовленные из пьезоэлектрического материала, выполняют роль пружин, обеспечивающих механическую связь между соединенной с основанием стойкой треугольного сечения и тремя сейсмическими (инерционными) массами. Воздействующие на основание акселерометра механические колебания приводят к тому, что на каждый пьезоэлемент действует динамическая сила, равная произведению ускорения сейсмической массы на соответствующую массу. Отдельные пьезоэлементы генерируют электрический заряд, пропорциональный действующей на них динамической силе. Сейсмические массы акселерометра вообще не изменяются и, следовательно, имеющийся на электродах пьезоэлементов электрический заряд пропорционален ускорению этих масс. Поскольку амплитуда и фаза ускорения сейсмических масс в широком частотном диапазоне идентична амплитуде и фазе ускорения основания акселерометра, отдаваемый последним общий электрический заряд пропорционален ускорению его основания и, следовательно, ускорению механических колебаний поверхности объекта, на котором акселерометр закреплен.

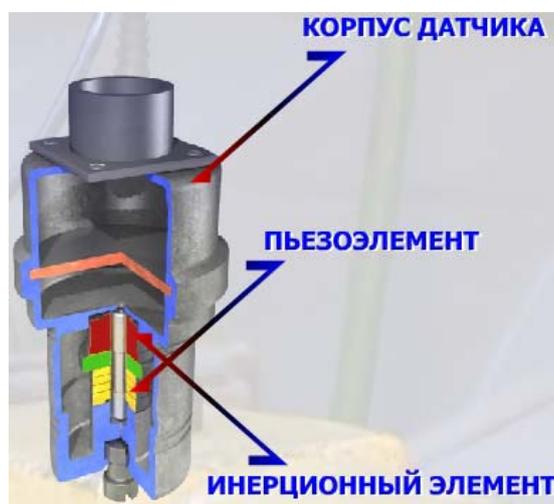


Рис. 40. Упрощенная модель пьезоэлектрического акселерометра

5.1.2. Характеристики акселерометров

Основным параметром акселерометра считается чувствительность. Идеальным являлся бы акселерометр, отдающий электрический сигнал с возможно большой амплитудой. Однако, уже на данном месте необходимо идти на компромисс, так как с большой чувствительностью нормально связана необходимость в относительно размерном пьезоэлементе и, следовательно, в увеличении размеров и собственной массы акселерометра.

В нормальных областях применения чувствительность акселерометра не является критическим параметром, так как современные преусилители рассчитаны на усиление сигналов с малыми амплитудами.

Собственная масса акселерометра становится важным параметром при измерении и анализе механических колебаний легких объектов. Образованная акселерометром дополнительная масса может значительно влиять на амплитуду и частоту измеряемых и анализируемых колебаний.

За общее правило можно взять, что собственная масса акселерометра не должна превышать одну десятую динамической массы объекта, на котором он закреплен (рис. 41).

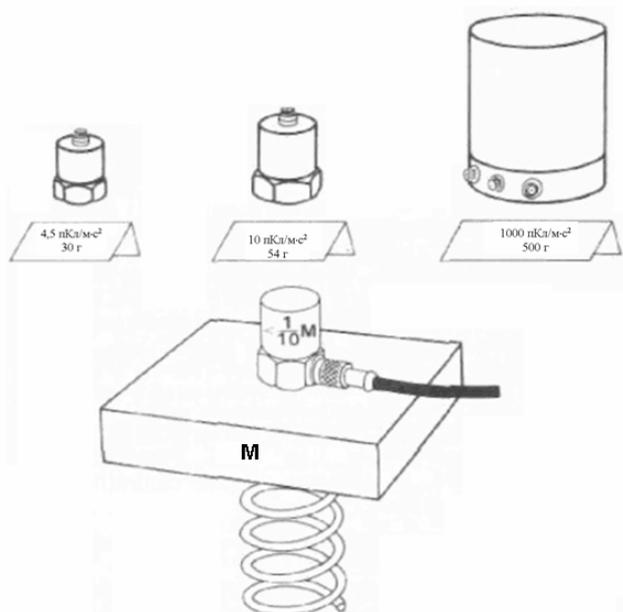


Рис. 41. Различные типы акселерометров

Рабочий динамический диапазон акселерометра необходимо учитывать при измерении и анализе механических колебаний с очень малыми или очень большими амплитудами ускорения. Показанный на рисунке нижний предел рабочего динамического диапазона нормально не определяется непосредственно акселерометром, а скорее воспринимаемым и генерируемым соединительными кабелями и усилительными каскадами электрическим шумом. При применении виброизмерительной аппаратуры общего назначения этот нижний предел порядка 0,01 м/с.

Верхний предел рабочего динамического диапазона акселерометра определяется прочностью его конструкции. Характеристика типичного акселерометра общего назначения линейна до 50000–100000 м/с², т. е. до области амплитуд механических ударов. Специальные акселерометры, предназначенные для измерения и анализа механических ударов, линейны до 1000 км/с² (100000 g).

5.1.3. Частотный диапазон

Кривая, отображающая частотную зависимость относительной амплитуды отдаваемого акселерометром электрического сигнала, показана на рис. 42. Эта кривая называется кривой амплитудно-частотной характеристики акселерометра и отображает изменения относительной амплитуды выходного электрического сигнала акселерометра, подвергаемого воздействию механических колебаний с фиксированным ускорением и с изменяющейся в широком диапазоне частот.

5.1.4. Верхний предел частоты

Кривая амплитудно-частотной характеристики на рис. 42 показывает, что частота резонанса закрепленного акселерометра определяет верхний предел рабочего частотного диапазона последнего, т. е. верхний предел частотного диапазона, в котором подвергаемый воздействию механических колебаний с фиксированной амплитудой акселерометр отдает пропорциональный электрический сигнал с фиксированной амплитудой.

Чем больше значение частоты резонанса закрепленного акселерометра, тем шире его рабочий частотный диапазон. Частоту резонанса закрепленного акселерометра можно увеличить или путем применения более жестких пьезоэлементов, или путем уменьшения его общей сейсмической массы. Поскольку жесткость пьезоэлементов обычно нельзя изменить, единственной возможностью является уменьшение сейсмической массы. Однако, уменьшение сейсмической массы сказывается на амплитуде действующей на пьезоэлементы динамической силы и, следовательно, обуславливает уменьшение чувствительности акселерометра. Следовательно, легкие акселерометры с широким рабочим частотным диапазоном менее чувствительны, чем более тяжелые акселерометры. Наоборот, высокочувствительные акселерометры обладают лишь ограниченным рабочим частотным диапазоном и не допускают применения в области высоких частот.

В качестве верхнего предела рабочего частотного диапазона акселерометра можно использовать различные значения, связанные с определенными значениями отклонений получаемых в результате измерений значений амплитуды от действительных значений амплитуды механических колебаний.

Предел 5 % определен частотой, на которой относительное отклонение получаемого в результате измерения значения амплитуды от действительного значения амплитуды воздействующих на акселерометр механических колебаний составляет 5 %. С непревышающей 5 % погрешностью можно измерять механические колебания с частотами, меньшими приблизительно деленного на 5 (коэффициент умножения 0,22) значения резонансной частоты закрепленного акселерометра.

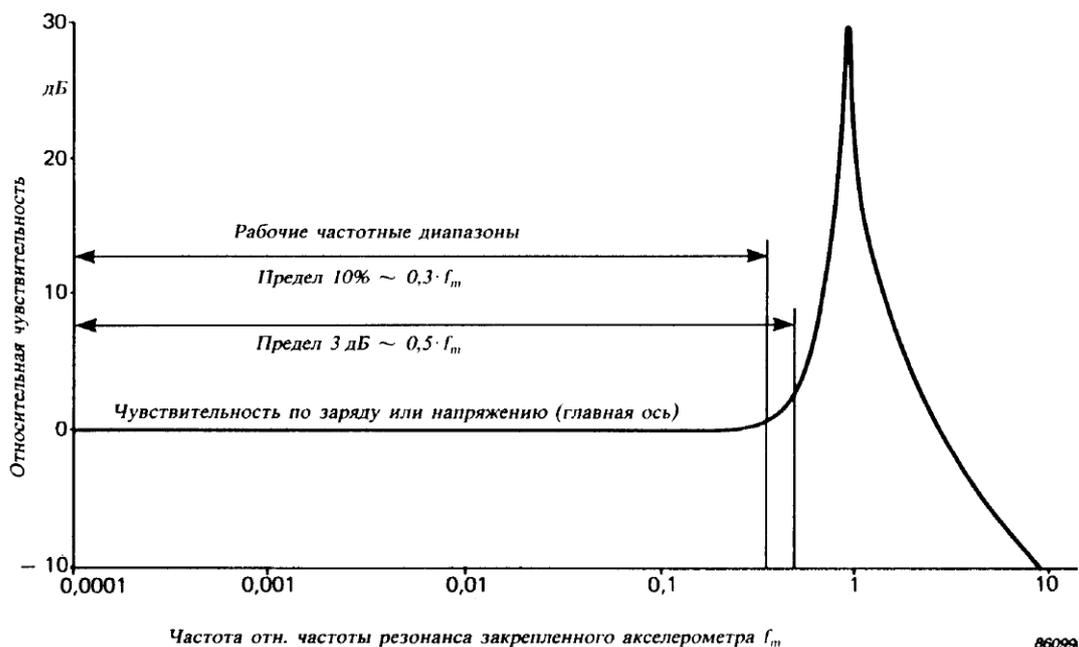


Рис. 42. Пример кривой амплитудно-частотной характеристики (зависимости чувствительности от частоты) пьезоэлектрического акселерометра

Предел 10 % определен частотой, на которой относительное отклонение получаемого в результате измерения значения амплитуды от действительного значения амплитуды воздействующих на акселерометр механических колебаний составляет 10 %. С погрешностью до 10 % можно измерять механические колебания с частотами, меньшими приблизительно деленного на 3 (коэффициент умножения 0,3) значения резонансной частоты закрепленного акселерометра.

Предел 3 дБ определен частотой, на которой разность получаемого в результате измерения значения уровня и действительного значения уровня воздействующих на акселерометр механических колебаний составляет 3 дБ. С непревышающей 3 дБ погрешностью можно измерять механические колебания с частотами, меньшими деленного приблизительно на 2 (коэффициент умножения 0,54) значения резонансной частоты закрепленного акселерометра.

5.1.5. Нижний предел частоты

Пьезоэлектрические акселерометры являются динамическими преобразователями, пьезоэлементы которых генерируют электрический заряд лишь под действием динамических сил. Следовательно, эти акселерометры не могут измерять механические колебания с доходящими до 0 Гц частотами. Нижний предел рабочего частотного диапазона, содержащего пьезоэлектрический акселерометр комплекта, зависит от па-

раметров используемого совместно предусилителя. По существу, используемый предусилитель определяет скорость утечки генерируемого пьезоэлементами акселерометра электрического заряда. Отметим, что содержащие акселерометры и предусилители комплекты дают возможность измерений механических колебаний с частотами до 0,003 Гц.

Нужно подчеркнуть, что в области виброметрической практики лишь редко когда предъявляются требования к применению аппаратуры с нижним пределом частоты порядка нескольких долей Гц. Следовательно, недостигающий до 0 Гц рабочий частотный диапазон не является серьезным недостатком пьезоэлектрических акселерометров.

5.2. Типы акселерометров

Большинство изготовителей вибродатчиков изготавливает и выпускает богатый ассортимент акселерометров – на первый взгляд слишком много моделей, так что подбор соответствующего условиям измерения акселерометра является затруднительным. Небольшая группа акселерометров «общего назначения» удовлетворяет требованиям большинства нормальных областей измерения и анализа механических колебаний. Разъемы для подключения соединительных кабелей этих акселерометров расположены или сверху, или сбоку корпуса и их чувствительности находятся в диапазоне 1–10 мВ или пКл на м/с².

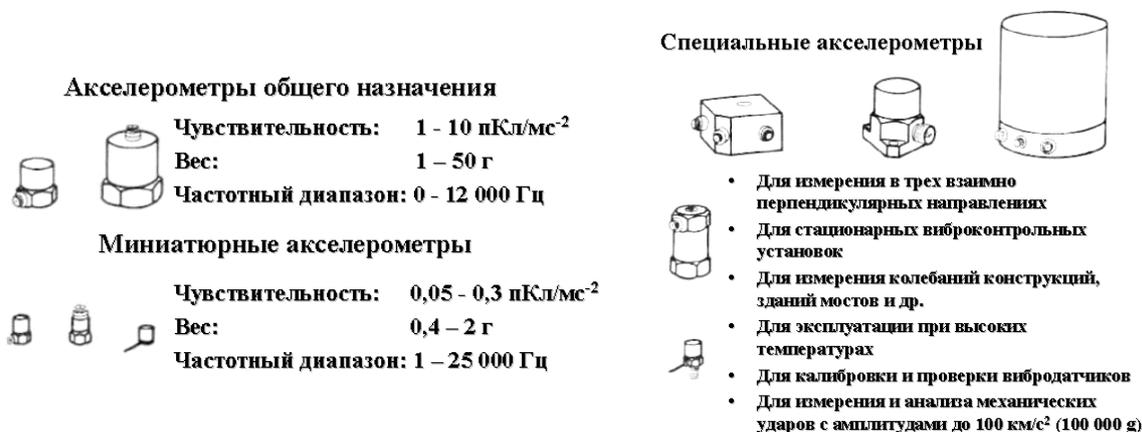


Рис. 43. Различные типы акселерометров

Другие акселерометры разработаны с учетом достижения оптимальных характеристик в определенных областях применения. Примером могут служить малогабаритные и легкие акселерометры, предназначенные для измерения механических колебаний с большими амплитудами и высокими частотами и применяемые при исследовании легких конструкций, каркасов, панелей и т. д. Собственная масса этих акселерометров находится в пределах от 1/2 до 2 г.

Специальные акселерометры являются оптимальными, например, для одновременного измерения в трех взаимно перпендикулярных направлениях, работы при высоких температурах, измерения больших ускорений или сильных механических ударов, калибровки вибродатчиков методом сравнения и для непрерывного контроля механических колебаний в промышленности и т. д.

5.3. Конструкции акселерометров

Пьезоэлектрические акселерометры сконструированы с учетом трех вариантов, показанных на рис. 44, 45 и 46. Эти варианты принципиально отличаются друг от друга видом деформации используемых пьезоэлементов, т. е. деформацией под действием силы сжатия или срезающей силы. Конструкция акселерометров, пьезоэлементы которых работают под действием срезающей силы, показана на рис. 44 и 45, а на рис. 46 показана конструкция акселерометров, в которых на пьезоэлементы действует сила сжатия.

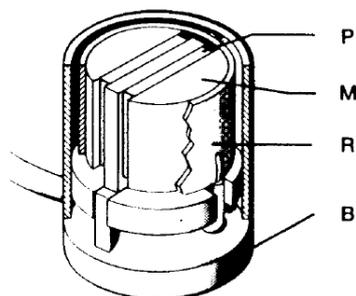


Рис. 44. Конструкция акселерометра с плоскими пьезоэлементами, работающими под действием срезающей силы:
М – сейсмическая масса,
Р – пьезоэлемент, R – тяжёлое кольцо,
В – основание



Рис. 45. Конструкция акселерометра с тремя пьезоэлементами, работающими под действием срезающей силы

1. Конструкция с плоскими пьезоэлементами, работающими под действием срезающей силы. Соответствующие акселерометры содержат два плоских пьезоэлемента, закрепленных между расположенной в центре опорной стойкой и двумя сейсмическими массами, прижатыми пружинным стяжным кольцом. Эта конструкция, показанная на рис. 44. Поскольку основание и пьезоэлементы эффективно изолированы друг отно-

сительно друга, обладающие описанной конструкцией акселерометры отличаются малой чувствительностью к деформациям основания и к флуктуациям температуры.

2. Конструкция с тремя пьезоэлементами, работающими под действием срезающей силы. Акселерометры, обладающие этой уникальной конструкцией, содержат три плоских пьезоэлемента, закрепленных между расположенной в центре опорной стойкой треугольного сечения и тремя сейсмическими массами, прижатыми пружинным стяжным кольцом (см. рис. 45). Поскольку стяжное кольцо действует на массы и пьезоэлементы большой радиальной силой и поскольку все детали тщательно обработаны и доведены, в соответствующих акселерометрах вообще не используются ни крепежные винты, ни промежуточные клейкие слои. Отсутствие крепежных приспособлений способствует достижению оптимальной эксплуатационной характеристики и долговременной стабильности параметров акселерометров. В качестве электродов, на которых имеется отдаваемый пьезоэлементами электрический заряд, служат стяжное кольцо и металлический корпус упомянутых акселерометров.

3. Конструкция с пьезоэлементами, закрепленными в центре и работающими под действием силы сжатия (см. рис. 46). Акселерометры этой традиционной конструкции отличаются прочностью, надежностью и относительно большим отношением чувствительности к собственной массе.

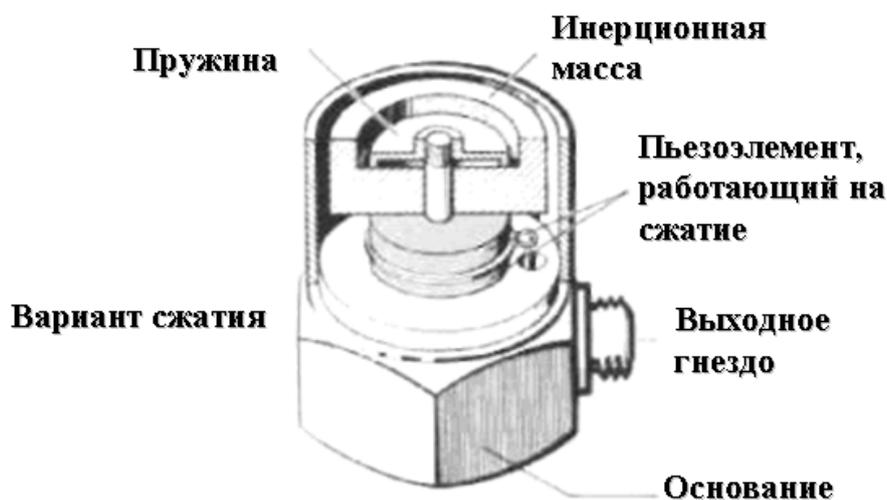


Рис. 46. Конструкция акселерометра с пьезоэлементами, закрепленными в центре и работающими под действием сжимающей силы

Сейсмическая масса, пружина и пьезоэлементы этих акселерометров установлены на цилиндрической опорной стойке, расположенной в центре и закрепленной на прочном основании общего корпуса (рис. 46). Поскольку основание и опорная стойка по существу образуют упругий элемент, со-

единенный параллельно с пьезоэлементами. Динамические деформации основания, обусловленные изгибом и/или изменениями температуры, передаются на пьезоэлементы и приводят к созданию паразитного электрического заряда. Даже массивные и прочные основания соответствующих акселерометров не исключают нежелательные и сказывающиеся на выходном электрическом сигнале влияния изгибающих и растягивающих сил. Следовательно, описываемые акселерометры более чувствительны к деформациям основания и к быстрым изменениям температуры, чем акселерометры с описанной выше и основанной на применении работающих под действием срезающей силы пьезоэлементов конструкцией.

5.4. Крепление акселерометров

При осуществляемых с помощью акселерометров исследованиях необходимо учитывать рассматриваемые ниже условия.

Рабочие частотный и динамический диапазоны не должны быть ограничены вследствие ненадежного крепления акселерометра.

Добавление присущей акселерометру массы не должно обуславливать изменения динамических характеристик вибрирующего объекта.

Места крепления акселерометра или акселерометров должны быть точно определены и должны допускать многократное крепление используемых вибродатчиков.

Используемый метод крепления может существенно повлиять на описанные выше условия.

5.4.1. Крепление при помощи шпильки

Метод

1. Подготовить путем чистовой обработки поверхность исследуемого или испытываемого объекта в месте крепления акселерометра. Очистить эту поверхность и основание используемого акселерометра.

2. Высверлить нужное отверстие в поверхности объекта и нарезать метчиком соответствующую резьбу. Размеры крепежного отверстия зависят от используемой при креплении акселерометра шпильки (или винта). Отметим, что глубина крепежного отверстия должна соответствовать длине используемой шпильки (или винта).

3. Ввинтить используемую шпильку в резьбовое отверстие в поверхности объекта. Навинтить на закрепленную шпильку используемый акселерометр (см. рис. 47). Убедиться в том, что шпилька не доходит до дна отверстия в основании акселерометра. Подтянуть резьбовое соединение пальцами или гаечным ключом. Нужно подчеркнуть необходимость осторожного применения гаечного ключа.

Применение

1. Исследования механических колебаний в области высоких частот, т. е. исследования, при которых необходимо обеспечить как можно большее значение частоты резонанса закрепленного акселерометра.
2. Стационарный контроль и мониторинг механических колебаний.

Преимущества

1. Крепление при помощи шпильки (или винта) способствует сохранению оптимальной эксплуатационной характеристики и широких рабочих частотного и динамического диапазонов акселерометров. Этот метод целесообразно применять повсюду там, где специальные условия не исключают возможность резьбового соединения акселерометра и исследуемого или испытываемого объекта.
2. Крепление при помощи шпильки (или винта) не обуславливает сужение диапазона рабочих температур акселерометров.
3. Закрепленные при помощи шпилек акселерометры можно применять при исследованиях механических колебаний с большими амплитудами ускорения.

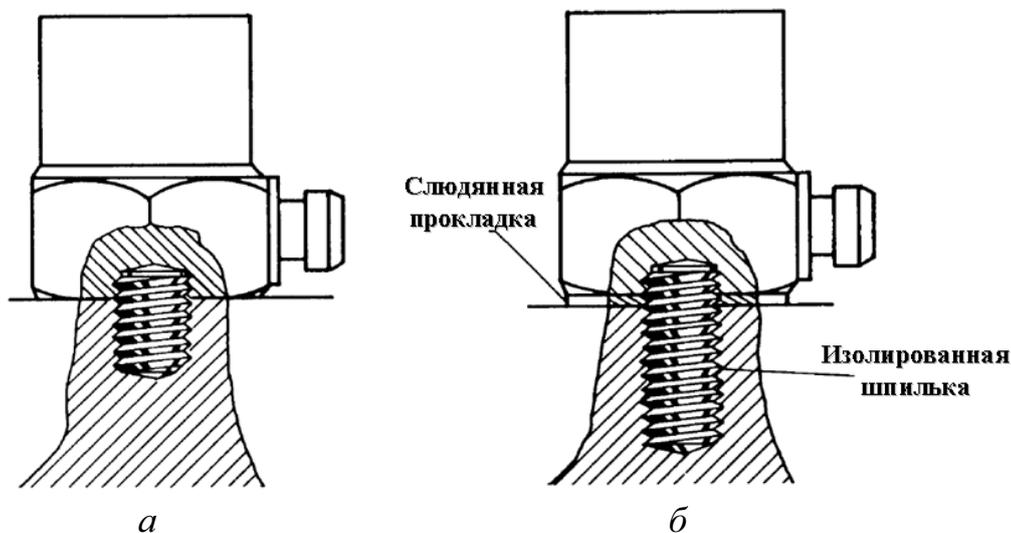


Рис. 47. Крепление акселерометра при помощи шпильки.
Слева показано применение стальной шпильки, а справа
изолированной шпильки и слюдяной прокладки

Недостатки

Обработка поверхности объекта в месте крепления акселерометра и подготовка резьбового отверстия занимают относительно длительное время.

Примечания

Тонкий слой консистентной силиконовой смазки между поверхностью исследуемого или испытываемого объекта и основанием акселерометра способствует повышению качества механической связи и увеличению надежности в области высоких частот. Сказанное справедливо именно в случае, если поверхность объекта не совсем ровная и гладкая.

Крепежная шпилька ни в коем случае не должна упираться в дно резьбового отверстия в основании акселерометра. Несоблюдение этого указания сопровождается ослаблением механической связи между поверхностью вибрирующего объекта и основанием акселерометра и, следовательно, приводит к грубым ошибкам.

5.4.2. Крепление при помощи воска

Метод

1. Убедиться в том, что поверхность объекта ровная и чистая в месте крепления акселерометра. В противном случае необходимы соответствующая обработка и очистка этой поверхности. Основание акселерометра также должно быть чистым.
2. Снять небольшое количество воска и размягчить его пальцами.
3. Нанести тонкий слой воска на поверхность объекта в месте крепления акселерометра. Слой воска должен перекрывать площадь, размеры которой больше размеров основания акселерометра. Отметим, что толщина слоя воска должна лишь обеспечивать заполнение зазора между поверхностью вибрирующего объекта и основанием акселерометра.
4. Расположить акселерометр сверху слоя воска. Закрепить акселерометр путем его многократного поворота в обе стороны под умеренным осевым давлением (см. рис. 48). Отметим, что при креплении акселерометров при помощи воска нужен определенный опыт.

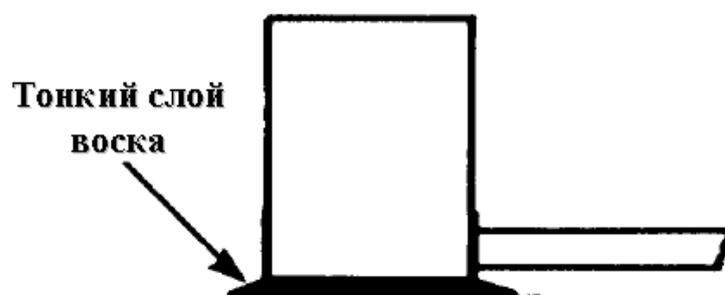


Рис. 48. Крепление акселерометра при помощи воска

Применение

1. Обзорные исследования механических колебаний.
2. Исследования механических колебаний в условиях, исключающих применение крепежных шпилек или винтов.
3. Крепление акселерометров, основания которых не снабжены ни резьбовыми или сквозными отверстиями, ни неотъемлемыми крепежными винтами.

Преимущества

1. Метод, способствующий быстрому и несложному креплению акселерометров.
2. Частота резонанса закрепленного при помощи воска акселерометра лишь мало отличается от частоты резонанса того же акселерометра, закрепленного при помощи стальной шпильки.

Недостатки

1. Диапазон рабочих температур акселерометров, закрепленных при помощи воска, ограничен сверху температурой приблизительно $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Рабочий динамический диапазон акселерометров, закрепленных при помощи воска, ограничен сверху ускорением порядка 100 м/с^2 .

Примечания

Резкое ограничение диапазона рабочих температур закрепленного при помощи воска акселерометра обусловлено размягчением воска при повышении температуры окружающей среды. Это сопровождается уменьшением жесткости механической связи между вибрирующим объектом и акселерометром и, следовательно, уменьшением присущей последнему резонансной частоты. В крайних случаях не исключено отсоединение акселерометра от поверхности вибрирующего объекта.

Применение чрезмерного количества или слишком толстого слоя воска обуславливает уменьшение частоты резонанса закрепленного акселерометра и, следовательно, сужение рабочего частотного диапазона последнего.

5.4.3. Крепление при помощи магнита

Метод

1. Убедиться в том, что поверхность объекта ровная и чистая в месте крепления акселерометра. В противном случае необходимы соответствующая обработка и очистка этой поверхности. Основание акселерометра также должно быть чистым.

2. Закрепить используемый акселерометр сверху магнита и подтянуть резьбовое соединение гаечным ключом. Следует подчеркнуть, что

гаечный ключ нужно использовать лишь по мере надобности и с большой осторожностью. Для сохранения как можно большего значения частоты резонанса закрепленного акселерометра целесообразно смазать тонким слоем консистентной силиконовой смазки основание акселерометра и поверхность объекта в месте крепления магнита (см. рис. 49).

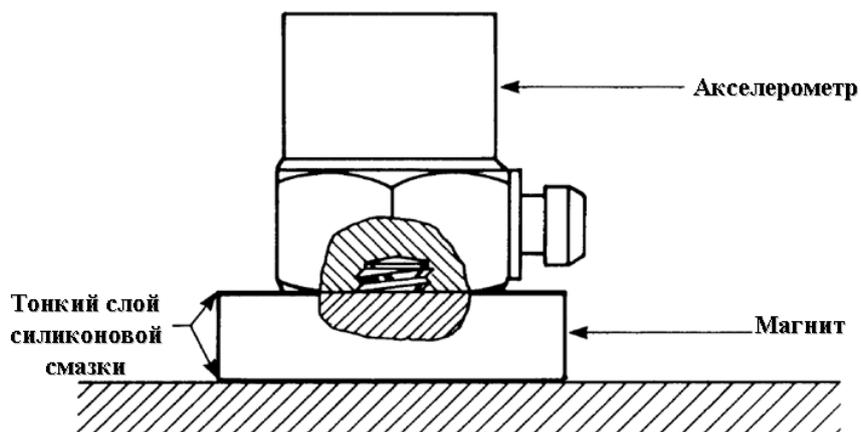


Рис. 49. Крепление акселерометра при помощи магнита

Применение

Обзорные исследования механических колебаний, в частности исследования, осуществляемые с целью определения мест крепления акселерометров, используемых в процессе контроля и мониторинга механических колебаний машинного и другого оборудования.

Преимущества

1. Быстрое крепление акселерометра с возможностью перемещения последнего с места на место.
2. Сохранение относительно большого значения частоты резонанса закрепленного акселерометра (в частности, при креплении на ровных поверхностях), несмотря на кажущуюся малую жесткость обеспечиваемой магнитом механической связи.
3. Сохранение широкого рабочего динамического диапазона акселерометра.

Недостатки

1. Поверхность исследуемого или испытываемого объекта должна быть изготовлена из ферромагнитного материала. В противном случае нужно на поверхности объекта закрепить диск или пластинку из ферромагнитного материала.
2. При повторном креплении при помощи магнита нельзя обеспечить абсолютно идентичное местоположение акселерометра.

3. Присущая крепежному магниту масса дополнительно нагружает исследуемый или испытываемый объект. Эта нагрузка может обуславливать затруднения при исследованиях механических колебаний легких конструкций, тонких плит, листов и др.

Примечания

При применении магнита можно обеспечить надежную электрическую изоляцию между акселерометром и исследуемым или испытываемым объектом. С этой целью используется изолирующая пластинка. Отметим, что эта пластинка снабжена клейким слоем, способствующим ее креплению на поверхности исследуемого или испытываемого объекта.

Магнит дает возможность крепления акселерометра на искривленных поверхностях, например, на трубках, трубах и др. Однако, рабочий частотный диапазон закрепленного акселерометра сужается по мере уменьшения радиуса закругления поверхности исследуемого объекта.

Максимальная статическая сила (сила сцепления) магнита зависит от качества параметров поверхности в месте крепления (в том числе от отсутствия или присутствия изолирующей пластинки). Следовательно, верхний предел рабочего динамического диапазона закрепленного при помощи магнита акселерометра существенно изменяется и зависит от общей (суммарной) массы магнита и акселерометра.

5.4.4. Крепление при помощи липкой пластинки

Метод

1. Убедиться в том, что поверхность объекта ровная и чистая в месте крепления акселерометра. В противном случае необходимы соответствующая обработка и очистка этой поверхности. Основание акселерометра также должно быть чистым.
2. Устранить защитную пленку с липкой поверхности пластинки и прикрепить последнюю к основанию акселерометра (см. рис. 50).
3. Устранить защитную пленку со свободной поверхности липкой пластинки и закрепить акселерометр на поверхности исследуемого или испытываемого объекта.

Применение

1. Обзорные исследования механических колебаний.
2. Исследования механических колебаний в условиях, исключающих применение крепежных шпилек или винтов.
3. Крепление акселерометров, основания которых не снабжены ни резьбовыми или сквозными отверстиями, ни неотъемлемыми крепежными винтами.

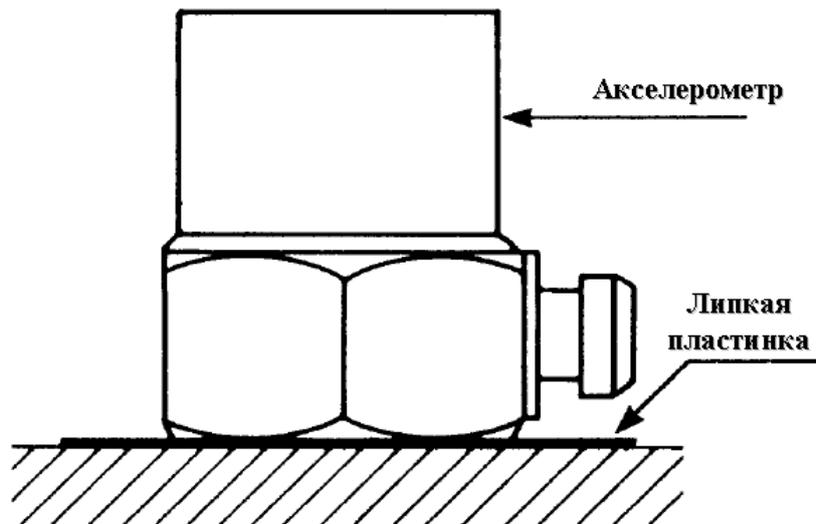


Рис. 50. Крепление акселерометра при помощи липкой пластинки

Преимущества

1. Метод, способствующий быстрому и несложному креплению акселерометров и не обуславливающий существенное сужение их рабочих частотного и динамического диапазонов.
2. Метод, обеспечивающий надежную электрическую изоляцию акселерометров относительно исследуемых или испытываемых объектов.

Недостатки

Применение липкой пластинки сопровождается ограничением снизу и сверху диапазона рабочих температур акселерометра.

Примечания

При креплении акселерометров также можно использовать двустороннюю липкую ленту. Применение тонкой ленты не сказывается на ширине рабочего частотного диапазона закрепляемого акселерометра, в то время как применение толстой ленты обуславливает уменьшение частоты резонанса закрепленного акселерометра.

5.4.5. Крепление при помощи клея

При креплении акселерометров с помощью клея, цемента или другого клейкого вещества можно использовать два метода. Один из этих методов заключается в непосредственном креплении акселерометра при помощи клейкого слоя, в то время как другой метод предусматривает применение специальной шпильки, снабженной большой шляпкой и закрепляемой клеем или цементом на поверхности исследуемого или испытываемого объекта.

5.4.5.1. Непосредственное крепление акселерометра

Метод

1. Убедиться в том, что поверхность объекта ровная и чистая в месте крепления акселерометра. В противном случае необходимы соответствующая обработка и очистка этой поверхности. Основание акселерометра также должно быть чистым.
2. Закрепить акселерометр на поверхности исследуемого или испытуемого объекта быстротвердеющим цианакриловым клеем (рис. 51). Отметим, что при креплении акселерометра нужно учитывать указания изготовителя используемого клея.

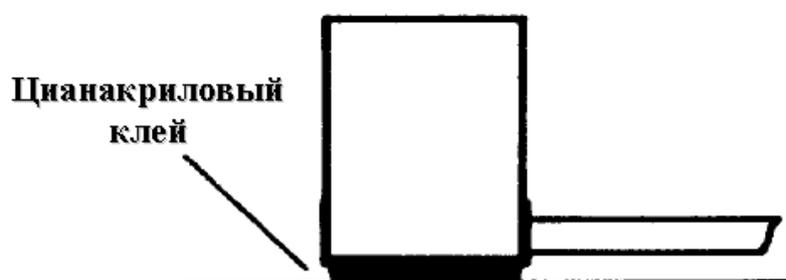


Рис. 51. Крепление акселерометра при помощи цианакрилового клея

Применение

1. Метод, находящий широкое применение при креплении малогабаритных (миниатюрных и сверхминиатюрных) акселерометров.
2. Крепление акселерометров, используемых при стационарном контроле и мониторинга механических колебаний и не допускающих крепление при помощи шпилек или винтов.

Преимущества

Непосредственное крепление акселерометра при помощи клея не приводит к сужению его рабочих частотного и динамического диапазонов.

Недостатки

1. Отсоединение закрепленного при помощи клея или цемента акселерометра затруднительно. Очистка основания акселерометра связана с необходимостью применения растворителей и занимает заметное время.
2. При повторном креплении при помощи клея или цемента нельзя обеспечить абсолютно идентичное местоположение акселерометра.
3. Процедура электрического изолирования закрепляемого при помощи клея или цемента акселерометра сложна и затруднительна.

5.4.5.2. Применение закрепляемой при помощи клея специальной шпильки

Метод

1. Убедиться в том, что поверхность объекта ровная и чистая в месте крепления акселерометра. В противном случае необходимы соответствующая обработка и очистка этой поверхности. Основание акселерометра также должно быть чистым.
2. Выбрать соответствующую условиям эксплуатации и снабженную большой шляпкой шпильку и, пользуясь эпоксидной смолой, закрепить последнюю на поверхности исследуемого или испытываемого объекта. Нужно подчеркнуть, что отверждение эпоксидных смол занимает относительно длительное время (от нескольких минут до нескольких часов).
3. Навинтить используемый акселерометр на закрепленную на поверхности объекта шпильку (рис. 52). Подтянуть резьбовое соединение пальцами или слегка гаечным ключом. Нужно подчеркнуть необходимую осторожность при применении гаечного ключа.

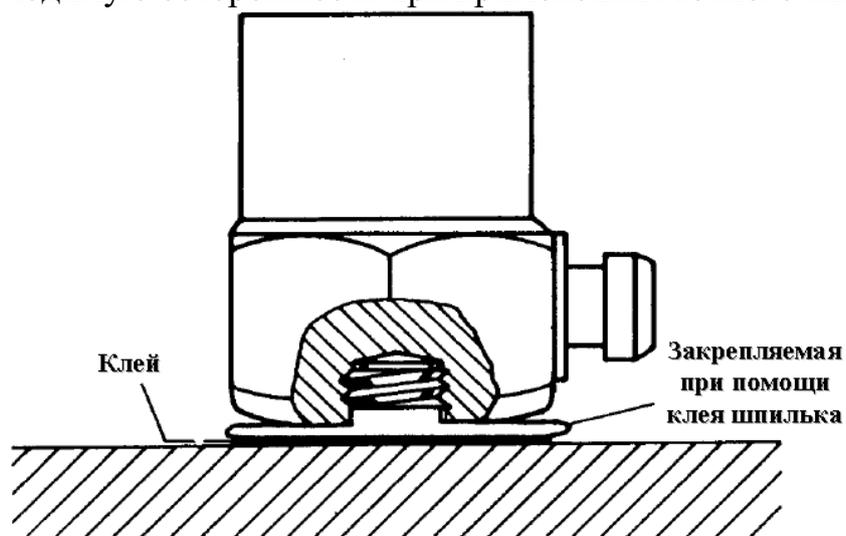


Рис. 52. Крепление акселерометра при помощи закрепляемой клеем специальной шпильки

Применение

Исследования, контроль или мониторинг механических колебаний в нескольких точках на поверхности объекта с применением перемещаемого с места на место акселерометра. Этот метод эффективен с точки зрения обеспечения точно определенных мест крепления акселерометра в условиях, не допускающих применения ввинчиваемых в поверхность объекта шпилек или винтов.

Преимущества

Метод крепления, способствующий сохранению оптимальных рабочих частотного и динамического диапазонов акселерометров.

Недостатки

1. Процесс крепления занимает значительное время (именно при применении эпоксидных смол).
2. Устранение закрепленных на поверхности объекта шпилек и остатков использовавшегося клея затруднительно.
3. Обеспечение электрической изоляции акселерометра связано с затруднениями. С соответствующей целью можно между закрепляемой при помощи эпоксидной смолы шпилькой и поверхностью объекта расположить кусок стеклоткани. Другая возможность заключается в покрытии шляпки крепежной шпильки слоем эпоксидной смолы и креплении шпильки только после совершенного отверждения упомянутого изолирующего слоя.
4. Применение эпоксидных смол обычно обуславливает ограничение сверху диапазона рабочих температур акселерометров. Номинальное значение этого верхнего предела равно приблизительно $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отметим, что специальные эпоксидные смолы допускают применение при превышающих указанное значение температурах.

Примечания

Цианакриловый клей можно использовать лишь при непосредственном креплении акселерометров на совершенно ровных и гладких поверхностях. При креплении на шероховатых поверхностях и при применении шпилек с шероховатыми шляпками нельзя использовать цианакриловый клей, так как он не заполняет местные углубления в подлежащих склейке поверхностях. Присутствие остаточных воздушных пузырьков сказывается на уменьшении прочности и жесткости механической связи между акселерометром и вибрирующим объектом.

При непосредственном креплении акселерометров на поверхности исследуемых объектов можно использовать эпоксидные смолы. Однако, при применении этих смол необходимо учитывать нужное для их отверждения время.

Применение «мягких» клеев не рекомендуется ввиду недостаточной жесткости обеспечиваемой ими механической связи. Применение таких клеев обуславливает сужение рабочего частотного диапазона акселерометров и обычно также ограничение диапазона их рабочих температур.

Крепление акселерометра на закрепленной при помощи клея шпильке нужно осуществлять с максимальной осторожностью, в част-

ности, при применении гаечного ключа. Закрепленный с применением чрезмерного крутящего момента акселерометр трудно снять. Накопленный опыт показал, что в таком случае не исключена поломка шпильки. Устранение сломанной шпильки из основания акселерометра связано с большими затруднениями.

5.4.6. Крепление при помощи ручного щупа

Метод

1. Навинтить используемый акселерометр на снабженный крепежной шпилькой с резьбой ручной щуп (рис. 53).
2. Смазать кончик щупа тонким слоем консистентной силиконовой смазки. Приложить кончик щупа к поверхности вибрирующего объекта и прижать несущий акселерометр щуп к объекту. Отметим, что щуп должен быть направлен перпендикулярно к поверхности объекта. Кончик щупа не должен ни скользить по поверхности объекта, ни отскакивать от последней.

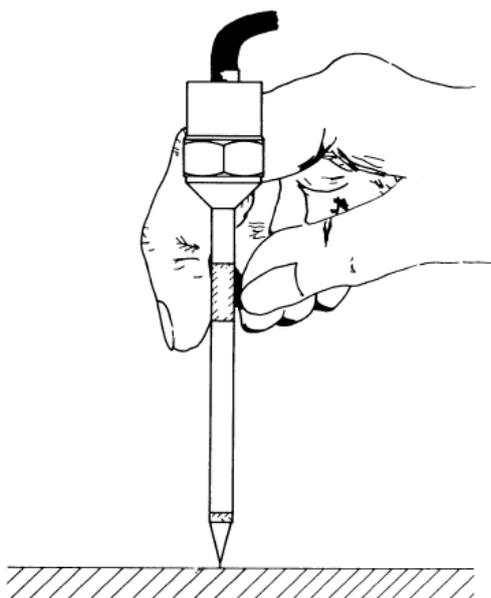


Рис. 53. Крепление акселерометра при помощи ручного щупа

Применение

Обзорные исследования механических колебаний с частотами до 1000 Гц.

Преимущества

1. Применение ручного щупа является самым быстрым методом крепления акселерометра.
2. Акселерометр можно перемещать с места на место.

Недостатки

1. Частота резонанса закрепленного на ручном щупе акселерометра так низка, что она находится в области присущих большинству механических колебаний частот. Это непосредственно сказывается на существенном увеличении погрешности результатов исследований. При применении закрепленного на щупе акселерометра рекомендуется использовать снабженный фильтрами предусилитель.
2. Воспроизводимость результатов исследований, осуществляемых при помощи закрепленного на ручном щупе акселерометра, плоха.

Примечания

Применение силиконовой смазки на кончике ручного щупа вероятно способствует улучшению качества механической связи между вибрирующим объектом и акселерометром. Отметим, что закругленный кончик способствует заметному расширению рабочего частотного диапазона закрепленного на щупе акселерометра.

5.5. Влияния условий внешней среды

Современные акселерометры и соединительные кабели разработаны и сконструированы с учетом обеспечения их минимальной чувствительности к влияниям внешней среды, иллюстрируемым на рис. 54. Однако, для работы в неблагоприятных условиях внешней среды часто нужны специальные акселерометры. В последующих разделах рассматриваются поочередно отдельные условия внешней среды и их влияние на пьезоэлектрические акселерометры.



Рис. 54. Примеры влияния условий внешней среды на работу акселерометра

5.5.1. Влияния условий внешней среды – температура

Нормальные акселерометры общего назначения могут работать в температурном диапазоне с верхним пределом 250 °С. При превышении этого предела начинается процесс деполяризации пьезокерамики и, следовательно, необратимого изменения чувствительности акселерометра. Отметим, что акселерометр с частично деполяризованным пьезоэлементом не теряет работоспособности, но его необходимо повторно калибровать. Для эксплуатации в температурном диапазоне до 400 °С предусмотрены акселерометры, чувствительный элемент которых изготовлен из специальной пьезокерамики.

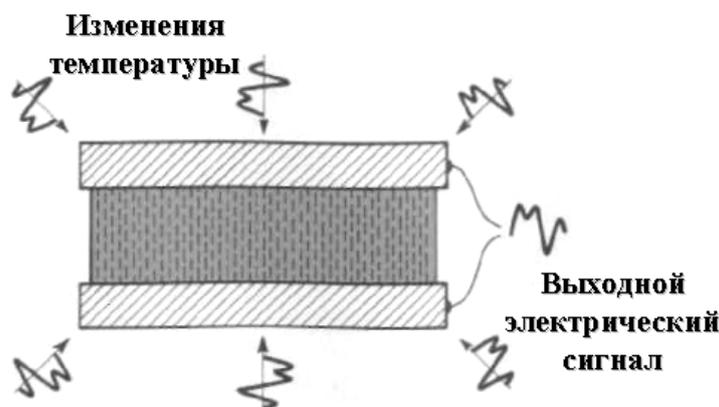


Рис. 55. Влияние температуры на работу акселерометра

Так как свойства всех пьезоэлектрических материалов зависят от температуры, результатом изменений температуры внешней среды являются изменения чувствительности работающего в таких условиях акселерометра. Чтобы дать возможность внесения соответствующей поправки, все акселерометры снабжаются индивидуальной калибровочной картой-паспортом, в которой также приводится зависимость чувствительности от температуры. Внесение поправки на температуру внешней среды нужно именно при эксплуатации акселерометров при температурах намного больше или меньше 20 °С.

Подвергаемые небольшим быстрым изменениям температуры акселерометры отдают паразитный электрический сигнал, ничем не связанный с измеряемыми механическими колебаниями. Так как амплитуда этого сигнала слишком мала, он является серьезным только при измерении и анализе механических колебаний с малыми ускорениями и/или низкими частотами. Современные акселерометры, в частности акселерометры с подвергаемым срезывающему усилию пьезоэлементом, отличаются малой чувствительностью к быстрым изменениям температуры внешней среды.

При креплении акселерометра на поверхностях, температура которых превышает 250 °С, рекомендуется применение теплоотвода и слюдяной прокладки, устанавливаемых между основанием акселерометра и поверхностью исследуемого или испытываемого объекта. При таком креплении температура основания акселерометра не превысит 250 °С даже при температурах поверхности объекта в диапазоне 350–400 °С. Еще более эффективным является форсированное воздушное охлаждение основания акселерометра.

5.5.2. Влияния условий внешней среды – шум соединительных кабелей

Поскольку пьезоэлектрические акселерометры являются высокоимпедансными вибродатчиками, шум используемых вместе с ними соединительных кабелей может быть причиной серьезных затруднений. Источниками таких помех могут быть контуры заземления, трибоэлектрический шум и помехи электромагнитного происхождения.

Контуры заземления, образуемые при заземлении акселерометра и измерительной аппаратуры на разные точки, способствуют прохождению паразитных токов через экраны соединительных кабелей и являются серьезным источником шума и помех. Эффективным методом устранения этих контуров является электрическая изоляция акселерометра, обеспечиваемая изолированной шпилькой и слюдяной шайбой.

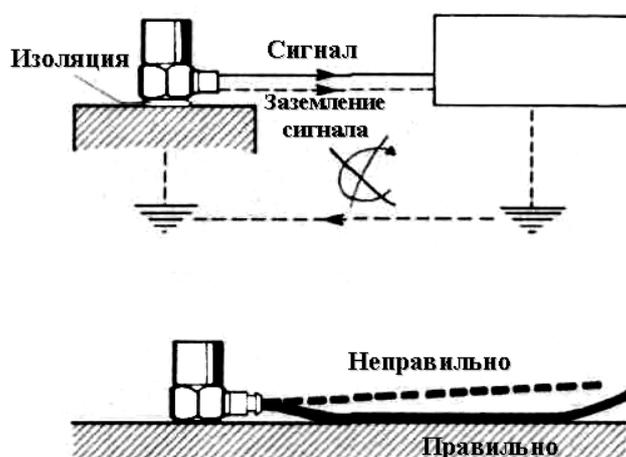


Рис. 56. Влияние шума соединительных кабелей на работу акселерометра

Трибоэлектрический шум возникает при механическом движении соединительных кабелей. Непосредственной причиной этого шума являются местные изменения емкости и заряда, вызываемые динамическими изгибом, растяжением и сжатием отдельных элементов соединительного кабеля. Кабели всегда целесообразно прочно и надежно закреплять липкой лентой или клеем на возможно малом расстоянии от акселерометров.

Электромагнитный шум является шумом, воспринимаемым соединительными кабелями в присутствии сильных электромагнитных полей, например, вблизи работающих электродвигателей, машин и т. д. Минимально чувствительными к шумам электромагнитного происхождения являются соединительные кабели с двойным экраном.

5.5.3. Другие влияния условий внешней среды

Деформация основания

Результатом деформации основания акселерометра, закрепленного на деформирующейся поверхности подвергаемого нагрузке объекта, является паразитный электрический сигнал, ничем не связанный с измеряемыми и анализируемыми механическими колебаниями.

Ядерное излучение

Большинство изготавливаемых акселерометров может работать надежно и без заметного изменения параметров в условиях сильного ядерного излучения, т. е. при дозе гамма-излучения до 10 крад/ч. Предусмотрены также специальные акселерометры, рассчитанные на эксплуатацию при излучении.

Влажность

Корпуса акселерометров или уплотнены эпоксидными смолами, или заварены с целью обеспечения точности, надежности и стабильности даже в условиях большой относительной влажности внешней среды. При кратковременной эксплуатации в жидкостях и очень влажных средах рекомендуется применение уплотненных соединительных кабелей с тефлоновой изоляцией. Отметим, что место соединения акселерометра и кабеля также нужно уплотнять. Для этой цели подходят некислая силиконовая резина, вулканизирующая при комнатной температуре, и разные мастики.

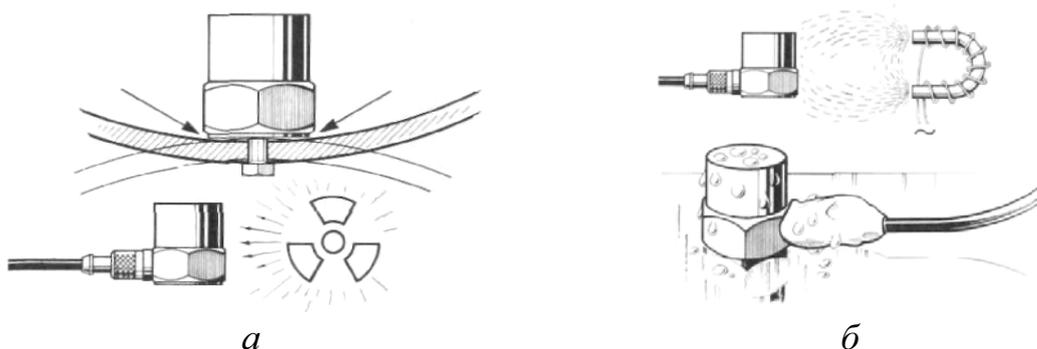


Рис. 57. Влияние деформации основания, ядерного излучения (а); влажности, электромагнитного шума (б) на работу акселерометра

Коррозионные вещества

Все материалы, используемые в конструкции акселерометров отличаются исключительной коррозионной стойкостью и сопротивлением всем встречающимся в промышленности химическим коррозионным веществам.

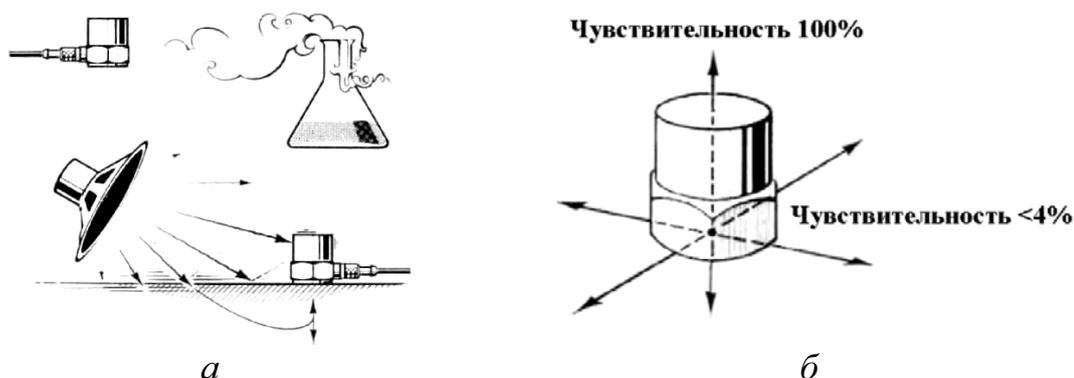


Рис. 58. Влияние коррозионных веществ, акустических шумов (а) и поперечных колебаний (б) на работу акселерометра

Акустические шумы

Акустические шумы, генерируемые нормальными машинами и оборудованием, имеют лишь незначительное влияние на точность результатов измерения и анализа механических колебаний. В общем, возбуждаемая акустическим шумом вибрация механических конструкций и их элементов нормально намного превышает влияние распространяющегося в воздухе и воздействующего непосредственно на акселерометр акустического шума.

Поперечные колебания

Акселерометры чувствительны не только к механическим колебаниям, перпендикулярным поверхности, на которой они закреплены, а также к колебаниям в поперечных направлениях. Поперечная чувствительность, т. е. чувствительность к колебаниям в перпендикулярной главной оси вибродатчика плоскости, акселерометров не превышает 3–4 % их чувствительности в направлении главной оси.

5.6. Калибровка акселерометров

Акселерометры подвергаются в процессе производства тщательной заводской калибровке и поставляются вместе с соответствующими индивидуальными калибровочными картами-паспортами. Параметры акселерометров, при эксплуатации и хранении которых соблюдаются определяемые технической спецификацией пределы температуры, из-

лучения, механических ударов и т. д., стабильны в течение длительного времени. На основе опыта установлено, что параметры акселерометров не изменяются более чем на 2 % даже в течение нескольких лет.



Рис. 59. Паспорт вибропреобразователя марки AP40

Однако, небрежное обращение с акселерометрами даже при их нормальной эксплуатации может привести к значительным изменениям их параметров и в крайних случаях даже к их повреждению. Отметим, что результатом свободного падения акселерометра из руки на пол из бетона является механический удар с ускорением, достигающим до нескольких тысяч g. Следовательно, акселерометры рекомендуется проверять и повторно калибровать по регулярным интервалам времени. Калибровка чувствительности акселерометра также дает гарантию его работоспособности.

5.7. Другие типы датчиков

5.7.1. Велометр

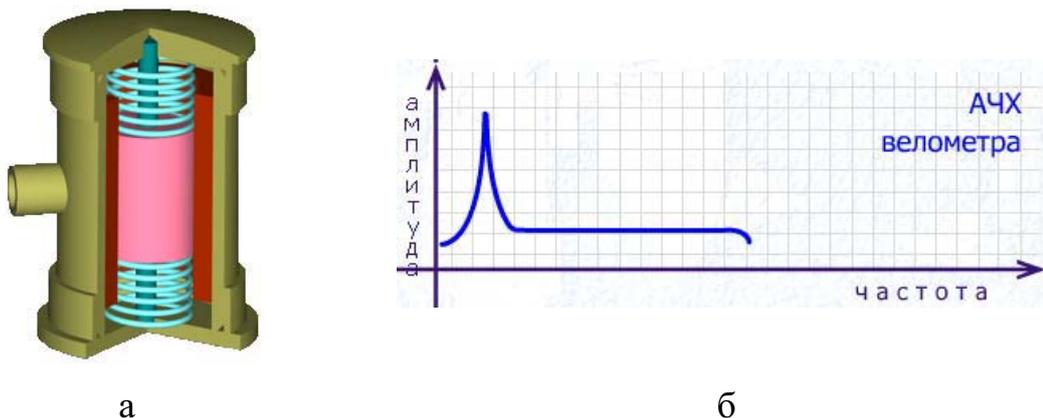


Рис. 60. Конструкция (а) и АЧХ (б) велометра

В основу работы измерительного преобразователя положено возникновение ЭДС индукции, вызываемое электрическим полем, порождаемым переменным магнитным полем. Конструктивно датчик выпол-

нен в виде цилиндрического корпуса, в котором расположена катушка индуктивности, внутри которой находится магнит в упругом подвесе. При колебании корпуса датчика магнит начинает колебаться под действием силы инерции, при этом в катушке возникает ЭДС, амплитуда и частота которой пропорциональна скорости и частоте колебаний корпуса датчика, жестко прикрепленного к исследуемой поверхности.

5.6.2. Проксиметр

Этот датчик является наиболее простым по конструкции. В нем нет подвижных механических частей. На торцевой части цилиндрического нетокопроводящего каркаса расположена катушка индуктивности, питание катушки осуществляется током высокой частоты (~300 кГц). Ток такой большой частоты используется для того, чтобы токи, индуцируемые в исследуемой поверхности ротора, текли только в поверхностном слое металла. При колебаниях зазора между ротором и датчиком, закрепленным на опоре, в колебательном контуре, образуемым датчиком и емкостью, входящей в состав усилителя, изменяются параметры контура: частота или амплитуда, пропорциональны частоте и значению амплитуды зазора. Этот датчик способен измерять статические значения зазора. Однако, тяжело отличить несовершенство поверхности ротора от его механических колебаний. Очевидно, что для работы датчика необходимо специальное устройство, которое обеспечит генерацию питающего преобразователь тока и специальный детектор вибрации.

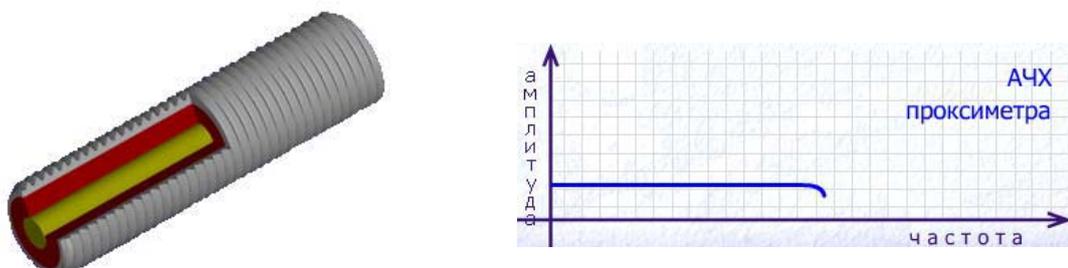


Рис. 61. Конструкция (а) и АЧХ (б) проксиметра

Проксиметр чувствителен к обуславливаемым механическими колебаниями относительным изменениям расстояния, т. е. к перемещению, и отличается малым выходным электрическим импедансом. Однако, он является пассивным датчиком с перекрывающим лишь область низких частот рабочим частотным диапазоном. Нужно подчеркнуть, что этот датчик можно применять лишь при измерениях механических колебаний объектов с электропроводной поверхностью.

ГЛАВА 6 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРИОДИЧЕСКОМ И НЕПРЕРЫВНОМ МОНИТОРИНГЕ

6.1. Цели и задачи мониторинга

Зависимость частоты отказов от времени для любого оборудования, начиная от электрической лампочки и кончая космическим кораблем, можно разделить на три основных периода: период приработки, период стационарной нормальной работы и период старения и постепенного выхода из строя. В первый период происходит приработка (обкатка) оборудования. На этом периоде проявляются основные заводские дефекты, дефекты монтажа и прочие. Частота отказов довольно высокая, но по мере приработки она постепенно снижается. На втором периоде частота отказов минимальна, оборудование «прикаталось» и функционирует максимально надежно.

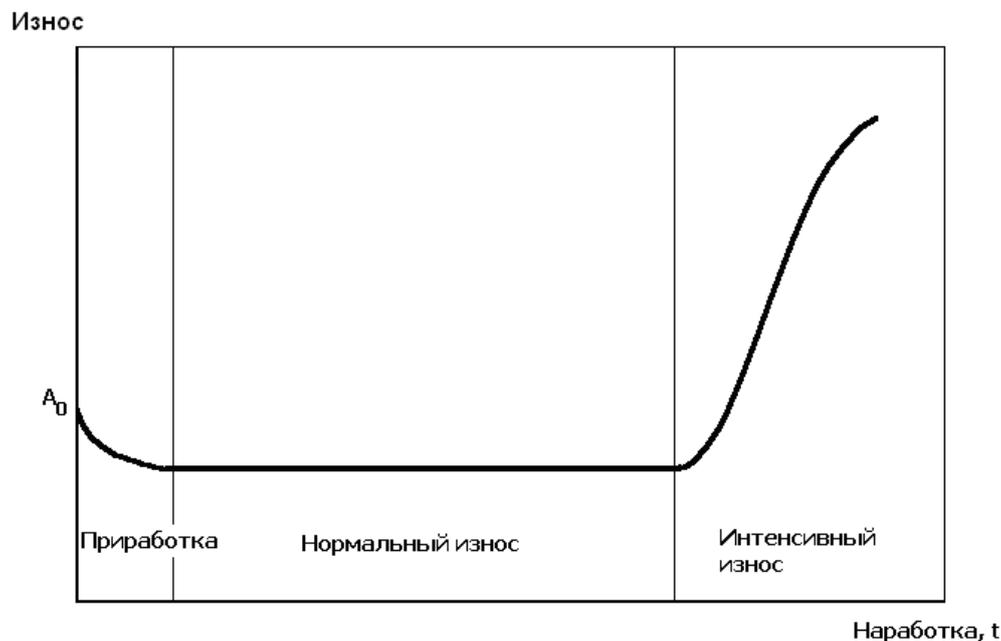


Рис. 62. Износ оборудования в зависимости от времени наработки

Третий период наступает при постепенном износе оборудования и его старении. Частота отказов возрастает со временем и при непринятии соответствующих мер (ремонта) в конце концов, оборудование выходит из строя.

Если при перегорании электрической лампочки ничего особо страшного не происходит, то аварии, например, мощных энергетических турбин могут привести к катастрофическим последствиям.

6.2. Стратегии технического обслуживания

Стратегии технического обслуживания оборудования можно разделить условно на три группы:

1. Фактически, никакого обслуживания нет. Оборудование работает до выхода его из строя, после чего просто заменяется исправным (ну какое может быть обслуживание для той же самой электролампочки? Разве что пыль стряхнуть). Такой подход оправдан для дешевого второстепенного оборудования.

2. Стратегия планово-предупредительных ремонтов (ППР). Для каждого конкретного типа оборудования на основе опыта и статистики его отказов определяется некоторый критический период его наработки, по истечении которого оборудование должно быть выведено в ремонт с вполне определенным объемом. Подобная практика широко применялась и применяется в настоящее время, как для основного критического оборудования, так и для более сложного второстепенного. Практика ППР показывает, что достаточно часто вывод оборудования в ремонт не оправдан. Межремонтные сроки для однотипного оборудования оказываются либо большими, либо заниженными, да и сам ремонт иногда не повышает надежность и работоспособность оборудования, а снижает их. Кроме того, затраты на ремонт сложного оборудования иногда недопустимо велики (представьте себе сколько стоит остановить мощную энергетическую турбину, разобрать, отремонтировать, собрать и пустить ее снова, а ведь может оказаться, часто так и происходит, что эта турбина могла бы надежно работать еще очень долго).

3. И, наконец, в последнее время все больше предприятий и технических служб переходят на систему обслуживания оборудования по техническому состоянию или, как ее еще называют, программу прогнозируемого обслуживания (ППО). Подобная система предусматривает постоянный мониторинг технического состояния оборудования, отслеживание его изменения и диагностирование развивающихся неисправностей с точностью до конкретного узла с прогнозированием его остаточного ресурса.

6.3. Программные и аппаратные средства

За счет предупреждения аварийных ситуаций, заблаговременного планирования проведения ремонтов конкретных узлов, уменьшения объемов ремонтов и увеличения межремонтных периодов грамотное применение системы ППО позволяет снизить затраты на обслуживание оборудования вдвое. Далее речь пойдет об организации именно программы прогнозируемого обслуживания.

Как уже было отмечено выше, основой ППО является мониторинг технического состояния оборудования. Под мониторингом подразумевается периодический контроль и анализ параметров работы агрегатов, включая не

только данные механической вибрации их узлов, но и технологические параметры (например, температуры, давления, расходы, электрические токи и напряжения и пр.), корреляция этих параметров, контроль за их выходом из допустимых пределов и прогнозирование их изменений в ближайшее время. Мониторинг технических параметров оборудования известен и применяется очень давно. Всем хорошо знакомы журналы состояния оборудования, в которые на протяжении десятилетий с определенной периодичностью заносились и заносятся обслуживающим персоналом показания контрольно-измерительных приборов и прочие данные, полученные, например, при периодических измерениях вибрации с помощью простейших приборов. Переход на систему прогнозируемого обслуживания требует увеличения измеряемой и хранимой информации во много раз. Ручной ввод, хранение и обработка этих данных становятся невозможными. Для сбора данных, для мониторинга технического состояния оборудования применяются так называемые коллекторы данных, представляющие собой автономные портативные микропроцессорные приборы, позволяющие измерять и запоминать различные данные (в том числе и большие их массивы – спектры и сигналы) с помощью разнотипных датчиков как переносных, так и стационарно установленных на оборудовании. Коллекторы данных должны позволять производить максимально автоматизированный сбор данных, запись и хранение их в памяти достаточное время, и разгрузку этих данных в соответствующую базу данных. Современные коллекторы данных удовлетворяют всем этим требованиям и позволяют производить периодические обследования оборудования даже неквалифицированному техническому персоналу.

Программное обеспечение

Как уже было сказано, обработка огромных массивов данных вручную становится невозможной, поэтому второй основной составляющей системы ППО должна являться достаточно мощная компьютерная система хранения, обработки, анализа и отображения собираемых данных. Программное обеспечение (ПО) должно обеспечивать возможность создания гибкой иерархической системы хранения данных, возможность двустороннего обмена данными с коллекторами, необходимые функции обработки и отображения данных и формирование всевозможных отчетных материалов (желательно в форме, которую предпочитает непосредственный пользователь).

Существенными дополнениями ПО являются функции автоматического диагностирования состояния оборудования и прогнозирования его изменений (экспертная система).

Но основой любой системы, несомненно, должен быть человек, специалист-аналитик, несмотря на любую, самую высшую степень автоматизации системы мониторинга, окончательное решение за ним.

6.4. Базы данных (БД)

Большие вычислительные центры в течение многих лет используют сложные и дорогие программные продукты для работы с базами данных. Использование этих баз, обладающих полным набором возможностей и тщательно оптимизированных программных систем, является единственным способом управления теми объемами корпоративной информации, которые существуют в больших компаниях. Такие БД собираются и поддерживаются десятилетиями на больших компьютерах. Пользователи домашних компьютеров ранее традиционно не нуждались в БД. Они хранили свои данные – адреса, списки дел и т. д. – в маленьких файлах или в программах типа электронных таблиц, телефонных справочников. Но основная категория пользователей компьютеров, находится между двумя этими крайностями. Они поддерживают информационные массивы средних размеров, хотят работать с ними в офисе, в командировках и дома.

База данных – это, попросту говоря, собрание данных. Примером неэлектронной БД является библиотека. Когда нужно отыскать в библиотеке какие-либо данные, Вы просматриваете каталог. Другой пример – стопка бумаг у Вас на столе, когда нужно что-то найти, Вы роетесь в этой кипе, пока не найдете нужный листок. Эта БД может работать (или нет), поскольку ее размер крайне мал. Стопка бумаг, несомненно, будет неэффективна для большого объема данных. Вашей стопкой бумаг можно было бы пользоваться более уверенно при наличии упорядоченной системы их хранения (тогда, возможно, вы не потеряли бы тот телефонный номер!). И вот Вы заводите папки. У библиотеки и стопки бумаг много сходства. Та и другая являются БД, состоящими из документов, но нет никакого смысла, однако, соединять их вместе. Каждая из этих баз отвечает определенному назначению и организована в соответствии с этим назначением. Поэтому БД – организованное собрание данных, которые собраны и хранятся в соответствии с некоторым назначением.

Электронные базы данных

У традиционных бумажных баз много недостатков. Им требуется огромное физическое пространство. Поиск в них осуществляется медленно. Библиотеки и рабочий стол утомительно содержать в порядке – для этого требуется чрезмерно много времени, поэтому хранение всего этого в базе данных в электронном виде помогает решить многие вопросы.

Когда Вы впервые начинали работать с данными в электронной форме, Вы почти наверняка использовали плоский файл. Этот файл системы является электронной версией бумаги на вашем столе. Вероятно, Вы пришли к заключению, что этот тип базы больше не отвечает Вашим по-

требностям. Вам нужны компьютерные программы, позволяющие пользователю создавать, поддерживать БД и управлять ими. Такой тип программного обеспечения известен как системы управления базами данных (СУБД). Следует различать БД и СУБД. СУБД действует как посредник между физической базой данных и ее пользователями. Реляционная БД организует данные в таблицы. У каждой таблицы есть название, несколько колонок и строки, содержащие данные в каждой из этих колонок. Подобная БД представляет все Ваши данные в таких таблицах и обеспечивает операции для работы с таблицами. Нам необходимо добавлять, удалять, обновлять данные. Необходимо иметь некий язык взаимодействия с БД. Исторически таким языком стал SQL (Structured Query Language – язык структурированных запросов). SQL – компьютерный язык, используемый для выражения операций с БД, организованной в реляционной форме (то есть в виде таблиц). SQL является принятым в отрасли стандартом языка, на котором говорят подавляющее большинство программистов БД, и который используется большинством пакетов СУБД.

Классификация СУБД

Согласно нашему определению – БД есть организованное собрание данных, служащее определенной цели. Назначение БД определяется тем, как Вы используете свои данные. Представьте себе библиотеку, в которой нельзя поменять книги или добавить новые. Полезность такой библиотеки будет со временем уменьшаться. БД существуют для того, чтобы люди могли с ними взаимодействовать. В случае с электронной БД взаимодействие происходит не непосредственно с БД, а косвенно, с помощью программного обеспечения. Программное обеспечение для работы с БД неотъемлемая часть для использования БД. Вы можете располагать ценными, полными и необходимыми данными, самой современной СУБД, но не сможете работать с БД из-за плохого или устаревшего программного обеспечения.

Классификация СУБД: по модели данных – реляционные, сетевые, иерархические; по сфере применения – информационно-поисковые, системы обработки данных; по способности настраиваться на предметную область – универсальные, специализированные; по способу обработки запросов – файловые, клиент-серверные.

Реляционная модель является простейшей и наиболее привычной формой представления данных в виде таблицы со множеством строк (записей) и столбцов (полей). Каждая строка таблицы (запись) содержит сведения об описываемом объекте. Все записи БД имеют идентичную, заданную пользователем структуру и размеры. В теории множеств таблице соответствует термин «отношение» (relation), который и дал назва-

ние модели. Для нее имеется развитый математический аппарат – реляционное исчисление и реляционная алгебра, где для БД (отношений) определены известные теоретико-множественные итерации (объединение, вычитание, пересечение, соединение и другие). Достоинством реляционной модели является сравнительная простота инструментальных средств ее поддержки. В настоящее время реляционные системы лучше соответствуют техническим возможностям персональных компьютеров и вполне удовлетворяют большинство пользователей.

Справочные системы предполагают, что большинство пользователей обращаются к ним для выборки подмножества хранимых данных (возможные обработки редки и выполняются в пакетном режиме). СУБД, ориентированные на справочные функции имеют развитые средства поиска, однако обновление информации в БД идет очень медленно (справочная служба города). Системы обработки данных характеризуются тем, что большинство пользователей не опрашивает систему, а обрабатывает данные в реальном режиме. Причем обращения к операционной системе, даже если они не предполагают вывод, часто представляют собой не подмножество хранимых данных, а результат обработки этих данных.

Универсальные СУБД легко настраиваются на любую предметную область. Они предоставляют неограниченные возможности для развития и применения, но при этом требуют существенно больших усилий для проектирования БД. Специализированные СУБД ориентированы на определенный класс приложения. Недостатком являются ограниченные возможности для ее развития.

Файловые СУБД предоставляют только физическую модель для хранения данных. Обработка запросов ведется клиентским приложением или специальным интерпретатором команд СУБД. Такие базы легко переносимы.

В клиент-серверных БД запрос от клиентского приложения выполняет и обрабатывает сервер. Современные серверные БД обладают развитыми языками программирования и механизмами обработки запросов. Логика работы программ реализуется на сервере, а клиентские программы осуществляют лишь визуализацию обрабатываемых сервером данных.

6.5. Маршруты виброобследований

Для обеспечения максимальной автоматизации проведения обследований и снижения вероятности ошибок необходимо описанную структуру БД вместе с описаниями замеров загрузить в коллектор данных. Далеко не всегда есть необходимость грузить в коллектор всю описанную структуру. Гораздо чаще надо загрузить ее часть (например, один агрегат или частично некоторые замеры по агрегатам). Для такой

возможности служат создаваемые в системе маршруты обследований. По своей сути маршрут представляет собой некоторую выделенную часть структуры БД только без данных.

Виброобследования проводятся по маршруту, который определяет перечень точек и направлений измерений, а также режимы анализа вибрационных сигналов.

Маршруты виброобследований, представленные на рис. 63, содержат наборы заданий для периодических измерений вибраций в нескольких точках на объекте измерения с заранее установленными конфигурациями.

Для того чтобы выполнить измерения прибором, предварительно в него необходимо загрузить нужный режим работы. При этом в прибор загружаются измерительная программа, программа-таймер, индивидуальные для каждого прибора калибровочные коэффициенты, список заданий на измерение и список датчиков и т. д.

При проведении обследований по загруженному маршруту от оператора требуется только по запросу коллектора подключить требуемый датчик и грамотно его установить в точку. Все измерения производятся в автоматическом режиме.

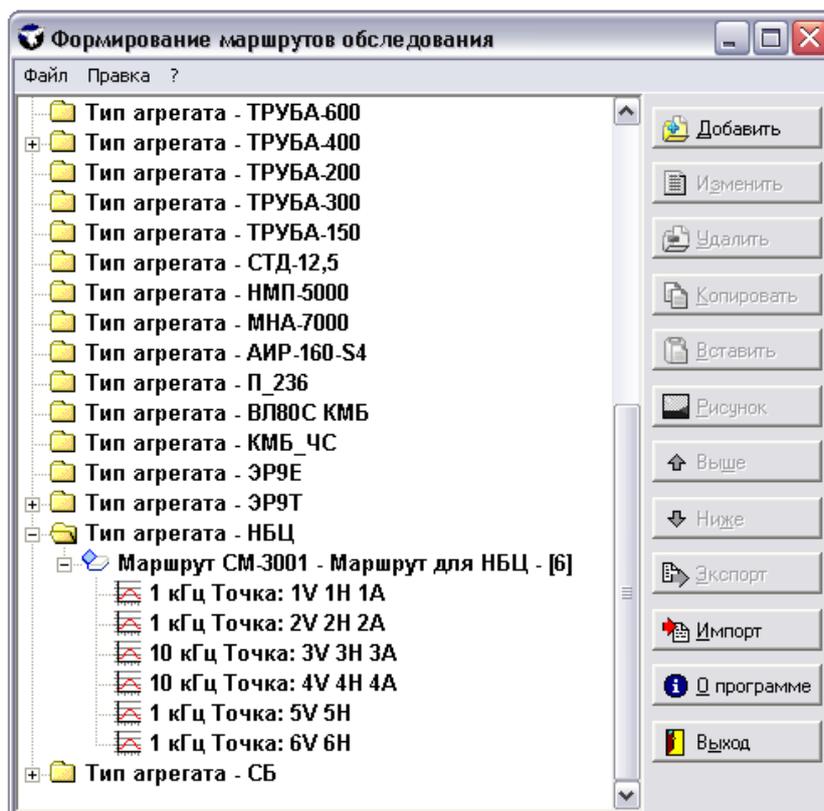


Рис. 63. Маршруты виброобследований

6.6. Периодичность и объем измерений

Периодичность проведения обследований и их объем зависят от критичности оборудования и необходимой степени информативности полученных данных. Например, на стабильно работающем агрегате нет необходимости ежедневно снимать во всех измерительных точках подробные спектры, формы сигналов и пр. Эта информация будет только «загромождать» БД. Достаточно контролировать, например, данные общего уровня и некоторых наиболее информативных частотных полос, данные пик-фактора или эксцесса для подшипников зубчатых передач. При появлении каких-либо изменений (повышении общего уровня: превышении уставок сигнализации и т. д.) возникает необходимость более подробного обследования агрегата.

Для реализации такой схемы мониторинга достаточно сформировать в БД для этого агрегата (или группы агрегатов) два маршрута – первый упрощенный, сбор данных, по которому производится быстрее и самих данных немного, а второй – подробный с измерением всех необходимых спектров, сигналов и пр.

Кроме того, следует учитывать, что более подробное вибрационное обследование рекомендуется производить в районе того узла агрегата, где замечены изменения вибрационного состояния.

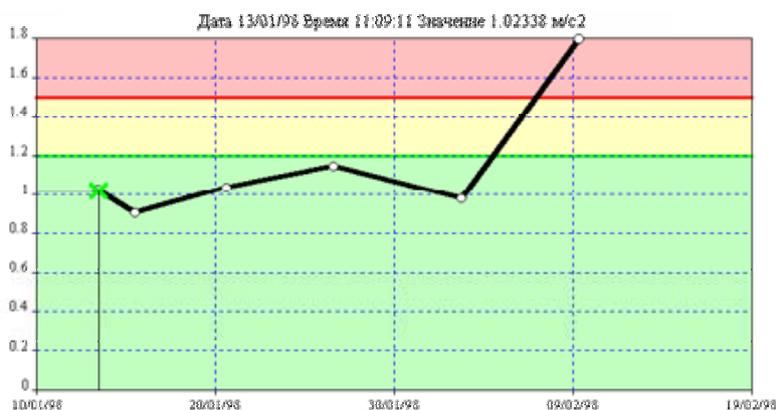


Рис. 64. Пример тренда вибросигнала

Давайте понаблюдаем за изменением СКЗ виброскорости в какой-нибудь из стандартных точек измерения на агрегате. Мы с вами уже знаем, что СКЗ виброскорости пропорционально кинетической энергии колебательного процесса. Чем меньше будет это значение, тем меньшая часть полезной мощности в машине будет рассеиваться на вибрацию, и тем большая ее часть будет использована в агрегате для выполнения полезной работы. Очевидно, что для нас выгодно, когда СКЗ скорости будет минимально. Построим зависимость контролируемого параметра от времени. Она имеет вид, показанный на рис. 64. Такая зависимость называется трендом. Слово «тренд» произошло от английского «trand», и означает «курс» или «общее направление».

Построение трендов

Строить тренды можно не только по виброскорости, но и по целому ряду других диагностических признаков, которые получаются в результате использования более сложных методов анализа вибрации. Тем не менее, вид трендов для большинства диагностических признаков качественно будет похож на график, приведенный на рис. 62. Изучим его подробнее. При рассмотрении трендов можно обнаружить три участка, на которых значение диагностического параметра изменяется монотонно. Первый из них называется «приработкой». Это стадия, на которой значение диагностического признака монотонно уменьшается. Это явление объясняется приработкой отдельных узлов агрегата, и проявляется на новых машинах, или вышедших после ремонта. Ясно, что мы можем его не обнаружить, если начнем мерить вибрацию не сразу после начала эксплуатации машины. Второй участок характеризует стадию нормальной работы машины. Поскольку вероятность выхода агрегата из строя прямо пропорциональна диагностическому признаку, то на этой стадии работы возможность того, что машина выйдет из строя, минимальна. Третий участок, на котором увеличивается скорость роста диагностического параметра, характеризует износ агрегата. Наибольший практический интерес для нас представляет вторая стадия и начало третьей, так как ситуация требует определить, когда и по каким причинам контролируемая машина выйдет из строя.

Термины, используемые в вибродиагностике

Термин	Определение
Активная виброзащита <i>Active vibration protection</i>	<i>вибрационная защита, использующая энергию дополнительного источника</i>
Амортизатор <i>Snubber</i>	<i>виброизолятор, действие которого основано на совместном использовании диссипативной и упругой сил (моментов)</i>
Вибрационная диагностика <i>Vibration diagnostics</i>	<i>раздел технической диагностики, основанный на анализе вибрации объекта</i>
Вибрационная защита <i>Vibration protection</i>	<i>снижение значений параметров вибрации защищаемого объекта с помощью технических устройств материалов или используемых методов с целью предотвращения его повреждения от воздействия вибрации</i>
Вибрационная машина <i>Vibration machine</i>	<i>машина, исполнительному органу которой сообщают возбуждающую вибрацию для осуществления, интенсификации или повышения качества выполняемой работы или процесса</i>
Вибрационная прочность <i>Vibration strength</i>	<i>свойство объекта – сохранять прочность под воздействием вибрации, выражающееся в непревышении установленных вибронпряжений, виброперемещений, деформаций формы и иных критериев</i>
Вибрационная техника <i>Vibration engineering</i>	<i>совокупность технических средств, полезно использующих вибрацию</i>
Вибрационная устойчивость <i>Vibration proper functioning</i>	<i>свойство объекта сохранять работоспособность при воздействии на него вибрации в пределах установленных норм</i>
Вибрационные испытания <i>Vibration testing</i>	<i>проверка виброустойчивости, вибропрочности объекта и (или) определение его вибрационных характеристик</i>
Вибрация <i>Vibration</i>	<i>механические колебания по преимуществу объектов техники, сопровождающиеся упругой деформацией их составных частей</i>
Вибровозбудитель <i>Vibration generator</i>	<i>исполнительный орган вибрационной машины, вибростенда или автономное устройство, непосредственно возбуждающее вибрацию</i>
Виброизолятор <i>Vibration isolator</i>	<i>техническое устройство, осуществляющее виброизоляцию</i>
Виброизоляция <i>Vibration isolation</i>	<i>вибрационная защита посредством технических устройств или материалов, помещаемых между источниками вибрации и защищаемым объектом</i>
Виброметрия <i>Vibrometry</i>	<i>совокупность средств и методов измерения величин, характеризующих вибрацию</i>

Термин	Определение
Виброперемещение <i>Vibration displacement</i>	мгновенное значение перемещения при вибрации, характеризуемое вектором, конец которого совпадает с положением материальной точки в данный момент, а начало с положением в состоянии покоя или равновесия
Виброскорость <i>Vibration velocity</i>	производная виброперемещения по времени
Вибростенд <i>Vibration testing machine</i>	устройство для возбуждения вибрации испытуемых объектов за счет преобразования какого-либо вида подводимой энергии в вибрацию
Виброускорение <i>Vibration acceleration</i>	производная виброскорости по времени
Демпфер <i>Damper</i>	виброизолятор, действие которого основано на использовании диссипативной силы (момента)
Демпфирующее покрытие <i>Damping covering</i>	покрытие, наносимое на вибрирующую поверхность с целью вибрационной защиты демпфированием
Динамическая жесткость виброизолятора <i>Dynamic stiffness</i>	отношение амплитуды гармонической вынуждающей силы к амплитуде виброперемещения, умноженного на косинус сдвига фаз между ними
Динамическое гашение вибрации <i>Dynamic attenuation</i>	вибрационная защита посредством присоединения к защищенному объекту системы, реакции которой уменьшают вибрацию объекта в точках присоединения системы
Интенсивность вибрации <i>Vibration severity</i>	характеристика «жесткости» вибрации, описываемая значениями одного или нескольких параметров вибрации или графиками значений параметров
Коэффициент передачи при виброизоляции <i>Transmissibility</i>	отношение значения параметра вибрации или силы, воздействующих на объект, к значению той же величины источника возбуждения
Коэффициент эффективности вибрационной защиты <i>Effectiveness factor of vibration factor</i>	отношение значения параметра вибрации или силы, воздействующих на объект до введения виброзащиты, к значению той же величины после введения виброзащиты
Линейный демпфер <i>Linear damper</i>	демпфер с линейной характеристикой диссипативной силы
Механические колебания <i>Oscillations</i>	движение точек механической системы с попередным возрастанием и убытием относительно состояния покоя или статистического равновесия кинематических или динамических величин, характеризующих движение
Минимальная собственная внутренняя частота виброизолятора <i>Minimum natural internal frequency</i>	минимальная частота вибрации эластомерно-демпфирующего элемента виброизолятора, при которой существенно снижается коэффициент вибрационной защиты

Термин	Определение
Многокаскадная виброизоляция <i>Multicascade vibration isolator</i>	<i>виброизоляция, при которой между защищаемым объектом и источником вибрации установлены виброизоляторы, разделенные инерционными и иными элементами</i>
Пассивная виброзащита <i>Passive vibration protection</i>	<i>вибрационная защита, не использующая энергию дополнительного источника</i>
Плоскостной виброизолятор <i>Flatness vibration isolator</i>	<i>виброизолятор на основе эластомеров с соотношением горизонтальных и вертикальных размеров более чем 10:1</i>
Рабочая диаграмма демпфирующего элемента виброизолятора <i>Performance diagram of damping element of vibration isolator</i>	<i>зависимость диссипативной силы (момента) от деформации демпфирующего элемента</i>
Равночастотный виброизолятор <i>Equal frequency vibration isolator</i>	<i>вибратор, обеспечивающий постоянство собственной частоты защищаемого объекта при изменении его массы в заданных пределах</i>
Сила сопротивления демпфирующего элемента виброизолятора <i>Resistance force of damping element of vibration isolator</i>	<i>значение диссипативной силы, определяемое по рабочей диаграмме демпфирующего элемента виброизолятора</i>
Статическая характеристика виброизолятора <i>Static characteristic</i>	<i>зависимость между статическим ходом виброизолятора и статической нагрузкой для каждого из направлений, на работу по которому рассчитан виброизолятор, определяемая для прямого и обратного хода виброизолятора</i>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серридж М., Лихт Т.Р. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и преусилителям. – «Брюль и Къер», 1987.
2. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – Москва, 1996. – 276 с.
3. Приборы и системы для измерения вибрации, шума, удара: справочник. Ч. 1 / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1978.
4. Герике Б.Л. Мониторинг и диагностика технического состояния машинных агрегатов: учебное пособие: в 2-х ч. Ч.1: Мониторинг технического состояния по параметрам вибрационных процессов/ Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 1999. – 189 с.
5. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т / под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 1995. – Т. 7: в 2 кн.
6. Мультимедийный учебник по основам вибродиагностики. ООО «Балтех».
7. Мультимедийный курс по основам центровки оборудования. ООО «Балтех».
8. Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А. и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.: ил.
9. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев Ю.А. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: учебное пособие. – СПб.: Изд. центр «СПбГМТУ», 2000 г.
10. Баркова Н.А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2003.
11. ГОСТ ИСО 10816-1-97 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1. Общие требования.
12. ГОСТ 20815-93 Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более.
13. Симонович С.В. Информатика: базовый курс. – СПб.: Питер, 2002. – 640 с.: ил.
14. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
15. Генкин М.Д., Соколова А.Х. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
16. Горелик А.Л., Балицкий Ф.Я., Требунский А.Н. Методы технической диагностики машин и механизмов. – М.: НТЦ «Информатика», 1990. – 204 с.

18. ГОСТ ИСО 7919-1-99. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования.
19. Методы автоматизированного исследования вибраций машин. Справочник / Добрынин С.А., Фельдман М.С., Фирсов Г.И. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.
20. Мозгалеvский А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика. – М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.

Учебное издание

ОГЛЕЗНЕВА Любовь Андреевна
КАЛИНИЧЕНКО Алексей Николаевич

АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

Часть II

Учебное пособие

Научный редактор
доктор технических наук,
профессор

Б.И. Капранов

Редактор

Е.О. Фукалова

Верстка

Д.В. Сотникова

Дизайн обложки

*О.Ю. Аршинова
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 07.04.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,98. Уч.-изд. л. 15,35.

Заказ 463-09. Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.