

Федеральное агентство по образованию
Дальневосточный государственный технический университет
(ДВПИ им. В.В.Куйбышева)

Н.А. Баркова, Ю.С. Дорошев

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

*Рекомендовано Дальневосточным региональным
учебно-методическим центром в качестве учебного пособия
для студентов специальности 150402
«Горные машины и оборудование» вузов региона*



Издательство
ДВГТУ

Владивосток • 2009

УДК 622.629.12.05:594.647

Б 25

Рецензенты:

И.В. Садардинов, генеральный директор
ОАО «ДальвостНИИпроектуголь», канд. техн. наук;
А.И. Агошков, генеральный директор научно-производственного,
проектно-конструкторского объединения «ЭКОГЕОПРОЕКТ»,
д-р техн. наук, профессор

Баркова, Н.А.

Б 25 Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования: учеб. пособие / Н.А.Баркова, Ю.С. Дорошев. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. – 157 с.

ISBN 978-5-7596-1135-6

Рассматриваются общие положения технической диагностики машин и оборудования, анализируются используемые для их диагностики свойства акустического шума и вибрации, методы и средства измерения и анализа вибродиагностических сигналов, а также особенности их использования при решении задач виброакустического мониторинга и диагностики.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 150402 «Горные машины и оборудование» по направлению 150400 «Технологические машины и оборудование», изучающих дисциплины «Горные машины», «Эксплуатация и ремонт горных машин», «Стационарные машины», «Транспортные машины», может быть полезно специалистам, изучающим вопросы диагностики и прогноза технического состояния машин и оборудования по их шуму и вибрации.

УДК 622.629.12.05:594.647

ISBN 978-5-7596-1135-6

© Н.А. Баркова

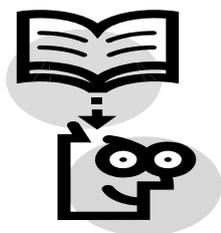
Ю.С. Дорошев, 2009

© ДВГТУ, изд-во ДВГТУ, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Основы технической диагностики.....	8
1.1. Виды технического обслуживания.....	8
1.2. Техничко-экономические преимущества технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования.....	14
1.3. Компоненты проактивной системы технического обслуживания.....	15
1.4. Развитие средств и методов оценки технического состояния машин и оборудования.....	17
1.5. Термины и определения.....	20
1.6. Основной принцип технической диагностики.....	23
1.7. Основные этапы технической диагностики.....	24
1.8. Функциональная и тестовая диагностика.....	29
1.9. Контроль технического состояния горного оборудования.....	32
1.9.1. Классификация методов неразрушающего контроля.....	32
1.9.2. Методы неразрушающего контроля, применяемые в горной промышленности.....	37
1.10. Методология технической диагностики.....	39
1.11. Выбор диагностического сигнала.....	43
Контрольные вопросы.....	44
Глава 2. Общие понятия об акустическом шуме и вибрации.....	45
2.1. Акустический шум.....	49
2.1.1. Происхождение и классификация акустического шума.....	49
2.1.2. Волновое уравнение.....	50
2.1.3. Особенности восприятия акустического шума человеком.....	52
2.2. Вибрация.....	53
2.2.1. Низкочастотная вибрация.....	57
2.2.2. Среднечастотная вибрация.....	59
2.2.3. Высокочастотная вибрация.....	61
2.3. Единицы измерения шума и вибрации.....	63
Контрольные вопросы.....	67
Глава 3. Анализ вибродиагностических сигналов.....	69
3.1. Анализ уровней вибрации.....	70
3.2. Анализ ударных импульсов.....	71

3.3. Частотный анализ.....	73
3.3.1. Частотный анализ с постоянной абсолютной шириной полосы пропускания.....	76
3.3.2. Частотный анализ с постоянной относительной (процентной) шириной полосы пропускания.....	79
3.3.3. Особенности использования частотного анализа в основных методах мониторинга и диагностики.....	84
Контрольные вопросы.....	95
Глава 4. Средства измерения и анализа виброакустических сигналов.....	98
4.1. Измерительные преобразователи.....	101
4.1.1. Измерительные преобразователи шума – микрофоны.....	101
4.1.2. Измерительные преобразователи вибрации.....	105
4.2. Анализаторы.....	131
4.3. Программное обеспечение для вибрационного мониторинга и диагностики.....	136
Контрольные вопросы.....	138
Заключение.....	140
Тесты.....	142
Библиографический список.....	155



ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии контроля и диагностики состояния оборудования, использующие вибрационную диагностическую информацию, можно разделить на три основные группы [1, 2, 3]:

- технологии комплексного контроля и управления оборудованием;
- технологии вибрационной наладки, т.е. поддержания вибрации оборудования в пределах, определенных стандартами и/или техническими условиями;
- технологии превентивной диагностики, т.е. глубокой диагностики, обеспечивающей долгосрочный прогноз состояния оборудования.

Технологии комплексного контроля и управления вращающегося оборудования развиваются по пути совершенствования вибрационных систем аварийного отключения и сигнализации, в которых в качестве информационного параметра используются величины низкочастотной вибрации в полосе частот от 2(10) Гц до 1000(2000) Гц и скорость ее нарастания [8].

Технологии вибрационной наладки используются для обеспечения безопасных уровней вибрации высокооборотных машин и включают в себя ряд сервисных работ, таких как центровка, балансировка, изменение колебательных свойств (отстройка от резонансов) машины, устранение дефектов в узлах машины или фундаментных конструкциях. В частности, балансировка машин в собственных опорах, в отличие от балансировки на специальных балансировочных станках, позволяет устранить технологические дисбалансы и значительно ускорить и облегчить эту трудоемкую и сложную процедуру. Технологии вибрационной наладки существенным образом зависят от типов машин и особенностей в разных областях промышленности.

Технологии превентивной диагностики машин являются наиболее сложными из диагностических технологий. Основными задачами превентивной диагностики является обнаружение в машине всех потенциально опасных дефектов на ранней стадии развития, наблюдение за их развитием и на этой основе – долгосрочный прогноз состояния машины. Определение вида каждого из обнаруженных дефектов позволяет повысить достоверность прогноза, т.к. каждый вид

дефекта имеет свою скорость развития. Окупаемость лучших систем превентивной диагностики вращающегося оборудования обычно не превышает 3-6 месяцев после обучения специалиста-диагноста и подготовки контролируемого оборудования для проведения диагностических измерений. Превентивная вибрационная диагностика реализуется, прежде всего, диагностику узлов оборудования по высокочастотной вибрации (5–25 кГц), т.к. зарождающиеся дефекты не являются источником значительной колебательной энергии, достаточной для заметного изменения вибрации всей машины на низких и средних частотах. Но поскольку решение о выводе оборудования в ремонт следует принимать при появлении развитых дефектов, а их количественная оценка более достоверно оценивается по низкочастотной (реже среднечастотной) вибрации, то превентивная диагностика стала использовать вибрацию машины во всем диапазоне частот.

Основную трудность в превентивной диагностике составляет определение эталонных и пороговых значений диагностических параметров. В настоящее время максимальную эффективность прогнозирования обеспечивает прогнозирование по заранее известному тренду, построенному с момента начала нормальной работы однотипных машин до полного их выхода из строя, т.е. по всему жизненному циклу подобных машин. Составление «истории» измерений параметров одной машины не всегда оказывается эффективным приемом, т.к. любое обслуживание машины или ее текущий ремонт может сильно изменить вибрационную картину конкретной машины. В этой связи важно иметь достаточный массив экспериментальных данных однотипных групп машин, работающих в сходных условиях. Предельные длительности достоверного прогноза безаварийной работы типовых машин составляют около 6 месяцев.

Современные системы превентивной диагностики, использующие диагностическое программное обеспечение для автоматической диагностики подшипников качения, позволяют достоверно диагностировать подшипники качения по однократным измерениям вибрации. Для этого достаточно произвести три измерения – спектра низкочастотной вибрации, спектра огибающей высокочастотной случайной вибрации и формы высокочастотного сигнала, из которой определяется пикфактор и среднеквадратическое значение.

Переход на прогрессивные технологии технического обслуживания связан с решением целого комплекса проблем – технических, организационных, социальных, создания автоматизированных систем

управления техническим обслуживанием. Решение всего комплекса вопросов является научной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение, внедрение которой может внести значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

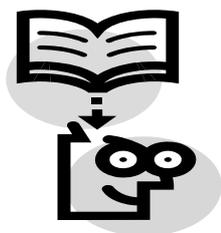
Опыт предприятий промышленно развитых стран показывает, что приемлемый уровень начальных капитальных вложений для типичного промышленного предприятия в средства обеспечения технического обслуживания по фактическому состоянию должен составлять не более 1% стоимости оборудования, предназначенного к мониторингу, а в средства обеспечения ремонта – не более 2%. В этом случае отношение затраты/прибыль при хорошей организации 1:5, т.е. рентабельность составляет 500%.

Настоящее учебное пособие является первой частью комплекса учебно-методических материалов по проблеме определения технического состояния машин и оборудования без разборки с использованием сигналов их вибрации и шума.

Полный комплекс учебно-методической литературы для подготовки специалистов по виброакустической диагностике машин в процессе их эксплуатации должен содержать также материалы, посвященные следующим проблемам:

- основные источники вибрации машин и оборудования;
- влияние дефектов на вибрацию машин и оборудования;
- балансировка роторов в процессе эксплуатации машин;
- математическое и программное обеспечение для экспертной и автоматической виброакустической диагностики;
- системы виброакустического мониторинга и диагностики машин и оборудования.

К настоящему времени имеется ряд изданий с кратким анализом основных вопросов по каждому из указанных направлений, однако быстрое развитие методов и алгоритмов технической и, в частности, виброакустической диагностики машин и оборудования, а также частая смена поколений технического и программного обеспечения диагностических систем требуют постоянного обновления учебно-методической литературы.



Глава 1

ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

1.1. Виды технического обслуживания

В настоящее время на горных предприятиях применяются следующие виды технического обслуживания (ТО) оборудования: реактивное (РТО) – ремонт или замена оборудования производится в случае выхода его из строя или выработки ресурса и планово-предупредительный ремонт (ППР), который производится ранее среднестатистического отказа с заданной вероятностью. ППР – основной вид ТО, его достоинством является более высокий уровень управления обслуживанием по сравнению с РТО – обеспечивается более чем 30%-е снижение эксплуатационных затрат. Как правило, система ППР содержит 3 (или более) уровня обслуживания – текущий, средний и капитальный ремонты [4, 5, 6, 7, 14, 15]. Однако, как показывает опыт, разборки оборудования, осуществляемые по регламенту ППР, сокращают реальный межремонтный период в среднем на 15 – 30%. Это обусловлено тем, что в реальных условиях не существует сильной взаимосвязи между сроком эксплуатации и техническим состоянием (ТС) оборудования, если не присутствуют эрозийные формы износа и разрушения деталей, линейно связанные со сроком службы. Следовательно, если ППР широко применяется для всего парка оборудования предприятия, существует высокая вероятность того, что выполняется большой объем работ по обслуживанию бездефектного оборудования, состояние которого на момент проведения ППР не требует ремонта, но обслуживается с целью гарантировать заданную вероятность безотказной работы в межремонтный интервал. Более того, оказывается, что для многих машин обслуживание и ремонт по регламенту не снижают частоту выхода из строя. Надежность работы машин и оборудования после технического обслуживания часто снижается временно до момента их приработки, а иногда это снижение надежности обусловлено появлением ранее отсутствующих дефектов монтажа, нарушением технологии ремонта, отклонением от требований ТУ, нарушением условий эксплуатации.

Очевидно, что увеличение эффективности, надежности и ресурса, а также обеспечение безопасной эксплуатации машин и механизмов тесно связано с необходимостью оценки их технического состоя-

ния. Это и определило формирование нового научного направления – технической диагностики, которое получило особо широкое развитие с появлением компьютерной техники [9].

В связи с этим возникает необходимость перехода на более прогрессивную систему ТО, которая уже внедряется на предприятиях ряда отраслей промышленности, – обслуживание по фактическому состоянию (ОФС). Идея ОФС состоит в минимизации (устранении) отказов путем применения методов отслеживания и распознавания ТС оборудования по совокупности его эксплуатационных характеристик. ОФС основано на достижениях в разработке контрольно-измерительной аппаратуры, обеспечивающих возможность выявлять состояние оборудования путем измерения ряда его технических параметров, и на основе анализа измеренных параметров предсказывать необходимость и планировать сроки и объемы проведения ремонта, т.е. проводить ремонт только того оборудования, которому он необходим.

Следует отметить, что техническое состояние механизмов, машин и оборудования в определенной степени оценивали и раньше. Это были измерительные приборы, системы контроля. Однако ограниченная информация о машинах и механизмах далеко не всегда позволяла выявить причины их отказов и, тем более, обнаружить дефект в объекте, который непосредственно не сказывался на его функционировании, но повышал вероятность отказа, снижая надежность и ресурс таких машин и механизмов.

В существующих системах управления, регулирования, контроля и диагностики эксплуатируемого оборудования основной особенностью является то, что операции контроля и защиты обычно автоматизированы, а решение задач диагностики до недавнего времени возлагалось на оператора или ремонтную бригаду. В этом случае решение задач диагностики усложнялось по следующим причинам: большой объем обрабатываемой информации, необходимость логического анализа сложных взаимосвязанных процессов, быстротечность рабочих процессов, опасность запоздалой или ошибочной оценки технического состояния.

Создание автоматизированных средств диагностики вывело техническую диагностику на еще более высокую ступень. В настоящее время успехи развития таких областей науки как теории распознавания и контролеспособности, которые являются составными частями технической диагностики, создали предпосылки для того, чтобы соз-

дание и совершенствование методов и средств технической диагностики, в особенности автоматизированных, стали наиболее эффективным путем увеличения надежности и ресурса машин и оборудования.

Использование методов и средств технической диагностики позволяет значительно уменьшить трудоемкость и время ремонта и таким образом снизить эксплуатационные расходы. Следует отметить, что эксплуатационные расходы превышают расходы изготовления в несколько раз. Это превышение составляет, например, для самолетов в 5 раз, для автотранспорта – в 7 раз, для станков – в 8 раз и более, для карьерных экскаваторов – в 10 раз. Если учесть, что за время эксплуатации механизм подвергается нескольким десяткам профилактических осмотров с частичной разборкой, до 10 вынужденным и плановым средним ремонтам и минимум 3 капитальным ремонтам, можно оценить, какой экономический эффект может быть получен за счет внедрения средств технической диагностики.

По данным международной конфедерации по измерительной технике и приборостроению ИМЕСО, только за счет внедрения средств диагностики, например, для энергетических установок, сокращаются трудоемкость и время ремонта более чем на 40%, уменьшается расход топлива на 4% и увеличивается коэффициент технического использования оборудования на 12%.

В случае перехода предприятия на систему ТО по ОФС возникает возможность создания так называемой проактивной системы обслуживания (ПАО). Идея ПАО заключается в обеспечении максимального возможного межремонтного срока эксплуатации оборудования за счет применения современных технологий обнаружения и подавления источников отказов, принятию мер по недопущению возникновения дефектов (т.е. в идеале – создание «вечного» оборудования, не требующего ТО). ПАО включает в себя несколько компонентов: анализ причин возникновения остановов, аварий, обеспечение соблюдения требований ТУ при монтаже и ремонте оборудования, оценку ТС оборудования после ремонта, обеспечение высококвалифицированными кадрами служб диагностики и ремонта. Последний компонент является ключевым в системе ПАО, поскольку именно в уровне квалификации кадров – обслуживающего персонала, служб диагностики и ремонта заложен большой резерв в увеличении межремонтного интервала. Например, по статистике, бездефектный подшипник выходит из строя по причине естественного износа только в

10% случаях, а в 90% случаях – по причинам неквалифицированного, халатного обслуживания, в том числе 40% – нарушение смазки, 30% – нарушение сборки и установки, 20% – неправильное применение повышенной вибрация и др. Также можно было бы избежать сокращения межремонтного интервала за счет повышения качества ремонта, который в настоящее время проводится с нарушениями в 20% случаях. Таким образом, комплексы горного оборудования необходимо рассматривать не как технические, а как эргастические системы. Человеческий фактор необходимо учитывать при анализе работоспособности оборудования в разработке системы ТО наряду с экономическими, техническими, технологическими, информационными и др. (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Характерные особенности различных видов ТО

Вид ТО	Характерные особенности	Недостатки
Реактивное обслуживание (РТО)	Отсутствие ТО в течение предполагаемого периода эксплуатации	Высокая вероятность внеплановых остановов, дорогостоящего длительного ремонта (серьезность и обширность поломок), отказа различных агрегатов одновременно (необходимость в ремонте может превысить возможности ремонтной службы)
Обслуживание по регламенту (ППР)	Профилактика внеплановых остановов, резкое снижение вероятности внезапного отказа оборудования	Проведение «излишних» ремонтов, т.е. ремонтов исправного оборудования, и, как следствие, излишний рост эксплуатационных затрат
Обслуживание по фактическому состоянию (ОФС)	Минимизация внеплановых остановов и ТО бездефектных машин (узлов), увеличение на 25–40% межремонтного интервала	Возможна ситуация, когда необходимость в проведении ремонтных работ на нескольких агрегатах одновременно превысит возможности ремонтной службы
Проактивное обслуживание (ПАО)	Увеличение межремонтного интервала, подавление источников отказов	

Человеку свойственно ошибаться, поэтому элементы РТО всегда будут присутствовать как в системе ППР, так и в ОФС и ПАО. Аналогично ОФС предполагает интегрированные элементы системы ППР, поэтому на каждом этапе развития стратегии ТО должен осуществляться необходимый баланс объемов выполнения РТО, ППР, ОФС и ПАО. На рис. 1.1 отображены примеры комбинаций различных видов ТО промышленных предприятий. Доли различных видов ТО в общем объеме определяются минимизацией затрат на производство продукции.

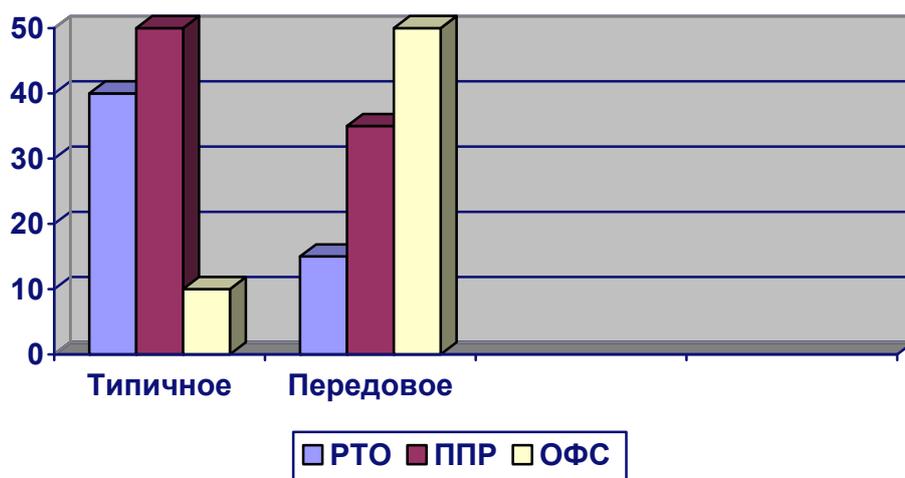


Рис. 1.1. Баланс (%) различных видов ТО:
типичное и рекомендуемое для промышленных предприятий

На рис. 1.2. показаны характерные особенности видов ТО. РТО характеризуется внезапными отказами оборудования и продолжительным периодом ремонта (рис. 1.2 а). В случае применения периодического контроля технологических параметров продолжительность ремонта снижается, а сам ремонт производится при возникновении отказа оборудования (рис. 1.2 б).

При проведении ТО по регламенту ремонт производится до возникновения поломки; наблюдается увеличение отказов оборудования в послеремонтный период (рис. 1.2 в).

ОФС характеризуется увеличением межремонтного периода, отсутствием внезапных отказов (рис. 1.2 г).

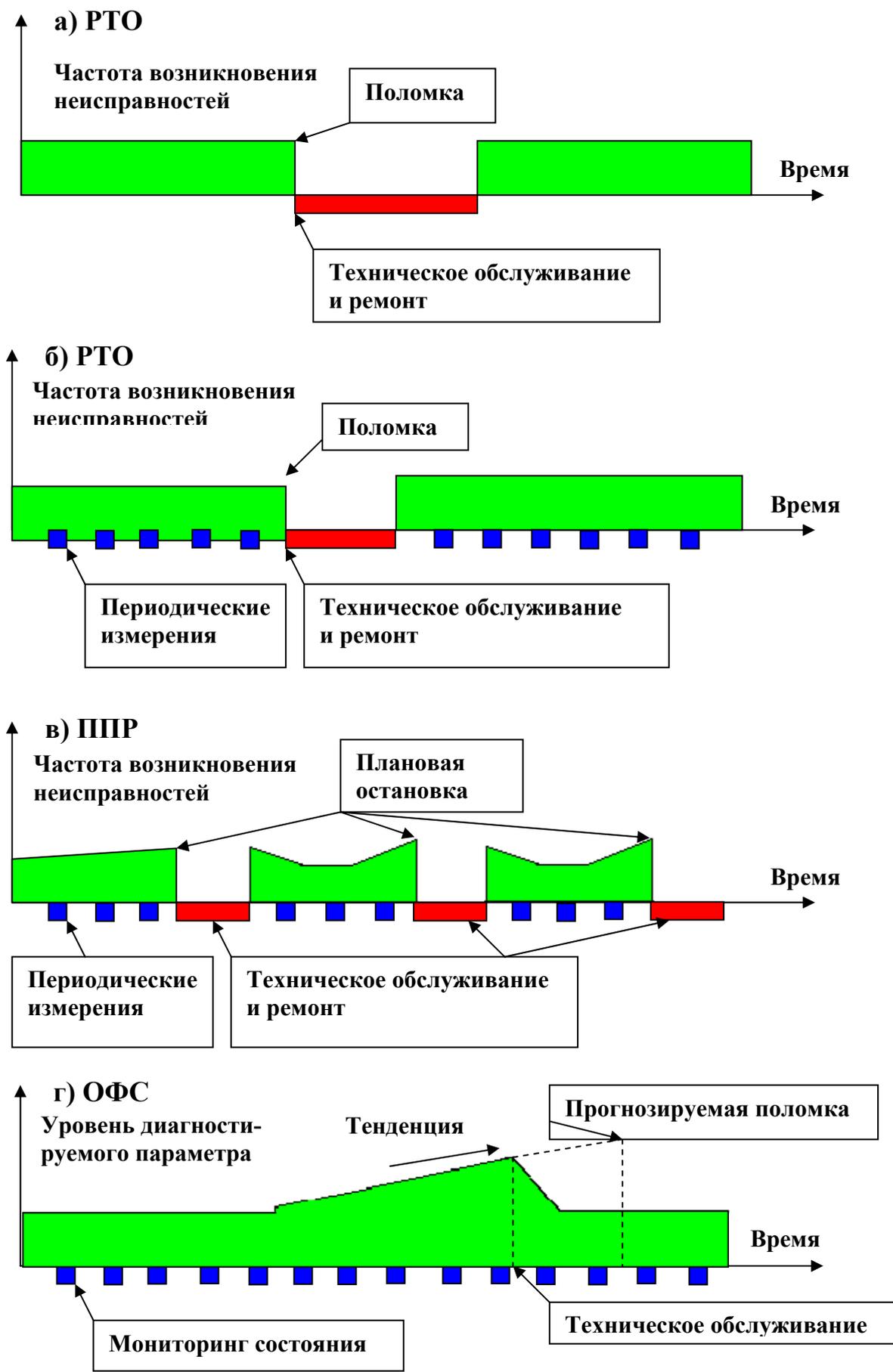


Рис. 1.2. Характерные особенности видов технического обслуживания

1.2. Техничко-экономические преимущества технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования

ОФС, по сравнению с ППР, дает следующие преимущества:

- наличие постоянной информации о состоянии оборудования, охваченного мониторингом; это позволяет планировать и выполнять ТО и ремонт без остановки производства и исключить отказы оборудования;
- прогнозирование и планирование объемов ТО и ремонта оборудования с дефектами; снижение расходов по ТО за счет минимизации ненужного ремонта оборудования без дефектов, увеличение межремонтного интервала (в результате проведения мониторинга ТС оборудования и ОФС внеплановый объем работ, вызванный чрезвычайными ситуациями, обычно составляет менее 5% от общего объема работ, а время простоя оборудования составляет не более 3% от времени, затраченного на ТО; опыт показывает, что типичные расходы на ремонт при аварийных отказах оборудования в среднем в 10 раз превышают стоимость ремонта при своевременно обнаруженном дефекте);
- обеспечение эффективности ремонта за счет послеремонтного обследования (примерно от 2 до 10% новых деталей имеют дефекты изготовления, приводящие к ускоренному выходу замененной детали из строя и вызывают повреждение других нормально функционирующих деталей; дефектная деталь или нарушения технологии сборки в ряде случаев могут быть обнаружены при проведении испытаний после ремонта);
- эффективное планирование распределения обслуживающего персонала, запасных частей, инструмента и др.; возможность сокращения резервного оборудования;
- повышение качества продукции (продукция может подвергаться неблагоприятному воздействию со стороны оборудования, имеющего дефекты; поскольку качество продукции часто проверяется на заключительном этапе производственного процесса, до момента обнаружения проблемы может быть произведено большое количество низкокачественного продукта; мониторинг ТС и ОФС позволяют не допускать изменения состояния оборудования, приводящего к браку, поскольку ремонт может быть произведен до того, как будет поставлено под угрозу качество продукта);

- улучшение охраны труда и устранение экологических требований (проведение ремонтных работ в чрезвычайной обстановке внезапного отказа и опасности внеплановой остановки производства приводит к повышению травматизма);

- экономия энергоресурсов (устранение источников повышенной вибрации или, например, недопущение фрикционного износа целевых уплотнений насосов может снизить удельные затраты энергии на 1–15%);

- эффективность переговоров с поставщиками оборудования относительно его гарантийного ремонта, восстановления, замены или изменения конструкции (поскольку записываемые параметры отражают документально ТС оборудования в момент пуска, приработки и гарантийной эксплуатации, а специалисты по ТД сертифицированы в соответствии с законодательством РФ, заключения являются доказательством для арбитража);

- исключение экспертных (субъективных) оценок для вывода оборудования в ремонт; обоснованность объемов финансирования ремонтных работ;

- выявление реальной картины объективных параметров технического состояния оборудования в соответствии с международными стандартами ИСО и в целях обеспечения требований федерального закона о промышленной безопасности.

Внедрение ОФС позволяет в целом снизить эксплуатационные расходы на предприятии. Анализ эксплуатационных расходов в некоторых отраслях промышленности показывает, что переход, например, в нефтехимии от РТО одного и того же парка оборудования к ППР приводит к снижению затрат в 1,5 раза, а к ОФС – почти в 2 раза.

1.3. Компоненты проактивной системы технического обслуживания

Проактивная система технического обслуживания базируется на применении нескольких компонентов, сочетание которых дает максимальный эффект.

Анализ причин внеплановых остановок, аварий, укороченных межремонтных интервалов, включающий выявление повторяющихся проблем, возникающих при эксплуатации оборудования

Принципиально дефекты и отказы (в т.ч. в начале срока службы), классифицируемые по причине возникновения, могут быть свя-

заны с конструкторскими дефектами и неправильным применением, производственными дефектами (изготовления) и дефектами материала, дефектами сборки и эксплуатационными дефектами (нарушения технологии сборки, монтажа и соединения узлов, ненужное ТО, нарушения условий эксплуатации), технологическими дефектами (отклонение рабочих параметров от номинальных). При этом ТО и ремонт обычно устремлены на устранение в основном очевидных дефектов оборудования, а нередко частые ремонты воспринимаются как вполне нормальное явление. Анализ коренных проблем отказов направляет аналитические средства и инженерную логику на идентификацию и коррекцию скрытой основной проблемы.

Обеспечение требований ТУ при монтаже и ремонте оборудования и исследование контролируемых параметров при выводе из ремонта

По статистике основными факторами, приводящими к уменьшению межремонтного интервала, являются высокий остаточный дисбаланс роторов, несоосность роторов агрегата, нарушение качества изготовления и монтажа подшипников, не обеспечение расчетной жесткости опорной системы при монтаже.

Две наиболее распространенные операции при завершении монтажа или ремонта агрегата (которые на вспомогательном оборудовании нередко выполняются с низким качеством или вообще игнорируются) – балансировка ротора и центровка узлов агрегата. Дополнительные затраты времени и ресурсов для достижения при проведении этих операций самых жестких норм не намного больше, чем те, которые требуются для проведения этих операций со средним качеством, но достижение уровней жестких норм часто способно увеличить даже вдвое межремонтный интервал оборудования. Эффект от точной центровки следующий: средний срок службы подшипников и муфт возрастает в 3–8 раз, затраты на ТО уменьшаются в среднем на 5–7%, межремонтный интервал возрастает в среднем на 10–12%, внеплановые останovy оборудования, возникающие в результате расцентровки, сокращаются наполовину. Аналогичные результаты дает тщательная балансировка роторов в собственных подшипниках.

Достаточно часто финишные операции ТО агрегата: затяжка разъемных соединений опор, статора, обвязки производится с низким качеством. Применение для этих операций динамометрических ключей способно обеспечить требуемую жесткость опорной системы и значительно снизить уровень вибрации.

Оценка технического состояния оборудования после ремонта

Важнейший этап проведения контроля состояния: вывод оборудования из монтажа или ремонта и проверка исправности (работоспособности) всего оборудования. По статистике 20% обслуживания такого типа оборудования производится с нарушением качества, приводя к сокращению межремонтного интервала оборудования. Наблюдения, проводимые на ряде предприятий, показывают, что завершающие операции проводятся менее добросовестно, чем ранее следующие в процессе ТО технологические операции. Оценка ТС оборудования после ремонта и проведение статистического анализа не только выявляет неприлежных ремонтников, но и совершенствует мастерство добросовестных исполнителей.

Входной и выходной контроль

В процессе испытаний при выводе оборудования из ремонта или монтажа, в т.ч. проводимого силами сторонней подрядной организации, предприятие, обладающее средствами контроля качества работы оборудования, может влиять на исполнителя, даже если в условиях контракта не предусмотрены многие требования, например, к уровню вибрации, поскольку нормы вибрации определяются отраслевыми нормами, нормами завода-изготовителя и стандартами, обязательными к выполнению.

1.4. Развитие средств и методов оценки технического состояния машин и оборудования

В развитии средств и методов оценки технического состояния машин и оборудования можно выделить 4 основных этапа:

- контроль измеряемых параметров;
- мониторинг контролируемых параметров;
- диагностика машин и оборудования;
- прогноз изменения их технического состояния.

При контроле машин и оборудования достаточно информации о величинах измеряемых параметров и зонах их допустимых отклонений (рис. 1.3). При мониторинге контролируемых параметров необходима дополнительная информация о тенденциях изменения измеряемых параметров во времени.



Рис. 1.3. Структурная схема оценки технического состояния оборудования

Еще больший объем информации требуется при диагностике машин и оборудования: определить место возникновения дефекта, идентифицировать его вид и оценить степень его развития. И наиболее сложной задачей является прогноз изменения технического состояния, позволяющий определить остаточный ресурс или период безаварийной работы (табл. 1.2).

В настоящее время под термином «мониторинг технического состояния» понимается весь комплекс процедур оценки состояния машин или оборудования:

- защита от внезапных поломок;
- предупреждение об изменении технического состояния оборудования;
- обнаружение на ранних этапах зарождающихся дефектов и определение места их появления, вида и степени развития;
- прогноз изменения технического состояния оборудования.

Таблица 1.2

История развития технических средств оценки технического состояния оборудования

Годы	Достижения	Страна, фирма-разработчик
До 1950	По шуму – слух по вибрации – слухач	
1950–1960	Форма сигнала (осциллограф) узкополосный анализатор (фильтр) балансировка	IRD (США), Брюль и Кьер (Дания)
1960–1970	Измерение ультразвуковой вибрации метод ударных импульсов (1968), выпуск прибора государственная программа по диагностике (1968) анализатор спектра в реальном времени	SPM (США-Швеция); СССР; Брюль и Кьер (Дания)
1970–1980	Системы аварийной защиты по вибрации цифровые анализаторы взаимные спектры (пеленг) спектры огибающей (1978)	Ряд фирм США, Фран- ции, Англии СССР
1980–1990	Внедрение компьютеров (базы данных, виртуаль- ные приборы) первые системы мониторинга объединение мониторинга и автоматики глубокая диагностика электрических машин по вибрации (1985) первые экспертные системы на базе переносных приборов начало внедрения вибрационного контроля и диаг- ностики в атомной энергетике СССР	США, Франция Бэнкли-Невада (США); СССР; CSI, ENTEK (США); СССР
1990–2000	Первая программа автоматической диагностики подшипников (1990) первый отечественный портативный анализатор спектра (1991) первый отечественный портативный прибор для балансировки (1992) первая отечественная стационарная система мо- ниторинга и диагностики (1993) первый отечественный цифровой малогабарит- ный анализатор в реальном времени (1996) появление ряда конкурирующих отечественных стационарных систем вибрационного мониторин- га (1995–1998)	Вибротехника (СССР) Приз (СССР) Дельфин-Диагностика (Россия) ВАСТ (Россия) ВАСТ (Россия) Россия

Годы	Достижения	Страна, фирма-разработчик
1990–2000	внедрение в России стандартов ИСО по мониторингу (1998–2000) объединение ряда ведущих мировых диагностических фирм с производителями систем автоматизации создание малогабаритных виброанализирующих приборов на базе промышленных Windows CE микрокомпьютеров (1998) создание единых сетей управления, мониторинга и диагностики (1997–2000)	Россия США, Великобритания, Германия DI (Великобритания) США
2000–2002	Начало разработки беспроводных сетей мониторинга и диагностики начало разработки объединенных (цеховых) стационарных и переносных систем вибрационной диагностики	США Россия

1.5. Термины и определения

Основные термины и определения технической диагностики регламентированы действующими стандартами, например, российским ГОСТом 20911-89 «Техническая диагностика. Основные термины и определения». Ниже приведены наиболее часто употребляемые термины и определения.

Техническое состояние – это совокупность свойств объекта, определяющих возможность его функционирования и подверженных изменению в процессе производства, эксплуатации и ремонта.

Работоспособный объект – объект, который может выполнять возложенные на него функции.

Зарождающийся дефект – потенциально опасное изменение состояния объекта в процессе его эксплуатации, при котором значение информативного параметра (или параметров) не вышло за пределы допусков, задаваемых в технической документации.

Дефект – изменение состояния объекта в процессе его изготовления, эксплуатации или ремонта, которое потенциально может привести к уменьшению степени его работоспособности.

Неисправность – изменение состояния объекта, приводящее к уменьшению степени его работоспособности.

Отказ – изменение состояния объекта, исключающее возможность продолжения его функционирования.

Параметры состояния – количественные характеристики свойств объекта, определяющие его работоспособность, заданные в технической документации на изготовление, эксплуатацию и ремонт.

Мониторинг – выполняемые без вмешательства в функционирование объекта процессы измерения, анализа и прогнозирования контролируемых параметров или характеристик объекта с отображением их во времени, сравнением с ретроспективными данными и с пороговыми значениями.

Защитный мониторинг – мониторинг, обеспечивающий в случае возникновения аварийной ситуации прекращение функционирования объекта.

Прогнозирующий мониторинг – мониторинг с прогнозом изменения контролируемых характеристик объекта на время, определяемое длительностью прогноза.

Диагностика (диагностирование) – процесс определения состояния объекта.

Тестовая диагностика – процесс определения состояния объекта по его реакции на внешнее воздействие определенного типа.

Функциональная (рабочая) диагностика – процесс определения состояния объекта без нарушения режима его функционирования.

Диагностические показатели – значения параметров или характеристик объекта, совокупность которых определяет состояние объекта.

Диагностический признак – свойство объекта, качественно отражающее его состояние, в том числе и появление различных видов дефектов.

Диагностический сигнал – контролируемая характеристика объекта, используемая для выявления диагностических признаков. (По диагностическому сигналу могут классифицироваться виды мониторинга и диагностики, например, тепловой или вибрационный мониторинг и диагностика).

Диагностический параметр – количественная характеристика измеряемого диагностического сигнала, входящая в совокупность показателей состояния объекта.

Диагностический симптом – это разность между фактическим и эталонным значениями диагностического параметра.

Диагностика в пространстве состояний – процесс определения состояния объекта по результатам непосредственного измерения параметров состояния.

Диагностика в пространстве признаков – процесс определения состояния объекта по результатам измерения диагностических параметров, определяющих диагностические признаки, в том числе косвенно связанные с параметрами состояния объекта.

Диагностическое правило – совокупность диагностических признаков и параметров, характеризующих появление в объекте определенного вида дефектов или неисправностей и пороговых значений, разделяющих множества бездефектных объектов и объектов с разной величиной дефекта.

Диагностическая модель – совокупность диагностических правил по всем потенциально опасным дефектам в объекте диагностики.

Алгоритм диагностики – совокупность предписаний по выполнению определенных действий, необходимых для постановки диагноза в соответствии с конкретной диагностической моделью объекта.

Диагноз – заключение о состоянии технического объекта.

Прогноз – заключение о степени работоспособности объекта в течение прогнозируемого периода, вероятности его отказа за этот период или об остаточном ресурсе объекта.

Технические средства мониторинга – средства, предназначенные для измерения и анализа контролируемых характеристик объекта, а также для прогноза их возможных изменений.

Программное обеспечение для мониторинга – программное обеспечение для поддержки баз данных, выполняемых для мониторинга измерений и/или для управления этими измерениями.

Технические средства диагностики – средства, предназначенные для измерения диагностических параметров и постановки диагноза.

Система мониторинга и диагностики – совокупность объекта, технических средств мониторинга и диагностики, а также (при необходимости) оператора и эксперта, обеспечивающая постановку диагноза и прогноза состояния объекта.

Автоматическая диагностика – процесс определения состояния объекта диагностики без участия оператора по данным измерений, выполненных техническими средствами диагностики либо с помощью оператора, либо автоматически.

Программы автоматической диагностики – программное обеспечение, позволяющее заменить эксперта персональным компьютером при решении типовых диагностических задач.

1.6. Основной принцип технической диагностики

Оценка и прогноз технического состояния объекта диагностики по результатам прямых или косвенных измерений параметров состояния или диагностических параметров и составляет суть технической диагностики.

Само по себе значение параметра состояния или диагностического параметра еще не дает оценки технического состояния объекта. Чтобы оценить состояние машины или оборудования необходимо знать не только *фактические значения* параметров, но и соответствующие *эталонные значения*.

Разность между фактическим θ_f и эталонным $\theta_{эм}$ значениями диагностических параметров называется *диагностическим симптомом*:

$$\Delta = \theta_f - \theta_{эм}.$$

Таким образом, оценка технического состояния объекта определяется отклонением фактических значений его параметров от их эталонных значений. Следовательно, любая система технической диагностики (рис. 1.4) работает по *принципу отклонений* (принцип Солсбери).

Погрешность, с которой оценивается величина диагностического симптома, в значительной степени определяет качество и достоверность диагноза и прогноза контролируемого объекта.

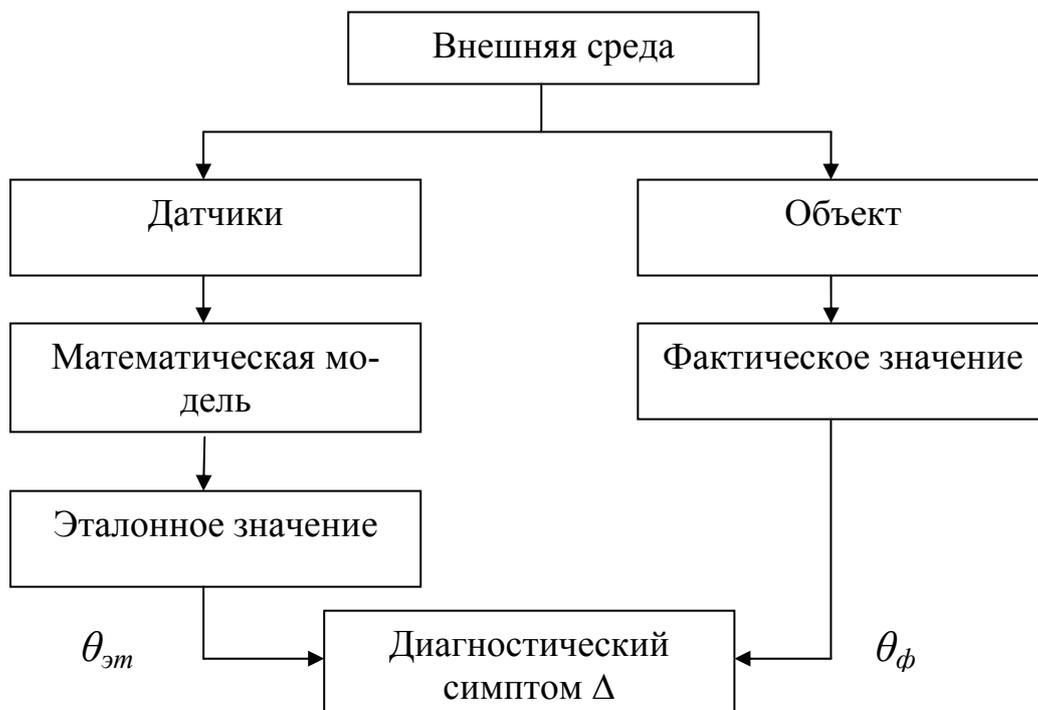


Рис. 1.4. Структурная схема технической диагностики

Эталонное значение указывает, какую величину будет иметь соответствующий параметр у исправного хорошо отрегулированного механизма, работавшего при такой же нагрузке и таких же внешних условиях.

Математическая модель объекта диагностики может быть представлена набором формул, по которым рассчитываются эталонные значения всех диагностируемых параметров. Каждая формула должна учитывать условия нагрузки объекта и существенные параметры внешней среды.

1.7. Основные этапы технической диагностики

Первым этапом оценки технического состояния любого объекта является определение номенклатуры дефектов, которые представляют наибольшую опасность для его функционирования и должны обнаруживаться в процессе диагностики. Для ее решения проводятся специальные исследования причин наиболее частых отказов объектов диагностики или их аналогов, а также тех изменений параметров состояния, которые измеряются в процессе предремонтной дефектации аналогичных объектов, отработавших межремонтный ресурс.

Второй этап – это определение совокупности максимально возможных параметров состояния, диагностических признаков и диагностических параметров, которые могут быть измерены для определения технического состояния объекта. (Избыточность параметров в этой совокупности необходима для того, чтобы выбрать из всех возможных параметров те, которые наиболее доступны для измерения, имеют минимальные ошибки определения диагностических симптомов и позволяют обнаруживать дефекты на стадии их зарождения). Как правило, вторая задача решается на основе многочисленных опубликованных результатов исследований влияния дефектов на разные параметры состояния и диагностические параметры сигналов контролируемых объектов.

Следующий, *третий этап* оценки технического состояния – это оптимизация совокупности измеряемых параметров состояния и диагностических параметров. Эта совокупность должна отражать развитие всех дефектов, определяющих ресурс контролируемого узла или машины в целом. При этом желательно, чтобы каждый параметр из выбранной совокупности зависел бы преимущественно от одного ви-

да дефекта. При выборе параметров предпочтение отдается тем, которые в значительной степени зависят от дефектов и слабо – от режимов и условий работы, наиболее доступны для измерения, имеют минимальные ошибки определения диагностических симптомов и позволяют обнаруживать дефекты на стадии их зарождения.

Для оценки технического состояния объекта необходимо определять для каждого параметра не только его эталонное значение, которое характеризует состояние бездефектного объекта, но и его пороговые значения, характеризующие состояние объекта с дефектом определенной величины, т.е. определяющие допустимую величину изменения данного контролируемого параметра.

Таким образом, значение параметра состояния или диагностического параметра, соответствующее состоянию объекта с дефектом определенной величины, принято называть пороговым значением (пороговым уровнем) параметра при этом виде дефекта. Параметр состояния или диагностический параметр может иметь несколько, например, три пороговых значения, характеризующих, соответственно, зарождающийся, средний и сильный дефекты.

Эталонные значения параметров состояния и диагностических параметров могут определяться различными способами. Один из них – расчетный с использованием математической модели объекта.

Математическая модель объекта может представлять собой набор формул, по которым рассчитываются эталонные значения всех выбранных параметров для конкретного режима работы объекта с учетом конкретных внешних условий. В нее же входят и формулы, определяющие пороги допустимых значений этих же параметров при появлении тех или иных дефектов.

Еще один способ определения эталонных и пороговых значений – это определение их по результатам непосредственных измерений параметров состояния или диагностических параметров. При этом эталонные и пороговые значения могут определяться как по измерениям одних и тех же параметров группы одинаковых объектов, работающих в одинаковых режимах и внешних условиях, так и по периодическим измерениям каждого из этих параметров у одного объекта.

Пороговые значения дефектов – это термин, который используется для определения пороговых значений величин диагностических параметров, характеризующих диагностические признаки дефекта конкретного вида. Пороговые значения дефектов также могут определяться различными способами. Один из них – расчетный с исполь-

зованием математической модели объекта диагностирования, если в модель включены соответствующие формулы для расчета влияния дефектов на параметры состояния или диагностические параметры. Пороговые значения дефектов могут определяться и по результатам экспериментальной оценки эталона параметра бездефектного объекта диагностики $\theta_{эм}$ и статистической величины ошибки измерения эталона, например, 2σ , где σ – среднеквадратическое отклонение параметра. Это значение, например, $\theta_{эм} + 2\sigma$ и может быть принято за пороговое значение дефекта в том случае, если имеется априорная информация о диапазоне изменения величины диагностического параметра в зависимости от величины дефекта и известно, что этот диапазон в несколько раз превышает ошибку измерения эталона. Еще один способ определения пороговых значений дефектов – экспериментальное многократное моделирование дефектов в однотипных объектах диагностики со статистической оценкой величины соответствующего диагностического симптома.

В технической диагностике, как уже упоминалось, в зависимости от ошибки измерения диагностического симптома может использоваться несколько пороговых значений дефектов. Если погрешность измерения симптома велика, чаще всего используется два порога – порог допустимых отклонений диагностического параметра от эталона (порог появления дефекта) и порог аварийного отклонения диагностического параметра от эталона. При использовании чувствительных к появлению дефектов диагностических параметров, позволяющих достаточно точно определять величины дефектов, количество порогов может быть больше, например, пороги слабого, среднего и сильного дефекта, а также порог аварийного отклонения состояния объекта.

Следует отметить, что практически во всех случаях величины порогов, определяемые как расчетными, так и экспериментальными способами, требуют корректировки в процессе адаптации технических систем диагностики к условиям их работы.

После решения третьей, наиболее сложной с практической точки зрения задачи, оптимизации диагностических параметров с построением эталонов и пороговых значений, необходимо выбрать методы и технические средства измерений и анализа диагностических сигналов, а также, если это возможно, параметров состояния объекта диагностики. На этом этапе также осуществляется выбор точек контроля диагностических параметров и режимов работы объекта во время диагностирования. Основной задачей этого выбора является

минимизация затрат на диагностические измерения без потерь качества диагностики, т.е. с сохранением минимальной вероятности пропуска дефектов в процессе диагностирования.

Следующий этап – создание диагностической модели, т.е. совокупности диагностических параметров и правил их измерения, их эталонных значений и пороговых значений дефектов. Кроме этого в диагностическую модель входят правила принятия решений в тех случаях, когда одним и тем же дефектам соответствует группа различных признаков и параметров и, что не менее сложно, когда один и тот же признак или параметр отвечает за появление разных дефектов в различных режимах работы объекта диагностики.

Современные системы диагностики кроме оценки состояния объекта дают возможность прогноза его работоспособности. Для этого анализируются тренды, представляющие собой зависимость диагностических симптомов от времени.

На рис. 1.5 а представлен тренд, характеризующий четыре этапа изменения характеристик вибрации, что соответствует четырем этапам жизненного цикла машины или оборудования. Первый этап T_1 – приработка машины, второй T_2 – нормальная работа, третий T_3 – развитие дефекта, четвертый T_4 – этап деградации (устойчивое развитие цепочки дефектов с момента, когда появляется потребность в обслуживании или ремонте объекта, до момента возникновения аварийной ситуации).

Наибольшая практическая сложность для решения задач диагноза и прогноза состояния машин возникает на первом этапе. Это обусловлено возможностью появления специфических дефектов изготовления и монтажа машины, многие из которых после приработки исчезают, что затрудняет дальнейшую оценку ее состояния.

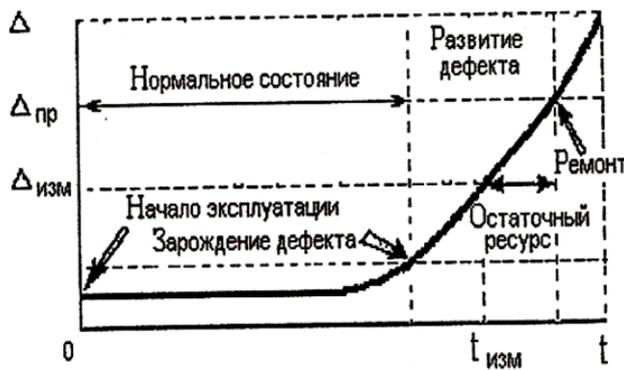
Существует два основных вида прогнозирования состояния объектов диагностики. Первый – по тренду, построенному в результате аппроксимации ретроспективных данных диагностических симптомов с дальнейшей экстраполяцией аппроксимирующей функции. В этом случае прогнозирование требует знания предельного значения диагностического симптома Δ_{np} и фактической кривой тренда, который совсем не обязательно бывает линейным и может характеризоваться большим разбросом точек. При условии монотонности тренда остаточный ресурс может быть оценен в первом приближении как интервал времени с момента последнего измерения диагностического параметра до момента времени, соответствующего точке пересечения тренда с линией, характеризующей предельное значение диагностического симптома Δ_{np} (рис. 1.5 б).



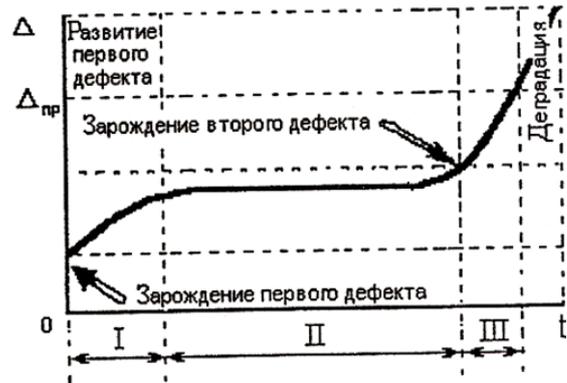
а



б



в



г

Рис. 1.5. Тренды:

- а) типовая зависимость величины диагностического симптома от времени;
- б) тенденция развития диагностического симптома во времени, построенная по ретроспективным данным с дальнейшей экстраполяцией аппроксимирующей зависимости (• - экспериментально полученные данные);
- в) зависимость изменения диагностического симптома от времени, построенная с момента нормальной работы машины до выхода ее из строя;
- г) зависимость диагностического симптома от времени с момента развития первого дефекта до полного выхода машины из строя

Второй вид прогнозирования – по заранее известному тренду, построенному с момента начала нормальной работы однотипных машин до полного их выхода из строя, т.е. по всему жизненному циклу подобных машин (рис. 1.5 в). Тогда остаточный ресурс в первом приближении может быть оценен как разность времени $t_{пр}$, соответствующего предельному значению диагностического симптома $\Delta_{пр}$, и времени $t_{изм}$, соответствующего значению диагностического симптома $\Delta_{изм}$ на момент измерения диагностического параметра.

Во многих практических случаях тренды могут быть немонотонными. Так, на рис. 1.5 г представлен тренд, участок I которого характеризует развитие одного дефекта, на участке II наблюдается стабилизация уровня вибрации и на участке III производная изменения уровня вибрации увеличивается в результате появления еще одного дефекта. В этом случае достоверный прогноз состояния объекта и оценка остаточного ресурса возможны только на последнем участке развития цепочки дефектов.

1.8. Функциональная и тестовая диагностика

По тем действиям, которые производятся с объектом, техническую диагностику можно разделить на функциональную (рабочую) и тестовую.

Функциональная диагностика осуществляется без нарушения режимов работы объекта, т.е. при выполнении им своих функций. Все измерения или другие виды оценки параметров состояния и диагностических параметров, анализ результатов и принятие решения выполняются до того как по результатам оценки состояния формируется, если это необходимо, результирующее воздействие на объект, например, прекращается его работа или он переводится на другой режим функционирования (рис. 1.6, 1.7).

По способу получения диагностической информации функциональная диагностика подразделяется на вибрационную, тепловую, электрическую и т.п.



Рис. 1.6. Виды диагностики

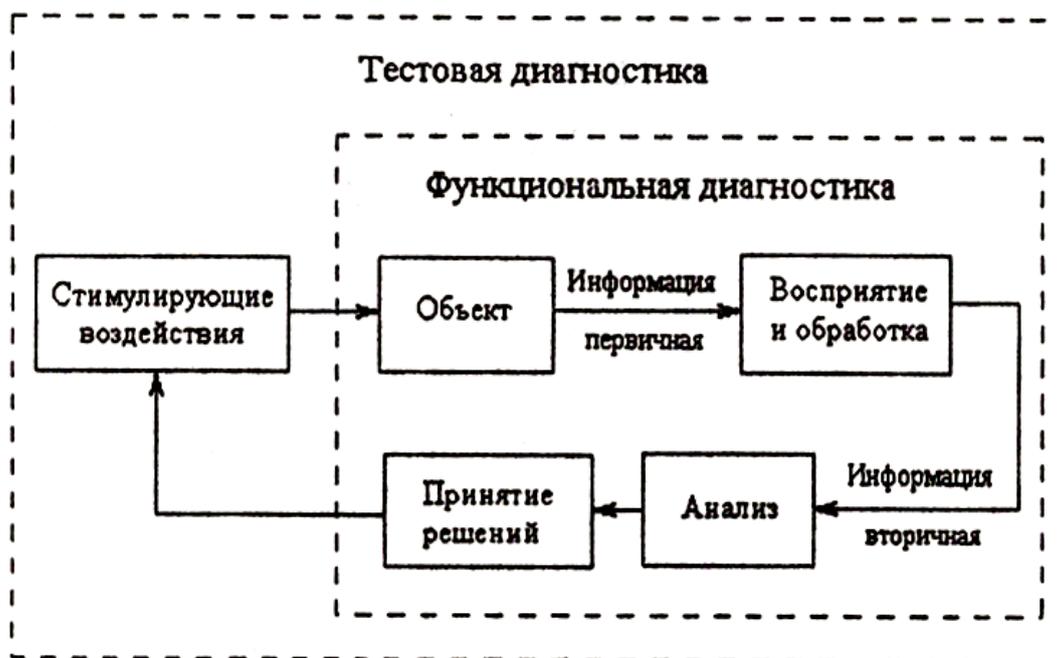


Рис. 1.7. Схема основных операций функциональной и тестовой диагностики

Тестовая диагностика – это определение состояния объекта по результатам его реакции на внешнее воздействие. Отличительной особенностью этого вида диагностики является использование источника внешнего воздействия, например, генератора тестовых сигналов (рис. 1.7). Если генератором тестовых сигналов является источник определенного вида излучений, например акустических, рентгеновских, электромагнитных и других, то такой вид тестовой диагностики часто называют *дефектоскопией*.

Генератором тестовых сигналов (воздействий) может быть и система управления объектом, а самим воздействием – включение (выключение) объекта, переход на другой режим и т.п. Диагностическая информация в этом случае содержится в переходных процессах, сопровождающих смену режима работы объекта.

К тестовым воздействиям с диагностической точки зрения можно отнести все виды неразрушающих испытаний объектов, например, испытания повышенным напряжением электрических машин, аппаратов и сетей на предмет обнаружения нарушений изоляции, испытания оборудования на предельных нагрузках или давлениях, тепловые испытания и т.д.

Тестовая диагностика существовала уже в начале XX в. и представляла собой основной вид технической диагностики, оставляя за

функциональной диагностикой лишь решение отдельных задач, и в первую очередь, задач аварийной защиты технических систем. Функции аварийной защиты выполняли средства контроля таких параметров состояния объекта, которые, с одной стороны, значительно изменялись на начальных стадиях развития аварийной ситуации, а, с другой стороны, были доступны для измерения простейшими средствами контроля.

Во второй половине XX в. стали интенсивно развиваться методы и технические средства мониторинга технических систем, которые, не нарушая режимов работы, обеспечивали слежение и глубокий анализ многих характеристик и свойств этих систем. Вместе с мониторингом стала развиваться и функциональная диагностика, которая взяла на себя функции интерпретации причин, обнаруживаемых при мониторинге изменений характеристик и свойств технических систем.

И лишь в последнее десятилетие XX в. глубокая функциональная диагностика технических объектов получила стимул для интенсивного развития. Он связан с реальным переводом технических объектов и особенно машин и оборудования с обслуживания и ремонта по регламенту на ремонт и обслуживание по фактическому состоянию. Для реализации такого перевода потребовались новые методы и средства технической диагностики, которые смогли бы обеспечить глубокую профилактическую диагностику объектов с долгосрочным прогнозом состояния. Естественно, что методы функциональной диагностики стали основой для разработок в этой области и лишь в редких случаях к ним добавлялись наиболее эффективные из методов тестовой диагностики технических систем.

Профилактическая (превентивная) диагностика технических систем, объединяющая лучшие из достижений функциональной и тестовой диагностики, по своим задачам во многом похожа на медицинский контроль профессиональной пригодности людей, работающих в опасных условиях, включающий в себя кроме периодического общего контроля их здоровья еще и раннюю диагностику и предупреждение профилактических заболеваний. Задачи такой диагностики несколько отличаются от задач мониторинга и тестовой диагностики, а их решение требует разработки более тонких методов и более эффективных средств массового диагностического обслуживания. В последние годы в технической диагностике этим вопросам уделяется наибольшее внимание.

1.9. Контроль технического состояния горного оборудования

1.9.1. Классификация методов неразрушающего контроля

В настоящее время имеется 9 видов и более 50 физических методов неразрушающего контроля, применяемых в отечественной и зарубежной практике для контроля за качеством материалов и изделий [11].

Согласно ГОСТ 18353-79, в основу классификации видов неразрушающего контроля положены физические процессы взаимодействия физического поля или вещества с объектом контроля (рис. 1.8). Мы предлагаем присвоить всем видам неразрушающего контроля соответствующие номера.

В табл. 1.3 систематизированы методы неразрушающего контроля, применяемые в горной промышленности, и аппаратное обеспечение этих методов [16].

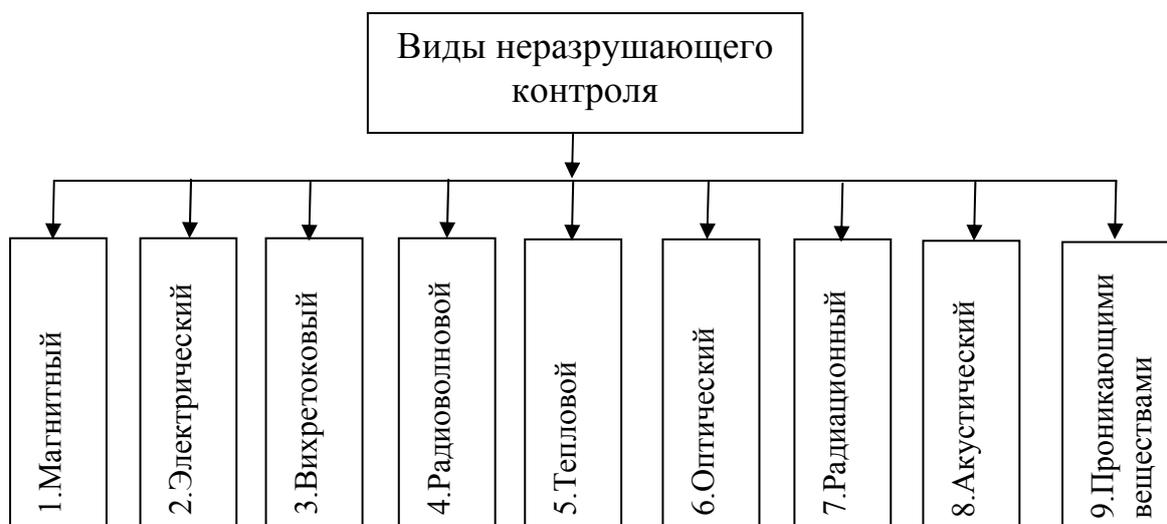


Рис. 1.8. Классификация видов неразрушающего контроля

1. Магнитный. Физический процесс: взаимодействие магнитного поля с контролируемым объектом.

Контролируемые объекты: из ферромагнитных материалов.

Первичные информативные параметры: коэрцитивная сила H_c , магнитная проницаемость μ , намагниченность I , параметры кривой намагничивания.

Контролируемые параметры: степень закалки, прочность, толщина, химический состав, структура, степень пластической деформации, наличие несплошностей, трещины.

Методы

1.1. Магнитопорошковый

1.2. Индуктивный

1.3. Магнитографический

1.4. Феррозондовый

1.5. Магниторезонансный

2. Электрический. Физический процесс: регистрация параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом.

Контролируемые объекты: диэлектрические, полупроводниковые материалы, а также проводники.

Первичные информативные параметры: электрическая емкость, потенциал, диэлектрическая проницаемость.

Контролируемые параметры: химический состав пластмасс, полупроводников, металлов, наличие несплошностей.

Методы

2.1. Термоэлектрический

2.2. Трибоэлектрический

2.3. Экзоэлектронной эмиссии

2.4. Электроискровой

2.5. Электростатический

3. Вихретоковый. Физический процесс: взаимодействие электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте.

Контролируемые объекты: электропроводящие материалы.

Первичные информативные параметры: частота, амплитуда, спектральный состав.

Контролируемые параметры: геометрические размеры, химический состав, внутреннее напряжение, поверхностные и подповерхностные дефекты.

Методы

3.1. Прохождения

4. Радиоволновый. Физический процесс: регистрация изменения параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом.

Контролируемые объекты: диэлектрики (пластмассы, керамика, стекловолокно), магнитодиэлектрики (ферриты), полупроводники, тонкостенные металлические объекты.

Первичные информативные параметры: волны СВЧ диапазона (1–100 мм), амплитуда, частота, фаза, поляризация, геометрия распространения вторичных волн, время их прохождения, волновое сопротивление, $\text{tg}\delta$.

Методы:

4.1. Прошедшего излучения

4.2. Отраженного излучения

4.3. Рассеянного излучения

4.4. Резонансный

На практике получили названия: толщинометрия, структуроскопия, дефектоскопия, интроскопия.

5. Тепловой. Физический процесс: регистрация изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов.

Контролируемые объекты: любые материалы.

Первичные информационные параметры: температура, тепловой поток.

Контролируемые параметры: неисправности, связанные с повышенным нагревом – участки электрических цепей и радиосхем, трещины в двигателях, места утечки теплоты, пористость.

Методы:

5.1. Пассивного излучения

5.2. Собственного излучения

5.3. Активный

6. Оптический. Физический процесс: наблюдение или регистрация параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом.

Контролируемые объекты: любые материалы, прозрачные материалы.

Первичные информационные параметры: амплитуда, фаза, степень поляризации, частота или частотный спектр, время прохождения света через объект, геометрия преломления и отражения лучей, интерференция, дифракция.

Контролируемые параметры: видимые дефекты, отклонения от заданной формы, цвета и т.д., сферичность, плоскостность, шерохо-

ватость, толщина изделия, диаметр тонкий волокон, формы острых кромок, в прозрачных объектах – структурные неоднородности, внутренние напряжения.

Методы:

6.1. Прошедшего излучения

6.1.1. Фотометрический

6.1.2. Денситометрический (фотоэлектрический)

6.2. Отраженного излучения

6.3. Рассеянного излучения

6.4. Индуцированного излучения

6.5. Органолептический (визуально-оптический)

6.6. Оптической голографии

6.7. Лазерный

7. Радиационный. Физический процесс: регистрация и анализ проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия его с контролируемым объектом.

Контролируемые объекты: любые материалы.

Первичные информационные параметры: плотность потока излучения.

Контролируемые параметры: толщина изделия (до 60 см), глубокие внутренние дефекты, качественный состав материала.

Методы

7.1. Рентгеновский

7.2. Гамма

7.3. Бета (поток электронов)

7.4. Нейтронный

7.5. Позитронный

7.6. Радиографический;

7.7. Радиометрический

7.8. Радиоскопический

8. Акустический. Физический процесс: регистрация параметров упругих волн звукового и ультразвукового диапазонов (свыше 20 кГц), возникающих или возбуждаемых в объекте.

Контролируемые объекты: металлы, пластмасса, керамика, бетон.

Первичные информационные параметры: амплитудно-частотная характеристика, количество сигналов в единицу времени, частота, амплитудное распределение, локация места возникновения упругих волн.

Контролируемые параметры: трещины, непровары, перестройка структуры материала, аллотропические превращения в кристаллической решетке, свойства материалов (модуль упругости, коэффициент затухания), твердость, податливость (упругий импеданс) поверхности, толщина труб и сосудов.

Методы

8.1. Ультразвуковой

8.2. Пассивный

8.2.1. Шумовибрационный

8.2.2. Вибрационный

8.3. Активный

8.4. Акустической эмиссии

8.5. Импедансный

8.6. Отражения (эхо-метод)

8.7. Вычислительная ультразвуковая голография.

9. Проникающими веществами. Физический процесс: проникновение пробных веществ в полость дефектов контролируемого объекта.

Контролируемые объекты: любые материалы, имеющие слабо видимые невооруженным глазом дефекты, выходящие на поверхность.

Первичные информационные параметры: индикация дефекта больше его реальных размеров. Контролируемые параметры: трещины, микроскопические отверстия.

Методы

9.1. Капиллярные

9.2. Течеискания

9.2.1. Масс-спектрометрический

9.2.2. Галогенный

9.2.3. Пузырьковый

9.2.4. Манометрический (абсолютный, дифференциальный)

9.2.5. Химической реакции

9.2.6. Ультразвукового течеискателя

9.2.7. Люминесцентно-гидравлический

9.2.8. Люминесцентно-капиллярный

1.9.2. Методы неразрушающего контроля, применяемые в горной промышленности

Таблица 1.3

П. классификации	Метод	Объект контроля	Средства контроля
1	2	3	4
1.1 1.3	Магнитопорошковый Магнитографический (магнитная структуроскопия)	Напряженное состояние металлоконструкций, тросов и канатов, стенок трубопроводов, сосудов и резервуаров	Дефектоскопы ПМД-70; 77ПДМ-3М; КРЦ-4; Дейтропульс 1000/1500 (ФРГ); КН-09 (15) Магнафлюс (США), магнитный структуроскоп КРЦ-4
2.1 2.4	Термоэлектрический Электроискровой	Токопроводящая часть и изоляция	Набор электроизмерительных приборов
5.1	Пассивного излучения (тепловидение и термография)	Электроэнергетическое оборудование, теплообменное оборудование, теплоизоляция, котлы, печи и др.	Полупроводниковые термометры ЭТП-М; тепловизор ТЕРМОСАМ (США); дистанционный измеритель температуры Кельвин; инфракрасные пирометры CSI 510А, VES 4-10-100; С-300 Фаворит; С-500.7 Кристалл; С-3000 Сталь; С-110 Факел; С-300.3 Фотон
6.5	Органолептический (визуально-оптический)	Энергомеханическое оборудование, металлоконструкции	Обзорные лупы ЛПК-470, ЛП-1, БЛ-2; телескопические лупы ЛПШ-474, ТЛА; бинокль БПЦ7х50; труба зрительная ЗРТ-457; эндоскопы РВП-451, 469, АС-1, УСЦ, ОД-20Э
7.2	Радиационный гамма	Уровнемеры, дозаторы, счетчики деталей, устройства блокировки и сигнализации	Гамма-реле ГР-6 (7, 8)
7.4	Радиационный нейтронный	Контроль физических свойств материалов (плотность и состав), наличия и процентного содержания компонентов в различных полезных ископаемых	Радиационные плотнометры ПР-1024В, ППП-2, влагомеры Нейтрон-37 (3), концентратомер КРК-2, многоэлементные анализаторы состава вещества (приборы с устройствами логической обработки данных)

Окончание табл. 1.3

1	2	3	4
7.6	Радиационный радиографический	Металлоконструкции, сварные швы	Рентгеновские аппараты РУП-100 (200, 300, 400), РИНА-1Д, ИРА-2Д, ИРИС1-500-3, НОРА, Макротанк, Мюллер, Эреско-120 (ФРГ), МТР-1(4), ПТУ-39, рентгеновские интроскопы РИ-10 (Т, Ф, ФП), ЭРГА-0,3; гамма-дефектоскопы РД-10Р, РИД-21М (41, 13), Гаммарид-11 (12, 25, 20)
7.7	Радиационный радиометрический	Стальные листы, многослойные изделия	Толщиномеры листов ИТХ-5736, ИТГ-5688, ИТ-5460, ИТШ-496-1, толщиномеры покрытий ТОР-3, Бетамикрометр-2, Бетаскоп, ТПРУ-1, ФРАТ-2
8.1	Акустический ультразвуковой (ультразвуковая дефектоскопия)	Состояние и толщина несущих конструкций, кранов, сосудов давления, резервуаров, трубопроводов и др.	Дефектоскопы ДУК-13ИМ, ДУК-66П, УД-11ПУ, УДМ-3, FlawMike, А1210, дефектоскоп стальных канатов Интрос; толщиномеры Кварц-15, УТ-50МЦ, ТИЦ-100, Т-Mike EL
8.2	Акустический пассивный (шумовибрационный, вибрационный – вибродиагностика)	Энергомеханическое оборудование с движущимися и вращающимися частями	Вибродиагностическая система CSI 2125 (США); виброанализатор СД-12М; СК-2300; виброметр Vibration Per(plus)CMVP50; система вибрационного мониторинга DREAM, BM-21
8.4	Акустической эмиссии (аэроультразвуковой контроль утечек, вакуумные утечки)	Компрессионное оборудование, сосуды давления, трубопроводы, несущие конструкции кранов	Приборы регистрации импульсов АЭ, АФ-11, АФ-14, УКОД, NDT-200, Сериес 7500, акустико-эмиссионная система Диатон, Интерюнис
9.1	Капиллярный	Изделия из металлов (неферромагнитных), неметаллических материалов и композитные изделия любой конфигурации	Дефектоскопические комплексы ДК-1, ДК-4, ДК-6; дефектоскопы ДМК-4, ДМК-5, пенетранты ЗИГЛО ZL-1В, ZL-2; установка КД-33Л
9.2.3	Течеискания пузырьковый	Объекты под давлением, погружаемые в жидкость либо обмыленные	
9.2.4	Течеискания манометрический	Объекты вакуумированные либо под давлением	Насосы, вакуумные насосы, манометры
9.2.8	Течеискания люминесцентно-капиллярный	Перегородки, стенки изделий, имеющие доступ с обеих сторон	Нориол с керосином, пенетрант, ультрафиолетовые светильники (ртутно-кварцевые лампы ЛУФ-4-1, ДРУФ), установка КД-33Л

1.10. Методология технической диагностики

Методология диагностики технических объектов включает в себя описание их бездефектных состояний и состояний с различными видами дефектов, выбор контролируемых параметров состояния и/или диагностических сигналов, оптимизацию диагностических параметров и средств их измерения и, наконец, составление алгоритмов постановки диагноза и прогноза.

При составлении подобных алгоритмов необходимо классифицировать возможные состояния объектов. Чаще всего эти состояния разбиваются на два подмножества – работоспособные и неработоспособные. Для подмножества работоспособных состояний составляются алгоритмы определения и прогноза степени работоспособности объекта, поиска дефектов, а для подмножества неработоспособных состояний – только алгоритмы поиска неисправностей (дефектов). В таком случае процесс формирования технического диагноза может быть представлен в виде структурной схемы (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Процесс формирования технического диагноза

Виброакустическая диагностика имеет свою особенность – она дает наиболее эффективные результаты в основном тогда, когда объект может функционировать и в нем формируются колебательные силы, возбуждающие вибрацию и/или шум. Именно поэтому в виброакустической диагностике множество состояний объекта разбивается

минимум на два подмножества – множество бездефектных состояний и множество состояний с дефектами (неисправностями), при которых объект остается работоспособным, но степень его работоспособности снижается. Те же состояния, когда объект теряет работоспособность, исключаются из рассмотрения в виброакустической диагностике и ими занимаются обычно в рамках другой области техники, называемой дефектацией.

Алгоритмы диагностики составляются при следующих допущениях.

1. Объект может находиться в конечном множестве состояний S , разделяемом на два подмножества S_1 (бездефектные состояния, различающиеся, например, режимами работы объекта) и S_2 (состояния с различными видами дефектов, при которых объект остается работоспособным). Каждое состояние из подмножества S_2 отличается степенью или запасом работоспособности.

Состояние объекта характеризуется совокупностью диагностических показателей d_1, d_2, \dots, d_k , которая представляет собой вектор состояния D :

$$D = (d_1, d_2, \dots, d_k).$$

Диагностические показатели могут представлять собой параметры или характеристики. В качестве параметров могут быть использованы, например, уровень вибрации или акустического шума, давление, сопротивление изоляции, температура и т.п. В качестве характеристик могут быть использованы показатели, характеризующие форму кривой, например, огибающая спектра сигнала вибрации или шума («маска»), затухание, крутизна и т.п.

Условие работоспособности задают областью работоспособности исходя из следующих предположений:

- вектор состояний оборудования определен;
- существует номинальный вектор состояний;
- отклонения вектора состояний от номинального допускаются только в определенных пределах;
- допустимые отклонения определяют область работоспособности.

2. Условия работоспособности задают по-разному для случаев использования в качестве диагностического показателя параметров или характеристик.

Если в качестве диагностического показателя используется один параметр, то условия работоспособности задаются неравенствами, ограничивающими его значение с одной или с двух сторон. Таким образом, объект работоспособен, если все неравенства выполняются:

$$d_i > d_{in}, \quad d_i < d_{ie},$$

или

$$d_{in} < d_i < d_{ie},$$

где d_i , d_{in} , d_{ie} – соответственно, текущее, нижнее допустимое и верхнее допустимое значения диагностического параметра.

3. Каждый из диагностических показателей состояния d_j может определяться по совокупности диагностических параметров d_{j1}, \dots, d_{jl} :

$$d_j = d_{j1}, \dots, d_{jl}.$$

4. Для каждого диагностического параметра d_i существует номинальное значение d_{oi} , область допустимых отклонений Δ_{oi} и предельное отклонение (порог опасного изменения параметра) Δ_i^{np} , при превышении которого объект считается неработоспособным и должен быть остановлен.

Объект считается бездефектным, если для каждого параметра выполняется неравенство

$$|d_i - d_{oi}| \leq \Delta_{oi},$$

где Δ_{oi} – порог допустимого отклонения.

Объект считается неработоспособным, если хотя бы для одного из параметров выполняется неравенство

$$|d_i - d_{oi}| > \Delta_i^{np},$$

где Δ_i^{np} – порог опасного изменения параметра.

Во всех других случаях объект имеет ограниченную работоспособность.

В качестве диагностических показателей могут использоваться не только параметры, но и характеристики объекта $y = f(x)$, где x и y – входная и выходная переменные соответственно. В последнем случае условие работоспособности объекта определяется степенью отклонения $\rho_p(f, \varphi)$ текущей характеристики $f(x)$ объекта от номинальной $\varphi(x)$:

$$\rho_p(f, \varphi) = \left[\int_a^b |f(x) - \varphi(x)|^p dx \right]^{\frac{1}{p}}, \quad p > 0,$$

где p – фиксированный параметр, определяющий критерий принятия решения о степени отклонения текущей характеристики от номинальной.

При $p = 1$ получаем оценку среднего отклонения (критерий среднего отклонения):

$$\rho_1(f, \varphi) = \int_a^b |f(x) - \varphi(x)| dx.$$

При $p = 2$ получим среднеквадратическое отклонение, т.е. большее отклонение будет иметь больший вес (критерий среднеквадратического отклонения):

$$\rho_2(f, \varphi) = \left[\int_a^b |f(x) - \varphi(x)|^2 dx \right]^{\frac{1}{2}}.$$

При $p = \infty$ основной вклад в выражение вносит только одно максимальное отклонение (критерий равномерного приближения):

$$\rho(f, \varphi) = \sup_{x \in (a, b)} |f(x) - \varphi(x)|;$$

В общем случае условие работоспособности представляется в виде:

$$\rho_p(f, \varphi) \leq \xi,$$

где ξ – допустимое отклонение.

Если характеристики $y = f(x)$ оцениваются по точкам на ограниченном интервале значений входной переменной $x \in a, b$, то условие работоспособности задают в виде неравенств для каждой точки:

$$|f(x_i) - \varphi(x_i)| < \xi_i; \quad i = \overline{1, n}.$$

Полагают, что объект работоспособен, если последние неравенства выполняются для всех без исключения точек, входящих в диапазон (a, b) .

Сложные объекты в целом оцениваются как работоспособные при условии работоспособности каждого его узла или структурной единицы.

В случаях ограниченной работоспособности контролируемого объекта при любой степени (запасе) его работоспособности задачами диагностики являются идентификация и прогноз развития имеющихся дефектов, определение интервала безаварийной работы или остаточного ресурса объекта.

1.11. Выбор диагностического сигнала

Оценить состояние оборудования можно по величинам свойств: механических (износ, деформация, перемещение и т.п.); электрических (напряжение, ток, мощность и др.); химических (состав газов, смазки и т.п.), а также по излучению энергии (тепловой, электромагнитной, акустической и т.п.). Эти величины, преобразованные, как правило, в электрические сигналы, обрабатывают специальные технические средства, а оператор принимает решение об изменении режима работы, о возможности дальнейшего использования оборудования, о мерах, которые необходимо принять для поддержания надежности, а при полной автоматизации оператор получает рекомендации, что делать.

При выборе диагностического сигнала для решения такой сложной задачи как оценка технического состояния машины или оборудования с определением места возникновения дефекта, идентификацией вида дефекта и степени его развития, а также прогнозирование изменения технического состояния объекта, требуется большой объем диагностической информации.

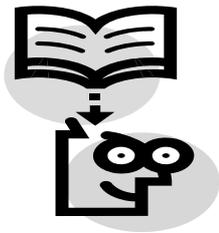
Такие диагностические сигналы как температура, давление, напор жидкости, наличие металлических частиц в смазке и т.п., можно характеризовать практически только одним параметром – их величиной (если не говорить о присущих большинству сигналов таких параметрах, как, например скорость их изменения, инерционность и т.п.). Значительно больший объем диагностической информации содержится в акустическом или гидродинамическом шуме и вибрации – это их общий уровень, уровни в определенных полосах частот, соотношения между этими уровнями, амплитуды, частоты и начальные фазы каждой составляющей, соотношения между амплитудами и частотами и т.д. Таким образом, именно сигналы вибрации и шума в наибольшей степени удовлетворяют требованию, предъявляемому к диагностическим сигналам для решения задач глубокой диагностики и прогноза состояния машин.

Еще одним важным обстоятельством в пользу выбора вибрации машин и оборудования в качестве диагностического сигнала является то, что дополнительные колебательные силы, возникающие из-за дефекта, возбуждают вибрацию непосредственно в месте его появления. Вибрация практически без потерь распространяется до точки ее измерения и, поскольку машина «прозрачна» для вибрации, появляется возможность исследовать колебательные силы, действующие в работающей машине. Это позволяет диагностировать ее на рабочем месте без остановки и разборки.



Контрольные вопросы

1. Какие виды технического обслуживания Вы знаете?
2. Какова сущность метода обслуживания по регламенту?
3. Какова идея ОФС?
4. Назовите основные преимущества ОФС по сравнению с ППР.
5. Каковы особенности проактивной системы технического обслуживания и каковы ее компоненты?
6. Дайте определение понятиям «мониторинг технического состояния» и «диагностика».
7. Что такое диагностический признак и диагностический параметр? Приведите примеры.
8. Чем отличается диагноз от прогноза?
9. По какому принципу работает любая система технической диагностики?
10. Какое значение параметра технического состояния называется эталонным и какое пороговым?
11. Назовите способы определения эталонных и пороговых значений параметров состояния.
12. Какие способы прогнозирования состояния объектов Вы знаете?
13. Дайте определение функциональной диагностики.
14. Приведите примеры тестовой диагностики.
15. Какие виды неразрушающего контроля технического состояния оборудования и качества изделий Вы знаете?
16. Какие методы неразрушающего контроля используются в горной промышленности для определения состояния несущих конструкций, электромеханического оборудования, объектов под давлением?
17. Напишите уравнение бездефектности объекта.
18. Напишите уравнение неработоспособности объекта.
19. Представьте условие работоспособности объекта в общем виде.
20. Почему сигналы вибрации в наибольшей степени позволяют реализовать глубокую диагностику и прогноз состояния вращающихся машин?



Глава 2 ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ОБ АКУСТИЧЕСКОМ ШУМЕ И ВИБРАЦИИ

Акустический шум и вибрация представляют собой разновидность колебаний в упругих средах и структурах. Простейший сигнал акустического шума или вибрации – гармоническое колебание (рис. 2.1).

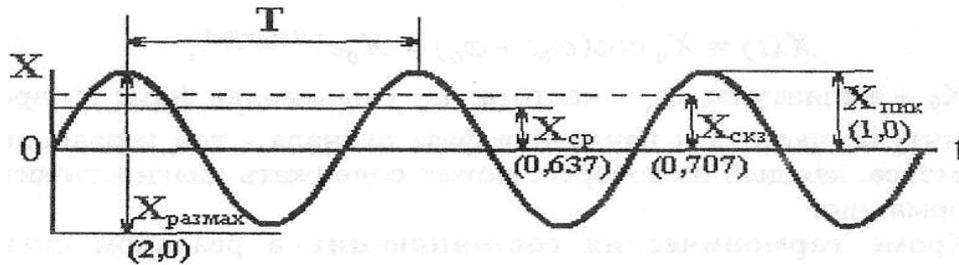


Рис. 2.1 Простейшее гармоническое колебание

Для количественного определения величин акустического шума или механических колебаний во временной области можно использовать различные значения [18]:

$X_{\text{пик}}$ – пиковое значение, которое характеризует максимальное значение колебаний, но не отображает его развитие во времени;

$$X_{\text{скз}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} - \text{среднеквадратическое (эффективное) значение, представляющее собой квадратный корень из усредненных во времени возведенных в квадрат мгновенных значений. Это значение имеет особую важность, так как связано с энергией, а, следовательно, с разрушающей способностью колебаний (T – период колебания). Для гармонических колебаний}$$

Для гармонических колебаний

$$X_{\text{скз}} = X_{\text{пик}}/2;$$

$$X_{\text{сред}} = \frac{1}{T} \int_0^T |X| dt - \text{среднее абсолютное значение, связанное с развитием механических колебаний во времени;}$$

развитием механических колебаний во времени;

$$X_{\text{размах}} - \text{размах колебаний (двойная амплитуда);}$$

$K = X_{\text{пик}} / X_{\text{скз}}$ – пик-фактор (амплитудный коэффициент), числовое значение которого тем больше, чем больше выражен импульсный или случайный характер колебаний. Для синусоидальных колебаний $K = \sqrt{2}$.

Для простейшего гармонического колебания можно записать

$$X(t) = X_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = X_0 e^{-j(\omega_0 t + \varphi_0)},$$

где X_0 – амплитуда; ω_0 – частота; φ_0 – начальная фаза; t – время.

Амплитуда, частота и начальная фаза сигнала – три независимых параметра, каждый из которых может содержать диагностическую информацию.

Кроме *гармонических составляющих* в реальном сигнале акустического шума или вибрации машины либо оборудования присутствуют, как правило, и *случайные составляющие* (рис. 2.2).

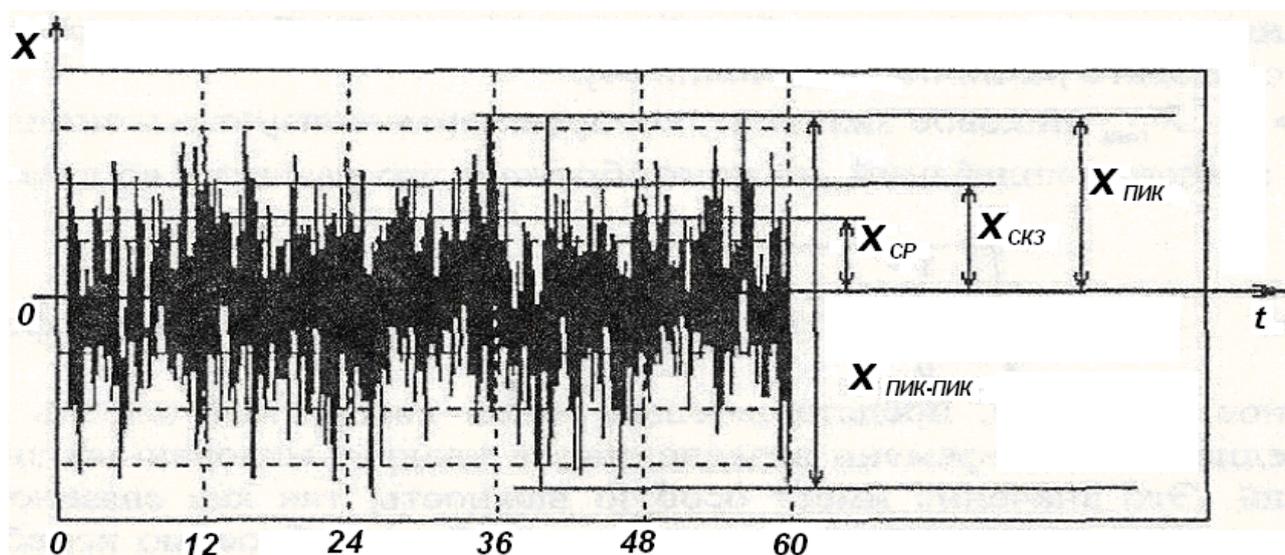


Рис. 2.2. Случайный сигнал

Случайный виброакустический сигнал может принимать любое значение в определенном диапазоне, поэтому его нельзя характеризовать амплитудой, частотой и фазой. Он характеризуется *пиковым значением, среднеквадратическим значением, средним значением и значением пик-пик* (значением от пика до пика).

Реальный сигнал акустического шума или вибрации машины представляет собой совокупность гармонических и случайных составляющих (рис. 2.3).

Достаточно сложно получить диагностическую информацию по форме сигнала. Наиболее часто временной сигнал используется для выявления дефектов, которые приводят к кратковременному изменению энергии, т.е. к появлению ударных импульсов.

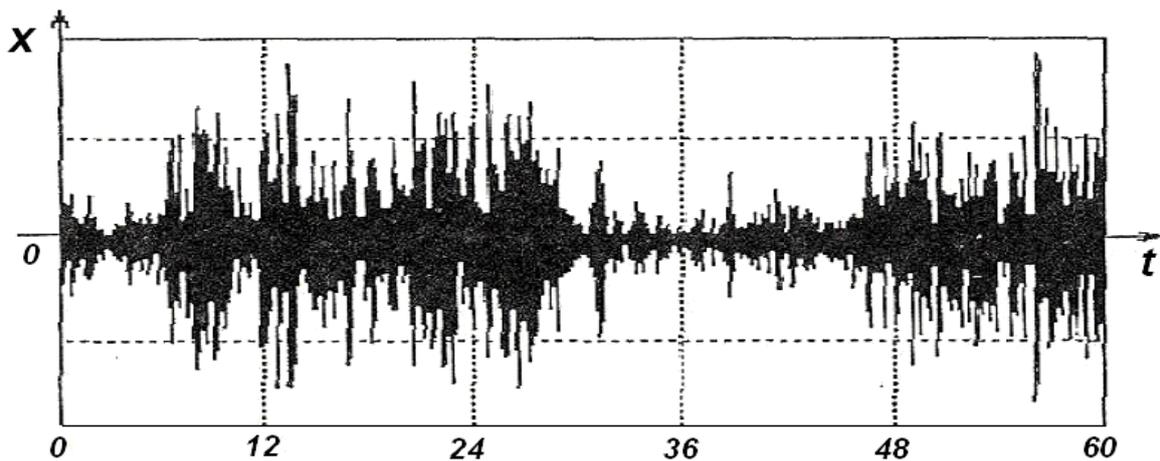


Рис. 2.3. Сигнал вибрации электрической машины

Для обнаружения дефектов, не приводящих к кратковременному изменению энергии сигнала, часто используют спектральное представление сигнала, т.е. разложение его на простые составляющие (тональные). Так, спектр простейшего гармонического колебания имеет вид, представленный на рис. 2.4 а (справа).

Если сигнал – комбинация двух простейших гармонических составляющих с разными частотами и амплитудами (рис. 2.4 а, б), то его спектр имеет вид, представленный на рис.2.4 в, где явно видно наличие именно двух гармонических составляющих, у которых легко определяются их частоты и амплитуды.

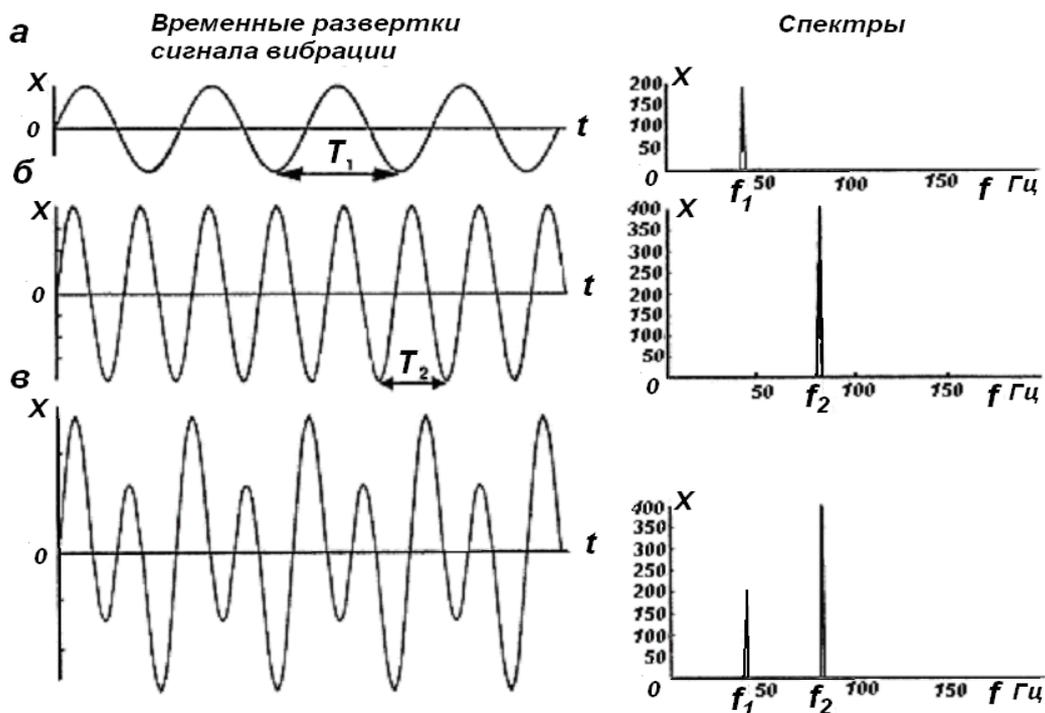


Рис. 2.4. Временные сигналы и их спектры

Виброакустический сигнал представляет собой совокупность многих составляющих акустического шума или вибрации, связанных с техническим состоянием машины или оборудования. Как уже было сказано, реальный сигнал шума или вибрации содержит, как правило, сумму гармонических составляющих и случайных составляющих (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Временной сигнал вибрации электрической машины и ее спектр

Спектральное представление периодических сигналов, а именно такими является множество сигналов акустического шума и вибрации в установившихся режимах работы вращающихся машин и оборудования, можно получить, используя разложение в ряд Фурье:

$$X(t) = \sum_{k=0}^{\infty} X_k \cos(k\omega t + \varphi_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t),$$

где $\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt$ – среднее значение сигнала $X(t)$, как правило, равно нулю;

a_k и b_k – коэффициенты ряда Фурье, связанные с временной функцией сигнала $X(t)$ следующими выражениями:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T X(t) \cos k\omega t dt, \quad k = 0, 1, 2, \dots;$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T X(t) \sin k\omega t dt, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Для амплитуды k -й гармоники имеем

$$X_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2},$$

для начальной фазы k -й гармоники

$$\varphi_k = \text{arctg}(b_k / a_k).$$

Для стационарных случайных сигналов также можно использовать спектральное преобразование. Только в этом случае используется не разложение в ряд Фурье, как для периодических сигналов, а интегральное преобразование Фурье:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) e^{-j\omega t} dt;$$

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} dt,$$

где $S(\omega)$ – спектральная плотность, характеризующая распределение энергии по частоте.

2.1. Акустический шум

Акустический шум – это колебания воздушной среды в диапазоне приблизительно от 16 Гц до 20 кГц.

2.1.1. Происхождение и классификация акустического шума

В зависимости от происхождения различают шум:

- *механический*, возникающий при движении, соударении, трении деталей машин и оборудования;
- *аэро- и гидродинамический*, возникающий при движении газа, пара, жидкости в результате пульсаций давления из-за турбулентного

перемешивания потоков, движущихся с разными скоростями в свободных струях или из-за турбулизации потока у границ обтекаемого тела;

- *термический*, возникающий при турбулизации потока, при горении или мгновенном изменении тепла, приводящего к мгновенному повышению давления (взрыв).

Производственные шумы классифицируются:

- по *спектральному составу* (низкие частоты до 300 Гц, средние от 300 Гц до 800 Гц и высокие выше 800 Гц);
- по *характеру спектра* (широкополосные и тональные);
- по *временным характеристикам* (стабильные, прерывистые и импульсные).

В зависимости от среды, в которой распространяется шум, различают корпусный (структурный) и воздушный шум.

2.1.2. Волновое уравнение

Акустическое поле в любой момент времени и в любой точке пространства полностью определяется зависимостью одной из трех взаимосвязанных величин:

x – вектор смещения частицы среды из положения покоя;

$\dot{x} = dx/dt$ – вектор колебательной скорости;

P – звуковое давление в среде.

Каждая из этих величин в любой момент времени и в каждой точке пространства удовлетворяет волновому уравнению. Так, для звукового давления волновое уравнение имеет вид:

$$\nabla^2 P = \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2},$$

где $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ – оператор Лапласа;

C_0 – скорость распространения волны (скорость звука в воздухе $C_0 \approx 330$ м/с).

Такому же волновому уравнению удовлетворяют вектор смещения x и вектор колебательной скорости \dot{x} .

С помощью волнового уравнения можно получить распределение в пространстве и во времени любой из характеризующих акустическое поле величин (P, x, \dot{x}) в выбранной системе координат. Наиболее часто используемые системы координат – плоская, сферическая и цилиндрическая.

При большом расстоянии от источника звука гармоническое колебание можно представить в виде **плоской** волны. Плоская волна (рис. 2.6) – это продольная волна, зависящая только от одной декартовой координаты и времени, тогда

$$\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0.$$

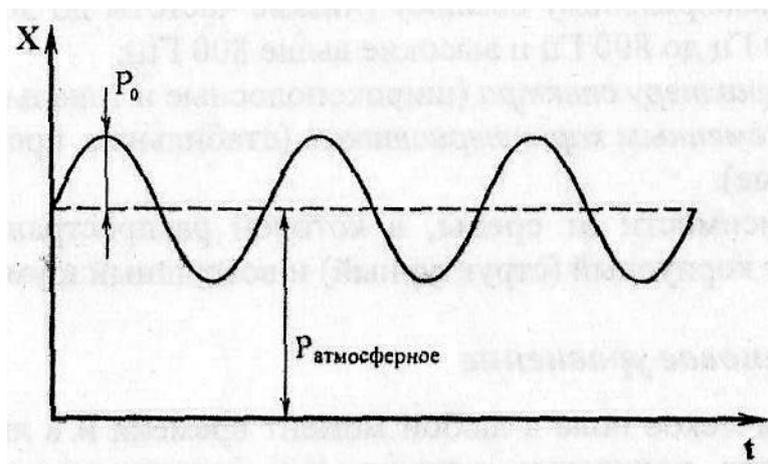


Рис. 2.6. Плоская волна

В этом случае волновое уравнение продольной волны, распространяющейся в упругой среде без учета потерь для однородной бесконечной среды, примет вид:

$$\frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{C_0} \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial t^2},$$

а его решение:

$$P(x,t) = P_0 \exp j[\omega(t - x/c_0)],$$

где P_0 – амплитуда переменной составляющей

ωt – фаза временная;

$\omega(x/c_0)$ – фаза пространственная.

В безграничной и идеальной среде скорость распространения волны C_0 определяется только параметрами среды:

$$C_0 = \sqrt{k/\rho},$$

где k – модуль всестороннего сжатия, Па;

ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Интенсивность звука связана с давлением выражением

$$J = P^2 / \rho c_0.$$

Здесь ρc_0 – волновое сопротивление, кг/м²·с (для воздуха $\rho c_0 \approx 440$ кг/м²·с).

Математическое описание акустического шума в реальных условиях значительно усложняется из-за поглощения звука, его многократного отражения (реверберации) и преломления.

2.1.3. Особенности восприятия акустического шума человеком

Главная особенность слуха человека – логарифмическая зависимость восприятия звука от величины переменного давления в воздухе. Эта особенность позволяет человеку эффективно воспринимать звук в диапазоне изменения величины до $10^6 \dots 10^7$ раз.

Вторая особенность заключается в том, что чувствительность органов слуха человека зависит от частоты звука, как показано (рис. 2.7). Диапазон слышимых частот – приблизительно от 16 Гц до 20 кГц. Максимальная чувствительность органов слуха в диапазоне частот приблизительно 1 ... 6 кГц.

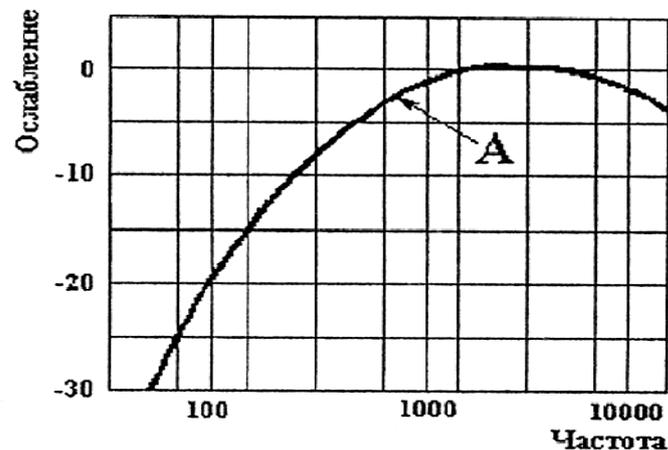


Рис. 2.7. Кривая равной громкости *A*

Следует отметить, что большинство измерительных и анализирующих акустический шум приборов имеет так называемый «взвешивающий» фильтр с амплитудно-частотной характеристикой, подобной кривой *A*, т.е. аналогично тому, как человек воспринимает звук.

Третья особенность – возможность различать на слух частоты (число различаемых по частоте поддиапазонов составляет приблизительно 150...200).

Говоря о диагностических возможностях акустического шума, можно привести слова специалистов одной из известных в этой области фирм мира – датской фирмы «Брюль и Кьер»: «Для многих музыка – это шум, для нас шум – это музыка».

Однако акустический шум обладает и вредным воздействием на человека, которое можно разделить в первом приближении на три основные степени: первая характеризуется возникновением неприятных ощущений, вторая – комплексной реакцией организма, связанной с возбуждением вегетативной нервной системы через нервные центры слуховых органов, а третья – с опасностью возникновения профессиональной шумовой болезни при длительной работе в условиях повышенного шума. Использование акустического шума в качестве диагностического сигнала имеет и ряд трудностей, связанных со следующими обстоятельствами:

- со сложностями разделения шума, создаваемого разными источниками (в этом случае целесообразно применять узконаправленные микрофоны);
- с искажениями характеристик потока и возникновением дополнительных шумов обтекания микрофонов или гидрофонов из-за установки их в потоке.

Для преодоления этих трудностей можно использовать в качестве диагностического сигнала вибрацию стенок потокосоздающих и теплопроводящих систем.

2.2. Вибрация

Вибрацией называются механические колебания тела относительно опорного положения равновесия.

Качественная конструкция машин и оборудования характеризуется, как правило, относительно низкими уровнями механических колебаний. Однако в процессе эксплуатации происходит естественный износ машин и оборудования, что сопровождается оседанием фундамента, деформацией и износом деталей, нарушением центровки валов, увеличением зазоров и, в конечном итоге, повышением вибрации. Элементы машины взаимодействуют друг с другом, и через конструкцию происходит рассеивание энергии в виде механических колебаний.

Источником *вибрации* элементов машин и оборудования являются внутренние вынуждающие силы, в значительной степени зависящие от их технического состояния – наличия допусков, зазоров, контактов поверхностей отдельных деталей машин и оборудования, сил, возникающих при вращении и возвратно-поступательном движении неуравновешенных элементов и деталей. Существенным источником вибрации, а, следовательно, и акустического шума могут стать механические колебания даже с небольшой амплитудой, так как они могут вызывать резонансные колебания других элементов машин и оборудования.

Число полных циклов движения тела за единицу времени, т.е. за секунду, называется частотой и выражается в герцах (Гц).

Механические колебания могут быть простыми и могут содержать только одну составляющую на определенной частоте, например, движение камертона (рис. 2.8 а) [18]. Одновременно колебания могут развиваться на двух разных частотах, например, колебания двигателя внутреннего сгорания (рис. 2.8 б). Но, как правило, вибрация реальных машин и оборудования представляет собой сложные механические колебания со многими составляющими на разных частотах, например, колебания редуктора (рис. 2.8 в).

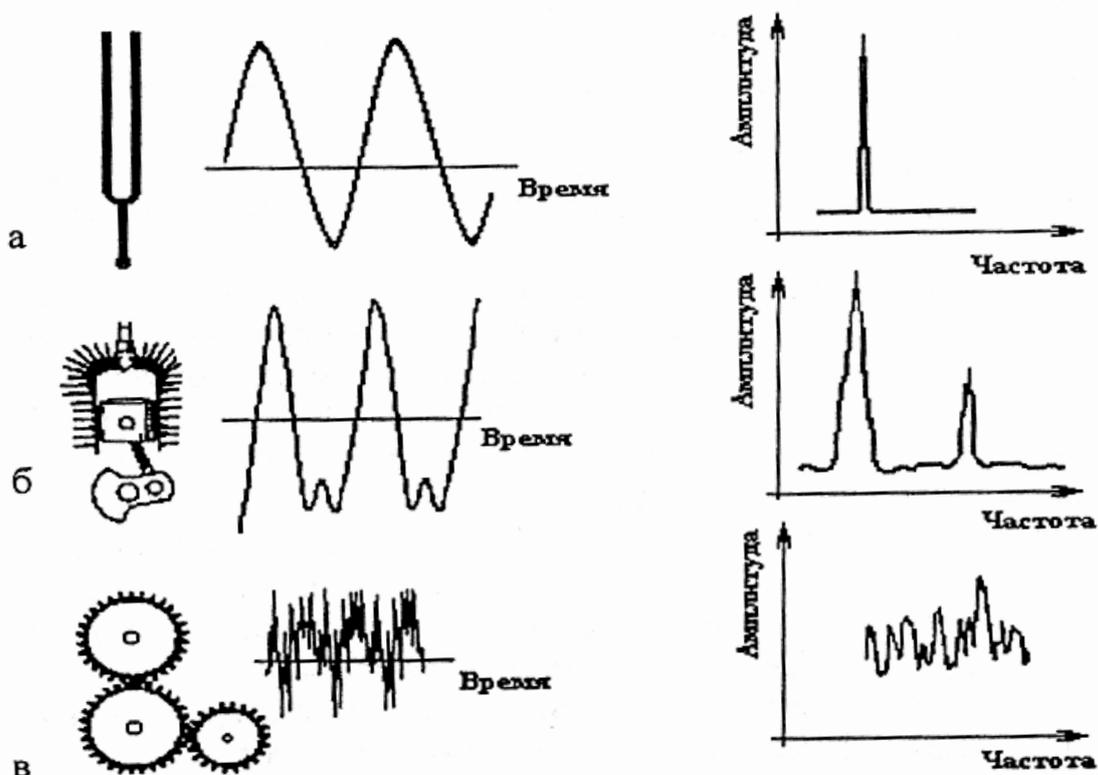


Рис. 2.8. Природа механических колебаний

Вибрацию любого объекта можно характеризовать вибросмещением x , виброскоростью $\dot{x} = dx/dt$ или виброускорением $\ddot{x} = d^2x/dt^2$, (иногда еще и резкостью – производной от виброускорения $\ddot{\ddot{x}} = d\ddot{x}/dt$).

Для гармонического колебания:

$$x(t) = x_0 \sin(\omega t + \varphi_0);$$

$$\dot{x}(t) = x_0 \omega \cos(\omega t + \varphi_0) = x_0 \omega \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$\ddot{x}(t) = -x_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) = x_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi).$$

Обозначим

$$d = x_0, \quad v = x_0 \omega, \quad a = x_0 \omega^2$$

соответственно, амплитуды виброперемещения, виброскорости и виброускорения.

Как видно из приведенных выражений, относительно вибросмещения виброскорость имеет опережение фазы на 90° , виброускорение – на 180° (рис. 2.9) [3].

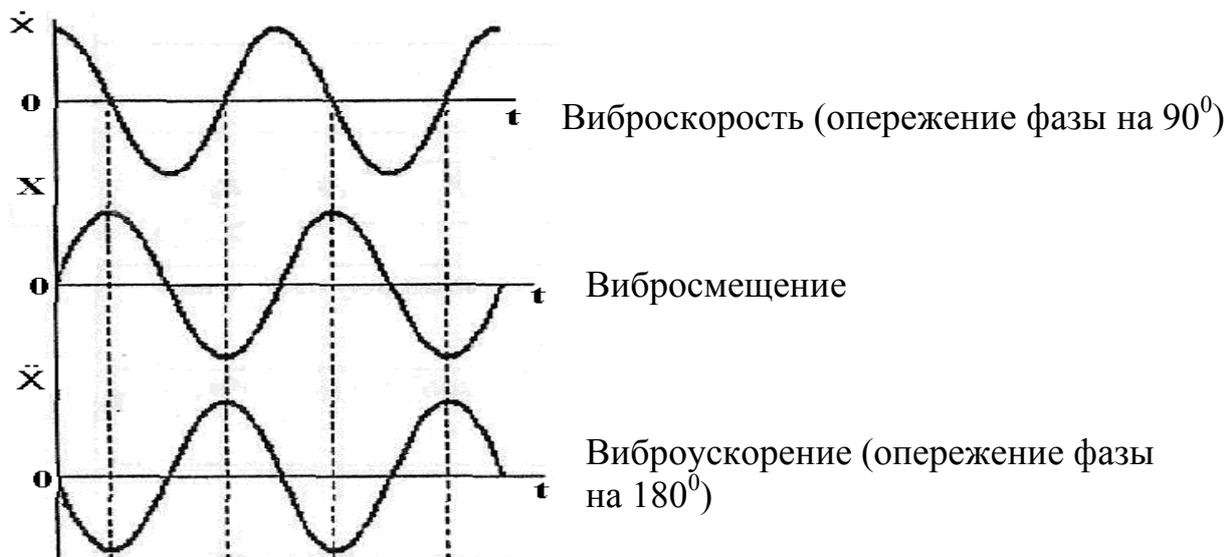


Рис. 2.9. Опережение фазы виброскорости и виброускорения относительно вибросмещения

Виброскорость гармонических колебаний может быть определена путем деления их виброускорения на $2\pi f$, а вибросмещение – делением виброускорения на $4\pi^2 f^2$:

$$v = \frac{a}{2\pi f} = \int a dt;$$

$$d = \frac{a}{4\pi^2 f^2} = \int v dt.$$

Современные виброизмерительные приборы автоматически осуществляют эти операции электронными или цифровыми интеграторами.

Очевидно, что виброускорение целесообразно измерять на высоких частотах, т.к. его амплитуда пропорциональна квадрату круговой частоты ω^2 . Аналогично амплитуда скорости механических колебаний пропорциональна круговой частоте ω в первой степени, что свидетельствует о целесообразности измерения виброскорости, если измерительный прибор имеет ограниченный динамический диапазон или если спектр виброскорости машины либо оборудования относительно равномерный по частоте. Виброперемещение наиболее часто используется для измерения низкочастотных механических колебаний (рис. 2.10).

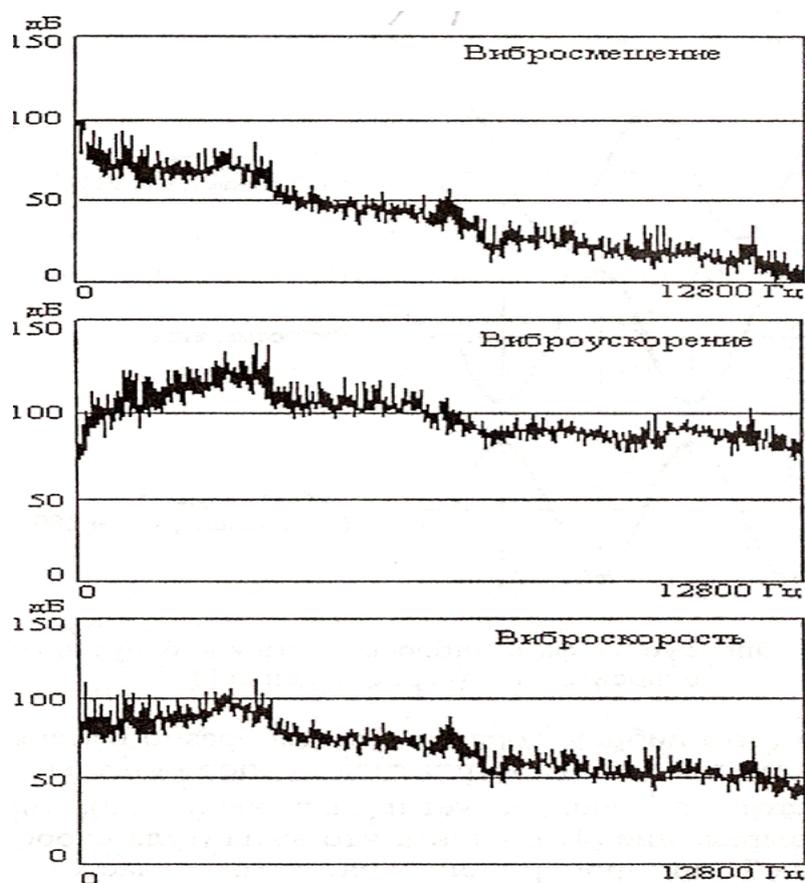


Рис. 2.10. Спектры виброперемещения, виброскорости и виброускорения асинхронного двигателя

При диагностировании машин и оборудования следует разделять вибрацию на низкочастотную, среднечастотную, высокочастотную и ультразвуковую (рис. 2.11). Это обусловлено тем, что в каждой области частот вибрация имеет свои физические особенности, оказывающие значительное влияние на выбор вибродиагностических параметров и методов диагностирования.



Рис. 2.11. Диапазоны вибрации

2.2.1. Низкочастотная вибрация

Основной особенностью низкочастотной вибрации является то, что под действием вынуждающей силы машина или ее элементы колеблются как единое целое. При математическом описании таких колебаний объект диагностирования может быть представлен конечным числом жестких тел с упругими связями между ними, т.е. системой с сосредоточенными параметрами. В зависимости от размеров и сложности формы машин или оборудования низкочастотные колебания имеют частоты ниже 100...300 Гц. Однако эта граница может несколько меняться в зависимости от частот колебательных сил, действующих в машине.

На рис. 2.12 а схематично показан механизм, упруго закрепленный на фундаменте с помощью виброизоляторов.

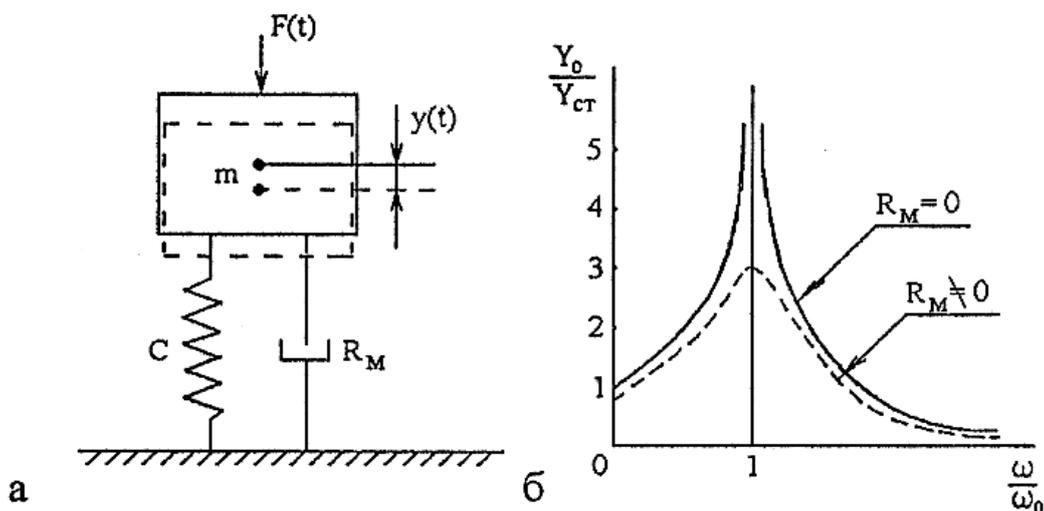


Рис. 2.12. Механизм как простейшая колебательная система

Под действием гармонической вынуждающей силы $F(t)$ с амплитудой F_0 он совершает одномерные в вертикальном направлении колебания, описываемые дифференциальными уравнениями второго порядка вида

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + R_m \frac{dy(t)}{dt} + Cy(t) = F(t),$$

где m – масса механизма;

C – суммарная жесткость виброизоляторов;

R_m – механическое сопротивление, определяющее активные потери колебательной энергии;

$y(t)$ – смещение инерционного элемента от положения равновесия;

$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$ – инерционные силы;

$R_m \frac{dy(t)}{dt}$ – силы трения;

$Cy(t)$ – упругие силы;

$F(t) = F_0 \cos \omega t$ – вынуждающая сила.

Колебания механизма будут также гармонического вида:

$$y(t) = Y_0 \cos(\omega t + \varphi).$$

Амплитуда колебаний без учета активных потерь, когда $R_m \rightarrow 0$, имеет вид:

$$Y_0 = \frac{F_0}{C - m\omega^2} = \frac{F_0}{C} \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}},$$

где $F_0/C = Y_{cm}$ – статическая деформация виброизоляторов под действием статической силы, равной F_0 ;

$\omega_0 = \sqrt{C/m}$ – собственная частота колебаний механизма на виброизоляторах.

Таким образом, амплитуда низкочастотных колебаний механизма Y_0 зависит от параметров вынуждающей силы (ее амплитуды F_0 и частоты ω) и от параметров канала передачи (суммарной жесткости виброизоляторов C и собственной частоты колебаний механизма на виброизоляторах ω_0).

На рис. 2.12 б показана зависимость амплитуды низкочастотных колебаний механизма от частоты при постоянной амплитуде вынуждающей силы. Как видно из рисунка, на резонансе (собственная час-

тота ω_0) амплитуда колебаний резко увеличивается. Активные потери в упругих элементах ограничивают амплитуду резонансных колебаний (рис. 2.12 б, пунктирная линия).

Низкочастотная вибрация механизмов, машин и оборудования содержит преимущественно гармонические составляющие, создаваемые вынуждающими силами, часть которых зависит от технического состояния объектов. Диагностическими параметрами низкочастотных составляющих вибрации чаще всего являются амплитуды колебаний (размах) на определенных частотах, пропорциональные величине соответствующих вынуждающих сил. Иногда в качестве диагностического параметра используется величина собственной частоты колебаний ω_0 , характеризующая, в первую очередь, свойства упругих элементов.

Выше были рассмотрены особенности одномерных гармонических колебаний. На самом деле объект имеет в пространстве шесть степеней свободы (три поступательных и три вращательных). Сравнение колебаний по каждой из них, а также сопоставление соответствующих им собственных частот дает возможность расширения объема диагностической информации, получаемой из анализа низкочастотной вибрации.

Основные трудности диагностирования машин и оборудования по низкочастотной вибрации связаны, во-первых, с тем, что не все элементы имеют упругие связи, т.е. не все установлены на виброизоляторах, что значительно усложняет описание колебательной системы. Во-вторых, собственные частоты элементов машин или оборудования точно неизвестны, а от их величин в значительной степени зависит амплитуда колебаний, являющаяся, как правило, основным диагностическим параметром.

2.2.2. Среднечастотная вибрация

Характерная особенность *среднечастотной вибрации* механизмов и конструкций – невозможность представить объект в виде системы с сосредоточенными параметрами, т.е. выделить в ней элементы, имеющие только инерционные и только упругие свойства. Это определяется тем, что каждый элемент на средних частотах обладает и теми, и другими свойствами. Вынужденные колебания в этом случае еще нельзя представить в виде распространяющейся волны, однако в пространстве они уже приобретают собственные формы, отражающие свойства колебательной системы.

Собственные формы колебаний хорошо иллюстрируются вынужденными колебаниями струны, натянутой между двумя неподвижными точками (рис. 2.13).

Колебания струны зависят от двух координат, и уравнение колебаний по форме левой его части совпадает с волновым уравнением:

$$m \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = F(x,t),$$

где m – масса струны на единицу длины;

T – сила натяжения струны.

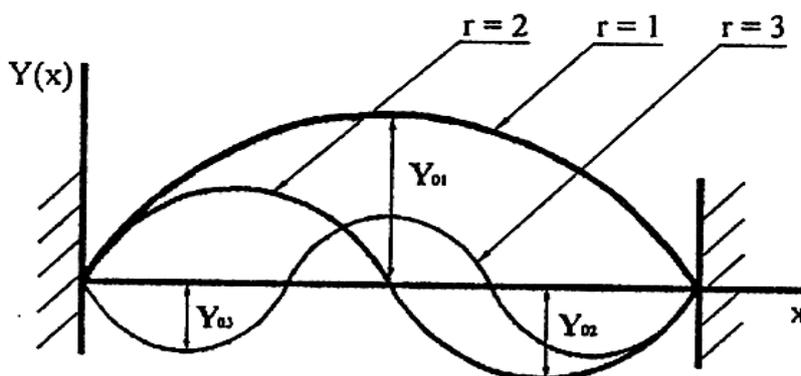


Рис. 2.13. Собственные формы колебаний струны

Если на низких частотах вынуждающая сила описывалась суммой гармонических составляющих и уравнение решалось только для одной из них, то в уравнении колебаний струны для каждой гармонической составляющей вынуждающая сила раскладывается еще по собственным формам (на синусные и косинусные составляющие:

$$F(x,t) = \sum_{r=1}^{\infty} a_r F_0 \sin r \frac{\pi}{l} x \cos(\omega t + \varphi),$$

где $F(x,t)$ – гармоническая вынуждающая сила;

F_0 – ее амплитуда; ω – частота;

a_r – коэффициент разложения амплитуды по собственным формам;

r – порядок колебаний, равный числу полувольт на длине струны;

l – длина струны между точками закрепления.

Колебания струны могут быть представлены в виде:

$$y(x,t) = \sum_{r=1}^{\infty} Y_{or} \sin r \frac{\pi}{l} x \cos(\omega t + \varphi),$$

где Y_{or} – амплитуда пространственной составляющей порядка r .

Для каждой формы колебаний существует собственная частота колебаний, равная

$$\omega_{or} = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{m}} r.$$

Большое число собственных форм колебаний не только целой машины или оборудования, но и отдельных их узлов затрудняет определение амплитуд вынуждающих сил по результатам измерения амплитуды колебаний на определенной частоте, особенно, если собственные частоты отдельных узлов находятся в области средних частот, а именно: в диапазоне от 100–300 Гц до 1–3 кГц. Это усложняет выделение диагностической информации, заложенной в пространственных характеристиках вибрации, поэтому параметры вибрации в области средних частот редко используются в качестве диагностических. Исключением является случай, когда у исправного объекта одна из составляющих вибрации отсутствует и появляется лишь при наличии определенного вида дефекта.

2.2.3. Высокочастотная вибрация

Основная особенность *высокочастотной вибрации* как машины в целом, так и ее отдельных узлов и деталей – представление ее в виде волновых процессов. В отличие от особенностей распространения упругих волн в жидкостях и газах в виде продольных волн, упругие свойства твердых сред определяются деформациями сжатия и сдвига. В безграничной упругой среде может существовать как продольная, так и поперечная волна.

Волновое уравнение, позволяющее получить полное описание обоих видов волн, аналогично волновому уравнению для газа и жидкости. Так, для продольной волны оно имеет вид:

$$C_{ox}^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1 - \chi}{(1 + \chi)(1 - 2\chi)};$$

где $U(x, t)$ – смещение частиц относительно положения равновесия;

x – направление распространения волны;

C_{ox} – скорость распространения продольной волны. Для поперечной волны имеем:

$$\frac{\partial^2 U_y(x, t)}{\partial x^2} - \frac{1}{C_{oy}^2} \frac{\partial^2 U_y(x, t)}{\partial t^2} = 0,$$

где y – направление, перпендикулярное направлению распространения волны;

C_{oy} – скорость распространения поперечной волны.

Скорость распространения упругой волны в безграничной среде связана с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона χ соотношениями:

$$C_{ox}^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1 - \chi}{(1 + \chi)(1 - 2\chi)};$$

$$C_{oy}^2 = \frac{E}{\rho 2(1 + \chi)}.$$

Если объем упругой среды ограничен, что имеет место при распространении высокочастотной вибрации по элементам машин или оборудования, и при условии, что эти элементы могут быть представлены в виде стержней, пластин и т.п., то и виды распространяющихся волн, их скорость и потери при распространении будут зависеть от граничных условий, т.е. от формы узла и механических свойств материала. Например, при распространении вибрации по стержню возникают продольные, поперечные и крутильные волны, а по пластине – продольные и поперечные волны. Следует отметить, что скорости распространения волн могут зависеть от координаты.

Сложность машин и оборудования как колебательных систем на высоких частотах приводит к тому, что параметры колебательных систем в качестве диагностических используются при диагностировании машин или оборудования в процессе их эксплуатации крайне редко. К тому же они не обеспечивают высокой эффективности обнаружения дефектов. Однако при изготовлении и ремонте отдельных деталей такие методы виброакустического неразрушающего контроля, основанные на сравнении скоростей распространения высокочастотных упругих волн, измерении потерь при их распространении, отражающей способности и т.д., могут быть эффективно использованы.

При диагностике машин и оборудования во время их эксплуатации в качестве диагностических параметров наиболее целесообразно использовать энергетические характеристики высокочастотной вибрации. Как известно, чем выше частота вибрации, тем больше ее затухание при распространении. Достаточно высокие потери вибрации при ее распространении обеспечивают получение всех преимуществ, свя-

занных с разделением источников вибрации на поверхности диагностируемого узла. Особое внимание следует обратить на тот факт, что высокочастотная вибрация обладает значительным объемом информации, содержащейся не только в величинах вибрационной энергии в разных полосах частот, но и в параметрах, характеризующих периодические и случайные флуктуации вибрационной энергии во времени.

2.3. Единицы измерения шума и вибрации

Для шума линейными единицами измерения являются:

паскаль (Па) – при измерении звукового давления;

ватт на метр квадратный (Вт/м²) – при измерении интенсивности звука.

Однако, как правило, шум измеряется в относительных логарифмических единицах – децибелах (дБ), что обусловлено удобством использования этих единиц измерения при изменении значений шума в большом диапазоне.

Уровень звукового давления, выраженный в децибелах, определяется формулой:

$$L_p = 20 \lg(P / P_{\text{пор}}),$$

где P – давление, Па;

$P_{\text{пор}} = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – порог слышимости человека на частоте 1 кГц.

Интенсивность звука J (Вт/м²) связана со звуковым давлением P выражением

$$J = P^2 / \rho c_0,$$

где ρc_0 – волновое сопротивление;

ρ – плотность среды, равная для воздуха приблизительно 1,29 кг/м³;

$c_0 \approx 330$ м/с – скорость звука в воздухе.

Пороговые значения давления и интенсивности выбраны такими, чтобы для воздуха в нормальных условиях интенсивность звука и звуковое давление в воздухе, выраженные в децибелах, совпадали.

Уровень интенсивности звука L_j (дБ) связан с линейными единицами измерения интенсивности следующим выражением:

$$L_j = 10 \lg(J / J_{\text{пор}}),$$

где J – интенсивность звука, Вт/м²;

$J_{\text{пор}} = 10^{-12}$ Вт/м² – пороговое значение интенсивности, полученное из выражения интенсивности звука при подстановке в числитель

значения порога слышимости человека на частоте 1кГц, т.е. $P_{\text{нор}} = 2 \cdot 10^{-5}$ Па, а в знаменатель – значения волнового сопротивления, равного для воздуха $\rho c_0 \approx 440 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$.

Еще одной единицей измерения шума, учитывающей свойства слуха человека, является фон. Это единица измерения, равная такому уровню гармонической (тональной) составляющей шума на частоте $f = 1 \text{ кГц}$, выраженному в дБ, который одинаков по восприятию ухом с измеряемым шумом. При этом измеряемый шум может иметь любой спектральный состав. Например, шум с уровнем 34 фона по своему восприятию эквивалентен тональному шуму на частоте $f = 1 \text{ кГц}$, уровень которого равен 34 дБ.

Некоторая неоднозначность определения такой единицы измерения шума как фон, учитывающей свойства слуха человека, частотная характеристика которого зависит от уровня звука, привела к тому, что вместо измерения шума в фонах стали измерять шум в децибелах по кривой A , т.е. в дБА. Приборы, имеющие амплитудно-частотную характеристику, соответствующую кривой A , в настоящее время являются широко распространенными, а уровень шума, измеряемого таким прибором (шумомером) или таким фильтром, обозначается дополнительным индексом (A), например, $L_A = 63 \text{ дБА}$.

Для вибрации линейными единицами измерения, согласно ГОСТам ИСО, являются:

- *микрометры* (мкм) – для измерения вибросмещения;
- *миллиметры в секунду* (мм/с) – для измерения виброскорости;
- *метры в секунду за секунду* (м/с²), или в единицах ускорения свободного падения $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ (м/с²(g)) – для измерения виброускорения.

Также как и для шума вибрация может выражаться в относительных единицах – децибелах. Тогда уровни колебаний соответственно виброперемещения, виброскорости и виброускорения (дБ), определяются следующим образом:

$$L_x = 20 \lg X / X_{\text{нор}};$$

$$L_{\dot{x}} = 20 \lg \dot{X} / \dot{X}_{\text{нор}};$$

$$L_{\ddot{x}} = 20 \lg \ddot{X} / \ddot{X}_{\text{нор}},$$

где $X_{\text{нор}}$, $\dot{X}_{\text{нор}}$, $\ddot{X}_{\text{нор}}$ – пороговые значения, равные до недавнего времени: $X_{\text{нор}} \approx 8 \cdot 10^{-12}$, м; $\dot{X}_{\text{нор}} \approx 5 \cdot 10^{-8}$, м/с; $\ddot{X}_{\text{нор}} \approx 3 \cdot 10^{-4}$, м/с².

В некоторых отраслях промышленности и до сих пор действительны эти пороговые значения.

Пороговое значение для виброскорости X_{nor} определяется из выражения, связывающего давление в упругой волне P со скоростью колебания частиц X при замене P на пороговое значение давления P_{nor} :

$$P_{nor} = \rho c_0 \dot{X}_{nor},$$

тогда для воздуха пороговое значение виброскорости равно

$$\dot{X}_{nor} = P_{nor} / \rho c_0 \approx 2 \cdot 10^{-5} / 440 \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}.$$

Следует отметить, что это пороговое значение \dot{X}_{nor} не зависит от частоты.

Пороговые значения виброперемещения и виброускорения выбраны таким образом, чтобы $X_{nor}, \dot{X}_{nor}, \ddot{X}_{nor}$, измеренные в одной точке и выраженные в децибелах, совпадали на частоте $f_0 = 1000$ Гц.

С учетом того, что для гармонического колебания амплитуда виброскорости по абсолютной величине равна

$$|\dot{X}(t)| = \omega_0 X_0,$$

получим величину порогового значения для виброперемещения X_{nor} , подставляя в это выражение вместо \dot{X} его пороговое значение, а именно: $\dot{X}_{nor} \approx 5 \cdot 10^{-8}$ м/с, и $\omega_0 = 2\pi f_0 = 6,28 \cdot 10^3$ рад/с,

где $f_0 = 1000$ Гц, тогда

$$X_{nor} = \dot{X}_{nor} / \omega_0 \approx 8 \cdot 10^{-12} \text{ м}.$$

Соответственно, величину порогового значения для виброускорения \ddot{X}_{nor} можно получить из выражения, связывающего амплитуду виброускорения по абсолютной величине $|\ddot{X}(t)|$ с амплитудой виброперемещения X_0 :

$$|\ddot{X}(t)| = \omega_0^2 X_0,$$

подставляя в это выражение вместо амплитуды виброперемещения колебаний его пороговое значение, тогда получим

$$\ddot{X}_{nor} = (2\pi \cdot 10^3)^2 \cdot 8 \cdot 10^{-12} \approx 3 \cdot 10^{-4}, \text{ м/с}^2.$$

В настоящее время в соответствии со стандартом ИСО-1683 широко используются следующие пороговые значения механических колебаний:

$$X_{\text{нор}} \approx 10^{-12} \text{ м};$$

$$\dot{X}_{\text{нор}} \approx 10^{-9} \text{ м/с};$$

$$\ddot{X}_{\text{нор}} \approx 10^{-6} \text{ м/с}^2,$$

приведенные не к частоте $f_0 = 1$ кГц, а для получения более простых значений к круговой частоте $\omega_0 = 1000$ рад/с ($f_0 = 159$ Гц). Это означает, что числовые значения уровней виброускорения, виброскорости и виброперемещения механических колебаний с синусоидальной формой волны и с угловой частотой $\omega_0 = 1000$ рад/с равны друг другу.

Таким образом, выражая амплитуды виброперемещения, виброскорости или виброускорения в децибелах, необходимо указывать уровень относительно определенного опорного значения, например, уровень ускорения 78 дБ относительно 10^{-6} м/с². При сравнении амплитуд механических колебаний достаточно указать лишь разность соответствующих уровней в децибелах, отнесенных к одному и тому же опорному значению. Например, один уровень выше другого на столько-то децибел, при этом опорное значение не указывается.

Для того чтобы в первом приближении оценить в размах уровень колебаний, приведенный в децибелах, достаточно запомнить только несколько значений, которые выделены в табл. 2.1 жирным шрифтом.

Так, если величину в децибелах представить в виде суммы или разности цифр, выделенных жирным шрифтом, можно перевести практически любое значение, выраженное в децибелах, в разы. Например:

$$12 \text{ дБ} = (6 + 6) \text{ дБ} \rightarrow (2 \cdot 2) = 4;$$

$$14 \text{ дБ} = (20 - 6) \text{ дБ} \rightarrow (10/2) = 5.$$

Таблица 2.1

Перевод величин вибрации из логарифмических единиц в линейные

$20\lg(x_1/x_2),$ дБ $\rightarrow x_1/x_2$	$20\lg(x_1/x_2),$ дБ $\rightarrow x_1/x_2$	$20\lg(x_1/x_2),$ дБ $\rightarrow x_1/x_2$
- 80 дБ $\rightarrow 0,0001$ раз	0 дБ $\rightarrow 1,00$ раз	10 дБ $\rightarrow 3,16$ раз
- 60 дБ $\rightarrow 0,001$ раз	1 дБ $\rightarrow 1,12$ раз	20 дБ $\rightarrow 10$ раз
- 40 дБ $\rightarrow 0,01$ раз	2 дБ $\rightarrow 1,26$ раз	40 дБ $\rightarrow 100$ раз
- 20 дБ $\rightarrow 0,1$ раз	3 дБ $\rightarrow 1,41$ раз	60 дБ $\rightarrow 1000$ раз
- 10 дБ $\rightarrow 0,316$ раз	4 дБ $\rightarrow 1,58$ раз	80 дБ $\rightarrow 10000$ раз
- 6 дБ $\rightarrow 0,5$ раз	5 дБ $\rightarrow 1,77$ раз	100 дБ $\rightarrow 100000$ раз
- 3 дБ $\rightarrow 0,707$ раз	6 дБ $\rightarrow 2,00$ раза	120 дБ $\rightarrow 1000000$ раз
- 1 дБ $\rightarrow 0,89$ раз		140 дБ $\rightarrow 10000000$ раз



Контрольные вопросы

1. Какими параметрами определяется величина акустического шума или механического колебания во временной области?
2. Какие параметры гармонического колебания могут содержать диагностическую информацию?
3. Какими параметрами характеризуется случайный виброакустический сигнал?
4. Что такое спектральное представление сигнала?
5. Какой математический аппарат используется для спектрального представления периодических сигналов?
6. Какой математический аппарат используется для спектрального представления стационарных случайных сигналов?
7. Что такое акустический шум?
8. Какова природа акустического шума?
9. Какому уравнению удовлетворяет звуковое давление, вектор смещения частицы среды, вектор колебательной скорости?
10. Какие параметры среды определяют скорость распространения акустической волны?
11. Какова главная особенность слуха человека?
12. Каков диапазон слышимых частот?
13. Что такое вибрация?
14. Каковы источники вибрации машин и оборудования?
15. Что такое частота вибрации и в каких единицах измеряется?
16. Какими параметрами можно характеризовать вибрацию любого объекта?
17. На каких частотах целесообразно измерять вибро смещение, вибро скорость и вибро ускорение?
18. Каким диапазонам частот соответствует вибрация: низкочастотная, среднечастотная, высокочастотная, ультразвуковая.
19. От каких параметров зависит амплитуда низкочастотных колебаний?
20. Какие параметры низкочастотных составляющих вибрации чаще всего являются диагностическими?
21. Каковы трудности диагностирования машин на низкочастотной вибрации?
22. Какова особенность среднечастотной вибрации механизмов?

23. Почему параметры вибрации в области средних частот редко используются в качестве диагностических?

24. Какова особенность высокочастотной вибрации механизмов?

25. Каковы достоинства высокочастотной вибрации механизмов?

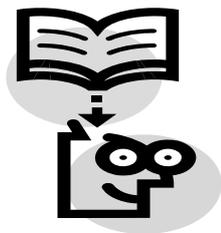
26. Назовите линейные и относительные единицы измерения шума.

27. Назовите линейные и относительные единицы измерения вибрации.

28. Назовите пороговые значения механических колебаний в соответствии со стандартом ИСО-1683.

29. Какое соотношение между числовыми значениями уровней виброускорения, виброскорости и виброускорения с синусоидальной формой волны и с угловой частотой $\omega_0 = 1000$ рад/с?

30. Во сколько раз отличается уровень вибрации в линейных единицах, если в относительных единицах этот уровень отличается на 10 дБ?



Глава 3

АНАЛИЗ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Диагностика машин и оборудования, как уже отмечалось, отличается от мониторинга их виброакустического состояния тем, что кроме определения тенденции изменения параметров шума и вибрации во времени требуется дополнительно выявлять источники неисправностей, идентифицировать вид и глубину развития каждого дефекта, поэтому многие из основных методов анализа виброакустических сигналов, применяемых при мониторинге, используются и при диагностике, однако в последнем случае, как правило, требуются и дополнительные методы анализа, дающие больше информации о конкретных видах дефектов. Эти методы должны позволить выявлять дефекты на стадии их зарождения, определять виды всех возможных дефектов и при каждом измерении оценивать степень их развития, что даст возможность прогнозировать изменение технического состояния машин.

Методы анализа виброакустических сигналов, используемые при тестовой и функциональной диагностике, как правило, сильно отличаются друг от друга.

Тестовые методы диагностики требуют формирования искусственных возмущений с известными характеристиками, которые возбуждают вибрацию машины или оборудования. Изменения параметров этой вибрации во времени и в пространстве при ее распространении в контролируемом объекте и являются признаками его состояния. По степени отклонения реакции этого объекта от номинальной вибрации можно судить о его состоянии. Тестовые методы могут использоваться как для неработающих объектов, так и для работающих. В ряде случаев требуется перевод машины или оборудования на специальные режимы работы, например, режимы пуска, прогрева, скачка нагрузки и т.п.

Функциональные методы диагностики используют, в основном, вибрацию, возникающую в процессе работы машины или оборудования в обычном режиме. Однако для решения ряда диагностических задач может проводиться и сравнительный анализ вибрации машин на разных режимах работы.

Следует отметить, что для выявления дефектов в процессе эксплуатации оборудования особенно широко используются функцио-

нальные методы диагностики, а при проведении ремонтов и послеремонтной доводке вибрационного состояния используются как функциональные, так и тестовые методы. В то же время вибрационный мониторинг должен использовать только результаты измерений и анализа вибрации, возбуждаемой самим объектом мониторинга, работающим в типовых режимах.

Ниже рассматриваются основные методы анализа виброакустических сигналов, используемые при решении задач мониторинга и функциональной диагностики машин и оборудования, как правило, без вывода объектов на специальные режимы работы.

3.1. Анализ уровней вибрации

Простейший из виброакустических методов – метод *измерения общего уровня* шума или вибрации. В этом случае в широких частотных диапазонах измеряются или среднеквадратичные значения, или пиковые значения виброускорения, виброскорости или виброперемещения механических колебаний либо колебаний в газообразных или жидких средах. На рис. 3.1 показан спектр колебаний (пунктиром) и общее значение амплитуды или общий уровень (сплошной линией), измеренный в широкой полосе частот.



Рис. 3.1. Общее значение амплитуды или общий уровень колебаний в широкой частотной полосе

При измерении общего уровня колебаний максимальный вклад могут давать несколько основных составляющих или даже одна доминирующая составляющая, например, составляющая на частоте вращения. Эта составляющая имеет, безусловно, большое значение,

однако развивающиеся дефекты могут привести к росту других составляющих, уровень которых может быть значительно ниже уровня доминирующей составляющей.

Таким образом, измерение общего уровня является слишком грубой оценкой с точки зрения определения технического состояния машины или оборудования и может быть использовано скорее для его контроля, чем для мониторинга, не говоря уже о глубокой детальной диагностике, требующей более тонких методов. Однако следует отметить, что практически все системы мониторинга и диагностики дают информацию об общем уровне шума и/или вибрации. Она используется, в частности, для сравнения с установленными стандартами пороговыми значениями и для построения трендов, т.е. зависимостей общего уровня от времени, что дает возможность оценить в первом приближении скорость изменения состояния машины или оборудования.

Прибор для измерения уровня вибрации, имеющий в своем составе измерительно-анализирующий тракт (рис. 3.2), называется *виброметром*. При измерении шума часто используется *шумомер*, основная амплитудно-частотная характеристика которого аналогична кривой *A* на рис. 2.7.

У виброметра, измеряющего только общий уровень, фильтр может отсутствовать, если не предъявляются специальные требования к полосе частот измеряемого сигнала.

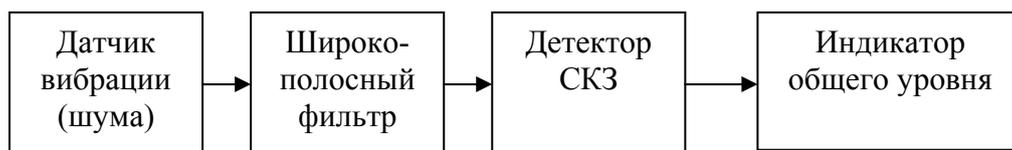


Рис. 3.2. Структурная схема прибора для измерения сигналов вибрации шума

3.2. Анализ ударных импульсов

Во многих случаях изменение технического состояния элементов машин и оборудования, особенно на начальной стадии развития дефектов, не влияет на общий уровень вибрации и шума. Так, в частности, у подшипников появление небольших дефектов на телах качения, а также на наружной или внутренней обоймах практически не изменяет общего уровня вибрации и шума. Однако наличие даже за-

рождающихся дефектов в подшипнике приводит к появлению высокочастотных ударных импульсов и, следовательно, к увеличению пиковых уровней в высокочастотном сигнале вибрации, при этом его среднеквадратические уровни в общем случае могут даже оставаться неизменными, поэтому отношение пикового и среднеквадратического значений, которое называется *пикфактором* – диагностическим признаком, а метод, основанный на измерении пикфактора, называется *методом ударных импульсов*. В случае отсутствия ударных импульсов пикфактор имеет значение меньше пяти, а при их наличии этот показатель может быть выше десяти. Принцип действия метода ударных импульсов показан на рис. 3.3, где представлены временные высокочастотные сигналы вибрации исправного подшипника качения и подшипника с раковинной дефектом на поверхности качения.

Однако, поскольку ударные импульсы появляются при различных видах дефектов и при изменении качества смазки, этот метод не позволяет идентифицировать вид дефекта, а, следовательно, может быть использован только для контроля состояния узла, но не для его диагностирования. Невозможность определить вид дефекта методом ударных импульсов не позволяет осуществлять долгосрочный прогноз состояния узла, т.к. различные дефекты имеют разные скорости развития. Кроме того, дефекты сборки, которые не приводят к продавливанию слоя смазки, не вызывают появления микроударов, а следовательно, не могут быть обнаружены. Еще одно обстоятельство ограничивает применение метода ударных импульсов: рост пикфактора прекращается при развитых дефектах и даже происходит его уменьшение по мере увеличения степени развития дефекта. Это определяется тем, что среднеквадратическое значение высокочастотной вибрации в этом случае начинает расти быстрее, чем его пиковое значение.

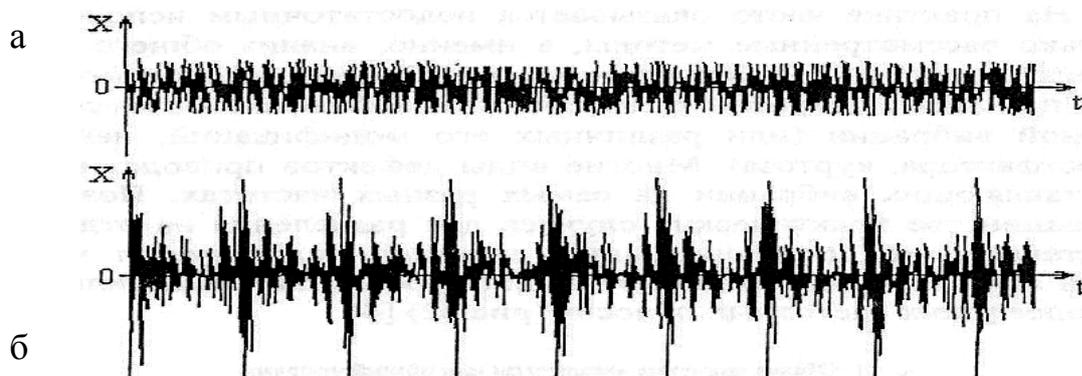


Рис. 3.3. Высокочастотная вибрация исправного (а) и дефектного (б) подшипников качения

На практике стандартный виброметр может совмещать функции прибора, измеряющего общий уровень, и прибора для измерения пикфактора.

При измерении пикфактора высокочастотной вибрации часто используется механический резонатор-камертон в виде металлического стержня с резонансом на частотах выше 25 кГц.

Метод ударных импульсов и реализующие его достаточно простые приборы (рис. 3.4) широко используются для обнаружения некоторых видов зарождающихся дефектов, в основном, подшипников качения.

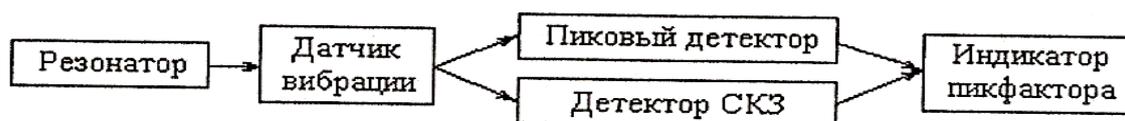


Рис. 3.4. Структурная схема прибора для измерения пикфактора сигнала вибрации

3.3. Частотный анализ

На практике часто оказывается недостаточным использовать только рассмотренные методы, а именно: анализ общего уровня преимущественно низкочастотных колебаний, измеряемого в более или менее широкой полосе частот, и пикфактора высокочастотной вибрации (или различных его модификаций, например, крестфактора, куртоза). Многие виды дефектов приводят к росту составляющих вибрации на самых разных частотах, поэтому в большинстве практических случаев для разделения на отдельные составляющие широкополосных сигналов используется *частотный анализ*, позволяющий оценивать уровни вибрации или шума в более узких частотных полосах (рис. 3.5).

Прибор, позволяющий измерять и анализировать амплитуды или среднеквадратические значения вибрации или шума в отдельных относительно узких полосах частот, называется *анализатором спектра*.

Такие анализаторы позволяют осуществлять *последовательный спектральный анализ*, т.е. анализ по очереди в отдельных полосах или на отдельных частотах в пределах их рабочего частотного диапазона. На выходе детектора величина сигнала пропорциональна мощности (при использовании на выходе детектора еще деквадратора величина сигнала пропорциональна среднеквадратическому значению) вибрации в выбранной полосе частот.



Рис. 3.5. Спектры вибрации, измеренной с различной разрешающей способностью

Простейший анализатор спектра (рис. 3.6) был создан еще в середине XX в. и представлял собой прибор с перестраиваемым по частоте полосовым фильтром (рис. 3.6 а) или прибор с последовательно переключаемыми фильтрами (рис. 3.6 б).

При последовательном анализе уровень каждой составляющей спектра измеряется в разное время, а следовательно, такие анализаторы почти нельзя было применять для анализа кратковременных изменяющихся во времени и импульсных сигналов. Кроме того, перенастройка или переключение фильтров требовало значительного времени.

Современные анализаторы спектра (рис. 3.7) осуществляют параллельный анализ, т.е. анализ, происходящий одновременно во всех полосах в пределах рабочего частотного диапазона. Таким образом обеспечивается мгновенный частотный анализ шума или вибрации, т.е. частотный анализ в реальном времени. Выражение «анализ в реальном времени» означает, что измерение, обработка и вычисление данных проводится в течение существования реального физического сигнала, так что результаты можно использовать для управления этим процессом. В таком случае результатом анализа является ряд значений или уровней, одновременно измеряемых анализатором спектра во многих относительно узких полосах частот.

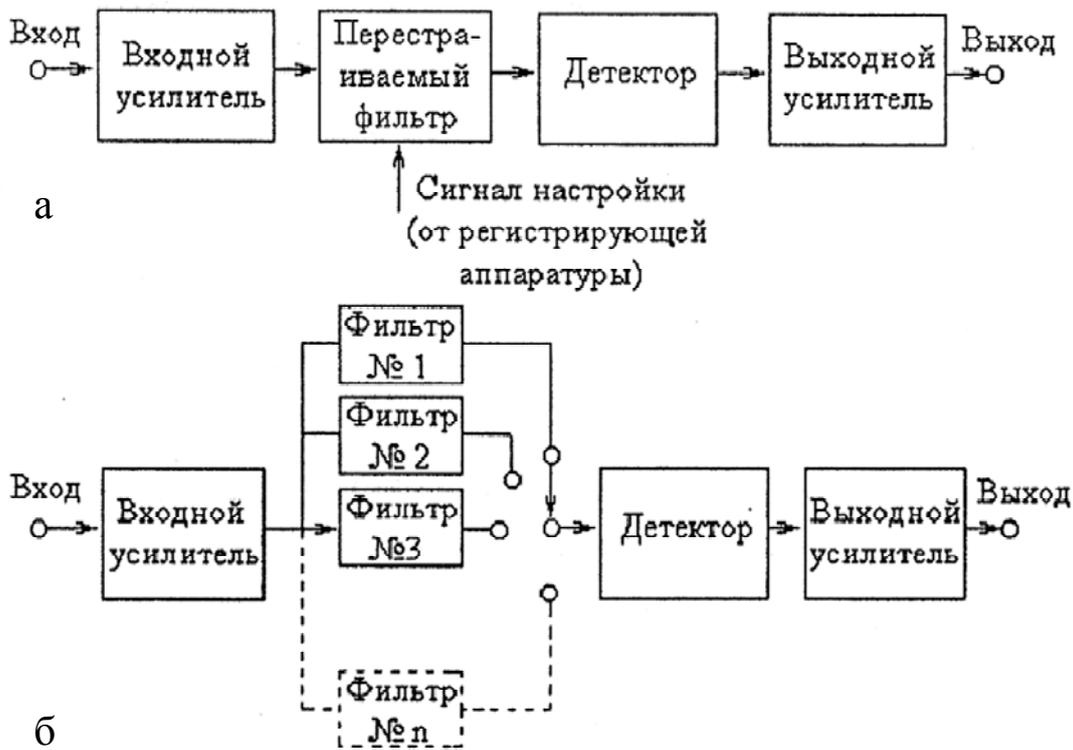


Рис. 3.6. Упрощенные структурные схемы анализаторов, осуществляющих последовательный спектральный анализ

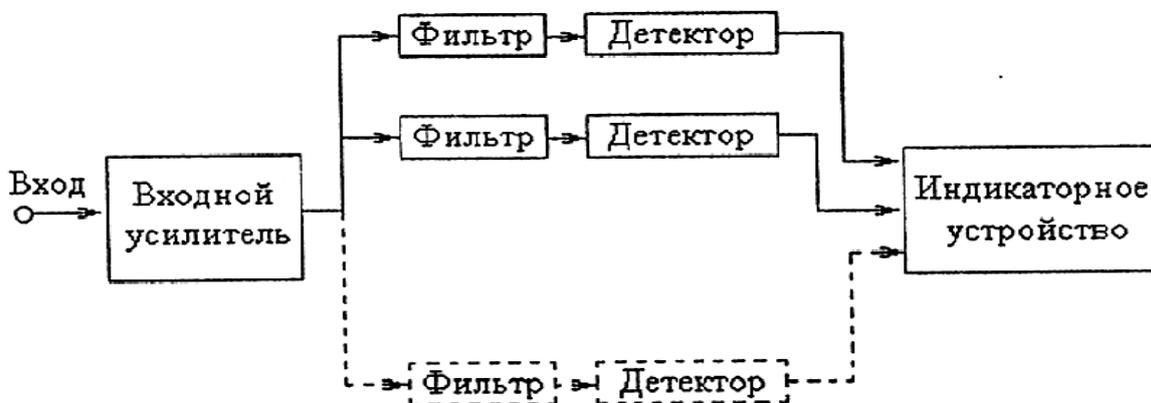


Рис. 3.7. Структурная схема анализатора, работающего в реальном времени и осуществляющего параллельный спектральный анализ

Современные анализаторы спектра кроме измерения уровней вибрации или шума в относительно узких полосах частот позволяют выполнять еще ряд функций, в том числе, как правило, измерять общий уровень в широкой полосе частот (используя так называемый «линейный фильтр»), уровни колебаний на низких и/или высоких частотах, а при измерении шума – дополнительно его уровень в полосе частот, определяемой кривой A (используя «взвешивающий» фильтр), и т.д.

Позднее появились аналого-цифровые анализаторы спектра, а затем – цифровые, т.е. анализаторы, основанные на цифровых методах анализа и обработки информации.

3.3.1. Частотный анализ с постоянной абсолютной шириной полосы пропускания

Как упоминалось выше, при частотном анализе используется, как правило, набор полосовых фильтров, настроенных на определенные частоты и переключаемых автоматически или вручную, или один полосовой фильтр, перестраиваемый в определенном частотном диапазоне. Существует два основных типа частотных анализаторов: анализаторы с постоянной абсолютной шириной полосы пропускания и анализаторы с постоянной относительной шириной полосы пропускания.

Первый тип имеет один фильтр или набор фильтров с точно определенной фиксированной шириной полосы пропускания, например, 3,16 Гц, 10 Гц и т.п. Анализаторы второго типа снабжены фильтром (фильтрами), ширина полосы пропускания которого (которых) всегда равна определенной доле (%) его (их) среднегеометрической частоты, т.е. частоты настройки, например, 1, 3, 6, 10, 23%. Обычно они и называются фильтрами с постоянной относительной (процентной) шириной полосы пропускания.

Анализаторы с постоянной абсолютной полосой пропускания имеют преимущества по сравнению с анализаторами второго типа – это идентичное разрешение по частоте при использовании линейной шкалы частоты и возможность получения высокой разрешающей способности, что позволяет использовать их при гармоническом анализе сложных сигналов. Однако применение линейной шкалы частоты автоматически ограничивает ширину частотного диапазона, необходимого для практического анализа. Этот диапазон перекрывает обычно только одну или две декады.

Идеальный полосовой фильтр имеет амплитудно-частотную характеристику (рис. 3.8).

На рис. 3.9 приведены зависимости ширины полосы пропускания анализатора с постоянной шириной полосы пропускания от частоты при линейном (рис. 3.9 а) и логарифмическом (рис. 3.9 б) масштабах частоты.

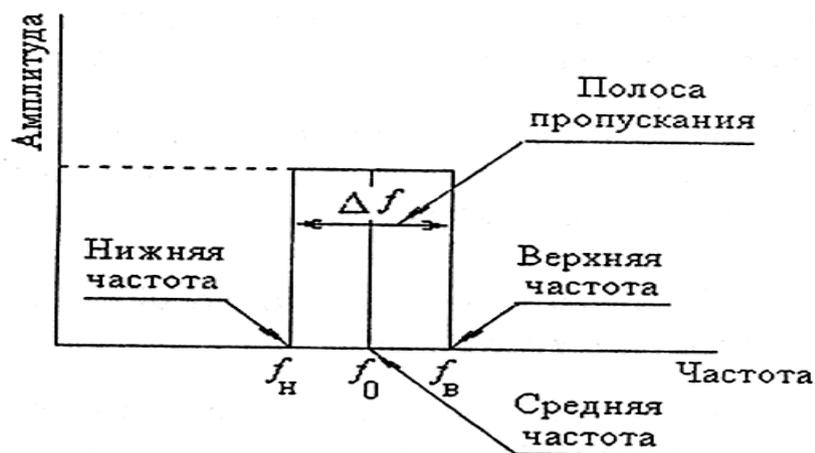


Рис. 3.8. Амплитудно-частотная характеристика идеального полосового фильтра

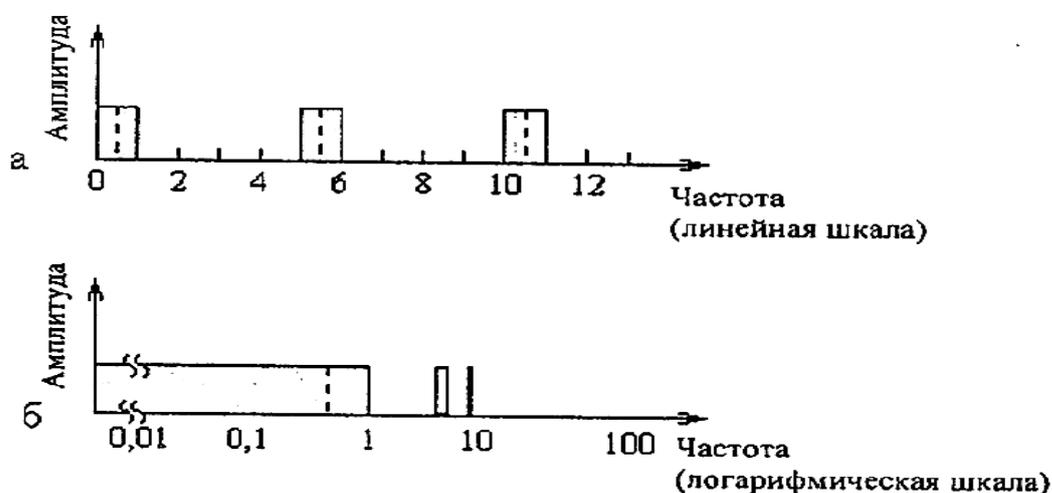


Рис. 3.9. Амплитудно-частотные характеристики идеальных полосовых фильтров с постоянными абсолютными значениями ширины полосы пропускания частот

Реальные полосовые фильтры имеют амплитудно-частотную характеристику, отличную от характеристики идеального фильтра (рис. 3.8). Амплитудно-частотная характеристика реального фильтра, имеющего менее крутые фронты, показана на рис. 3.10. В этом случае возникает вопрос об определении *ширины* полосы пропускания реальных фильтров. В предыдущих главах не затрагивалось данное понятие, т.к. результаты математического анализа Фурье всегда излагались применительно к бесконечно узкой полосе частот Δf , что практически недостижимо.

Ширина полосы пропускания реального фильтра может быть определена двумя основными способами. Наиболее часто принято под

шириной полосы пропускания реального фильтра понимать ширину полосы пропускания идеального фильтра, пропускающего такую же мощность «белого» шума, как и реальный фильтр (рис. 3.10 а). Значение этого параметра можно определить по точкам пересечения кривой характеристики реального фильтра и фронтов идеального фильтра, площадь которого равна площади под кривой реального фильтра (заштрихованная площадь). Этот параметр еще называется эффективной шириной полосы пропускания реального фильтра.

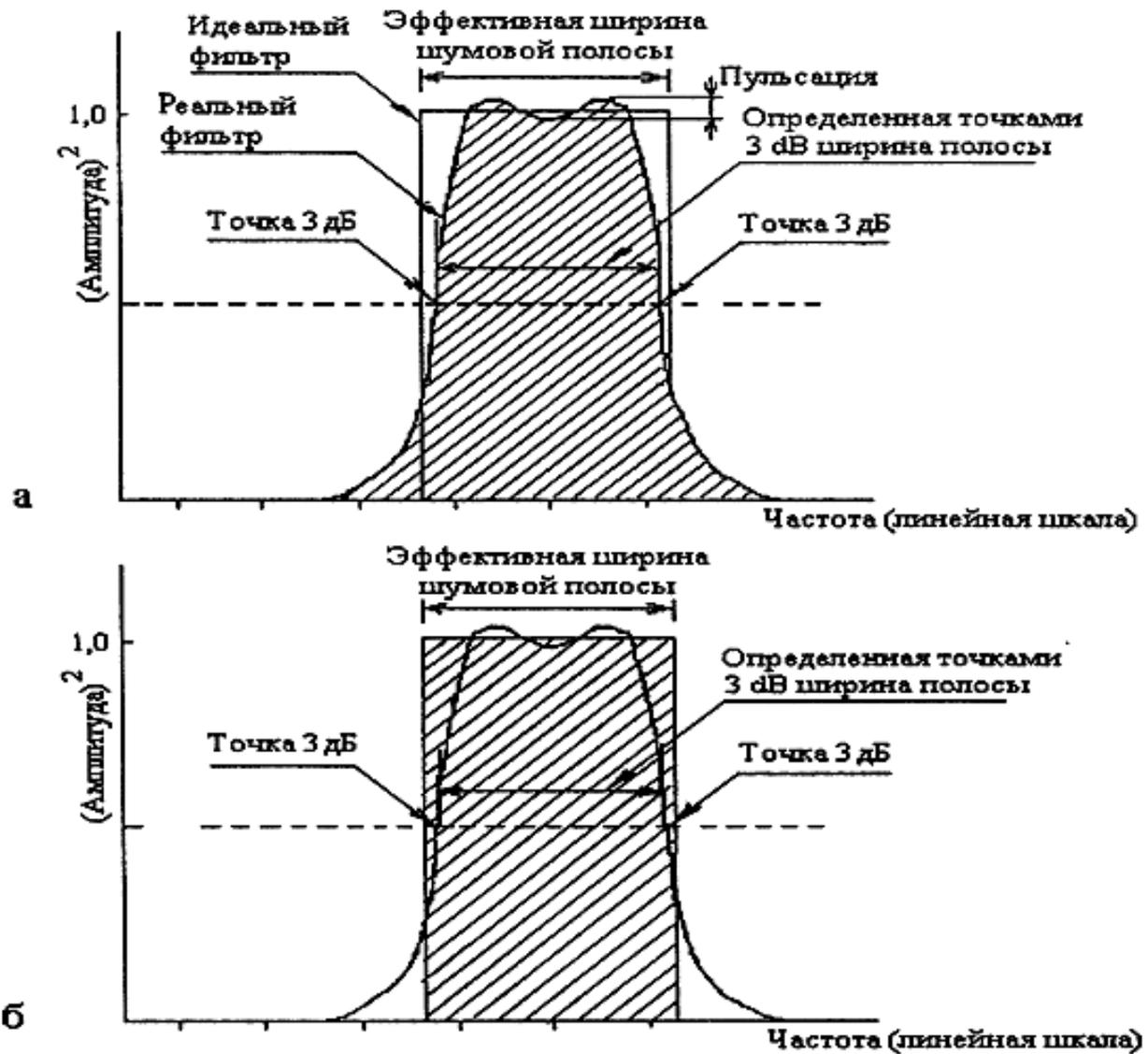


Рис. 3.10. Амплитудно-частотные характеристики реального (а) и идеального (б) фильтров

С помощью второго способа ширина полосы пропускания реального фильтра определяется как интервал частот на уровне спада частотной характеристики фильтра на 3 дБ (рис. 3.10 б).

Для фильтров с постоянной абсолютной шириной полосы пропускания средняя частота определяется как $f_0 = \frac{f_в + f_н}{2}$, а ширина полосы пропускания равна

$$\Delta f = f_в - f_н,$$

где $f_в$ и $f_н$ – верхняя и нижняя частоты фильтра, соответственно.

Для измерения и анализа спектра вибрации или шума фильтры анализаторов должны иметь пересекающиеся на некотором уровне амплитудно-частотные характеристики, что обусловлено требованием практически идентичного пропускания сигналов во всем необходимом диапазоне частот, поэтому в анализаторах спектра «гребенка» фильтров с постоянной абсолютной шириной полосы пропускания при линейной шкале частот имеет вид, показанный на рис. 3.11.

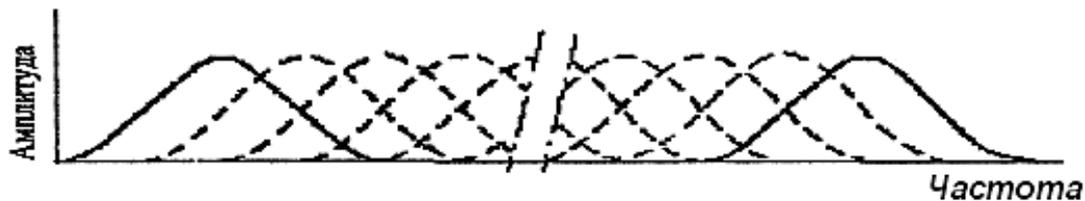


Рис. 3.11. Амплитудно-частотные характеристики фильтров анализатора при постоянной ширине их полос пропускания

3.3.2. Частотный анализ с постоянной относительной (процентной) шириной полосы пропускания

Как было сказано выше, анализаторы второго типа имеют набор фильтров (или один перенастраиваемый фильтр), ширина полосы пропускания которых (или которого) равна определенной доле в процентах от среднегеометрической частоты. Эти фильтры с постоянной относительной (процентной) шириной полосы пропускания имеют среднегеометрическую частоту, равную

$$f_0 = \sqrt{f_в f_н},$$

и относительную ширину полосы пропускания, определяемую как

$$\Delta f_{отн} = \frac{(f_в - f_н) \cdot 100}{f_0} \%$$

На рис. 3.12 приведены зависимости ширины полосы пропускания анализатора с постоянной относительной шириной полосы пропускания от частоты при линейном (рис. 3.12 а) и логарифмическом (рис. 3.12 б) масштабах частоты.

Следует отметить, что ширина полосы пропускания анализатора с постоянной относительной шириной полосы кажется фиксированной при использовании логарифмической шкалы частот, что удобно и эффективно для отображения спектра сигнала в широком диапазоне частот, перекрывающем 3 или больше декад.

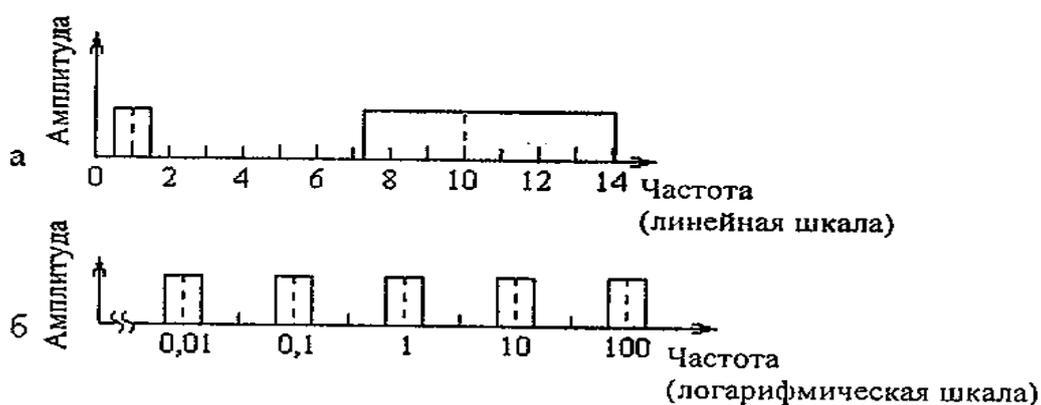


Рис. 3.12. Амплитудно-частотные характеристики идеальных фильтров с постоянными относительными значениями ширины полосы пропускания

Это и является одним из важных преимуществ анализаторов с постоянной относительной шириной полосы пропускания, определяющих их широкое практическое применение, в отличие от анализаторов с постоянной абсолютной шириной полосы пропускания. Еще одно преимущество – соответствие постоянной относительной ширины полосы пропускания постоянному значению добротности, т.е. постоянному значению коэффициента усиления в области возможных резонансных пиков (рис. 3.13). Это позволяет эффективно применять анализаторы с фильтрами с постоянной относительной шириной полосы пропускания при использовании логарифмической частотной шкалы для анализа вибрации при нестабильной частоте вращения и большом количестве резонансов конструкции машины.

На практике особо широко используются два фильтра с постоянной относительной шириной полосы пропускания – октавный фильтр и третьоктавный фильтр.

Октава – это диапазон частот, в котором верхняя частота f_v отличается от нижней частоты f_n в два раза. Следовательно, ширина ок-

тавного диапазона частот $\Delta f_{отн}$ равна 70,7% от среднегеометрической частоты. Таким образом, для октавного фильтра справедливо соотношение

$$f_в = 2 f_н,$$

при этом для среднегеометрического значения частоты имеем

$$f_0 = \sqrt{f_в f_н} = \sqrt{2 f_н^2} = \sqrt{2} f_н$$

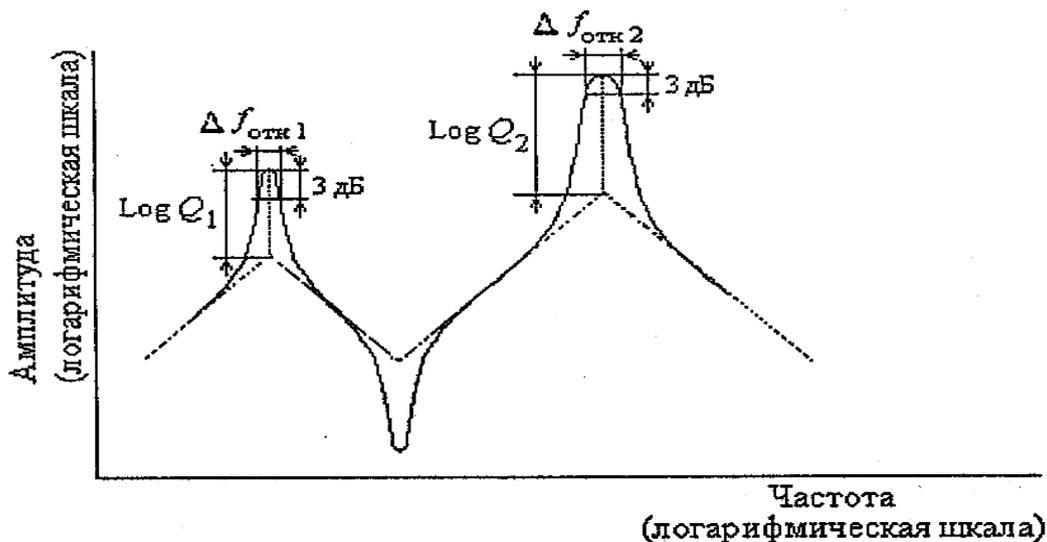


Рис. 3.13. Связь между добротностью Q и относительной шириной частотной полосы $\Delta f_{отн}$

Абсолютная ширина полосы пропускания октавного фильтра равна

$$\Delta f = f_в - f_н,$$

а для относительной ширины полосы пропускания имеем

$$\Delta f_{отн} = \frac{(f_в - f_н) \cdot 100}{f_0} \% = \frac{f_н}{\sqrt{2} f_н} 100 \% = \frac{1}{\sqrt{2}} 100 \% = 70,7 \%$$

Итак, если октавный фильтр имеет среднегеометрическую частоту $f_0 = 10$ Гц, то абсолютное значение его полосы пропускания равно $\Delta f = 7$ Гц. Если среднегеометрическая частота октавного фильтра равна $f_0 = 100$ Гц, тогда $\Delta f = 70$ Гц.

Для значений среднегеометрических частот октавных фильтров установлен ряд предпочтительных значений в соответствии с рекомендацией 225 Международной электротехнической комиссии (МЭК). Опорным значением частоты этого ряда является $f_0 = 1000$ Гц.

Таким образом, для перекрытия диапазона частот от 22,5 Гц (нижний предел октавной полосы со среднегеометрической частотой 32,5 Гц) до 22,5 кГц (верхний предел октавной полосы со среднегеометрической частотой 16 кГц) достаточно 10 октавных полос. Следовательно, десятью октавными фильтрами можно перекрыть соответствующий трем декадам диапазон частот (декада – изменение частоты в 10 раз).

Если октавную полосу разделить на три геометрически равных участка, то получим третьоктавную полосу, поэтому для третьоктавного фильтра справедливо соотношение

$$f_в = \sqrt[3]{2} f_н = 1,259 f_н.$$

В принципе, третьоктавная полоса соответствует одной десятой доли декады, т.к.

$$\lg 2^{1/3} = \frac{1}{3} \lg 2 = \frac{1}{3} \cdot 0,3 = 0,1;$$

$$\lg 10^{1/10} = \frac{1}{10} \lg 10 = 0,1.$$

Относительная процентная ширина полосы пропускания третьоктавного фильтра

$$\Delta f_{отн} = \frac{(f_в - f_н) \cdot 100}{f_0} \% = \frac{2^{1/3} - 1}{2^{1/6}} 100\% = 23,1\%.$$

Итак, третьоктавный фильтр со среднегеометрической частотой полосы пропускания $f_0 = 10$ Гц имеет абсолютное значение полосы пропускания, равное $\Delta f = 2,3$ Гц, а при частоте третьоктавного фильтра $f_0 = 1000$ Гц его $\Delta f = 231$ Гц.

Таким образом, и для октавного и для третьоктавного фильтров абсолютные значения ширины полосы пропускания увеличиваются по мере роста их среднегеометрических частот, оставаясь в процентном отношении постоянными – 23% для третьоктавного и 70% – для октавного фильтров. В качестве примера на рис. 3.14 приведена «гребенка» фильтров третьоктавного анализатора с логарифмической шкалой частот.

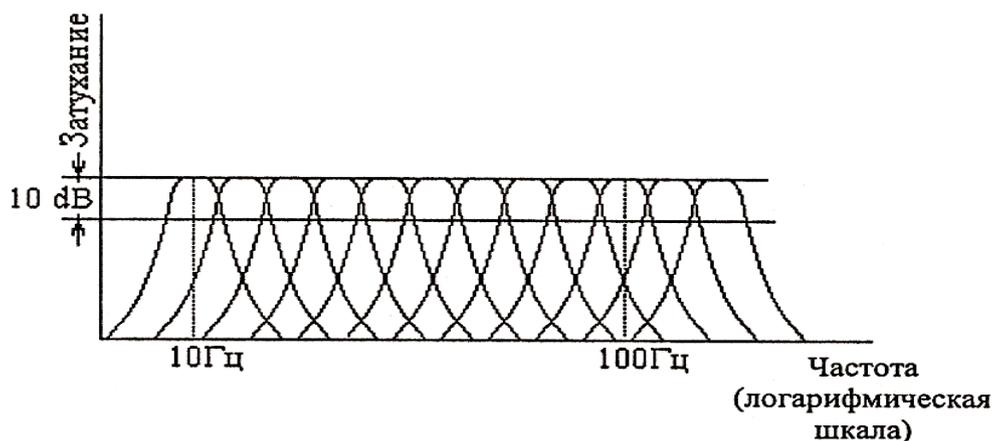


Рис. 3.14. Амплитудно-частотные характеристики смежных третьоктавных фильтров с логарифмической шкалой частот

Для решения задач мониторинга технического состояния и диагностики вращающихся машин и оборудования октавный и особенно третьоктавный анализ вибрации имеет большое значение и широко применяется. Но и для мониторинга и для диагностики во многих практических случаях требуется анализ вибрации в узких полосах частот, чтобы не пропустить рост определенных ее составляющих или появление новых составляющих при возникновении неисправностей и дефектов в объекте контроля. С этой позиции, казалось бы, чем больше разрешающая способность анализаторов, тем лучше. Частотное разрешение является важнейшей характеристикой спектрального анализа, определяющее возможности разделения в спектре близких по частоте гармонических составляющих анализируемого сигнала. Однако существует один важный фактор, ограничивающий ширину полосы пропускания частот смежных фильтров при решении простых традиционных задач контроля, мониторинга и диагностики. Этот фактор заключается в реальной нестабильности во времени частоты вращения для многих видов машин и оборудования. В свою очередь, значение частоты вращения входит в формулы, определяющие основные составляющие шума и вибрации. А это означает, что не только составляющая вибрации на частоте вращения может изменяться в определенных пределах, но и остальные зависящие от нее и кратные по частоте составляющие также изменятся. Соответственно все или часть этих составляющих могут оказаться в других полосах частот вместо ожидаемых, если используются анализаторы с очень узкими полосами частот. Следовательно, требуемая на практике ширина полос пропускания частот смежных фильтров должна быть та-

кой, чтобы при возможном уходе частоты вращения и связанных с ней кратных по частоте составляющих последние оставались бы в тех же полосах частот. Это позволит контролировать их изменение во времени с погрешностью, не зависящей от ширины полосы пропускания частот анализатора. Для определения оптимальной с точки зрения всех изложенных факторов ширины полос пропускания частот можно использовать эмпирическое правило: возможный диапазон изменения частоты вращения машины или оборудования лежит в пределах $\pm 10\%$. Тогда изменение частоты в одну сторону составляет 10% и изменение частоты в другую сторону – тоже 10% . Итого 20% , а ширина полосы пропускания третьоктавного фильтра – 23% , что во многих случаях удовлетворяет определенным требованиям к контролю уровней шума и вибрации машин и оборудования.

Однако частое использование октавных и третьоктавных анализаторов является недостаточным с точки зрения их разрешающей способности, поэтому на практике, особенно для мониторинга и глубокой диагностики машин и оборудования, широко используется узкополосный спектральный анализ.

Следует отметить, что, с одной стороны, узкополосный спектральный анализ вибрации позволяет получить большой объем диагностической информации, который может увеличиваться с увеличением разрешающей способности анализатора, но при условии высокой стабильности частоты вращения машины, а с другой стороны, с увеличением разрешающей способности увеличивается время, необходимое для измерения вибрации или шума.

3.3.3. Особенности использования частотного анализа в основных методах мониторинга и диагностики

Выбор методов диагностики, используемых для определения и контроля технического состояния вращающихся машин и оборудования, в значительной степени зависит от особенностей их работы и возможностей частотного анализа вибрации.

Вибрационный мониторинг машин и оборудования проводится обычно по их низкочастотной вибрации. Уровни составляющих низкочастотной вибрации достаточно стабильно ведут себя во времени при смене внешних условий, например, температуры, влажности и достаточно часто при смене нагрузки в небольших пределах. Существенный рост низкочастотной вибрации наблюдается, как правило,

лишь при появлении нескольких видов сильных дефектов. Поскольку любой дефект незадолго до аварии порождает цепочку дефектов, в которой хоть один из них существенным образом влияет на низкочастотную вибрацию машины, ее вибрация, по крайней мере, за несколько секунд до аварии, обязательно превысит допустимые нормы. Именно поэтому в системах аварийной защиты ответственных машин и оборудования часто используются вибрационные каналы. К сожалению, время на принятие решения, а, следовательно, и на измерение вибрации в таких каналах ограничено секундами или даже долями секунд, поэтому измерение вибрации проводится с использованием широкополосного фильтра, нижняя граничная частота которого обычно меньше половины частоты вращения, а верхняя чаще всего составляет 1000 Гц. Как правило, вибрационный канал с таким фильтром реагирует на скачкообразное изменение вибрации не позже, чем через 2–3 оборота ротора.

Более 50% типов сильных дефектов оказывают непосредственное влияние на низкочастотную вибрацию машин и оборудования, и их можно обнаружить задолго до аварии. Но каждый из этих дефектов имеет, как правило, свои признаки, изменяя параметры вибрации на разных частотах, поэтому для более раннего обнаружения некоторых дефектов необходимо проводить спектральный анализ низкочастотной вибрации. Такой анализ является обязательной составной частью вибрационного мониторинга, и по его результатам может быть решен целый ряд диагностических задач. Наличие разных дефектов, в зависимости от их вида, может привести либо к росту составляющих вибрации на частотах, характерных для бездефектной машины (или ее узла), либо к появлению и росту составляющих на других известных частотах.

Для анализа низкочастотной вибрации машин периодического действия, имеющих высокую стабильность частоты вращения как во время одного измерения спектра вибрации, так и от измерения к измерению, можно рекомендовать использовать анализаторы с постоянной полосой пропускания и большим числом параллельных фильтров – до 1000 и более. Для машин с нестабильной в небольших пределах частотой вращения можно использовать фильтры с постоянной относительной полосой пропускания или синхронные фильтры, управляемые опорным сигналом с датчика оборотов машины. Наконец, для частотного анализа вибрации в режимах пуска или выбега машины синхронная фильтрация сигнала вибрации обязательна.

К сожалению, диагностика машин и оборудования по низкочастотной вибрации даже с применением таких мощных инструментов как узкополосный анализ, в том числе и синхронный анализ, имеет большое количество существенных недостатков и не обеспечивает решения задач долгосрочного прогноза состояния оборудования. К основным ее недостаткам относятся следующие.

1. *Невозможность обнаружения и идентификации (определения вида и величины) многих видов дефектов, являющихся причиной отказов машин и оборудования.* Следствием этого является невозможность получения достоверного долгосрочного прогноза состояния.

2. *Сложность разделения составляющих вибрации, возбуждаемой разными, в том числе и дефектными узлами машин и оборудования,* что определяется слабым затуханием при распространении низкочастотной вибрации. Именно поэтому вибрация к точке измерения приходит от всех узлов механизма, от соседних машин и даже от проходящего вблизи транспорта, что резко усложняет задачи выделения из сигнала вибрации контролируемых составляющих. По этой же причине малоэффективной оказывается диагностика оборудования по воздушному шуму, если в одном помещении работает несколько единиц оборудования.

3. *Сложность обнаружения зарождающихся дефектов.* Это обусловлено тем, что на низких частотах механизм колеблется как единое целое, поэтому для возбуждения вибрации на какой-либо составляющей, заметной на фоне естественных флуктуаций каждой из контролируемых составляющих, нужны относительно большие колебательные силы. Такие силы возникают только при появлении развитых дефектов, поэтому дефекты в начальной стадии развития практически не проявляются в низкочастотной части спектра вибрации.

Казалось бы, что резкого повышения эффективности вибрационной диагностики можно добиться, анализируя среднечастотную вибрацию не всей машины, а ее отдельных узлов, для возбуждения которой не нужны значительные колебательные силы. Но оказывается, что у большинства машин и оборудования на средних частотах такое большое количество высокооборотных резонансов, что даже малейшее изменение частоты вращения или механических свойств объекта контроля в десятки раз может изменить уровни контролируемых составляющих вибрации. К аналогичным результатам приводят и изменения нагрузки, температуры, влажности воздуха и т.п. В связи с этим приходится вводить многочисленные поправки в результаты измерений вибрации, которые могут свести на нет все усилия диагноста.

Затруднения при выделении диагностической информации из низкочастотной и среднечастотной вибрации, возможные ее искажения и сложности локализации дефекта – все это определило повышенный интерес к высокочастотной вибрации. В этой области вибрация приобретает волновой характер. Одним из определяющих преимуществ этой области частот является быстрое затухание высокочастотной вибрации при ее распространении, что позволяет «увидеть» только диагностируемый узел. Природа сил, действующих в области высоких частот, – *силы трения и микроудары*, возбуждающие не гармонические колебания, а случайные. На первый взгляд, в высокочастотной области спектра практически отсутствует диагностическая информация, в отличие от низкочастотной области, богатой гармоническими составляющими, непосредственно связанными с конструктивными параметрами диагностируемых узлов и наличием определенных видов дефектов.

Но оказывается, что силы трения, возбуждающие высокочастотную случайную вибрацию, стационарны только при отсутствии дефектов. В бездефектных узлах трения стационарна и случайная высокочастотная вибрация. Ее мощность постоянна во времени. При появлении дефектов, например, в подшипнике качения, приводящих даже к частичному «продавливанию» смазки, изменяются периодически во времени силы трения или возникают удары, возбуждающие высокочастотную вибрацию. Также удары могут появиться, если смазка не очень хорошая и ее слой легко «рвется». Таким образом, при наличии дефектов величина сил трения и мощность вибрации изменяются во времени, т.е. появляется модуляция мощности высокочастотной вибрации (рис. 3.15).

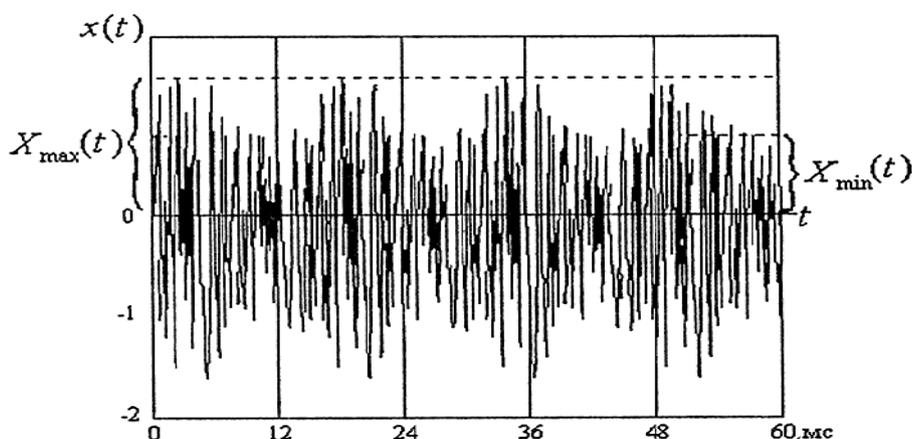


Рис. 3.15. Случайный амплитудно-модулированный сигнал

Глубину модуляции m случайного амплитудно-модулированного сигнала вибрации $X(t)$ можно определить в процентах:

$$m = \frac{X_{\max}(t) - X_{\min}(t)}{X_{\max}(t) + X_{\min}(t)} \cdot 100\%,$$

где X_{\max} , X_{\min} – максимальное и минимальное значения огибающей сигнала соответственно.

При изменении вида дефекта частота модуляции изменяется. Чем больше степень развития дефекта, тем больше становится глубина модуляции. Таким образом, вся информация о техническом состоянии содержится в огибающей высокочастотного сигнала. Частота модуляции определяет вид дефекта, а глубина модуляции – степень его развития. В качестве примера на рис. 3.16 (слева) приведены временные сигналы вибрации подшипников качения исправного, с износом и с раковинной на поверхности трения, а справа – соответствующие им спектры огибающих этих сигналов.



Рис. 3.16. Временные сигналы высокочастотной вибрации подшипника качения и спектры ее огибающей:
 а) исправный подшипник; б) подшипник с износом поверхности трения;
 в) подшипник с раковинной на поверхности трения

В спектре огибающей высокочастотной вибрации можно наблюдать за развитием одновременно всех имеющихся дефектов по величинам превышения гармонических составляющих на определенных частотах над фоном. Таким образом, появляется возможность определения парциальных глубин модуляции, т.е. глубин модуляции для каждого из имеющихся дефектов. Это позволяет определять степень развития всех дефектов и идентифицировать их вид. Следовательно, имеется возможность прогнозировать состояние диагностируемого узла, т.к. каждый вид дефекта имеет свою скорость развития.

Глубина модуляции m связана с разностью ΔL уровней гармонической и случайной составляющих спектра огибающей (рис. 3.16) выражением

$$m = \sqrt{(10^{\Delta L/10} - 1) \frac{\Delta f_a}{\Delta f_\phi}},$$

где Δf_ϕ – ширина полосы фильтра, выделяющего высокочастотную вибрацию;

Δf_a – разрешающая способность при анализе спектра огибающей высокочастотной вибрации, (ширина полосы пропускания частот полосового фильтра одного канала анализатора спектра огибающей), равная

$$\Delta f_a = f_{cp} / n.$$

Здесь f_{cp} – граничная частота спектра огибающей, n – число частотных полос (число частотных каналов).

Структурная схема анализатора спектра огибающей высокочастотной вибрации приведена на рис. 3.17. Ее отличие от обычного анализатора спектра – наличие полосового фильтра детектора огибающей (с полосой пропускания частот Δf_ϕ), выделяющего из сигнала вибрации ее высокочастотную составляющую, и детектора огибающей. Далее структурная схема аналогична обычному анализатору спектра, только теперь уже анализируется не весь сигнал вибрации, а только ее огибающая.

Другой путь формирования спектра огибающей – использование преобразования Гильберта для получения огибающей с дальнейшим преобразованием Фурье для получения спектра огибающей.

К достоинствам метода анализа параметров модуляции высокочастотной случайной вибрации, т.е. спектрального анализа огибающей, можно отнести следующее.

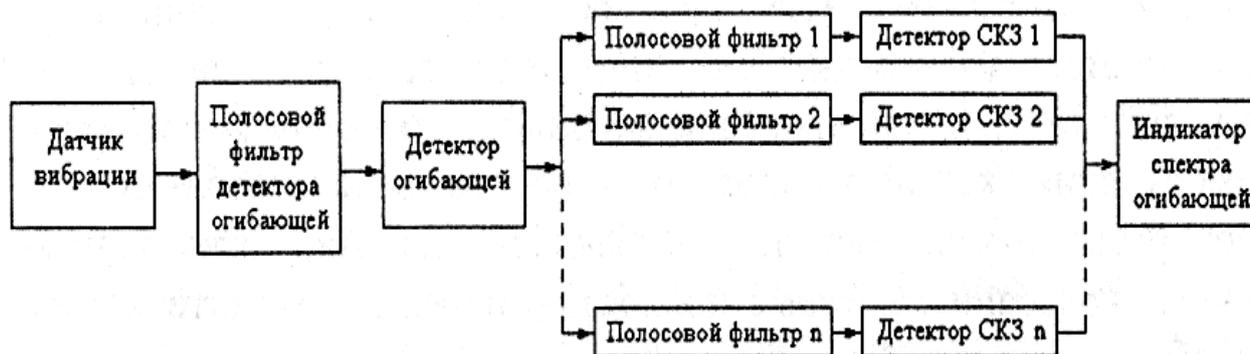


Рис. 3.17. Упрощенная структурная схема анализатора спектра огибающей высокочастотной вибрации

1. *Возможность локализации дефекта.* Она определяется свойством высокочастотной вибрации быстро затухать при распространении, что позволяет оценивать техническое состояние именно того узла, вблизи которого установлен датчик вибрации. По этой же причине спектр огибающей высокочастотной вибрации не «затемнен» составляющими от других узлов контролируемой машины или оборудования, что повышает достоверность диагноза.

2. *Высокая чувствительность.* В отличие от спектрального анализа низкочастотной и среднечастотной вибрации, где требуются относительно большие силы для ее возбуждения, а, следовательно, достоверно обнаружить можно только развитые дефекты, для изменения параметров высокочастотной вибрации требуется гораздо меньшие силы, поэтому наличие даже зарождающихся дефектов приводит к появлению модуляции высокочастотной вибрации контролируемого узла, а значит и к появлению гармонических составляющих в спектре огибающей этой вибрации.

3. *Высокая достоверность определения вида и величины каждого из дефектов.* Если сравнивать метод огибающей со спектральными методами анализа низкочастотной и среднечастотной вибрации, то высокая достоверность определяется использованием не абсолютных значений составляющих вибрации, как при спектральном анализе, а относительных значений – парциальных глубин модуляции. При изменении уровня вибрации, например, из-за изменения коэффициента усиления или изменения чувствительности датчика, глубина модуляции, обусловленная появлением дефекта, остается неизменной. В отличие от известного метода анализа высокочастотной вибрации, названного методом *резонансной демодуляции*, когда анализируются

собственные колебания контролируемого узла, методом огибающей анализируются вынужденные колебания, которые полностью передают характеристики колебательных сил. Как следствие, резкое уменьшение погрешности определения свойств и отличительных признаков дефектов, что также повышает достоверность идентификации вида дефекта и степени его развития.

4. *Возможность постановки диагноза и прогноза по однократным измерениям вибрации.* Она определяется использованием относительных измерений, т.е. измерений глубин модуляции высокочастотной вибрации, и отсутствием каких бы то ни было гармонических составляющих в спектре огибающей бездефектного подшипника. Знание предельных глубин модуляции всех возможных сильных дефектов и скоростей развития каждого вида дефекта позволяет не только определять вид и степень развития любого дефекта, но и прогнозировать время безаварийной работы контролируемого узла без предварительного построения эталонов. Исключение составляет только дефект смазки, для определения которого создается эталон или по нескольким первым измерениям (обычно по трем), или по группе однотипных машин (обычно не менее пяти).

Таким образом, метод огибающей высокочастотной вибрации позволяет обнаружить, идентифицировать и прогнозировать состояние подшипников качения с дефектами, сопровождающимися появлением модуляции высокочастотной вибрации из-за изменения сил трения и появлением высокочастотных импульсов из-за возникновения микроударов.

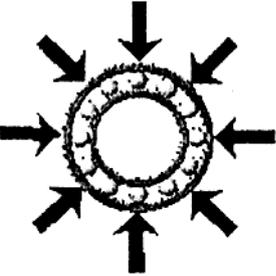
Из всех рассмотренных методов наиболее эффективным и чувствительным для диагностики многих видов узлов машин и оборудования является метод, основанный на анализе спектра огибающей их высокочастотной вибрации. Однако в том случае, когда узел находится в стадии деградации и в нем имеется целый ряд развитых дефектов, модуляция его высокочастотной вибрации приобретает случайный характер в результате суперпозиции многих модуляционных процессов. В этом случае высокочастотная вибрация вновь становится стационарным процессом с постоянной во времени мощностью, поэтому, для того чтобы по одиночным измерениям обнаружить предаварийные состояния машины или оборудования, наиболее целесообразно, кроме метода огибающей, использовать и спектральный анализ их низкочастотной и средне-частотной вибрации. В таком

случае окончательный диагноз ставится по результатам совместного спектрального анализа вибрации (при этом эталон может быть построен по группе однотипных машин, обычно пять машин) и спектрального анализа огибающей ее высокочастотных составляющих.

Следует отметить, что диагностические признаки, характеризующие вид дефекта узла машины или определенное сочетание дефектов, могут изменяться в зависимости от вида нагрузки, действующей на этот узел. В табл. 3.1 приведены четыре основных вида нагрузки в подшипниках качения.

Таблица 3.1

Основные виды нагрузки в подшипниках качения

Нагрузка	Графическое изображение
Радиальная статистическая нагрузка на одну точку поверхности качения (на одно тело качения), например, подшипник качения в машине горизонтального исполнения	
Радиальная статистическая нагрузка на две противоположные точки поверхности качения, например, подшипник с перекосом наружного кольца	
Радиальная статистическая нагрузка на все тела качения, например, подшипник в машине вертикального исполнения или в машине с осевым поджатием подшипника	
Вращающаяся нагрузка, действующая на одно тело качения, например, подшипник качения в машине с неуравновешенным ротором или боем вала	

Кроме возможного изменения нагрузки на вращающийся узел существует еще целый ряд особенностей, которые следует учесть при постановке диагноза и прогноза.

1. Часть диагностических признаков, используемых для идентификации одного вида дефекта, может совпадать с признаками другого вида дефекта, что требует дополнительной оценки вероятности правильного определения вида каждого дефекта.

2. Возможность изменения частоты вращения машины, с которой связаны значения других диагностических параметров диагностируемого узла.

3. Возможность ошибок при определении конструктивных характеристик диагностируемого узла, например, числа тел качения или диаметров поверхностей качения в определенном типе подшипника, что искажает расчетные значения ряда подшипниковых частот, а, следовательно, и диагностических признаков.

4. Влияние других узлов машины и их дефектов на работу диагностируемого узла, и в частности, на параметры нагрузки, передаваемой на диагностируемый узел, что может изменить свойства процессов, модулирующих вибрацию этого узла.

Необходимость учета всех перечисленных особенностей приводит к тому, что для постановки только одного диагноза, например, для подшипника качения, следует проанализировать более пятисот различных признаков и параметров, а это возможно лишь в системах диагностики с искусственным интеллектом.

Приведенное выше краткое описание основных методов анализа виброакустических сигналов позволяет сделать вывод, что для быстрого принятия решения об остановке машины следует использовать измерения общего уровня вибрации в широкой полосе частот. Это может быть либо низкочастотная вибрация машины в целом, либо ультразвуковая вибрация подшипников качения. Для получения большого объема информации, необходимой при решении диагностических задач и особенно задач долгосрочного прогноза, следует проводить узкополосный спектральный анализ как самого сигнала вибрации, так и процессов, описывающих изменение во времени информативных параметров этого сигнала, например, мощности или огибающей отдельных компонент вибрации. Естественно, что для спектрального анализа сигналов требуются значительно большее время и более сложная аппаратура, чем для измерения их мощности или общего уровня.

В то же время для решения сложных задач диагностики и прогноза состояния машин и оборудования недостаточно использовать только спектральный анализ вибрации и ее огибающей, необходимо

дополнительно измерять уровень вибрации как на низких, так и на высоких частотах, а в ряде случаев проводить и специальные виды анализа сигналов. Например, в системах диагностики подшипников качения для достоверной оценки и прогноза их технического состояния целесообразно одновременно использовать:

- анализ ультразвуковой вибрации с оценкой величины среднего значения и пик-фактора (крест-фактора, куртоза) для обнаружения зарождающихся дефектов смазки и поверхностей качения, которые приводят к появлению ударных импульсов при контакте тел качения с неподвижным кольцом и возбуждению ультразвуковой вибрации последнего. В отличие от спектрального этот анализ может быть эффективным и в случае возникновения неперiodических ударных импульсов. Кроме того, он не требует проведения длительных измерений с последующими усреднениями результатов (время измерения составляет обычно один–два оборота вала). Такой анализ вибрации обычно не используется на низких скоростях вращения подшипника (ниже 50–100 об/мин), т.к. в этом случае масляная пленка подшипника оказывается нестабильной и в ней возникают частые разрывы даже при отсутствии дефектов, а, следовательно, ударные импульсы возникают и в бездефектных подшипниках, особенно в редукторах;

- спектральный анализ огибающей высокочастотной случайной вибрации для обнаружения и определения вида зарождающихся дефектов поверхностей качения и скольжения, сопровождающихся периодическим изменением и ростом сил трения, а также появлением периодических ударных импульсов. Этот анализ наиболее эффективен при идентификации и наблюдении за развитием дефектов;

- спектральный анализ низкочастотной и среднечастотной вибрации для обнаружения и идентификации средних и сильных дефектов подшипников, сопровождающихся появлением в подшипниковом узле периодических колебательных сил кинематического, параметрического или ударного происхождения. Такой анализ наиболее эффективен при определении величин развитых дефектов с целью принятия решения о начале и объеме ремонтных работ;

- контроль общего уровня низкочастотной вибрации в полосе частот от 10 Гц до 1 кГц (границы частотного диапазона могут изменяться в зависимости от вида и скорости вращения машины) для обнаружения предаварийного состояния машины в целом, когда из-за частичного разрушения подшипника колебательные силы в нем перестают быть периодическими и могут скачкообразно изменяться во

время измерения. Такой контроль наиболее эффективен для интегральной оценки уровня дефектов на стадии деградации машин и оборудования, когда спектральный анализ низкочастотной вибрации может потерять чувствительность к группе одновременно растущих сильных дефектов.

Как и для подшипников качения, для диагностики и прогноза состояния других видов вращающихся узлов используются те же методы анализа вибрации. Диагностика машин по воздушному шуму проводится с применением тех же методов анализа сигналов, но гораздо реже. Трудности в диагностике по воздушному шуму связаны с тем, что в любую точку контроля шум от всех узлов и других машин доходит практически без потерь и, кроме того, в эту точку доходят и многократно отраженные эхосигналы, искажающие его структуру и значительно усложняющие процессы анализа и обработки результатов. Обычно диагностика по шуму производится тогда, когда узел недоступен для измерения вибрации, а шум узла можно измерить с помощью направленного микрофона.

Из специальных видов анализа вибрации в современных системах мониторинга и диагностики для повышения достоверности, эффективности и увеличения вероятности правильного обнаружения дефектов могут дополнительно использоваться:

- анализ траекторий (орбит) движения вала в подшипниках скольжения, применяемый обычно для диагностики крупных машин и агрегатов, в том числе турбин, электрических машин большой мощности и т.п.;
- статистический анализ шума и вибрации с оценкой всех моментов распределения их значений.

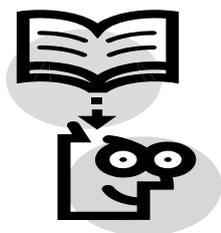


Контрольные вопросы

1. Почему измерение общего уровня вибрации или шума является наиболее простым из виброакустических методов?
2. Какими приборами измеряется общий уровень вибрации или шума?
3. Для каких целей используется информация об общем уровне вибрации или шума?

4. Что такое пик-фактор?
5. Какие абсолютные значения может приобретать пик-фактор?
6. Для каких целей используется метод ударных импульсов? Назовите его достоинства и недостатки.
7. Нарисуйте структурную схему прибора для измерения пик-фактора сигнала вибрации.
8. Что такое анализатор спектра? Каковы основные элементы структурных схем анализаторов спектра?
9. Назовите основные типы частотных анализаторов.
10. Каковы достоинства и недостатки анализаторов с постоянной абсолютной и постоянной относительной шириной полосы пропускания?
11. Что такое «полоса пропускания» полосового фильтра? Нарисуйте амплитудно-частотную характеристику идеального полосового фильтра.
12. Что называется эффективной шириной полосы пропускания реального полосового фильтра?
13. Для какой цели амплитудно-частотные характеристики фильтров анализаторов спектра пересекаются на некотором уровне?
14. Как определяется среднегеометрическая частота полосового фильтра с постоянной относительной шириной полосы пропускания?
15. Каковы причины широкого применения анализаторов спектра с постоянной относительной шириной полосы пропускания?
16. Что такое октава? Какова ширина (%) октавного диапазона частот от среднегеометрической частоты?
17. Что такое декада?
18. Что такое третьоктавная полоса?
19. Каково соотношение между верхней и нижней частотами третьоктавной полосы?
20. Чему равна относительная процентная ширина пропускания третьоктавного фильтра?
21. Что такое разрешающая способность анализаторов спектра?
22. Какой производственный фактор ограничивает разрешающую способность анализаторов спектра?
23. Каковы нижняя и верхняя граничные частоты вибрационного мониторинга?
24. Каковы основные недостатки диагностики машин по низкочастотной вибрации?

25. Почему среднечастотная вибрация находит ограниченное применение в вибродиагностике?
26. Какова природа сил, действующих в области высоких частот?
27. Как определяется глубина модуляции случайного амплитудно-модулированного сигнала вибрации?
28. По каким параметрам определяется вид и степень развития дефекта?
29. Каким образом формируется спектр огибающей высокочастотной вибрации?
30. Каковы основные достоинства метода огибающей высокочастотного сигнала?
31. Почему необходимо дополнять анализ спектра огибающей еще и спектральным анализом по низкочастотной вибрации?
32. Какие эксплуатационные факторы следует учитывать при постановке диагноза и прогноза?
33. В каких случаях и каким образом осуществляется диагностика по шуму?



Глава 4

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Измерение и анализ сигналов вибрации и шума являются одними из основных операций виброакустической диагностики. От качества измерения и анализа диагностических сигналов в значительной степени зависят эффективность и глубина диагноза.

Для виброакустического мониторинга и диагностики могут применяться различные средства измерения и анализа, основанные как на простых, так и на сложных алгоритмах анализа сигналов.

Многие годы простейшие системы виброакустической диагностики ориентировались на слуховые ощущения специально подготовленных операторов. Основным измерительным инструментом для них являлся стетоскоп (слухач), преобразовывающий низкочастотную вибрацию точки контакта в пульсацию давления воздуха в ушной раковине, который позволял обнаружить сильные дефекты и определить их местоположение. Опытные операторы, прослушивая воздушный шум, излучаемый вибрирующей поверхностью, могли обнаружить даже слабые и средние дефекты (по шуму на частотах 1–15 кГц).

Первый этап развития вибродиагностики связан с техническими средствами, которые стали использоваться – виброметрами, измеряющими величину низкочастотной вибрации (до 1000 Гц). Они использовались как контрольные приборы при допуске машин и оборудования в эксплуатацию, позволяя уйти от субъективных ощущений операторов, но не давая информации о наличии многих развитых дефектов, так как не обеспечивали возможности разделения вибрации на составляющие разной частоты. Именно поэтому такие средства не могли заменить опытных операторов, определяющих состояние машин и оборудования «на слух», а лишь дополняли субъективные ощущения оператора минимальной количественной оценкой вибрационной энергии машины на низких частотах.

Второй этап в развитии виброакустической диагностики связан с появлением приборов, измеряющих ультразвуковую вибрацию, которая не попадает в диапазон звуковых частот, воспринимаемых органами слуха человека. Такие приборы ориентированы в первую очередь на обнаружение зарождающихся дефектов в подшипниках каче-

ния, т.к. высокочастотная вибрация хорошо возбуждается даже микроударами, возникающими при разрыве слоя смазки. В связи с этим приборы, измеряющие вибрацию узлов машин и оборудования на частотах выше 15–25 кГц, с целью обнаружения зарождающихся дефектов, стали называться индикаторами состояния диагностируемых узлов, причем, прежде всего, подшипников качения. Но и эти приборы не позволяли определять реальную опасность обнаруживаемых дефектов и даже часто не реагировали на появление сильных дефектов, пропуская предаварийные ситуации. В последние годы в состав индикаторов состояния подшипников стали включаться дополнительно виброметры для измерения уровня низкочастотной вибрации, а также «звуковые каналы», преобразующие вибрацию в звуковом диапазоне частот в воздушный шум, прослушиваемый оператором с помощью наушников.

Третий этап развития средств виброакустической диагностики связан с появлением вычислительной техники для спектрального анализа сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье. Разделение сигнала вибрации и шума на большое число (400 и более) частотных составляющих позволило создать приборы с возможностями, превышающими характеристики органов слуха человека. Последующее появление доступных для многих пользователей средств измерения и спектрального анализа вибрации привело к созданию эффективных систем вибрационного мониторинга и диагностики роторных машин и агрегатов.

Измерение и анализ сигналов в системах виброакустической диагностики вращающихся машин и оборудования чаще всего производятся с помощью приборов, приспособленных для работы в промышленных условиях. В то же время эти операции могут выполняться и с помощью компьютера, на входе которого устанавливаются устройства, питающие измерительные преобразователи, усиливающие электрические сигналы и преобразующие сигналы в цифровую форму. Компьютер с такими устройствами называется виртуальным прибором для измерения и анализа вибрации и шума.

К измерительной и анализирующей аппаратуре, используемой для мониторинга и диагностики машин и оборудования, предъявляются весьма жесткие требования. В частности, она должна выполнять следующие основные операции:

- обеспечивать с помощью первичных измерительных преобразователей (датчиков) линейное преобразование шума и вибрации, из-

меряемых в заданных точках контроля, в электрический сигнал в широкой полосе частот;

- обеспечивать линейное усиление сигналов, передачу их (если требуется) на большие расстояния и ввод в анализирующие приборы, системы и/или ЭВМ;

- проводить автоматический контроль состояния измерительной и анализирующей аппаратуры;

- проводить в частотном и динамическом диапазонах анализ этих сигналов во временной и частотных областях, а также, если необходимо, в пространстве и/или по множеству измерений;

- автоматически обрабатывать и хранить в памяти данные измерений и результаты анализа;

- обеспечивать визуальное (графическое) отображение необходимой информации со сжатием и масштабированием во времени.

Кроме этого современные анализирующие приборы и системы должны уметь обмениваться данными с программным обеспечением для мониторинга виброакустического состояния и диагностики технического состояния объектов контроля. В свою очередь, указанное программное обеспечение должно выполнять:

- сортировку, накопление и хранение данных измерений, результатов анализа и другой необходимой информации;

- автоматическое формирование заданий на измерения и их передачу в измерительные приборы;

- допусковый контроль вибрации или шума машин и оборудования по действующим в различных отраслях промышленности нормам и требованиям;

- решение задач мониторинга, т.е. автоматическое обнаружение изменений вибрационного (акустического) состояния контролируемых машин и оборудования, наблюдение за их развитием и прогноз виброакустического состояния;

- решение задач технической диагностики, т.е. автоматическое обнаружение дефектов с определением вида и глубины каждого из них, наблюдение за их развитием и долгосрочный прогноз технического состояния;

- автоматическую выдачу рекомендаций по обслуживанию и ремонту машин и оборудования с учетом их фактического состояния.

4.1. Измерительные преобразователи

Для преобразования шума и вибрации в электрический сигнал используют измерительные преобразователи, которые могут быть двух типов – генераторные и параметрические.

Генераторные (энергетические) преобразователи представляют собой измерительные преобразователи, которые при воздействии на них измеряемых колебаний вырабатывают за счет энергии этих колебаний электрический сигнал в виде тока, заряда или напряжения. Таким образом происходит преобразование одного вида энергии в другой. Вспомогательный источник электрической энергии в общем случае принципиально *не нужен*. Мощность электрического сигнала на выходе преобразователя пропорциональна интенсивности измеряемых колебаний.

Параметрические преобразователи – это измерительные преобразователи, в которых при воздействии на них измеряемого колебательного процесса и за счет его энергии изменяется какой-либо электрический параметр (активное сопротивление R , индуктивность L или емкость C). Параметрическим преобразователям требуется электрическая энергия от *вспомогательного источника*.

4.1.1. Измерительные преобразователи шума – микрофоны

Измерительные преобразователи воздушного шума, называемые микрофонами, также делятся на генераторные и параметрические. Среди микрофонов генераторного вида встречаются электромагнитные, электродинамические, электретные и пьезоэлектрические. Среди параметрических микрофонов чаще всего встречаются угольные и конденсаторные.

По *частотному диапазону* микрофоны делятся на узкополосные (речевые), и широкополосные, а по *направленности* – на ненаправленные, односторонние, двухсторонние (восьмерочные), и остронаправленные.

Одним из широко распространенных преобразователей шума является электростатический (конденсаторный) микрофон. Это параметрический преобразователь звукового давления в электрический сигнал, работающий от источника постоянного напряжения (рис.4.1).

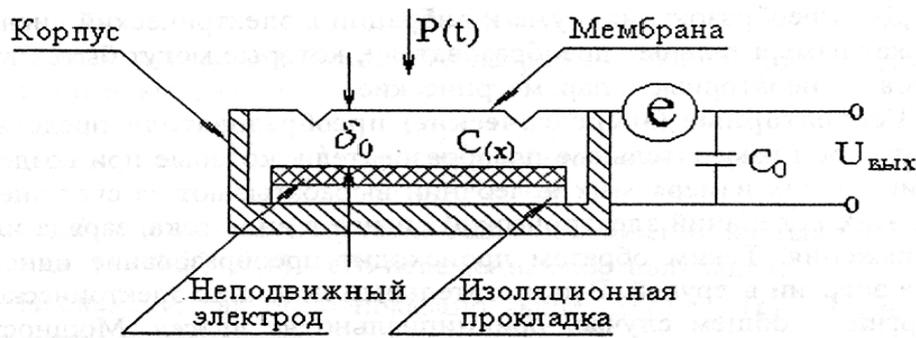


Рис. 4.1. Схема микрофона

Тонкая никелевая мембрана, закрепленная параллельно проводящему основанию, образует совместно с ним конденсатор емкостью $C(x)$. Последовательно к конденсатору $C(x)$ включены конденсатор C_0 и источник постоянного напряжения e .

Переменное напряжение $U_{\text{вых}}(t)$, пропорциональное величине переменного давления воздуха $P(t)$, снимается с емкости C_0 .

Определим связь перемещения мембраны $x(t)$ с действующим на нее звуковым давлением $P(t)$.

По закону Гука, сила, действующая на мембрану, равна

$$F = kx(t),$$

где k – жесткость мембраны;

$x(t)$ – смещение мембраны под действием звукового давления.

С другой стороны, для этой силы справедливо выражение

$$F = P(t) \cdot S,$$

где S – площадь мембраны

тогда

$$kx(t) = P(t) \cdot S,$$

отсюда

$$x(t) = \frac{P(t) \cdot S}{k}.$$

Следовательно, перемещение мембраны $x(t)$ прямо пропорционально величине звукового давления $P(t)$.

Далее определим связь выходного напряжения $U_{\text{вых}}(t)$ как функции от перемещения $x(t)$ мембраны. Для этого можно воспользоваться эквивалентной схемой микрофона, представленной на рис. 4.2.

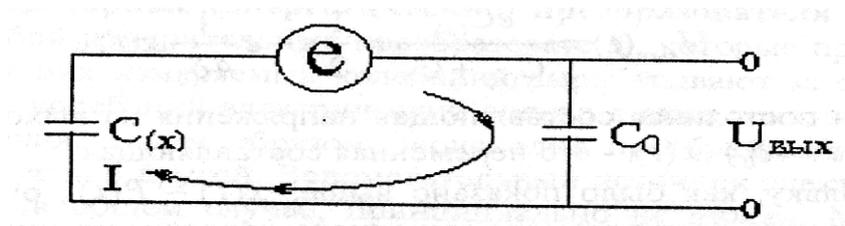


Рис. 4.2. Эквивалентная схема конденсаторного микрофона

В соответствии с эквивалентной схемой для выходного напряжения имеем

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{e \cdot C_{(x)}}{C_{(x)} + C_0}.$$

В исходном состоянии при отсутствии звукового давления, и, следовательно, при отсутствии перемещения мембраны, емкость конденсатора, образованного мембраной и неподвижным основанием, определяется выражением

$$C_{(x=0)} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{\delta_0},$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость воздуха;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость;

δ_0 – зазор между проводящим основанием и мембраной в исходном состоянии.

При действии звукового давления емкость конденсатора $C_{(0)}$ определяется выражением

$$C_{(x=0)} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{\delta_0 - x(t)},$$

где $x(t)$ – смещение мембраны под действием звукового давления.

Максимальная чувствительность микрофона достигается при условии

$$C_0 \equiv \overline{C(x)}.$$

В этом случае для выходного напряжения микрофона получим следующее выражение:

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{eC_{(x)}}{C_{(x)} + C_0} \approx \frac{1}{2}e - e \frac{1}{4\delta_0} x(t),$$

где $e/2$ – постоянная составляющая напряжения на выходе микрофона;

$(e/4\delta_0) \cdot x(t)$ – его переменная составляющая.

Поскольку, как было показано выше, $x(t) \sim P(t)$, очевидно, что переменная составляющая выходного напряжения микрофона прямо пропорциональна звуковому давлению, т.е.

$$U_{\sim \text{вых}} \sim P(t).$$

С учетом того, что $x(t) = P(t) \cdot S/k$, получим следующее выражение для переменной составляющей напряжения на выходе микрофона:

$$U_{\sim \text{вых}} = (e/4\delta_0) \cdot x(t) = P(t)eS/4\delta_0k \sim \nu \cdot P(t),$$

где $\nu = U_{\sim \text{вых}} / P(t) = eS/4\delta_0k$ – чувствительность микрофона, мВ/Па.

Типовые микрофоны не должны обладать направленностью, чтобы их чувствительность не зависела от угла падения звуковой волны. Для выполнения этого условия размеры мембраны не должны превышать половины длины звуковой волны с частотой, соответствующей верхнему значению частотного диапазона микрофона. Так, для граничной частоты $f_{cp} = 15$ кГц диаметр мембраны не должен превышать 12 мм.

Очевидно, что чем больше диаметр мембраны микрофона D , тем больше его чувствительность ν , но меньше диапазон частот, т.к. ниже резонансная частота f_0 .

Для сравнения приведем данные двух стандартных микрофонов: дюймового М-101 и полудюймового М-201:

М-101	М-201
$D = 24$ мм	$D = 13$ мм
$f_0 = 10$ кГц	$f_0 = 25$ кГц
$\nu = 40$ мВ/Па	$\nu = 10$ мВ/Па

Верхнюю границу диапазона рабочих частот принято определять как 1/3 или 1/2 от резонансной частоты f_0 .

Достоинствами электростатических конденсаторных микрофонов являются:

- широкий частотный диапазон;
- малая неравномерность частотной характеристики;
- низкие нелинейные и переходные искажения;
- высокая чувствительность;
- низкий уровень шумов.

К недостаткам можно отнести необходимость внешнего источника питания.

Рассмотренный микрофон относится к классу параметрических. В качестве примера генераторных микрофонов можно назвать электретный микрофон, который, по существу, представляет собой тот же конденсаторный, но постоянное напряжение для него обеспечивается не обычным источником, а электрическим зарядом мембраны или неподвижного электрода, материалы которых отличаются тем, что способны сохранять этот заряд длительное время. Электреты – это поляризованные диэлектрики в виде пластин или пленок, несущие на противоположных сторонах связанные заряды разных знаков и создающие электрическое поле в окружающем пространстве. Время релаксации таких диэлектриков может достигать 10 лет и более.

4.1.2. Измерительные преобразователи вибрации

Измерительные преобразователи вибрации значительно различаются и по принципам действия и по конструкции в зависимости от диапазона частот измеряемой вибрации. В качестве измерительных преобразователей могут быть использованы датчики вибро смещения, вибро скорости или вибро ускорения. Особенности их применения:

- *датчики вибро смещения (вибро перемещения)* чаще всего используются для измерения вибрации на низких и сверхнизких частотах, причем, как правило, являются параметрическими;

- *датчики вибро скорости* используются для измерения вибрации на низких и средних частотах и могут быть как генераторными, так и параметрическими. Чаще всего нормирование вибрации объектов контроля производится именно по вибро скорости;

- *датчики вибро ускорения* используются для измерения вибрации в широком диапазоне частот – от низких до ультразвуковых. Исключение составляют сверхнизкие частоты, на которых точности измерения падают, а уровень собственных шумов растет. Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические датчики вибрации генераторного типа. Эти же датчики с электрическим интегратором на выходе используются для измерения вибро скорости, а иногда с двойным интегратором для измерения вибро смещения.

Измерительные преобразователи вибро смещения

Множество существующих типов датчиков смещения, называемых проксиметрами, используют различные принципы преобразования вибрации в электрический сигнал.

Тензометрические вибропреобразователи. Одна из возможных схем тензометрического вибропреобразователя приведена на рис. 4.3. Основой такого преобразователя является тензосопротивление $R(x)$, закрепленное на упругом элементе, один конец которого неподвижен, а второй контактирует с колеблющейся поверхностью контролируемого объекта. Проводимость тензосопротивления изменяется в зависимости от деформации упругого элемента, на котором он крепится, а деформация преобразователя определяется величиной относительного смещения подвижной и неподвижной поверхностей. Такого вида преобразователи являются параметрическими, и им требуется внешний источник энергии e_0 .

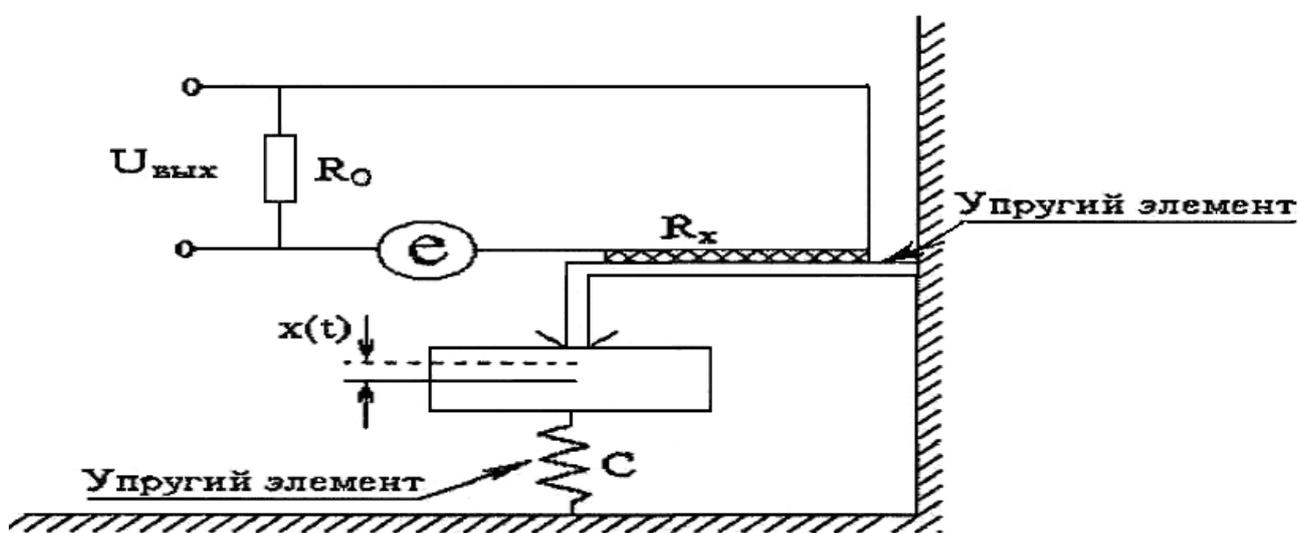


Рис. 4.3. Схема тензометрического вибропреобразователя

Выходное напряжение, снимаемое с последовательно включенного с $R(x)$ сопротивления R_0 , равно

$$U_{\text{вых}} = e_0 \frac{R_0}{R_0 + R(x)}.$$

Переменную составляющую выходного напряжения тензометрического преобразователя можно представить в виде

$$U_{\sim \text{вых}} = V_x x(t),$$

где V_x – чувствительность преобразователя колебательного смещения, мВ/мкм;

$x(t)$ – относительное смещение точки измерения и неподвижной поверхности.

К недостаткам этих преобразователей можно отнести:

- обязательное наличие внешнего источника питания;
- неудобство измерений, связанное с необходимостью иметь неподвижную опору для крепления датчика;
- невозможность выполнять бесконтактные измерения, например, вибросмещения вращающегося ротора относительно неподвижного корпуса машины. Фактически тензометрические преобразователи являются наиболее удобным средством измерения колебательных сил, а не вибрации.

Дифференциальные конденсаторные вибропреобразователи. Один из возможных вариантов дифференциального конденсаторного параметрического датчика представлен на рис. 4.4.

Инерционная масса датчика, закрепленная упругими элементами, и два неподвижных электрода в виде фольги образуют две емкости – $C_{1(x)}$ и $C_{2(x)}$, изменяющиеся при действии вибросмещения. Прогиб пружины под действием силы тяжести инерционной массы компенсируется специальными винтами, с помощью которых можно регулировать зазоры.

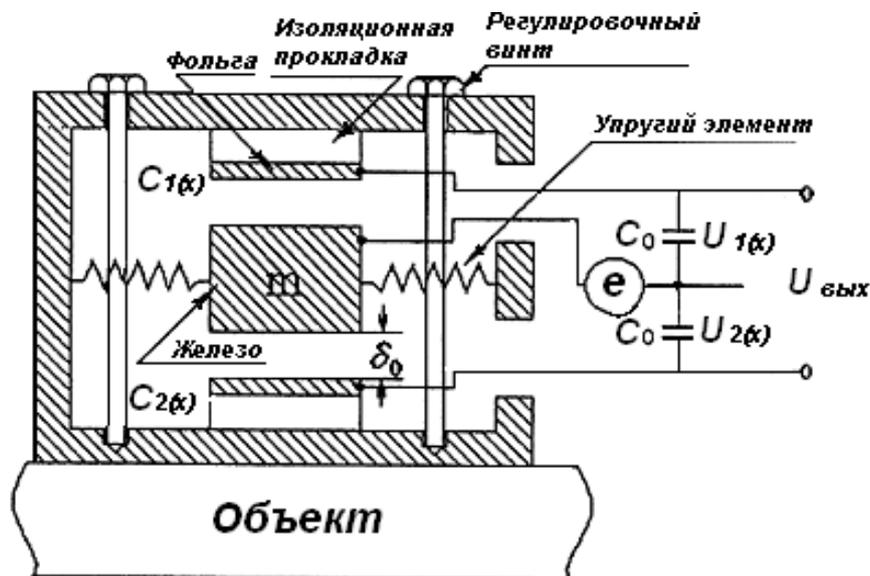


Рис. 4.4. Схема дифференциального конденсаторного датчика вибросмещения

Для двух одинаковых емкостей C_0 на выходе датчика требуется соблюдение условия, при котором его чувствительность будет максимальной:

$$\overline{C_{1(x)}} = \overline{C_{2(x)}} = C_0.$$

При действии механических колебаний, (вибросмещения) выражения для переменных емкостей датчика $C_{1(x)}$ и $C_{2(x)}$ можно представить, соответственно, в следующем виде:

$$C_{1(x)} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{\delta_0 + x(t)} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{\delta_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{x(t)}{\delta_0}} = C_0 \cdot \frac{1}{1 + \frac{x(t)}{\delta_0}};$$

$$C_{2(x)} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{\delta_0 - x(t)} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{\delta_0} \cdot \frac{1}{1 - \frac{x(t)}{\delta_0}} = C_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{x(t)}{\delta_0}}.$$

Эквивалентная схема дифференциального конденсаторного датчика вибросмещения представлена на рис. 4.5.

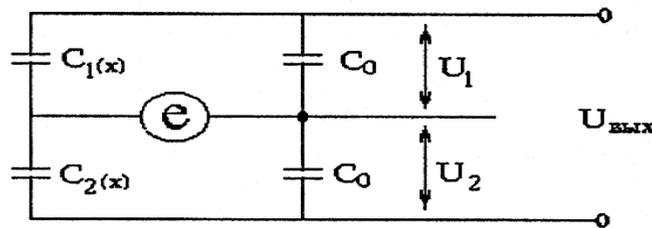


Рис. 4.5. Эквивалентная схема дифференциального конденсаторного датчика вибросмещения

В соответствии с эквивалентной схемой датчика для выходного напряжения можно записать:

$$U_{\text{вых}} = U_1(x) - U_2(x);$$

$$U_1(x) = \frac{e \cdot C_{1(x)}}{C_{1(x)} + C_0} = \frac{e}{2 + \frac{x}{\delta_0}};$$

$$U_2(x) = \frac{e \cdot C_{2(x)}}{C_{2(x)} + C_0} = \frac{e}{2 - \frac{x}{\delta_0}}.$$

Окончательно для выходного напряжения получим

$$U_{\text{вых}}(x) = e \cdot \frac{-2 \frac{x(t)}{\delta_0}}{4 - \left[\frac{x(t)}{\delta_0} \right]^2} \approx -\frac{e}{2} \cdot \frac{x(t)}{\delta_0}.$$

Таким образом, встречное включение двух емкостей датчика – $C_{1(x)}$ и $C_{2(x)}$ компенсирует постоянную составляющую напряжения и уменьшает нелинейность его характеристики.

Основные недостатки преобразователя определяются тем, что измерение вибросмещения выполняется на частотах выше резонансной частоты инерционной массы на упругих элементах. При ее снижении ниже 10 Гц конструкция преобразователя становится «мягкой», габариты растут и резко усложняются регулировки при выставлении нулевого положения инерционной массы.

Вихретоковые вибропреобразователи. Вихретоковые вибропреобразователи получили наиболее широкое применение среди датчиков вибросмещения. Они предназначены для бесконтактного измерения вибрации и перемещения электропроводящих объектов относительно неподвижной точки, в которой устанавливается датчик. Приоритетной областью использования вихретоковых преобразователей является контроль осевого смещения и поперечного биения валов больших турбин, компрессоров, электромоторов и других машин, в которых используются подшипники скольжения.

Вихретоковый вибропреобразователь представляет собой систему (рис. 4.6) из катушки индуктивности, закрепленной на конце диэлектрического стержня, и электронного устройства. Эта катушка со специально подобранной емкостью образует резонансный контур. На вход контура с электрического генератора, входящего в состав электронного блока, подается высокочастотный сигнал. Если катушку поместить на небольшом расстоянии от электропроводящей поверхности, на поверхности будут наводиться токи Фуко, и часть электрической энергии контура будет передаваться на нее и преобразовываться в тепло. Потери в контуре изменяют его добротность и снижают амплитуду резонансных колебаний. Таким образом, амплитуда колебаний зависит от расстояния между катушкой индуктивности и электропроводящей поверхностью. Естественно, что колебания этой поверхности приводят и к аналогичным колебаниям добротности резонансного контура и, как следствие – к амплитудной модуляции резонансных колебаний в контуре. Сигнал с контура подается на амплитудный детектор, и затем выпрямляется и из него вычитается опорная составляющая. Выходной сигнал преобразователя в итоге становится пропорциональным расстоянию от катушки до контролируемого объекта.

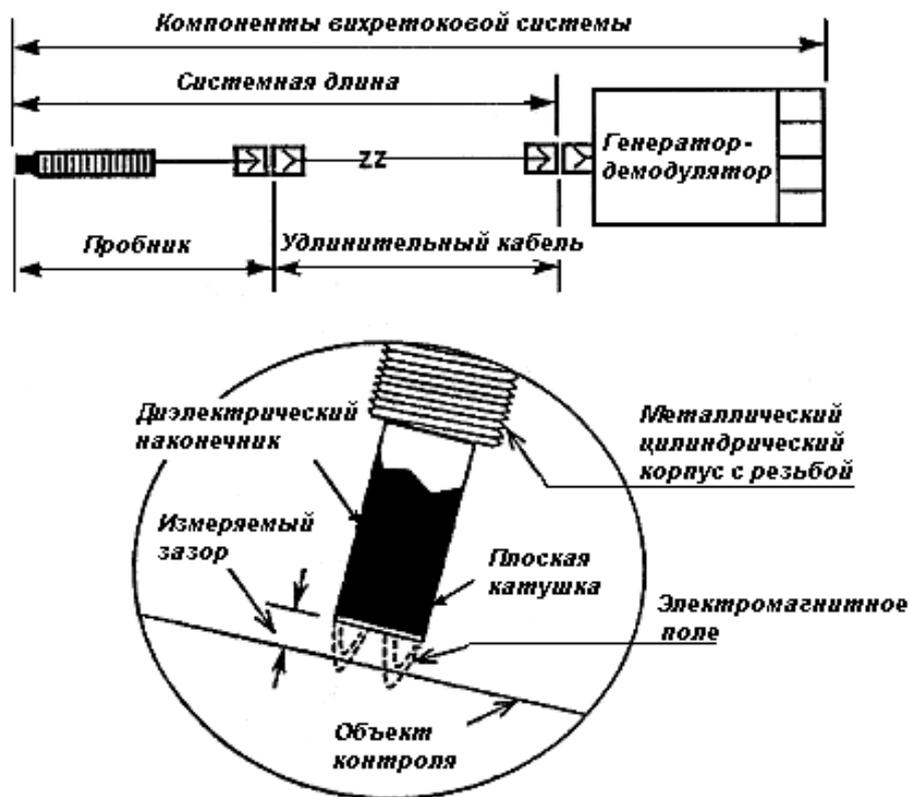


Рис. 4.6. Вихрековый вибропреобразователь

Резонансная частота контура (и частота генерируемых колебаний) зависит от верхней границы частотного диапазона преобразователя и превышает ее не менее чем в три раза. Максимальное расстояние от катушки до контролируемого объекта зависит от размеров катушки и расстояния от катушки до ближайших неподвижных электропроводящих поверхностей. Обычно это расстояние составляет от 0,5 мм до 1,0–3,0 мм. Поскольку от расстояния между катушкой и контролируемой поверхностью зависят не только активные потери в контуре, но и индуктивность катушки, а, следовательно, и резонансная частота контура, приходится принимать специальные меры в виде автоподстройки частоты генератора или учета изменений индуктивности в полезном сигнале на выходе преобразователя. Иногда для снижения влияния неподвижных электропроводящих поверхностей, находящихся в непосредственной близости к датчику, на точность его показаний, контур помещают в ферритовый сердечник, открытый со стороны контролируемой поверхности.

Наиболее часто вихрековые датчики применяются для измерения относительного перемещения между шейкой вала, закрепленной в подшипнике скольжения, и корпусом подшипника скольжения.

Во многих случаях устанавливаются два датчика перпендикулярно валу, которые ориентированы относительно друг друга под углом 90° , что позволяет визуально наблюдать орбиту движения вала в радиальной плоскости (рис. 4.7 а).

Для измерения осевого сдвига датчик размещают параллельно оси в торце вала и (или) параллельно плоскости измерительного буртика (рис. 4.7 б). Иногда для усиления диагностических возможностей в торце вала рекомендуется устанавливать два датчика, что позволяет помимо осевого смещения измерять угол отклонения вала от осевой линии.

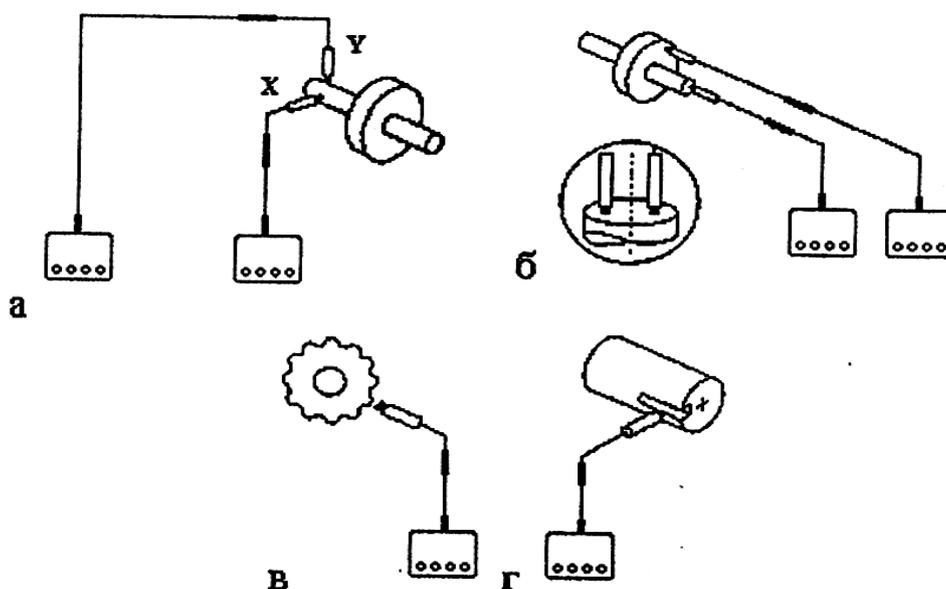


Рис. 4.7. Измерения величин:
*Радиальной вибрации (а), осевого смещения (б) и частоты вращения (в, г)
 или углового положения ротора (г)*

Часто вихретоковые датчики используются для измерения частоты вращения или углового положения ротора (рис. 4.7 в, г). Формирование отклика датчика обеспечивается небольшим выступом или углублением на валу. Вихретоковый датчик в виде формирователя фазовой метки часто используют совместно с X-Y – датчиками радиальной вибрации для определения ориентации орбиты движения вала относительно фазовой метки. Это позволяет легко определить место установки противовеса для устранения дисбаланса вала.

Отношение сигнал/шум вихретоковых датчиков зависит от состояния поверхности вала, а также от качества внешнего источника питания датчика. Реальная оценка составляет 20–40 дБ в частотном

$$U_{\sim \text{вблх}} = -Blv = -Bl\dot{x}(t),$$

где B – магнитная индукция, Тл;

l – общая длина проводника, находящегося в магнитном поле, м.

Рабочий диапазон частот электродинамических преобразователей лежит выше утроенного значения собственной частоты колебаний инерционного элемента m на упругих элементах C (рис. 4.9).

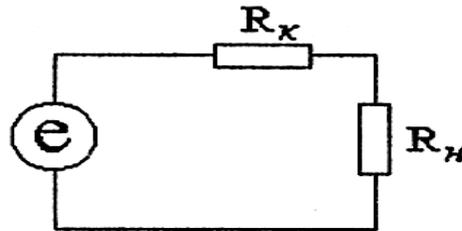


Рис. 4.9. Эквивалентная схема велосиметра

Преимуществом такого датчика является его достаточно мощный выходной сигнал, т.к. ток в контуре I определяется выражением

$$I = \frac{e}{R_k + R_n},$$

где выходное сопротивление (сопротивление катушки R_k) – мало по сравнению с сопротивлением нагрузки R_n . Это обеспечивает высокую помехоустойчивость в условиях действия электромагнитных помех.

К недостаткам преобразователей электродинамического типа можно отнести их относительно большие габариты. Поскольку нижняя граница частотного диапазона такого датчика часто даже выше аналогичной границы акселерометра с интегратором на его выходе, электродинамические велосиметры не получили широкого распространения.

Измерительные преобразователи виброускорения

Во многих практических случаях для мониторинга и диагностики используются измерительные преобразователи виброускорения. Это объясняется тем, что выходной электрический сигнал таких датчиков, пропорциональный ускорению механических колебаний, эффективно измеряет высокочастотную вибрацию, а при необходимости выходной сигнал виброускорения с помощью интеграторов может быть преобразован в сигнал скорости и перемещения. На практике в основном используются пьезоэлектрические датчики ускорения

(акселерометры), представляющие собой генераторные преобразователи вибрации.

В качестве пьезоэлектрических материалов в акселерометрах применяется искусственно поляризованная керамика с металлизированными обкладками, процесс поляризации которой аналогичен процессу намагничивания железа в магнитном поле. Типы керамики, используемые в измерительных преобразователях виброускорения, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Типы керамики, используемые в акселерометрах

PZ-23	PZ-27	PZ-45	PZ-100
Искусственно поляризованная ферроэлектрическая керамика (из группы титанатов и цирконатов свинца) $v \approx 300 \text{ пКл/Н}$ $t^0 \text{ до } +250^0 \text{ С}$	Искусственно поляризованная керамика (цирконат титанат свинца). Используется в малогабаритных акселерометрах	Ферроэлектрическая керамика по специальному рецепту, $t^0 \text{ до } +400^0 \text{ С}$. Используется при ударах с большими амплитудами	Кварцевые кристаллы. Обладают малой чувствительностью к быстрым изменениям температуры. Используются в эталонных акселерометрах

При воздействии кратковременного импульса высокого напряжения на обкладке происходит ориентация доменов молекулярной структуры материала в одном направлении (рис. 4.10) [17].

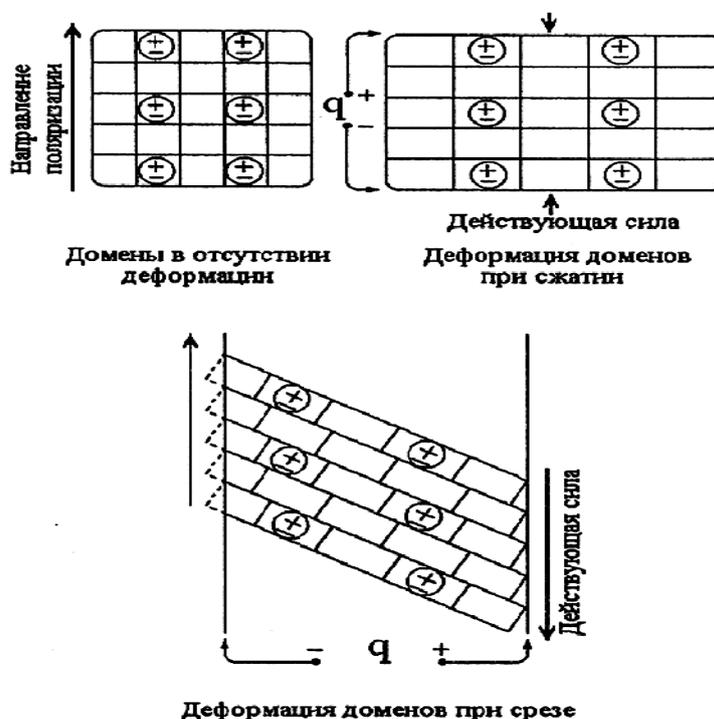


Рис. 4.10. Упрощенная модель пьезоэлектрического эффекта искусственно поляризованной керамики

Деформация пьезоэлементов может быть вызвана *сжимающим* или *срезающим* усилием. И в одном и в другом случае электрический заряд образуется на поверхностях, находящихся под воздействием силы. Следует отметить, что при сжатии возникает паразитный электрический заряд из-за изменений температуры окружающей среды, а при срезающем усилии нет, поэтому акселерометры, работающие на срезающем усилии, предпочтительны.

Схема одного из возможных вариантов акселерометра, работающего на сжатие, представлена на рис. 4.11.

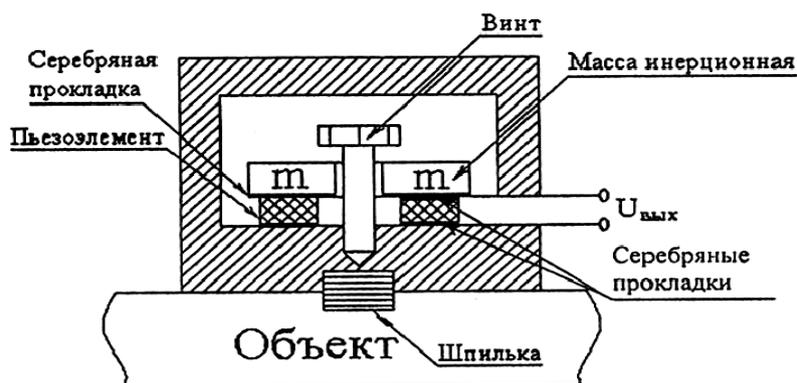


Рис. 4.11. Схема измерительного преобразователя виброускорения

Основными элементами акселерометра являются пьезоэлемент в виде поляризованной шайбы (или пластины) с металлическими обкладками и инерционный элемент m . Вибродатчик ускорения основан на пьезоэлектрическом эффекте. Воздействующие на акселерометр механические колебания приводят к тому, что на пьезоэлемент действует динамическая сила $F(t)$, равная произведению ускорения инерционной массы $\ddot{x}(t)$ на саму массу m :

$$F(t) = m \cdot \ddot{x}(t).$$

Под действием динамической силы $F(t)$, пропорциональной ускорению объекта $\ddot{x}(t)$, на котором установлен акселерометр, деформируется пьезоэлемент, в нем появляется объемный заряд $q(t)$, а на его обкладках – напряжение $U_{\text{вых}}(t)$. Величина заряда равна

$$q(t) = F(t) \cdot d = m\ddot{x}(t) \cdot d = v_q \ddot{x}(t),$$

где d – пьезомодуль керамики, максимальная величина которого близка к $3 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н;

v_q – чувствительность акселерометра по заряду.

Одна из существенных особенностей акселерометров – их очень большое сопротивление, исчисляемое гигаомами, что характерно для пьезокерамики.

Как было упомянуто выше, более предпочтительными являются акселерометры, работающие на срезающих усилиях (рис. 4.12).

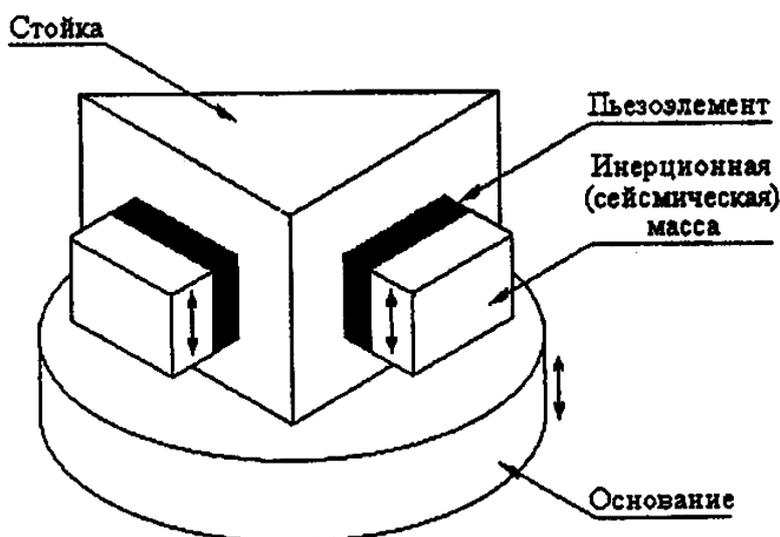


Рис. 4.12. Упрощенная модель пьезоэлектрического акселерометра

На треугольной стойке акселерометра крепятся его активные элементы, изготовленные из пьезоэлектрического материала. Они исполняют роль пружин, осуществляющих механическую связь между треугольной стойкой, соединенной с основанием датчика, и тремя инерционными массами. Поскольку амплитуда и фаза ускорения инерционных масс в широком частотном диапазоне идентичны амплитуде и фазе ускорения основания акселерометра, общий электрический заряд пропорционален ускорению основания и, следовательно, ускорению механических колебаний поверхности объекта, на котором закреплен акселерометр.

Систему пьезоэлектрического акселерометра можно представить в виде еще более упрощенной и допускающей несложное математическое описание механической модели (рис. 4.13).

Это колебательная система с одной степенью свободы. Она представляет собой две незакрепленные и соединенные друг с другом через идеальный упругий элемент инерционные массы.

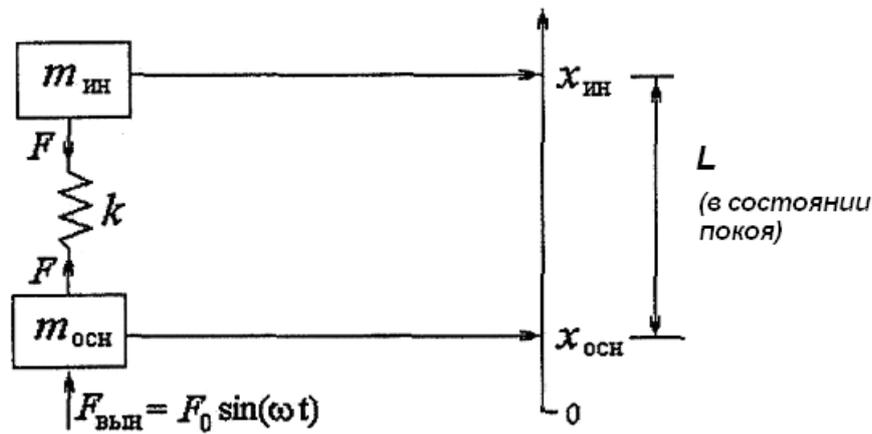


Рис. 4.13. Упрощенная механическая модель акселерометра:
 $m_{ин}$ – инерционная масса; $m_{осн}$ – масса основания датчика; k – эквивалентная жесткость акселерометра; F – сила, действующая на упругий элемент;
 $F_{вын}$ – вынуждающая сила, действующая на основание датчика;
 $x_{ин}$ – перемещение инерционной массы; $x_{осн}$ – перемещение основания акселерометра

Учитывая силы, действующие на элементы модели, можно написать следующие уравнения:

для силы, действующей на упругий элемент

$$F = k(x_{ин} - x_{осн} - L);$$

для силы, действующей на основание акселерометра

$$m_{осн} \cdot \ddot{x}_{осн} = F + F_{вын};$$

для силы, действующей на инерционные массы

$$m_{ин} \cdot \ddot{x}_{ин} = -F.$$

Движение модели определяется уравнением

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{ин} - \ddot{x}_{осн} &= -\frac{F}{m_{ин}} - \frac{F + F_{вын}}{m_{осн}} = -F \left(\frac{1}{m_{ин}} + \frac{1}{m_{осн}} \right) - \frac{F_{вын}}{m_{осн}} = \\ &= -k(x_{ин} - x_{осн} - L) \cdot \left(\frac{1}{m_{ин}} + \frac{1}{m_{осн}} \right) - \frac{F_{вын}}{m_{осн}}, \end{aligned}$$

где $(x_{ин} - x_{осн} - L) = r$ – перемещение инерционной массы относительно основания акселерометра; $\left(\frac{1}{m_{ин}} + \frac{1}{m_{осн}} \right) = \left(\frac{1}{\mu} \right)$;

μ – приведенная масса.

Тогда уравнение движения модели можно записать в виде:

$$\mu \cdot \ddot{r} = -kr - \frac{\mu}{m_{осн}} F_0 \sin \omega t \cdot t.$$

Если акселерометр не закреплен на объекте и не подвергается действию внешних сил, т.е. $F_{внн} = 0$, то уравнение его свободных колебаний будет иметь вид:

$$\mu \cdot \ddot{r} = kr.$$

Если система линейна, то перемещение инерционной массы относительно основания акселерометра r тоже изменяется по гармоническому закону. Тогда, полагая, что $r = R \sin \omega t \cdot t$, получим

$$-\mu \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega \cdot t = -kR \cdot \sin \omega \cdot t.$$

Отсюда, обозначив $\omega \rightarrow \omega_{рез}$, получим для резонансной частоты акселерометра

$$\omega_{рез}^2 = \frac{k}{\mu}$$

или

$$\omega_{рез}^2 = \frac{k}{\mu} = k \left(\frac{1}{m_{ин}} + \frac{1}{m_{осн}} \right).$$

Для прочно закрепленного акселерометра $m_{осн} \gg m_{ин}$, и можно считать, что $m_{осн} \rightarrow \infty$, тогда квадрат частоты резонанса закрепленного на объекте акселерометра будет равен

$$\omega_m^2 = \frac{k}{m_{ин}}.$$

Определенная таким образом резонансная частота является основным параметром акселерометра. На практике нельзя закрепить акселерометр на поверхности с бесконечной массой и жесткостью, следовательно, нельзя определить экспериментальным путем действительное значение его резонансной частоты.

Приближенное значение резонансной частоты закрепленного на объекте акселерометра принято определять, устанавливая его на стальном кубике массой 180 г и подвергая воздействию механических колебаний с фиксированной амплитудой ускорения и с регулируемой в широком диапазоне частотой.

Значение частоты собственного резонанса незакрепленного акселерометра в значительной степени зависит от отношения общего значения $m_{ин}$ к значению $m_{осн}$. Практическим правилом можно считать $m_{ин} \approx m_{осн}$, тогда

$$\omega_m / \omega_{рез} \approx 1 / \sqrt{2}.$$

Частота резонанса закрепленного на объекте датчика уменьшается с увеличением податливости крепежного приспособления k . Таким образом, метод крепления может быть причиной возникновения нового резонанса с меньшей частотой.

Колебательное движение акселерометра под действием вынуждающей силы можно представить в следующем виде, разделив каждый член уравнения движения модели на μ :

$$\ddot{r} = -\frac{k}{\mu} r - \frac{F_0}{m_{осн}} \sin \omega \cdot t.$$

Учитывая, что $\omega_{рез}^2 = k/\mu$, получим уравнение колебаний акселерометра:

$$\ddot{r} + \omega_{рез}^2 r + \frac{F_0}{m_{осн}} \sin \omega \cdot t = 0.$$

При гармоническом законе перемещения с амплитудой R массы инерционной относительно массы основания полученное выражение примет вид:

$$-R\omega^2 \sin \omega \cdot t + \omega_{рез}^2 R \sin \omega \cdot t + \frac{F_0}{m_{осн}} \sin \omega \cdot t = 0.$$

Решая уравнение относительно амплитуды колебаний акселерометра, получим

$$R = -\frac{F_0}{m_{осн} (\omega_{рез}^2 - \omega^2)}.$$

На низких частотах, когда $\omega \ll \omega_{рез}$, можно записать

$$R_0 = -\frac{F_0}{m_{осн} \omega_{рез}^2},$$

тогда отношение амплитуды перемещения инерционной массы относительно массы основания R к этой же амплитуде на низких частотах R_0 можно представить в виде:

$$\frac{R}{R_0} = \frac{-\frac{F_0}{m_{осн}(\omega_{рез}^2 - \omega^2)}}{-\frac{F_0}{m_{осн}\omega_{рез}^2}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{рез}}\right)^2}.$$

Как видно из полученного выражения, при частоте вынуждающей силы, соизмеримой с частотой собственного резонанса акселерометра, увеличивается перемещение основания датчика относительно его инерционных масс.

Если подставить вместо резонансной частоты датчика $\omega_{рез}$ частоту резонанса закрепленного на объекте акселерометра ω_m , можно получить выражение для его амплитудно-частотной характеристики (рис. 4.14):

$$\frac{R}{R_0} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^2}.$$

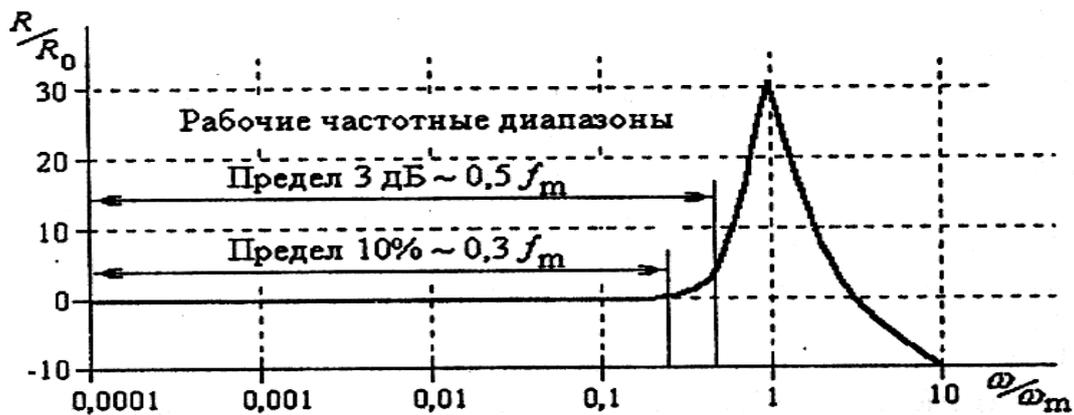


Рис. 4.14. Амплитудно-частотная характеристика акселерометра

Нижний предел частоты акселерометра определяется двумя факторами:

- 1) нижней частотой среза f_n , используемого вместе с акселерометром предусилителя ($f_n \approx 0,003$ Гц);
- 2) влиянием изменений температуры окружающей среды. Как уже отмечалось ранее, минимальной чувствительностью к изменению температуры обладают акселерометры, пьезоэлемент которых работает под срезающим усилием. Как правило, эта величина не превышает 0,1 Гц.

Верхний предел частоты акселерометра определяется резонансом закрепленного датчика. Так, для акселерометров общего назначения резонансная частота $f_{рез} \approx 20...30$ кГц, при малой массе датчика $f_{рез} \rightarrow 180$ кГц.

В инженерной практике часто используется эмпирическое правило: если верхняя частота рабочего частотного диапазона акселерометра в три раза меньше его резонансной частоты, то погрешность измерений не превышает + 12%.

К основным характеристикам вибропреобразователя ускорения относятся чувствительность v_a , масса m , динамический диапазон.

Чувствительность не является критический параметром, т.к. акселерометры всегда используются с предусилителями. Обязательное применение предварительного усилителя обусловлено, в первую очередь, необходимостью согласования акселерометра, внутреннее электрическое сопротивление которого очень велико и составляет десятки или сотни гигаом, с усилителем, входное сопротивление которого намного порядков меньше, поэтому пьезоэлемент датчика можно представить как параллельную комбинацию конденсатора емкостью C_A и резистора R_A с таким большим сопротивлением, что им можно пренебречь.

Пьезоэлектрический акселерометр может представлять собой (рис. 4.15):

- *источник электрического заряда*, тогда его можно рассматривать как идеальный источник заряда Q_A с параллельно соединенными конденсатором емкостью C_A и емкостью соединительного кабеля C_K , которая является нагрузкой;
- *источник напряжения*, тогда его можно рассматривать как источник напряжения в последовательном соединении с конденсатором C_A , работающим на нагрузку, представляющую собой емкость соединительного кабеля C_K [17].

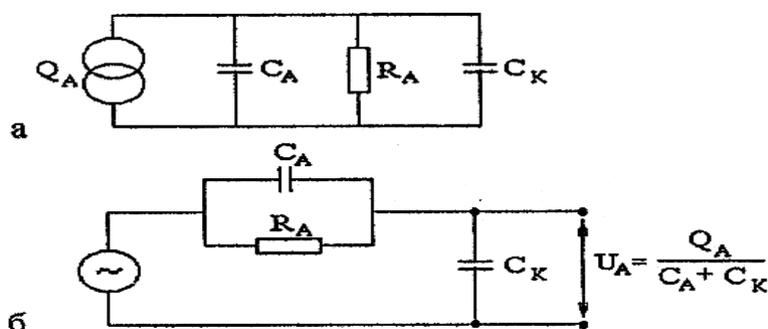


Рис. 4.15. Эквивалентные схемы акселерометров: а) с источником заряда; б) с источником напряжения

Для акселерометра чувствительность по заряду v_q (пКл/(м/с²)) определяется отношением электрического заряда к ускорению механических колебаний

$$v_q = Q_A / \ddot{x},$$

а чувствительность по напряжению v_u (мВ/(м/с²)) рассчитывается как отношение выходного напряжения акселерометра U_A к ускорению механических колебаний \ddot{x} :

$$v_u = U_A / \ddot{x}.$$

Следует отметить, что величина выходного напряжения акселерометра U_A зависит от емкости кабеля C_K , а величина заряда Q_A не зависит от C_K . Следовательно, применение различных кабелей или кабелей различной длины влияет на чувствительность по напряжению и требует повторной калибровки. Это обстоятельство и определяет преимущественное использование усилителей заряда, а не усилителей напряжения.

Изменение чувствительности акселерометра по заряду в пределах рабочего частотного диапазона составляет меньше $\pm 5\%$, а по напряжению – менее $+10\%$ (рис. 4.16).

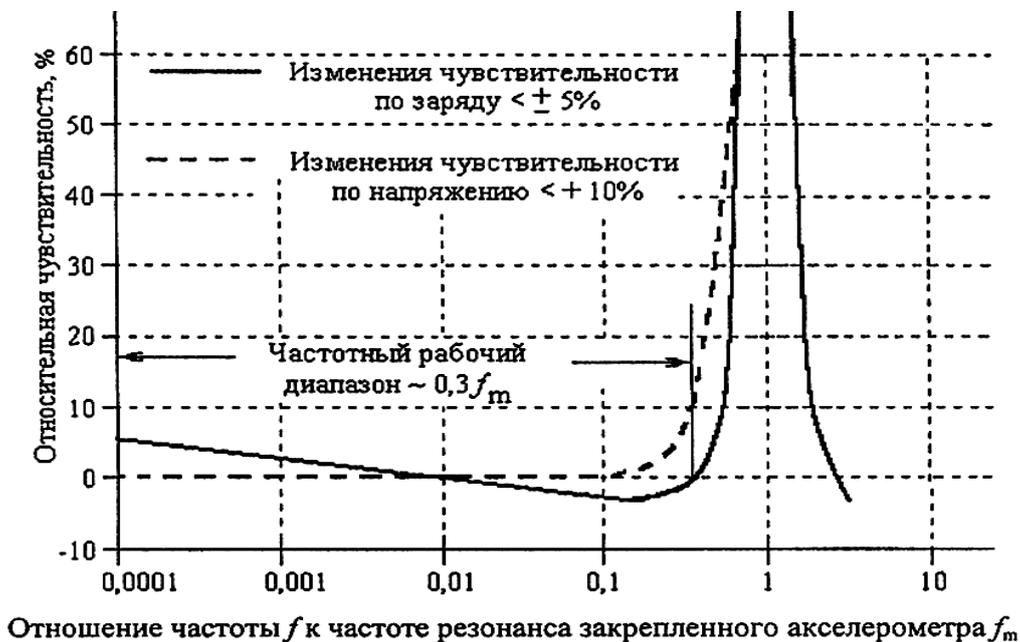


Рис. 4.16. Чувствительность акселерометра по заряду и по напряжению

Акселерометр обладает основной чувствительностью вдоль его продольной оси, но имеет и некоторую поперечную чувствительность (рис. 4.17).

Отношение поперечной чувствительности v_{non} к продольной v_{prod} составляет величину

$$v_{non}/v_{prod} \approx 4...10\%.$$

Минимальная величина этого соотношения соответствует идеальному случаю: акселерометр хорошо закреплен на ровной и гладкой поверхности.

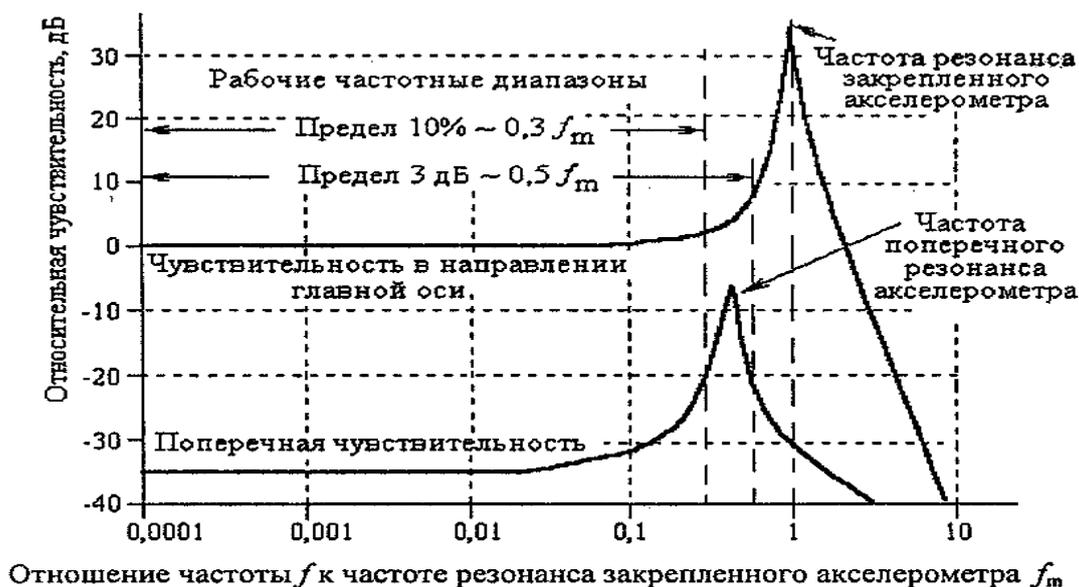


Рис. 4.17. Продольная и поперечная чувствительность

Амплитудно-частотные характеристики акселерометров отличаются исключительной линейностью (рис. 4.18). Снизу ограничения рабочего диапазона определяются собственными шумами предусилителя, кабеля и окружающей среды. Верхний предел амплитудно-частотной характеристики, выше которого характеристика становится нелинейной, определяется непосредственно акселерометром. При уровнях ускорения, превышающих верхний предел, характеристика становится нелинейной и может возникнуть осевое перемещение стяжного кольца, закрепляющего пьезоэлементы.

В этом случае кольцо может соприкоснуться с основанием и тогда акселерометр выходит из строя и его невозможно восстановить. Нижний предел частотного диапазона датчика определяется параметрами предусилителя и условиями окружающей среды.

Современные акселерометры снабжены пьезоэлектрическими или сегнетоэлектрическими чувствительными элементами, работающими при сжатии или срезывающем усилии. Их отличают высокая стойкость к воздействию окружающей среды и высокая стабильность.

Помимо акселерометров общего назначения выпускаются специальные датчики, например, акселерометры для измерения сильных механических ударов, механических колебаний низкой частоты и малой амплитуды, специальные акселерометры для работы при высокой или изменяющейся температуре, специальные акселерометры для калибровки и легкие акселерометры для измерений и анализа колебаний миниатюрных и легких конструкций.



Рис. 4.18. Динамический диапазон акселерометра

Области применения отдельных акселерометров до некоторой степени перекрываются, однако большая номенклатура позволяет проводить оптимальный выбор датчика для конкретной области использования. Так, в табл. 4.2 для примера приведены основные технические данные некоторых типов акселерометров.

Таблица 4.2

Технические характеристики акселерометров

Тип акселерометра	Чувствительность		Диапазон рабочих частот, Гц	Резонансная частота, кГц	Максимальная рабочая температура, t ⁰ , С	Масса, г	Область применения и особенности
	По заряду, мкКл/(мс ⁻²)	По напряжению, мВ/(мс ⁻²)					
1	2	3	4	5	6	7	8
Датчики фирмы «Брюль и Кьер» (Дания, г.Нэрум)							
4366	4,8	4	0,2-8100	27	250	28	Для общих измерений механических колебаний и ударов. Отличаются оптимальными параметрами и высокой стойкостью к воздействию окружающей среды и деформации основания
4367	2,2	1,8	0,2-9600	32	180	13	
4368	4,8	4	0,1-8100	27	250	30	
4369	2,2	1,8	0,2-9600	32	180	14	

Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8
4371	1±2%	0,8	0,2-12700	42	250	11	Для общих измерений механических колебаний и ударов, а также колебаний с малыми амплитудами. Обладают малой чувствительностью к изменению температуры и деформации основания
4384	1±2%	0,8	0,2-12700	42	250	11	
4370	10±2%	8	0,2-5400	18	250	54	Для измерения колебаний с малыми амплитудами. Отличаются нормализованной чувствительностью, высокой линейностью амплитуды сигнала и большим отношением чувствительности к собственной массе датчика
4381	10±2%	8	0,2-5400	18	250	43	
4374	0,11	0,18	1-2600	85	250	0,65	Для измерения колебаний легких объектов с относительно большими амплитудами и высокими частотами. Снабжены неразъемными малошумными кабелями длиной 0,4 м. Имеют малые габариты и массу
4375	0,35	0,45	1-16500	55	250	2,6	
8309	0,004	0,04	1-54000	180	120	3 (без кабеля)	Для измерения колебаний с большими амплитудами (ускорение до 300 км/с ²) и интенсивных ударов с пиковыми амплитудами ускорения до 1000 км/с ² (взрывы, удары или сотрясения, испытания пневматических инструментов, измерения колебаний клапанов двигателей внутреннего сгорания и т.п.). Имеет специально обработанный чувствительный элемент из пьезокерамики типа PZ 45, что обеспечивает высокую ударную стойкость и малый сдвиг нуля. Соединительный кабель длиной 300 мм является частью его корпуса
4321	1±2%	0,8	0,2-12000	40	250	55	Для измерения колебаний в 3-х взаимно перпендикулярных направлениях (в одном корпусе 3 датчика с нормализованной чувствительностью). Обладает малой чувствительностью к деформации основания, изменениям температуры и поперечным колебаниям

Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8
8305	0,125	-	0,2-5300	38	200	40 (пьезо-керамика PZ 100)	Стандартный эталонный акселерометр (для калибровки датчиков методом сравнения). Отличается долговременной стабильностью параметров и малой чувствительностью к изменениям температуры. Поверяется лазерным интерферометром на заводе-изготовителе
8308	1±2%	0,9	1-9000	30	400	100	Для измерения механических колебаний газовых и паровых турбин, двигателей самолетов, ядерных реакторов и т.п., т.е. там, где высокая температура, влажность, электромагнитные поля или ядерное излучение
8310	1±2%	0,55	1-9000	30	400	100 (без кабеля)	
8315	10±2%	2,5	1-9000	28	250	102	
Датчики Арзамасского филиала АО «Глобалтест» (Россия, г. Саров)							
AP40			0,5 – 10000	>35		12 (14)	Для измерения механических колебаний оборудования в энергетической промышленности, в автомобилестроении, в станкостроении и др. Обладают высокой ударной стойкостью
AP28		3,0	0,5 – 10000	>30	125	40 (26)	
AP35-100		10,0	0,5 – 12000	>40	125	39	
AP36-50		5,0	1-12000	>35	125	39	
Датчики фирмы Vibra Metrics, Inc., (USA, Hamden)							
1000		1± 5%	1-40000	90	121	2	Для измерения механических (особенно высокочастотных) колебаний легких конструкций. Имеют встроенные в титановые корпуса датчиков преусилители. Обладают низким выходным сопротивлением
3000 (трех плоскостные)		1 ± 5%	1-11000	50	121	30	

Окончание табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8
1022 (с неразъемным кабелем)		10±5%	1-10000	25	121	50	Датчики общего назначения (для лабораторных исследований). Имеют встроенные предусилители, а, следовательно, низкое выходное сопротивление. Обладают высокой чувствительностью
1026		10±5%	0,5–7000	20	121	23	
5302		10±5%	1-10000	20	121	189	Для измерения механических колебаний промышленного оборудования. Датчики имеют встроенные предусилители, низкие выходные сопротивления, высокую чувствительность и низкие уровни собственных помех
6036		10±5%	1-12000	25	121	90	
6036 С		10±5 %	1-10000	25	180	110	Для измерения механических колебаний высокотемпературного оборудования целлюлозно-бумажных, металлургических комбинатов и т.п. Датчики имеют встроенные предусилители, низкие выходные сопротивления, высокую чувствительность и низкие уровни собственных помех
1024-4		10±5 %	1-11000	25	121	60	Для измерения механических колебаний оборудования под водой. Имеет встроенные предусилители, низкое выходное сопротивление, высокую чувствительность, низкие уровни собственных помех и неразъемный кабель длиной от 4,5 м и более

Крепление акселерометров. Качество крепления акселерометров (рис. 4.19) в значительной степени может влиять на его рабочие характеристики (частотный и динамический диапазоны). Среди известных способов крепления следует выделить крепления с помощью шпильки, воска, магнита, клея, липкой пластины и ручного щупа.

Крепление с помощью шпильки. Этот вид крепления (рис. 4.20) требует предварительного высверливания необходимого диаметра

отверстия на поверхности машины или оборудования, ввинчивания шпильки в резьбовое отверстие и навинчивание на укрепленную шпильку акселерометра.

Особо следует убедиться в том, чтобы шпилька не доходила до дна отверстия в акселерометре.

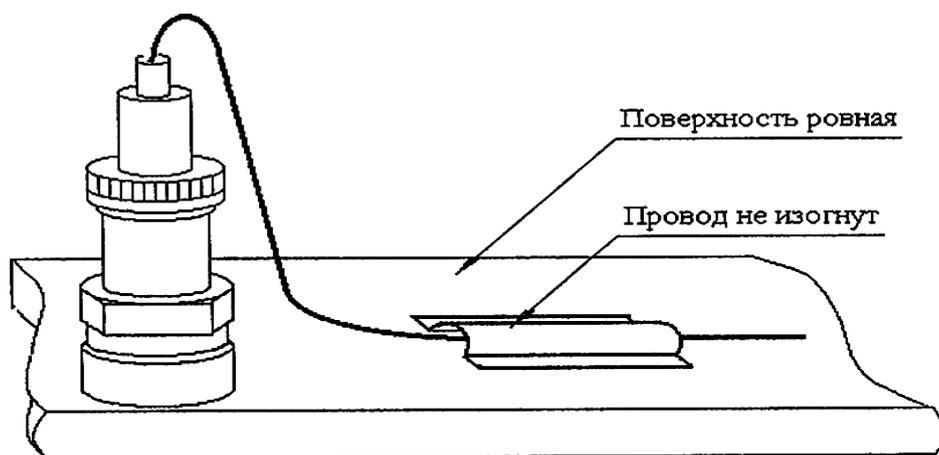


Рис. 4.19. Правильно установленный акселерометр

Крепление с помощью шпильки является одним из самых надежных способов, не искажающих его эксплуатационные характеристики, резонансную частоту и динамический диапазон.

Такой вид крепления используется в стационарных системах контроля, мониторинга и диагностики; позволяет измерять колебания с большими амплитудами ускорения, а также высокочастотные колебания.

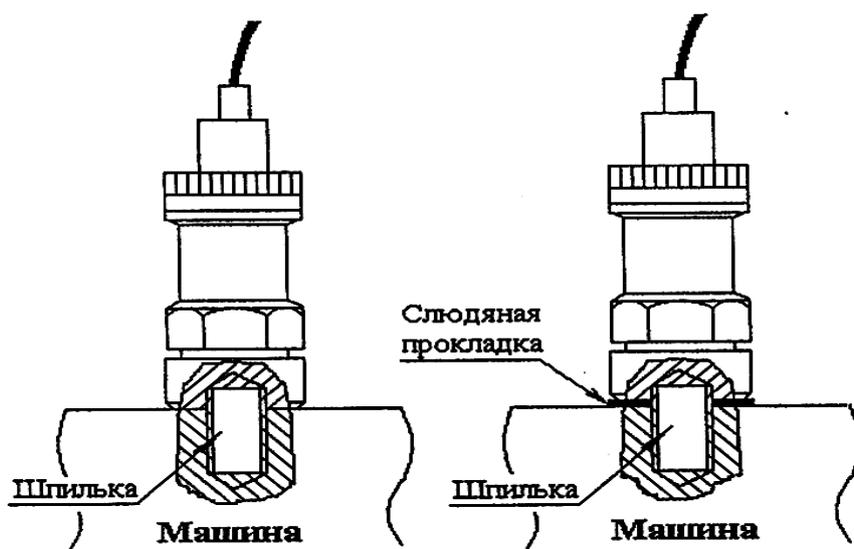


Рис. 4.20. Крепление с помощью шпильки

Крепление с помощью воска. При креплении с помощью воска (рис. 4.21) следует обратить внимание на то, что воск следует наносить тонким слоем. Этот слой должен быть таким, чтобы только обеспечить заполнение зазора между основанием акселерометра и поверхностью машины.

Резонансная частота акселерометра при таком виде крепления практически сохраняется и лишь незначительно меньше, чем в случае крепления с помощью шпильки.

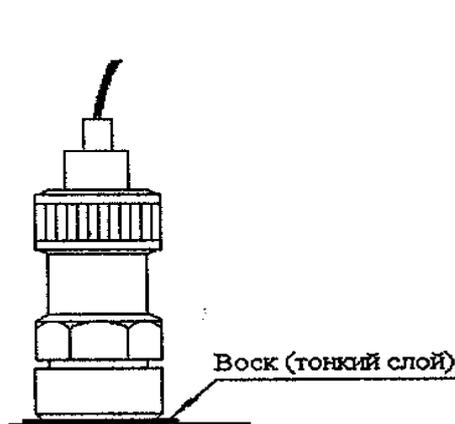


Рис. 4.21. Крепление с помощью воска

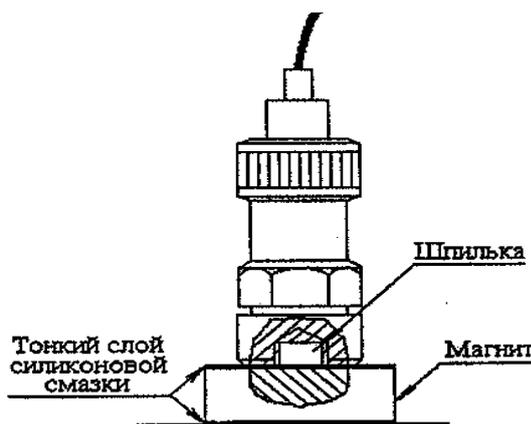


Рис. 4.22. Крепление с помощью магнита

Этот быстрый и несложный способ крепления используется обычно в условиях, когда нежелательно или невозможно крепление шпилек или винтов либо когда сам акселерометр не имеет резьбовых отверстий. Однако применение воска ограничивает диапазон рабочих температур. Как правило, верхняя граница рабочей температуры составляет $+40^{\circ}\text{C}$. Определенные ограничения имеются и для верхней границы рабочего динамического диапазона – это ускорения не более 100 м/с^2 .

Крепление с помощью магнита. Магнит, закрепляемый на основании акселерометра с помощью резьбового соединения, широко используется, обеспечивая быструю установку и возможность перемещать датчик по поверхности объекта из ферромагнитного материала (рис. 4.22). Использование магнита практически сохраняет динамический диапазон акселерометра, но несколько уменьшает верхнюю границу его диапазона рабочих частот. В зависимости от конструкции магнита и от кривизны магнитопроводящей поверхности объекта в точке контроля собственная частота колебаний датчика на магните может лежать в диапазоне от 3 до 12 кГц. Для сохранения макси-

мально возможного значения частоты закрепленного акселерометра применяется тонкий слой консистентной силиконовой смазки, который наносится и на основание датчика, и на поверхность объекта в месте крепления. В этом случае при сохранении частоты резонанса датчика на магните снижается его добротность. Кроме этого, смазка на частотах выше резонанса выполняет функции воска, обеспечивая передачу высокочастотной вибрации на корпус датчика с минимальными потерями.

Следует отметить, что определенные марки крепежных магнитов позволяют устанавливать акселерометры на искривлённые поверхности, например, на трубы и т.п. Однако в этом случае сужается рабочий частотный диапазон и тем больше, чем меньше радиус закругления поверхности объекта. Поэтому при периодическом контроле вибрации одних и тех же объектов в точках контроля вибрации рекомендуется специально готовить установочную поверхность, зашлифовывая, приваривая или приклеивая ровную площадку по размерам установочного магнита.

Крепление с помощью клея. Используется при стационарном креплении акселерометров в том случае, когда исключается их установка с помощью шпилек. Возможно непосредственное крепление акселерометра таким образом или предварительное крепление клеем или цементом шпильки на поверхность объекта. Использование клея практически не изменяет его рабочих частотного и динамического диапазонов. Применение, например, цианакрилового клея требует совершенно гладких и ровных поверхностей. Возможно использование эпоксидных смол, но следует помнить, что для их отверждения требуется определенное время. Кроме того, если это не специальные эпоксидные смолы, то они имеют ограничение верхнего предела рабочих температур приблизительно $+80^{\circ}\text{C}$. Использование «мягких» клеев сужает рабочий частотный диапазон акселерометров, ограничивает диапазон рабочих температур и не обеспечивает достаточной жесткости крепления.

Крепление с помощью ручного щупа. В этом случае (рис. 4.23) акселерометр навинчивается на крепежную шпильку ручного щупа. Измерения механических колебаний акселерометром, закрепленным на ручном щупе, ограничены частотами до 1000 Гц. Кроме того, использование такого вида крепления возможно, когда нет жестких требований к точности измерений. При измерениях конец щупа сле-

дует смазать тонким слоем консистентной силиконовой смазки и с некоторым усилием прижать к вибрирующей поверхности. Для расширения рабочего диапазона частот можно использовать так называемый «перевернутый» ручной щуп, когда датчик прижимается упругим щупом к контролируемому объекту.

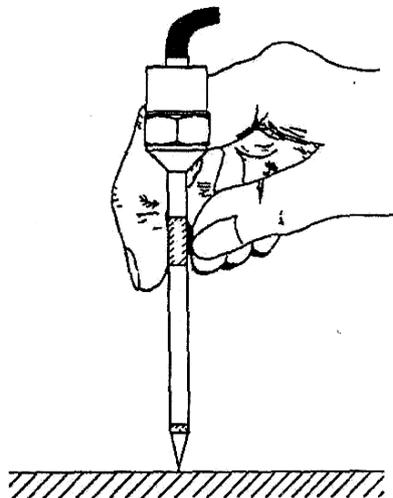


Рис. 4.23. Крепление с помощью ручного щупа

4.2. Анализаторы

Для анализа виброакустических сигналов используются приборы, называемые анализаторами. Основными видами анализа, выполняемыми этими приборами, являются анализ формы сигнала, его частотный и спектральный анализ. Лишь в редких случаях используются двухканальные приборы, параллельно анализирующие два сигнала. Такие двухканальные приборы дополнительно могут измерять форму колебаний на плоскости (орбиты движения вала в подшипнике) и взаимные спектры виброакустических сигналов, но эти дополнительные операции анализа обеспечиваются за счет резкого усложнения прибора со всеми вытекающими из этого последствиями. Во многих случаях, когда необходим многоканальный анализ, оптимальным решением оказывается подключение большого числа датчиков шума, вибрации и других сигналов к одному входу анализатора через управляемый коммутатор и затем проведение последовательного анализа сигналов.

Анализатором виброакустического сигнала может стать любой анализатор электрических сигналов, если на его вход подан электрически согласованный с ним сигнал с выхода датчика шума или виб-

рации. Это может быть и виртуальный анализатор, выполненный на базе персонального компьютера с устройством преобразования аналогового сигнала в цифровую форму на входе компьютера. Основной проблемой использования таких анализаторов является их метрологическая аттестация.

Поскольку в подавляющем большинстве систем контроля, мониторинга и диагностики машин и оборудования используется их вибрация, анализируемая проще, чем воздушный шум, в котором смешиваются компоненты от разных узлов многих машин, ограничимся рассмотрением лучших российских анализаторов вибрации в настоящее время – виброанализаторов СД-12М и СД-21 (рис. 4.24).

Это малогабаритные анализаторы электрических сигналов, адаптированные к работе в промышленных условиях. Они имеют аналоговый (один или два) и один управляющий входы, дополнительный сигнальный процессор и внутреннее матобеспечение для цифрового анализа сигналов, энергонезависимую память для хранения программ и результатов анализа, а также интерфейс связи с компьютером.



Рис. 4.24. Виброанализаторы СД-12М (а) и СД-21 (б)

Аналоговый вход рассчитан на прием сигнала в диапазоне частот 0–25,6 кГц. Для подключения датчиков различных физических величин должно использоваться согласующее устройство. Для каждого типа датчика такое устройство имеет свои характеристики. Так, для датчиков вибрации может использоваться один из трех видов таких устройств:

- усилитель заряда (для пьезоакселерометров с зарядовым выходом, частотный диапазон 0,5 Гц – 25,6 кГц);
- усилитель напряжения (для пьезоакселерометров со встроенным усилителем напряжения, частотный диапазон 2 Гц – 25,6 кГц);
- ICP-адаптер (для пьезоакселерометров со встроенным усилителем по стандарту ICP, частотный диапазон 0,5 Гц – 25,6 кГц).

На вход анализаторов могут быть подсоединены и датчики тока (напряжения) со своими согласующими устройствами, различные типы микрофонов и т.п. Согласующие устройства могут питаться как от внешнего источника, так и от сборщика данных. Предусмотрена возможность подключения нескольких согласующих устройств через коммутатор до 16 каналов, управляемый от анализатора. Управляющий вход рассчитан на прием стандартного сигнала, например, от датчика оборотов. Для инфракрасного датчика оборотов ФД-2 в анализаторах предусмотрен специальный источник питания, обеспечивающий эффективную работу канала измерения скорости вращения с расстояния до 30 см от вращающейся поверхности. Наличие управляющего входа позволяет проводить синхронный фазовый анализ вибрации, необходимый для балансировки машин. В анализаторы встраивается и программа балансировки, специально адаптированная к решению задачи балансировки машин на месте эксплуатации в сложных условиях.

Виброанализаторы СД-12М и СД-21 обеспечивают следующие виды анализа:

- фильтрацию сигнала полосовыми фильтрами и измерение параметров в этих полосах;
- измерение частоты, временного интервала, разности фаз;
- сравнение параметров сигнала с пороговыми значениями;
- синхронное накопление и анализ формы сигнала;
- узкополосный спектральный анализ собственно сигнала или его части;
- узкополосный спектральный анализ огибающей сигнала;
- построение амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик механизмов с переменной скоростью вращения.

Для решения указанных задач в анализаторах установлен антилайзинговый фильтр с полосой пропускания от 0 до 25,6 кГц, а все дальнейшие операции, в том числе и антилайзинговые с более низкими граничными частотами, выполняются в цифровой форме с использованием специального сигнального процессора (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Основные технические характеристики виброанализаторов

Параметры	Характеристики параметров	Значения параметров	
		С Д-12М	СД-21
1	2	3	4
Вход	Количество каналов	1 аналоговый канал, 1 канал синхронизации	2 аналоговых канала, 1 канал синхронизации
	Типы входов	Линейный (один канал) ICP акселерометр (один канал) Датчик оборотов (один канал)	Линейный (два канала) ICP акселерометр (два канала) Датчик оборотов (один канал)
	Типы преобразователей	Акселерометр, токоизмерительные клещи, датчик оборотов, микрофон	
	Частотный диапазон	0,5 – 25600 Гц	
	Максимальная неравномерность АХЧ	±5%, (0,5 дБ)	
	Линейный вход	1 мкВ – 3 В	От -3 до +3 В
	Усиление	Авто, 0 – 54 дБ шагами по 6 дБ	
Параметры вибрации	Измеряемые величины	Виброперемещение, виброскорость, виброускорение, пик-фактор	
	Детектор	СКЗ, пик, пик-пик (размах)	
	Полосы для измерения вибрации: По ГОСТам: Дополнительные:	2-1000; 10-1000; 10-2000 2-200; 3-300; 5-500; 10-5000; 5000-10000; 10000-25000 Гц	2-1000; 10-1000; 10-2000 Гц 2-200; 3-300; 5-500; 10-5000; 500-2500; 625-1250; 1200-2500; 2500-5000; 5000-10000; 10000-25000; 17000-25000 Гц
	Диапазоны измерения СКЗ: виброускорение виброскорость виброперемещение	от 0,02 до 1000 м/с ² от 0,01 до 1000 мм/с от 0,1 до 10000 мкм	от 0,02 до 1000 м/с ² от 0,1 до 1000 мм/с от 0,1 до 1000 мкм
Спектральный анализ	Граничные частоты	25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12800, 25600 Гц	25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 12800, 25600 Гц
	Частотное разрешение	400, 800, 1600 полос	
	Динамический диапазон	70 дБ, не хуже	90 дБ, не хуже
	Число усредняемых спектров	1 - 256	
	Детектор огибающей с полосовыми фильтрами 1/3 октавные: 1/1 октавные:	800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3200, 4000, 5000, 6400, 8000, 10000, 12800, 16000, 20000 Гц 8000, 160 Гц	50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, 8000, 12800, 16000 Гц

Окончание табл. 4.3

1	2	3	4
Измерение амплитуды и фазы для балансировки	Диапазон частот вращения	0,5 – 1700 Гц	
	Погрешность по частоте	+/- 1%	
	Погрешность по фазе	+/- 5 градусов	
	Погрешность по амплитуде	+/- 1 дБ	
	Автоматический контроль	Наличия и формы сигнала с датчика положения вала, качества измерений	
	Единицы измерения амплитуды	дБ, g, м/с ² , мм/с, мкм (СКЗ, Пик, Пик-Пик)	
	Встроенный источник питания для фотодатчика	5 В постоянного тока, 15 мА	
Амплитудно-фазочастотные характеристики при разгоне-выбеге	Диапазон частот вращения	От 0,5 до 1700 Гц	
	Гармоники	От 0,5 Гц до 10-й гармоники частоты вращения	
	Количество отсчетов	До 200 по двум гармоникам	
	Измеряются параметры на:	1-6 гармониках частоты вращения	
Общие данные	Графический дисплей	320x240 точек 80x60 мм, с подсветкой	
	Мембранная клавиатура	20 многофункциональных кнопок	
	Порт для обмена данными	RS-232	
	Встроенные функции	Самотестирование и калибровка	
	Степень защищенности	IP-65 (пылезащищенное исполнение)	
	Диапазон рабочих температур	- 20/ +50 °С	
	Вес	1,7 кг	0,7 кг
	Размеры	150x225x45 мм	109x206x35 мм
	Время работы от аккумулятора	8 часов, не менее	
	Тип батареи	Никельметаллгидридная	Никельметаллгидридная быстросъемная
	Время заряда	2,5 часа, не более	2 часа, не более, в приборе или отдельно

В анализаторах установлена энергонезависимая память объемом 2 Мб, что обеспечивает хранение около 700 спектров сигнала с 1600 частотными полосами или более 50 файлов с временными выборками сигнала объемом в 32 Кб.

Наличие последовательного интерфейса RS-232 позволяет разгружать (загружать) информацию из анализатора менее чем за 15 мин. Программная поддержка модема, имеющаяся в анализаторе, позволяет автоматически загружать и разгружать сборщик по стандартным линиям связи.

Виброанализаторы типа СД могут проводить измерения по маршрутной карте или вне маршрута. Предусмотрена возможность ввода в анализатор с его клавиатуры буквенно-цифровой информации.

4.3. Программное обеспечение для вибрационного мониторинга и диагностики

Составной частью современных диагностических систем являются программы для персонального компьютера, облегчающие работу оператора по анализу данных, полученных с помощью различных средств измерения и анализа диагностических сигналов, а также дающие возможность сохранять результаты первичных измерений и другую полезную информацию. Основой подобного программного обеспечения является программа мониторинга, главными задачами которой, кроме сбора и хранения данных, являются сравнение результатов измерений с пороговыми значениями, обнаружение неслучайных изменений и анализ обнаруженных тенденций.

Для решения более сложных задач идентификации причин обнаруженных изменений и тенденций служат экспертные диагностические программы, дающие оператору дополнительную информацию о диагностических признаках и параметрах дефектов в той конкретной практической ситуации, описание которой составляет оператор при обращении к экспертной программе. Например, в качестве такой информации может выступать список частот подшипниковых составляющих в спектре вибрации при конкретной задаваемой оператором частоте вращения ротора с показом этих составляющих на анализируемом спектре вибрации.

Самыми сложными являются программы автоматической диагностики оборудования, основными функциями которых являются автоматическое формирование заданий на диагностические измерения, автоматический анализ результатов измерений, автоматический переход от вибрационных параметров к техническим с указанием вида и величины обнаруженных дефектов, автоматическая постановка диагноза и долгосрочного прогноза технического состояния и автоматическое формирование рекомендаций по обслуживанию и ремонту оборудования.

В последние годы программное обеспечение для мониторинга стали выпускать практически все производители технических средств

измерения и анализа вибрации. Возможности программ мониторинга большинства производителей приблизительно одинаковы и отличаются они лишь построением баз данных и качеством графического анализа. Экспертные программы выпускают лишь некоторые из крупных производителей приборов и систем, привлекая для их создания ведущих экспертов-диагностов из разных стран, причем возможности различных программ могут отличаться в десятки раз. Что касается программ автоматической диагностики машин и оборудования, то их созданием занимаются не отдельные предприятия, а научные школы, имеющие в своем составе экспертов с многолетним стажем работы, специализирующихся в виброакустической диагностике конкретных видов оборудования и обладающих опытом подготовки высококвалифицированных специалистов в этой области. Все попытки разрабатывать подобные программы, копируя первоисточники, не позволяют добиваться высокой достоверности получаемых результатов, поэтому наибольшее распространение получает лишь то программное обеспечение, которое имеет богатую историю.

Именно к таким программам автоматической диагностики относится пакет программ Drem for Windows (Diagnostics of a Rotating Equipment of Machines), выпускаемый в России и используемый во многих странах мира. Этот пакет предназначен как для вибрационного мониторинга, так и для автоматической диагностики и обеспечивает выполнение следующих функций:

- формирование заданий на мониторинговые и диагностические измерения в виде маршрутных карт или команд с учетом реального состояния объекта;
- передачу заданий в измерительную систему и прием результатов измерений, в том числе и результатов тех измерений, которые выполнены не по заданию Drem -32 (внемаршрутные измерения);
- размещение и хранение в базе данных конструктивных характеристик объектов контроля, данных о системе измерений, первичных результатов измерений, результатов мониторинга и диагностики;
- анализ вновь поступающих данных мониторинговых и диагностических измерений или по команде оператора данных измерений, хранящихся в базе, сравнение результатов с порогами и эталонами;
- построение диагностических эталонов бездефектных и дефектных узлов по заложенным в программу правилам и данным измерений диагностических параметров группы идентичных машин (эталон по группе) или группы последовательных измерений параметров одного узла (эталон по истории);

- составление заключений и рекомендаций по данным измерений на дату, выбранную оператором, формирование прогноза состояния в виде рекомендуемой даты следующего измерения;
- импорт и экспорт данных первичных измерений и результатов мониторинга, диагностики и прогноза, в том числе экспорт данных в стандарте «Мимоза» (MIMOSA – Machinery Information Management Open Systems Alliance) или в форме, необходимой для поддержки пользователей по Интернету;
- графический анализ данных первичных измерений, а также конечных и промежуточных результатов их анализа;
- выдача отчетов и различных справочных данных.



Контрольные вопросы

1. Как назывались первые технические средства, используемые в вибрационной диагностике, и в каких пределах осуществлялся ими контроль вибрации?
2. Что такое индикаторы состояния диагностируемых узлов?
3. Какие основные требования предъявляются к измерительной и анализирующей аппаратуре, используемой для мониторинга и диагностики машин и оборудования?
4. Какие основные типы преобразователей шума и вибрации Вы знаете? В чем их принципиальное отличие?
5. Дайте классификацию измерительных преобразователей воздушного шума.
6. Объясните принцип работы параметрического преобразователя шума.
7. От каких параметров зависит чувствительность микрофона?
8. Каковы достоинства и недостатки электростатических конденсаторных микрофонов?
9. Каковы области применения датчиков вибросмещения, виброскорости и виброускорения?
10. Объясните принцип действия тензометрического проксиметра.
11. Каковы недостатки тензометрических вибропреобразователей?
12. Объясните принцип действия дифференциального конденсаторного датчика вибросмещения. Каковы его недостатки?

13. Для каких целей наиболее часто используются вихретоковые датчики?
14. Каковы недостатки бесконтактных датчиков смещения?
15. Объясните принцип действия электродинамического велосиметра.
16. Почему для мониторинга и диагностики на практике во многих случаях используют преобразователи виброускорения?
17. Объясните принцип действия пьезоэлектрического акселерометра.
18. Какой технический параметр является основным для акселерометра?
19. Как влияет метод крепления на частоту собственного резонанса акселерометра?
20. Чем определяются нижний и верхний пределы частоты акселерометра?
21. Как определяется чувствительность акселерометра?
22. В каком случае отношение поперечной чувствительности к продольной составляет минимальную величину?
23. Как определяется динамический диапазон акселерометра?
24. Какие способы крепления акселерометра Вы знаете?
25. Какие функции выполняют анализаторы виброакустических сигналов?
26. Какие виды анализа обеспечивают виброанализаторы типов СД-12М и СД-21?
27. Какие задачи решаются программным обеспечением вибрационного мониторинга и диагностики?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для контроля состояния вращающегося оборудования на каждом из возможных этапов его эксплуатации, определяемом глубиной развития дефектов, применяются разные методы виброакустической диагностики. Эти методы основаны на анализе особенностей формирования и распространения вибрации оборудования в разных частотных диапазонах и имеют различную чувствительность обнаружения разных по виду и величине дефектов.

На первом этапе эксплуатации оборудования, когда идет приработка его элементов, необходимо в основном выявлять скрытые дефекты их изготовления и дефекты, возникающие при монтаже оборудования на месте эксплуатации. *На втором этапе* бездефектной эксплуатации оборудования, когда происходит только естественный износ его элементов, стоит задача определения начала третьего этапа, т.е. появления зарождающихся дефектов. *На третьем этапе*, когда появляются отдельные дефекты, многие из которых в процессе дальнейшей работы могут уменьшаться и даже исчезать, стоят задачи определения момента появления необратимых дефектов и момента появления «цепочки» быстро развивающихся дефектов, после чего необходим постоянный контроль за вибрацией оборудования или его остановка для выполнения ремонтных работ. *На четвертом этапе* быстрого развития «цепочки» дефектов с последующим отказом оборудования обычно решаются вопросы аварийной защиты оборудования и в ряде случаев – задача прогноза остаточного ресурса оборудования. Для этого используются методы и средства вибрационного защитного мониторинга.

Если ставится задача долгосрочного прогноза состояния оборудования, необходимо обнаруживать зарождающиеся дефекты в каждом его узле. Для этого используются методы профилактической вибрационной диагностики, наибольшая эффективность которых достигается при решении диагностических задач на втором и третьем этапах эксплуатации оборудования. Именно на этих этапах можно прогнозировать безотказную работу оборудования на длительный срок – до шести месяцев и более.

При создании и применении систем мониторинга и диагностики различных машин и оборудования необходимо принимать во внимание три правила, общие для всех видов технической диагностики.

1. Система защитного мониторинга (аварийной защиты) должна использовать каналы непрерывного измерения всех контролируемых величин и принимать решение об остановке машины в считанные доли секунды.

2. Система профилактической диагностики и долгосрочного прогноза состояния должна обеспечивать обнаружение всех потенциально опасных дефектов на стадии зарождения и идентифицировать вид каждого дефекта, т.к. разные дефекты имеют разную скорость развития.

3. При невозможности обнаружения каких-либо видов дефектов задолго до аварийной остановки машины особо важные объекты диагностики следует комплектовать обоими видами систем.

Следующие правила относятся ко всем системам виброакустического мониторинга и диагностики.

4. Системы профилактической диагностики должны обеспечивать обнаружение зарождающихся дефектов в первую очередь по высокочастотной вибрации, для возбуждения которой в ближней к дефекту зоне не нужны значительные колебательные силы.

5. Системы защитного мониторинга должны строиться на базе данных измерений низкочастотной вибрации машины, для возбуждения которой нужны значительные колебательные силы, сопровождающие появление сильных дефектов.

Из последних двух правил можно сделать весьма полезный вывод о том, что число точек контроля в системах защитного мониторинга может быть весьма ограниченным, т.к. на низких частотах машина чаще всего колеблется как единое целое и нет необходимости контролировать вибрацию каждого ее узла. Да и повторяемость результатов измерений вибрации бездефектной машины на низких частотах при смене режима ее работы или внешних условий гораздо выше.

Исходя из общих правил технической диагностики различных объектов, основных правил виброакустической диагностики роторных машин и оборудования, а также требований по надежности этих машин и ограничений на сроки, длительность и место выполнения диагностических измерений, назначением системы диагностики должен быть долгосрочный (не менее одного – двух месяцев) и достоверный (не менее 95–98%) прогноз безаварийной работы машины. Это означает, что практически все дефекты должны обнаруживаться на ранней стадии развития, за несколько месяцев до возможного отказа узла, т.е. в основе систем должны быть методы обнаружения дефектов по высокочастотной вибрации.

ТЕСТЫ

№ п.п.	Вопросы	№ п.п.	Варианты ответов
1	2	3	4
1	Какова идея метода обслуживания оборудования по регламенту?	1.1	Ремонт или замена оборудования производится ранее среднестатистического отказа с заданной вероятностью
		1.2	Ремонт или замена оборудования производится в случае выхода его из строя или выработки ресурса
		1.3	Обслуживание производится с применением методов отслеживания и распознавания технического состояния оборудования по совокупности его эксплуатационных характеристик
2	Дайте определение понятию «мониторинг технического состояния».	2.1	Непрерывный контроль основных параметров, выявление тенденций их изменений и прогноз развития
		2.2	Информация о величинах технологических параметров и зонах их допустимого отклонения
		2.3	Идентификация места, вида и величины дефектов и прогноз их развития
3	Выберите правильное определение термина «состояние исправности».	3.1	Это состояние, при котором исследуемый агрегат соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией
		3.2	Это состояние, при котором исследуемый агрегат способен выполнять заданные функции в пределах, установленных нормативно-технической документацией, т.е. могут присутствовать необнаруженные неисправности, не препятствующие применению его по назначению
		3.3	Это состояние исследуемого агрегата, при котором он способен проработать неограниченное время
4	Выберите правильное определение термина «состояние работоспособности».	4.1	Это состояние, при котором исследуемый агрегат способен выполнять заданные функции в пределах, установленных нормативно-технической документацией, т.е. могут присутствовать необнаруженные неисправности, не препятствующие применению его по назначению
		4.2	Это состояние, при котором исследуемый агрегат соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией
		4.3	Это состояние исследуемого агрегата, при котором он способен проработать неограниченное время
5	Выберите правильное определение термина «дефект».	5.1	Это изменение состояния объекта в процессе его изготовления, эксплуатации или ремонта, которое потенциально может привести к уменьшению степени его работоспособности.
		5.2	Это изменение состояния объекта, приводящее к уменьшению степени его работоспособности
		5.3	Это изменение состояния объекта, исключающее возможность продолжения его функционирования

1	2	3	4
6	Что такое тестовая диагностика?	6.1	Это процесс определения состояния объекта по его реакции на внешнее воздействие определенного типа
		6.2	Это процесс определения состояния объекта без нарушения режима его функционирования
		6.3	Это процесс определения состояния объекта
7	Что такое диагностический симптом?	7.1	Это разность между фактическим и эталонным значениями диагностических параметров
		7.2	Это разность между эталонным и пороговым значениями диагностических параметров
		7.3	Это допустимая погрешность определения диагностических параметров
8	Какое количество видов неразрушающего контроля классифицировано ГОСТ 18353-79?	8.1	Девять
		8.2	Двенадцать
		8.3	Пять
9	К какому виду неразрушающего контроля относится вибрационный метод диагностики?	9.1	К акустическому
		9.2	К вихретоковому
		9.3	К радиоволновому
10	Объект считается неработоспособным, если хотя бы для одного из параметров выполняется неравенство, где (d_i , d_{oi} , Δ_i^{np} , Δ_{oi} - соответственно, фактическое, номинальное значения диагностического параметра, порог опасного изменения и порог допустимого отклонения параметра)	10.1	$ d_i - d_{oi} > \Delta_i^{np}$
		10.2	$ d_i - d_{oi} \leq \Delta_{oi}$
		10.3	$ d_i - d_{oi} \leq \Delta_i^{np}$
11	Какой из перечисленных диагностических параметров обладает наибольшей информативностью о техническом состоянии объекта контроля?	11.1	Сигнал вибрации
		11.2	Электрический (напряжение, ток, сопротивление)
		11.3	Тепловой
12	Какими параметрами определяется величина акустического шума или механического колебания во временной области?	12.1	$X_{\text{размах}}$, $X_{\text{ср}}$, $X_{\text{скз}}$, $X_{\text{пик}}$
		12.2	$X_{\text{пик-пик}}$, $X_{\text{ср}}$, $X_{\text{скз}}$
		12.3	$X_{\text{ср}}$, $X_{\text{скз}}$, $X_{\text{пик}}$
13	Виброакустический сигнал представляет собой	13.1	Совокупность гармонических составляющих и случайных составляющих
		13.2	Совокупность гармонических составляющих
		13.3	Совокупность случайных составляющих

1	2	3	4
14	Наиболее полную диагностическую информацию можно получить	14.1	Из спектра виброакустического сигнала
		14.2	Из формы виброакустического сигнала
		14.3	Из величины мощности виброакустического сигнала
15	Что такое спектральное представление периодических сигналов?	15.1	Это разложение в ряд Фурье
		15.2	Это интегральное преобразование Фурье
		15.3	Это разложение на простые (тональные) составляющие
16	Что такое аэро- и гидродинамический шум?	16.1	Это шум, возникающий при движении газа, пара, жидкости в результате пульсаций давления из-за турбулентного перемешивания потоков, движущихся с разными скоростями в свободных струях или из-за турбулизации потока у границ обтекаемого тела
		16.2	Это шум, возникающий при турбулизации потока, при горении или мгновенном изменении тепла, приводящего к мгновенному повышению давления
		16.3	Это шум, возникающий при движении, соударении, трении деталей машин и оборудования
17	Акустическое поле в любой момент времени и в любой точке пространства полностью определяется следующими параметрами:	17.1	Вектором смещения частицы среды из положения покоя, вектором колебательной скорости, звуковым давлением в среде
		17.2	Скоростью распространения волны, звуковым давлением в среде, оператором Лапласа
		17.3	Амплитудой переменной составляющей, временной фазой, плотностью среды
18	Какова главная особенность слуха человека?	18.1	Это логарифмическая зависимость восприятия звука от величины переменного давления в воздухе
		18.2	Это линейная зависимость восприятия звука от величины переменного давления в воздухе
		18.3	Чувствительность органов слуха человека зависит от частоты звука
19	Что такое вибрация?	19.1	Это механические колебания тела относительно опорного положения равновесия
		19.2	Это колебания машин
		19.3	Это колебания подшипниковых узлов роторов вращающихся машин
20	Какие колебательные величины характеризуют вибрацию?	20.1	Резкость, виброускорение, виброскорость, виброперемещение
		20.2	Пик-фактор, виброперемещение, частота
		20.3	Виброускорение, виброскорость, виброперемещение
21	Выберите формулу виброускорения гармонической вибрации	21.1	$A = x_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi)$
		21.2	$A = x_0 \omega \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)$
		21.3	$A = x_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$
22	Выберите единицу, в которой принято измерять частоту	22.1	C ⁻¹
		22.2	Мин ⁻¹
		22.3	Мс ⁻¹

1	2	3	4
23	Выберите единицу, в которой принято измерять виброускорение	23.1	м/с^2
		23.2	мм/с
		23.3	мкм
24	Выберите единицу, в которой принято измерять виброскорость	24.1	мм/с
		24.2	$\text{м/с}^2(\text{г})$
		24.3	мкм
25	Выберите единицу, в которой принято измерять виброперемещение	25.1	мкм
		25.2	мм
		25.3	см
26	На каких частотах целесообразно измерять вибросмещение?	26.1	На низких частотах
		26.2	На средних частотах
		26.3	На высоких частотах
27	Назовите диапазон высокочастотной вибрации	27.1	2000 – 30000 Гц
		27.2	300 – 2000
		27.3	> 25000 Гц
28	От каких параметров зависит амплитуда низкочастотных колебаний?	28.1	От параметров вынуждающей силы, канала передачи и собственной частоты колебаний механизма
		28.2	От величин деформации сжатия и сдвига
		28.3	От массы тела, сил трения и вынуждающей силы
29	Какой параметр обычно используют при оценке интенсивности виброперемещения?	29.1	Размах
		29.2	Амплитуда
		29.3	Среднее значение
		29.4	Среднеквадратическое значение
30	Какой параметр обычно используют при оценке интенсивности виброускорения?	30.1	Среднеквадратическое значение
		30.2	Амплитуда
		30.3	Размах
		30.4	Среднее значение
31	Какой параметр обычно используют при оценке интенсивности виброскорости?	31.1	Среднеквадратическое значение
		31.2	Среднее значение
		31.3	Амплитуда
		31.4	Размах
32	Каким образом используются параметры среднечастотной вибрации для диагностики дефектов?	32.1	Практически не используются
		32.2	Используются для диагностики зарождающихся дефектов
		32.3	Используются для диагностики развитых дефектов
33	Какое свойство высокочастотной вибрации является ее наибольшим достоинством с точки зрения диагностики технического состояния оборудования?	33.1	Волновой характер высокочастотной вибрации и ее быстрое затухание при распространении
		33.2	Для каждой гармонической составляющей вынуждающая сила раскладывается еще по собственным формам (на синусные и косинусные составляющие)
		33.3	Диагностическая информация содержится не только в величинах вибрационной энергии в разных полосах частот, но и в параметрах, характеризующих периодические и случайные флуктуации вибрационной энергии во времени
34	Абсолютной единицей измерения интенсивности звука является	34.1	ватт на метр квадратный (Вт/м^2)
		34.2	паскаль (Па)
		34.3	децибел (дБ)

1	2	3	4
35	Пороговым значением виброперемещения в соответствии со стандартом ИСО – 1683 является	35.1	$X_{\text{нор}} \approx 10^{-12}$ м
		35.2	$X_{\text{нор}} \approx 10^{-9}$ м
		35.3	$X_{\text{нор}} \approx 10^{-6}$ м
36	Какими соотношениями связаны между собой параметры гармонической вибрации – виброперемещения d , виброскорости v , виброускорения a ?	36.1	$d = x_0, v = x_0\omega, a = x_0\omega^2$
		36.2	$v = x_0\omega^2, a = x_0\omega$
		36.3	$v = 2\pi f x_0, a = \pi^2 f^2 x_0^2$
37	Во сколько раз отличается уровень вибрации в линейных единицах, если в относительных единицах этот уровень отличается на 10 дБ?	37.1	В 3,16 раз
		37.2	В 10 раз
		37.3	В 0,316 раз
38	Системы защитного мониторинга должны строиться на базе данных	38.1	Измерений низкочастотной вибрации машины
		38.2	Измерений низкочастотной, среднечастотной и высокочастотной вибрации машины
		38.3	Измерения высокочастотной вибрации машины
39	Медленнее затухает вибрация	39.1	Низкочастотная
		39.2	Среднечастотная
		39.3	Высокочастотная
		39.4	Ультразвуковая
40	Что такое пик-фактор?	40.1	Это диагностический признак, определяемый отношением пикового и среднеквадратического значениями сигнала вибрации
		40.2	Это пиковый уровень в высокочастотном сигнале вибрации
		40.3	Это пиковый уровень в низкочастотном сигнале вибрации
41	Для каких целей используется метод ударных импульсов?	41.1	Для определения зарождающихся дефектов
		41.2	Для определения вида дефектов
		41.3	Для осуществления долгосрочного прогноза состояния узла
42	Что такое анализатор спектра?	42.1	Это прибор, позволяющий измерять и анализировать амплитуды или среднеквадратические значения вибрации или шума в отдельных относительно узких полосах частот
		42.2	Это прибор, разделяющий на отдельные составляющие широкополосные сигналы
		42.3	Это программный продукт, использующий быстрые преобразования Фурье для разложения временного сигнала в ряд гармонических составляющих

1	2	3	4
43	Назовите основные типы частотных анализаторов	43.1	Анализаторы с постоянной абсолютной шириной полосы пропускания и анализаторы с постоянной относительной шириной полосы пропускания
		43.2	Анализаторы с постоянной абсолютной шириной полосы пропускания и анализаторы с переменной относительной шириной полосы пропускания
		43.3	Анализаторы с переменной абсолютной шириной полосы пропускания и анализаторы с переменной относительной шириной полосы пропускания
44	Что такое «полоса пропускания» реального полосового фильтра?	44.1	Ширина полосы пропускания реального фильтра определяется как интервал частот на уровне спада частотной характеристики фильтра на 3 дБ
		44.2	$\Delta f = f_в - f_н$, где $f_в$ и $f_н$ – верхняя и нижняя частоты фильтра, соответственно
		44.3	$\Delta f = 0,707 f_в f_н$
45	Какова основная причина широкого применения анализаторов спектра с постоянной относительной шириной полосы пропускания?	45.1	Ширина полосы пропускания анализатора с постоянной относительной шириной полосы кажется фиксированной при использовании логарифмической шкалы частот
		45.2	Идентичное разрешение по частоте при использовании линейной шкалы частоты и возможность получения высокой разрешающей способности
		45.3	Возможность использовать их при гармоническом анализе сложных сигналов
46	Что такое октава?	46.1	Это диапазон частот, в котором верхняя частота $f_в$ отличается от нижней частоты $f_н$ в два раза
		46.2	Это диапазон частот, в котором верхняя частота $f_в$ отличается от нижней частоты $f_н$ в семь раз
		46.3	Это диапазон частот, в котором верхняя частота $f_в$ отличается от нижней частоты $f_н$ в десять раз
47	Какова ширина (%) октавного диапазона частот от среднегеометрической частоты?	47.1	70,7%
		47.2	23%
		47.3	100%
48	Что такое декада?	48.1	Это изменение частоты в 10 раз
		48.2	Это изменение частоты на 10 октав
		48.3	Это изменение частоты на 10 дБ
49	Каково соотношение между верхней и нижней частотами третьоктавной полосы?	49.1	$f_в = 1,259 f_н$
		49.2	$f_в = 1,3 f_н$
		49.3	$f_в = 3,0 f_н$
50	Чему равна относительная процентная ширина пропускания третьоктавного фильтра?	50.1	23,1%
		50.2	70,7%
		50.3	100%

1	2	3	4
51	Что такое разрешающая способность анализаторов спектра?	51.1	Это возможность разделения в спектре близких по частоте гармонических составляющих анализируемого сигнала
		51.2	Это возможность контролировать кратные по частоте вращения гармоники во времени с погрешностью, не зависящей от ширины полосы пропускания частот анализатора
		51.3	Это отношение граничной частоты спектра на число частотных полос
52	Какой производственный фактор ограничивает разрешающую способность анализаторов спектра?	52.1	Нестабильность во времени частоты вращения многих видов машин и оборудования
		52.2	С увеличением разрешающей способности увеличивается время, необходимое для измерения вибрации или шума
		52.3	С увеличением разрешающей способности анализатора увеличивается объем диагностической информации
53	Каковы нижняя и верхняя граничные частоты вибрационного мониторинга?	53.1	Нижняя граничная частота обычно меньше половины частоты вращения, а верхняя чаще всего составляет 1000 Гц
		53.2	Нижняя граничная частота равна частоте вращения, а верхняя составляет 25000 Гц
		53.3	Нижняя и верхняя граничные частоты определяются в зависимости от класса оборудования
54	Для обнаружения зарождающихся дефектов, таких как незначительный износ поверхностей качения, ухудшение качества смазки подшипников, предпочтительно анализировать вибрацию	54.1	Высокочастотную
		54.2	Низкочастотную и среднечастотную
		54.3	На частоте вращения
55	Какова природа сил, действующих в области высоких частот?	55.1	Силы трения и микроудары
		55.2	Кинематические, параметрические, ударные
		55.3	Кинематические и силы от микроударов
56	Какие силы возбуждают низкочастотную вибрацию?	56.1	Кинематические, параметрические, ударные
		56.2	Кинематические и силы от микроударов
		56.3	Силы трения и микроудары
57	Медленнее затухает вибрация	57.1	Низкочастотная
		57.2	Среднечастотная
		57.3	Высокочастотная

1	2	3	4
58	Как определяется глубина модуляции случайного амплитудно-модулированного сигнала вибрации?	58.1	$m = \frac{X_{\max}(t) - X_{\min}(t)}{X_{\max}(t) + X_{\min}(t)} \cdot 100\%$, где X_{\max} , X_{\min} – максимальное и минимальное значения огибающей сигнала соответственно
		58.2	$m = \frac{X_{\max}(t) + X_{\min}(t)}{X_{\max}(t) - X_{\min}(t)} \cdot 100\%$, где X_{\max} , X_{\min} – максимальное и минимальное значения огибающей сигнала соответственно
		58.3	$m = \sqrt{(10^{\Delta L/10} - 1) \frac{\Delta f_a}{\Delta f_\phi}}$ - где Δf_ϕ ширина полосы фильтра, выделяющего высокочастотную вибрацию; Δf_a - разрешающая способность при анализе спектра огибающей высокочастотной вибрации; ΔL - разность уровней гармонической и случайной составляющих спектра огибающей
59	По каким параметрам определяется вид и степень развития дефекта?	59.1	Частота модуляции определяет вид дефекта, а глубина модуляции – степень его развития
		59.2	По величинам превышения гармонических составляющих на определенных частотах над фоном
		59.3	Глубина модуляции определяет вид дефекта, а частота модуляции – степень его развития
60	Каковы основные достоинства метода огибающей высокочастотного сигнала?	60.1	В спектре огибающей высокочастотной вибрации можно наблюдать за развитием одновременно всех имеющихся дефектов по величинам превышения гармонических составляющих на определенных частотах над фоном
		60.2	Вся информация о техническом состоянии содержится в огибающей высокочастотного сигнала
		60.3	Метод позволяет определять степень развития всех дефектов и идентифицировать их вид
		60.4	Верны все три ответа
61	Как назывались первые технические средства, используемые в вибрационной диагностике?	61.1	Виброметры
		61.2	Индикаторы состояния
		61.3	Стетоскопы
62	В чем заключается принцип действия генераторных (энергетических) преобразователей шума и вибрации?	62.1	Это измерительные преобразователи, которые при воздействии на них измеряемых колебаний вырабатывают за счет энергии этих колебаний электрический сигнал в виде тока, заряда или напряжения
		62.2	Это измерительные преобразователи, в которых при воздействии на них измеряемого колебательного процесса и за счет его энергии изменяется какой-либо электрический параметр (активное сопротивление R , индуктивность L или емкость C)
		62.3	Это преобразователи, для которых требуется электрическая энергия от вспомогательного источника

1	2	3	4
63	В чем заключается принцип действия параметрических преобразователей шума и вибрации?	63.1	Это измерительные преобразователи, в которых при воздействии на них измеряемого колебательно-го процесса и за счет его энергии изменяется какой-либо электрический параметр (активное сопротивление R , индуктивность L или емкость C)
		63.2	Это преобразователи, для которых требуется электрическая энергия от вспомогательного источника
		63.3	Это измерительные преобразователи, которые при воздействии на них измеряемых колебаний вырабатывают за счет энергии этих колебаний электрический сигнал в виде тока, заряда или напряжения
64	Как определяется чувствительность электростатического микрофона?	64.1	Это отношение выходного напряжения $U_{\text{вых}}(t)$ к звуковому давлению $P(t)$
		64.2	Это смещение мембраны под действием звукового давления
		64.3	Это смещение мембраны при изменении емкости конденсатора
65	Для микрофона справедливо утверждение:	65.1	Чем больше диаметр мембраны микрофона, тем больше его чувствительность
		65.2	Чем больше диаметр мембраны микрофона, тем больше диапазон частот
		65.3	Чем больше диаметр мембраны микрофона, тем больше резонансная частота
66	Недостатком электростатического микрофона является	66.1	Необходимость внешнего источника питания
		66.2	Низкий уровень шумов
		66.3	Малая неравномерность частотной характеристики
67	Датчики виброускорения используются	67.1	Для измерения вибрации в широком диапазоне частот – от низких до ультразвуковых
		67.2	Для измерения вибрации на низких и средних частотах
		67.3	Для измерения вибрации на низких и сверхнизких частотах
68	Датчики виброскорости используются	68.1	Для измерения вибрации на низких и средних частотах
		68.2	Для измерения вибрации на низких и сверхнизких частотах
		68.3	Для измерения вибрации в широком диапазоне частот – от низких до ультразвуковых
69	Датчики вибросмещения используются	69.1	Для измерения вибрации на низких и сверхнизких частотах
		69.2	Для измерения вибрации на низких и средних частотах
		69.3	Для измерения вибрации в широком диапазоне частот – от низких до ультразвуковых
70	Измерительными преобразователями вибросмещения называют	70.1	Проксиметры
		70.2	Велосиметры
		70.3	Акселерометры

1	2	3	4
71	Измерительными преобразователями виброскорости называют	71.1	Велосиметры
		71.2	Проксиметры
		71.3	Акселерометры
72	Тензометрический вибропреобразователь является	72.1	Параметрическим преобразователем и ему требуется внешний источник энергии e_0
		72.2	Генераторным преобразователем и он имеет внутренний источник энергии e_0
		72.3	Параметрическим преобразователем и ему не требуется внешний источник энергии e_0
73	Одним из недостатков тензометрического вибропреобразователя является	73.1	Обязательное наличие внешнего источника питания
		73.2	То, что он является не очень удобным средством измерения колебательных сил
		73.3	Требование подвижной опоры для крепления датчика
74	Какой основной недостаток конденсаторного преобразователя вибросмещения?	74.1	Измерение вибросмещения выполняется на частотах выше резонансной частоты инерционной массы на упругих элементах
		74.2	Встречное включение двух емкостей датчика $C_{1(x)}$ и $C_{2(x)}$ компенсирует постоянную составляющую напряжения
		74.3	При снижении частоты ниже 10 Гц конструкция преобразователя становится «мягкой», габариты резко уменьшаются
75	Для каких целей наиболее часто используются вихретоковые датчики?	75.1	Приоритетной областью использования вихретоковых преобразователей является контроль осевого смещения и поперечного биения валов, в которых используются подшипники скольжения
		75.2	Наиболее часто вихретоковые датчики применяются для измерения радиального сдвига
		75.3	Вихретоковые датчики используются в широком диапазоне частот для измерения виброскорости
76	На показания вихретоковых датчиков практически не влияют	76.1	Изменения температуры
		76.2	Изменения состава материала
		76.3	Царапины на поверхности вала или другие дефекты
		76.4	Биения вала
77	Преимуществом электродинамических велосиметров является	77.1	Достаточно мощный выходной сигнал, обеспечивающий высокую помехоустойчивость в условиях действия электромагнитных помех
		77.2	Достаточно большие габариты
		77.3	Расположение нижней границы частотного диапазона датчика часто даже выше аналогичной границы акселерометра с интегратором на его выходе
78	Определите типы датчиков, применяемых в системах виброконтроля и диагностики	78.1	Акселерометры и индуктивные датчики перемещения
		78.2	Акустические датчики
		78.3	Велосиметры
79	Более предпочтительными являются акселерометры,	79.1	Работающие на срезающих усилиях
		79.2	Работающие на сжимающих усилиях
		79.3	Работающие на растягивающих усилиях

1	2	3	4
80	Выходное сопротивление акселерометров исчисляется	80.1	Гигаомами
		80.2	Килоомами
		80.3	Омами
81	Принцип действия датчика виброускорения основан	81.1	На пьезоэлектрическом эффекте
		81.2	Электродинамическом преобразовании вибросигнала
		81.3	На преобразовании колебаний поверхности к аналогичным колебаниям добротности резонансного контура, состоящего из катушки индуктивности, закрепленной на конце диэлектрического стержня, и специально подобранной емкости
82	Основным параметром акселерометра является	82.1	Резонансная частота
		82.2	Его продольная чувствительность
		82.3	Его динамический диапазон
83	От чего зависит частота резонанса ω_m закрепленного на объекте акселерометра?	83.1	Частота резонанса закрепленного на объекте датчика уменьшается с увеличением податливости крепежного приспособления и увеличением инерционной массы $m_{ин}$
		83.2	Частота резонанса закрепленного на объекте датчика уменьшается с увеличением податливости крепежного приспособления и увеличением приведенной массы μ
		83.3	Частота резонанса закрепленного на объекте датчика зависит от способа его крепления
84	От чего зависит собственная частота резонанса $\omega_{соб}$ акселерометра?	84.1	От величины эквивалентной жесткости акселерометра k , инерционной массы $m_{ин}$ и массы основания датчика $m_{осн}$
		84.2	Только от вынуждающей силы $F_{вын}$, действующей на основание датчика
		84.3	От приведенной массы вибродатчика μ и вынуждающей силы $F_{вын}$, действующей на его основание
85	Если принять за практику примерное равенство масс инерционной и основания датчика $m_{ин} \approx m_{осн}$, то соотношение между резонансными частотами закрепленного и незакрепленного датчика будет составлять	85.1	$\omega_m / \omega_{рез} \approx 1/\sqrt{2}$
		85.2	$\omega_m / \omega_{рез} \approx 1$
		85.3	$\omega_m / \omega_{рез} \approx 2$
86	Чем определяется верхний предел частоты акселерометра?	86.1	Верхний предел частоты акселерометра определяется резонансом закрепленного датчика
		86.2	Верхний предел частоты акселерометра определяется влиянием изменений температуры окружающей среды
		86.3	Верхний предел частоты акселерометра определяется частотой среза f_H , используемого вместе с акселерометром предусилителя

Продолжение

1	2	3	4
87	Чем определяется нижний предел частоты акселерометра?	87.1	Влиянием изменений температуры окружающей среды и нижней частотой среза f_n , используемого вместе с акселерометром предусилителя
		87.2	Нижний предел частоты акселерометра определяется резонансом закрепленного датчика
		87.3	Погрешностью измерений, не превышающей + 12%.
88	Является ли применение предусилителя с акселерометром обязательным?	88.1	Использование предусилителя с акселерометром является обязательным
		88.2	Использование предусилителя с акселерометром является не обязательным
		88.3	Использование предусилителя с акселерометром является желательным
89	В чем заключается эмпирическое правило выбора частотного диапазона акселерометра?	89.1	Если верхняя частота рабочего частотного диапазона акселерометра в три раза меньше его резонансной частоты, то погрешность измерений не превышает + 12%.
		89.2	Частота рабочего частотного диапазона акселерометра не должна превышать его резонансной частоты
		89.3	Частота рабочего частотного диапазона акселерометра не должна превышать верхней частоты 25 кГц
90	Чувствительность акселерометра v_q по заряду определяется	90.1	Отношением электрического заряда к ускорению механических колебаний
		90.2	Разностью электрического заряда и ускорения механических колебаний
		90.3	Произведением электрического заряда на ускорение механических колебаний
91	Чувствительность акселерометра v_u по напряжению определяется в	91.1	мВ/(м/с ²)
		91.2	пКл/(м/с ²)
		93.3	мВ/(мм/с ²)
92	Зависит ли чувствительность акселерометра от сечения или длины кабеля датчика?	92.1	Зависит чувствительность по напряжению
		92.2	Зависит чувствительность по заряду
		92.3	Не зависит
93	Максимальной чувствительностью акселерометр обладает	93.1	Вдоль продольной оси
		93.2	Вдоль поперечной оси
		93.3	Как вдоль продольной, так и поперечной оси
94	Какой характер амплитудно-частотной характеристики акселерометра в рабочем диапазоне частот?	94.1	Линейный
		94.2	Параболический
		94.3	Логарифмический
95	Как определяется динамический диапазон акселерометра?	95.1	Нижний предел частоты определяется шумом системы, а верхний – линейностью АЧХ акселерометра
		95.2	Изменением чувствительности акселерометра по заряду в пределах $\pm 5\%$
		95.3	Изменением чувствительности акселерометра по напряжению в пределах $\pm 10\%$

1	2	3	4
96	Одним из самых надежных способов крепления акселерометров, не искажающих его эксплуатационные характеристики, резонансную частоту и динамический диапазон, является	96.1	Крепление с помощью шпильки
		96.2	Крепление с помощью клея
		96.3	Крепление с помощью магнита
97	Измерения механических колебаний акселерометром, закрепленным на ручном щупе, ограничены частотами до	97.1	1000 Гц
		97.2	10000 Гц
		97.3	20000 Гц
98	Анализаторы виброакустических сигналов СД-12М и СД-21 не предназначены для решения задач	98.1	Стационарных систем вибромониторинга
		98.2	Фильтрации вибросигнала полосовыми фильтрами и измерения параметров в этих полосах
		98.3	Измерения частоты, временного интервала, разности фаз вибросигнала
		98.4	Многоплоскостной балансировки роторов в собственных опорах
99	Динамический диапазон виброанализаторов СД-12М и СД-21 составляет не менее	99.1	70 дБ
		99.2	100 дБ
		99.3	120 дБ
100	Пакет программ Drem for Windows предназначен	100.1	Как для вибрационного мониторинга, так и для автоматической диагностики
		100.2	Для вибрационного мониторинга
		100.3	Для автоматической диагностики

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. – СПб.: СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
2. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: учеб. пособие. – СПб.: СПбГМТУ, 2000. – 159 с.
3. Баркова Н.А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования: учеб. пособие. – СПб.: СПбГМТУ, 2003, – 160 с.
4. ГОСТ 21571-76. Система технического обслуживания и ремонта техники. Методы определения допустимого параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин. – М.: Изд-во стандартов, 1976.
5. ГОСТ 23660-79. Система технического обслуживания и ремонта техники. Обеспечение ремонтпригодности при разработке изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1979.
6. ГОСТ 27.302-86. Надежность в технике. Методы определения допустимого отклонения параметра технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса составных частей агрегатов машин. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
7. ГОСТ 28.001-83. Система технического обслуживания и ремонта техники. – М.: Изд-во стандартов, 1983.
8. ГОСТ Р ИСО 10816-3-99. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин⁻¹. – М.: Изд-во стандартов, 1999.
9. Давыдов В.М., Жуков Р.В. Диагностика, как неотъемлемая часть ремонта оборудования по техническому состоянию // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 3. – С. 12–14.
10. Дорошев Ю.С., Соловьев Д.Б. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 156 с.
11. Ермолов И.Н., Остахин Н.Я. Методы и средства неразрушающего контроля качества. – М.: Высш. шк., 1988.

12. *Квагинидзе В.С.* Эксплуатация карьерного горного и транспортного оборудования в условиях Севера. – М.: Изд-во МГГУ, 2002. – 243 с.

13. Неразрушающий контроль: справочник: В 7 т. / под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.

14. Положение о планово-предупредительной системе технического обслуживания и ремонта оборудования угольных и сланцевых шахт Минуглепрома ССС. – М.: Изд-во ИГД им. А.А. Скочинского, 1981.

15. Положение о планово-предупредительном ремонте оборудования открытых горных работ на предприятиях угольной промышленности СССР. – Челябинск: Изд. НИИОГР, 1990. – 37 с.

16. Приборы и средства диагностики электрооборудования и измерений в системах электроснабжения: справ. Пособие / под ред. В.И. Григорьева. – М.: Колос, 2006. – 272 с.

Учебное издание

Баркова Наталья Александровна
Дорошев Юрий Степанович

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ГОРНЫХ МАШИН
И ОБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие

Редактор В.В. Прищепа
Компьютерная верстка М.Н. Евсеенко

Подписано в печать 29.09.09. Формат 60x84/16

Усл. печ. л. 9,07. Уч.-изд. л. 8,4

Тираж 100 экз. Заказ 078

Издательство ДВГТУ. 690990, Владивосток, ул. Пушкинская, 10
Типография ДВГТУ. 690990, Владивосток, ул. Пушкинская, 10