

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Ю.В.Волков

**СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ, АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ**

Часть 2

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2017

УДК 62-5 (075)
ББК 32.965я7
В 676

Волков Ю.В.

Системы технического диагностирования, автоматического управления и защиты: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017. Часть 2 – 117 с.: ил. 33.

В учебном пособии рассмотрены вопросы диагностического обеспечения с упором на создание систем цифровой обработки, приведены методы диагностирования дизелей, подробно разобран метод виброакустического диагностирования дизелей.

Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 13.04.01 “Теплоэнергетика и теплотехника”. Может представлять интерес для специалистов, занимающихся разработкой и эксплуатацией автоматизированных систем контроля и управления, а также для преподавателей, аспирантов и студентов технических высших учебных заведений.

Рецензенты: канд. техн. наук, начальник кафедры электромеханической службы Военного института дополнительного профессионального образования ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова» Д.И. Коваленко;
канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ВШТЭ СПбГУПТД С.Н. Смородин.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебного пособия.

©Высшая школа технологии и энергетики
СПбГУПТД, 2017
©Волков Ю.В., 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Диагностическое обеспечение	4
1.1. Диагностические модели технических систем	5
1.2. Диагностические параметры и признаки	14
1.3. Алгоритм технического диагностирования	17
1.4. Средства диагностирования	19
1.5. Разработка методики диагностирования	23
2. Цифровая обработка сигналов	26
2.1. Понятие сигнала	26
2.2. Аналоговый сигнал	28
2.3. Цифровой сигнал	34
2.4. Преобразование сигнала в цифровую форму	36
2.5. Система цифровой обработки аналоговых сигналов	38
2.6. Методы ЦОС	39
3. Виброакустическое диагностирование	42
3.1. Вибрация	42
3.2. Методы виброакустического диагностирования	45
3.3. Средства виброакустического диагностирования	55
4. Диагностирование дизелей	77
4.1. Отказы и дефекты дизелей	77
4.2. Методы безразборного функционального диагностирования дизелей	79
5. Виброакустическое диагностирование дизелей	86
5.1. Источники вибрации	86
5.2. Физические процессы дизеля	90
5.3. Способ вибродиагностирования дизелей	100
Библиографический список	113

1. Диагностическое обеспечение

Диагностическое обеспечение – комплекс взаимоувязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования на всех этапах жизненного цикла объекта [1].

Для того чтобы объект был приспособлен к диагностированию, необходимо при его проектировании разрабатывать диагностическое обеспечение. Диагностическое обеспечение проектируемого объекта получают в результате анализа его *диагностической модели*. Строится диагностическая модель на основе предполагаемой конструкции, условий использования и эксплуатации объекта. В результате исследования диагностической модели устанавливают *диагностические признаки*, прямые и косвенные *параметры* и методы их оценки, определяют условия работоспособности, разрабатывают *алгоритмы диагностирования*.

Диагностическое обеспечение дает возможность получить достоверную информацию о работоспособности объекта диагностирования (ОД). Это позволяет поддерживать на высоком уровне экономичность и безопасность.

Например, появление дефектов в некоторых элементах энергетических установок (ЭУ) может привести к снижению ее экономичности, так как при этом нарушается оптимальное соотношение геометрических параметров, ухудшаются условия протекания рабочих процессов, возникают дополнительные потери энергии. Поэтому своевременное обнаружение и устранение дефектов будет способствовать поддержанию указанного показателя на заданном уровне [2].

Предупреждение средствами диагностирования перехода ОД в опасное состояние, которое может быть обусловлено развивающимся дефектом, является одним из способов отыскания кратчайшего пути его опасного функционирования, позволяющим повысить безопасность ОД, а значит, снизить аварийность ЭУ [3].

1.1. Диагностические модели технических систем

Диагностическая модель (ДМ) – формализованное описание объекта, необходимое для решения задач диагностирования [1].

Выбор того или иного типа модели для представления конкретного объекта зависит от целого ряда таких факторов, как условия эксплуатации, возможное конструктивное выполнение, тип комплектующих элементов и т.п.

Выбор диагностических моделей производится с учетом:

- специфики объекта;
- условий использования;
- методов диагностирования.

Классификация диагностических моделей приведена на рис. 1.1.

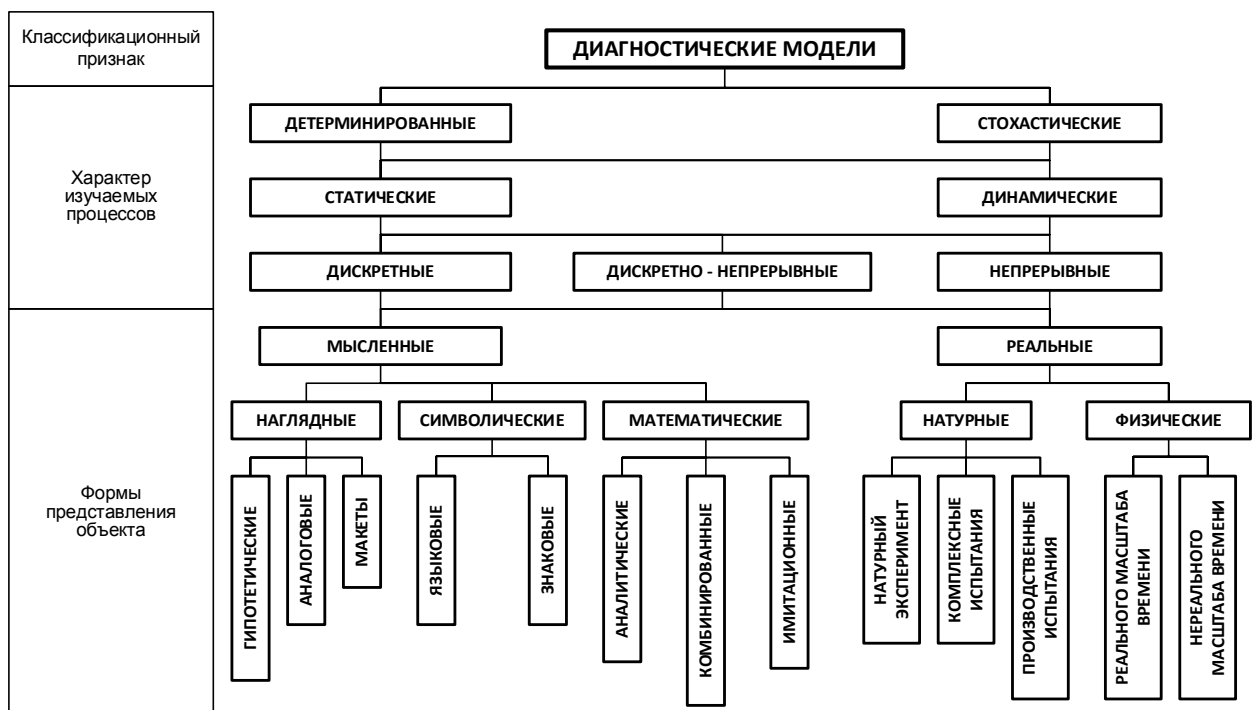


Рис. 1.1. Классификация диагностических моделей

Процесс создания диагностической модели называется *моделированием*. В основе моделирования лежит *теория подобия*, которая утверждает, что абсолютное подобие может иметь место лишь при замене одного объекта другим точно таким же. При моделировании абсолютное подобие не имеет

места и стремятся к тому, чтобы модель достаточно хорошо отображала исследуемую сторону функционирования объекта. Поэтому в качестве одного из первых признаков классификации моделей можно выбрать **степень полноты модели** и разделить модели в соответствии с этим признаком на полные, неполные и приближенные. В основе полного моделирования лежит полное подобие, которое проявляется как во времени, так и в пространстве. Для неполного моделирования характерно неполное подобие модели изучаемому объекту. В основе приближенного моделирования лежит приближенное подобие, при котором некоторые стороны функционирования реального объекта не моделируются совсем.

В зависимости от **характера изучаемых процессов** в системе все виды моделей могут быть разделены на детерминированные и стохастические, статические и динамические, дискретные, непрерывные и дискретно-непрерывные. *Детерминированное* моделирование отображает детерминированные процессы, т.е. процессы, в которых предполагается отсутствие всяких случайных воздействий. *Стохастическое* моделирование отображает вероятностные процессы и события. В этом случае анализируется ряд реализаций случайного процесса и оцениваются средние характеристики, т.е. набор однородных реализаций. *Статическое* моделирование служит для описания поведения объекта в какой-либо момент времени, а *динамическое* моделирование отражает поведение объекта во времени. *Дискретное* моделирование служит для описания процессов, которые предполагаются дискретными, соответственно, *непрерывное* моделирование позволяет отразить непрерывные процессы в системах, а *дискретно-непрерывное* моделирование используется для случаев, когда хотят выделить наличие как дискретных, так и непрерывных процессов.

В зависимости от **формы представления объекта** (системы) можно выделить мысленное и реальное моделирование.

Мысленное моделирование часто является единственным способом моделирования объектов, которые либо практически не реализуемы в заданном интервале времени, либо существуют вне условий, возможных для их физического создания. Например, на базе мысленного моделирования могут быть проанализированы многие ситуации микромира, которые не поддаются физическому эксперименту. Мысленное моделирование может быть реализовано в виде наглядного, символического и математического.

При наглядном моделировании на базе представлений человека о реальных объектах создаются различные наглядные модели, отображающие явления и процессы, протекающие в объекте.

В основу гипотетического моделирования исследователем закладывается некоторая гипотеза о закономерностях протекания процесса в реальном объекте, которая отражает уровень знаний исследователя об объекте и базируется на причинно-следственных связях между входом и выходом изучаемого объекта. Гипотетическое моделирование используется, когда знаний об объекте недостаточно для построения формальных моделей.

Аналоговое моделирование основывается на применении аналогий различных уровней. Наивысшим уровнем является полная аналогия, имеющая место только для достаточно простых объектов. С усложнением объекта используют аналогии последующих уровней, когда аналоговая модель отображает несколько либо только одну сторону функционирования объекта.

Существенное место при мысленном наглядном моделировании занимает макетирование. Мысленный макет может применяться в случаях, когда протекающие в реальном объекте процессы не поддаются физическому моделированию, либо может предшествовать проведению других видов моделирования. В основе построения мысленных макетов также лежат аналогии, однако обычно базирующиеся на причинно-следственных связях между явлениями и процессами в объекте.

Символическое моделирование представляет собой искусственный процесс создания логического объекта, который замещает реальный и выражает основные свойства его отношений с помощью определенной системы знаков или символов.

Если ввести условное обозначение отдельных понятий, т.е. знаки, а также определенные операции между этими знаками, то можно реализовать знаковое моделирование и с помощью знаков отображать набор понятий – составлять отдельные цепочки из слов и предложений. Используя операции объединения, пересечения и дополнения теории множеств, можно в отдельных символах дать описание какого-то реального объекта.

В основе языкового моделирования лежит некоторый тезаурус. Последний образуется из набора входящих понятий, причем этот набор должен быть фиксированным. Следует отметить, что между тезаурусом и обычным словарем имеются принципиальные различия. Тезаурус – словарь, который очищен от неоднозначности, т.е. в нем каждому слову может соответствовать лишь единственное понятие, хотя в обычном словаре одному слову могут соответствовать несколько понятий.

Для исследования характеристик процесса функционирования любой системы математическими методами, включая и машинные, должна быть проведена формализация этого процесса, т.е. построена математическая модель.

Под *математическим* моделированием понимается процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью, и исследование этой модели, позволяющее получать характеристики рассматриваемого реального объекта. Вид математической модели зависит как от природы реального объекта, так и от задач исследования объекта и требуемой достоверности и точ-

ности решения этой задачи. Любая математическая модель, как и всякая другая, описывает реальный объект лишь с некоторой степенью приближения к действительности. Математическое моделирование для исследования характеристик процесса функционирования систем можно разделить на аналитическое, имитационное и комбинированное.

Для аналитического моделирования характерно то, что процессы функционирования элементов системы записываются в виде некоторых функциональных соотношений (алгебраических, интегральных, дифференциальных, конечно-разностных и т.п.) или логических условий. Аналитическая модель может быть исследована следующими методами: а) аналитическим, когда стремятся получить в общем виде явные зависимости для искомых характеристик; б) численным, когда, не умея решать уравнения в общем виде, стремятся получить числовые результаты при конкретных начальных данных; в) качественным, когда, не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения (например, оценить устойчивость решения).

Наиболее полное исследование процесса функционирования системы можно провести, если известны явные зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными системы. Однако такие зависимости удастся получить только для сравнительно простых систем. При усложнении систем исследование их аналитическим методом наталкивается на значительные трудности, которые часто бывают непреодолимыми. Поэтому, желая использовать аналитический метод, в этом случае идут на существенное упрощение первоначальной модели, чтобы иметь возможность изучить хотя бы общие свойства системы. Такое исследование на упрощенной модели аналитическим методом помогает получить ориентировочные результаты для определения более точных оценок другими методами. Численный метод позволяет исследовать по сравнению с аналити-

ческим методом более широкий класс систем, но при этом полученные решения носят частный характер. Численный метод особенно эффективен при использовании ЭВМ.

В отдельных случаях исследователя системы могут удовлетворить и те выводы, которые можно сделать при использовании качественного метода анализа математической модели. Такие качественные методы широко используются, например, в теории автоматического управления для оценки эффективности различных вариантов систем управления.

В настоящее время распространены методы машинной реализации исследования характеристик процесса функционирования больших систем. Для реализации математической модели на ЭВМ необходимо построить соответствующий моделирующий алгоритм.

При имитационном моделировании алгоритм, реализующий модель, воспроизводит процесс функционирования системы во времени. Причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени. Это позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы.

Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия и др., которые часто создают трудности при аналитических исследованиях. В настоящее время имитационное моделирование – наиболее эффективный метод исследования сложных систем, а часто и единственный практически доступный метод получения информации о поведении системы, особенно на этапе ее проектирования.

Когда результаты, полученные при воспроизведении на имитационной модели процесса функционирования системы, являются реализациями случайных величин и функций, тогда для нахождения характеристик процесса требуется его многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой информации и целесообразно в качестве метода машинной реализации имитационной модели использовать метод статистического моделирования. Первоначально был разработан метод статистических испытаний, представляющий собой численный метод, который применялся для моделирования случайных величин и функций, вероятностные характеристики которых совпадали с решениями аналитических задач (такая процедура получила название метода Монте-Карло). Затем этот прием стали применять и для машинной имитации с целью исследования характеристик процессов функционирования систем, подверженных случайным воздействиям, т.е. появился метод статистического моделирования.

Таким образом, *методом статистического моделирования* называется метод машинной реализации имитационной модели, а *методом статистических испытаний* (Монте-Карло) называется численный метод решения аналитической задачи.

Метод имитационного моделирования позволяет решать задачи анализа сложных систем, включая задачи оценки:

- вариантов структуры системы;
- эффективности различных алгоритмов управления системой;
- влияния изменения различных параметров системы.

Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование при анализе и синтезе систем позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования. При построении комбинированных моделей проводится предварительная декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие подпроцессы, и для тех из них, где это возможно,

используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели. Такой комбинированный подход позволяет охватить качественно новые классы систем, которые не могут быть исследованы с использованием только аналитического и имитационного моделирования в отдельности.

При *реальном* моделировании используется возможность исследования различных характеристик либо на реальном объекте целиком, либо на его части. Такие исследования могут проводиться как на объектах, работающих в нормальных режимах, так и при организации специальных режимов для оценки интересующих исследователя характеристик (при других значениях переменных и параметров, в другом масштабе времени и т.д.). Реальное моделирование является наиболее адекватным, но при этом его возможности с учетом особенностей реальных объектов ограничены. Например, проведение реального моделирования ОБЪЕКТА предприятием потребует, во-первых, создания такого ОБЪЕКТА, а во-вторых, проведения экспериментов с управляемым ОБЪЕКТОМ, что в большинстве случаев невозможно. Рассмотрим разновидности реального моделирования.

Натурным моделированием называют проведение исследования на реальном объекте с последующей обработкой результатов эксперимента на основе теории подобия. При функционировании объекта в соответствии с поставленной целью удастся выявить закономерности протекания реального процесса. Надо отметить, что такие разновидности натурного эксперимента, как *производственный эксперимент* и *комплексные испытания*, обладают высокой степенью достоверности.

Другим видом реального моделирования является физическое, отличающееся от натурного тем, что исследование проводится на установках, которые сохраняют природу явлений и обладают физическим подобием. В процессе физического моделирования задаются некоторые характеристики

внешней среды и исследуется поведение либо реального объекта, либо его модели при заданных или создаваемых искусственно воздействиях внешней среды. Физическое моделирование может протекать в реальном и нереальном (псевдореальном) масштабах времени, а также может рассматриваться без учета времени. В последнем случае изучению подлежат так называемые “замороженные” процессы, которые фиксируются в некоторый момент времени. Наибольшая сложность и интерес с точки зрения верности получаемых результатов представляет физическое моделирование в реальном масштабе времени.

С точки зрения *математического описания* объекта и в зависимости от его характера модели можно разделить на модели аналоговые (непрерывные), цифровые (дискретные) и аналого-цифровые (комбинированные). Под *аналоговой* моделью понимается подобная модель, которая описывается уравнениями, связывающими непрерывные величины. Под *цифровой* понимают модель, которая описывается уравнениями, связывающими дискретные величины, представленные в цифровом виде. Под *аналого-цифровой* понимается модель, которая может быть описана уравнениями, связывающими непрерывные и дискретные величины.

Особое место в моделировании занимает *кибернетическое* моделирование, в котором отсутствует непосредственное подобие физических процессов, происходящих в моделях, реальным процессам. В этом случае стремятся отобразить лишь некоторую функцию и рассматривают реальный объект как “черный ящик”, имеющий ряд входов и выходов, и моделируются некоторые связи между выходами и входами. Чаще всего при использовании кибернетических моделей проводят анализ поведенческой стороны объекта при различных воздействиях внешней среды. То есть в основе кибернетических моделей лежит отражение некоторых информационных процессов управления, что

позволяет оценить поведение реального объекта. Для построения имитационной модели в этом случае необходимо выделить исследуемую функцию реального объекта, попытаться формализовать эту функцию в виде некоторых операторов связи между входом и выходом и воспроизвести на имитационной модели данную функцию, причем на базе совершенно иных математических соотношений и, естественно, иной физической реализации процесса.

Таким образом, спектр форм ДМ широк – от образов дефектов и их признаков в сознании отдельного специалиста-практика по обслуживанию и ремонту ОД до математических конструкций, реализованных в формальных диагностических программах.

1.2. Диагностические параметры и признаки

Для каждого объекта можно указать множество параметров, характеризующих его техническое состояние.

Следует различать прямые и косвенные диагностические параметры. Прямой – структурный параметр (например, износ, зазор в сопряжении и др.) непосредственно характеризует техническое состояние объекта. Косвенный параметр (например, давление масла, время, содержание СО в отработавших газах и др.) косвенно характеризует техническое состояние. Их выбирают в зависимости от применяемого метода диагностирования.

Возможность прямого изменения **структурных параметров**, а, следовательно, и возможность их непосредственного использования для диагностирования весьма ограничена. Поэтому при диагностировании параметры технического состояния механизма, как правило, измеряют *косвенно*, используя выходные (рабочие) и сопутствующие процессы, порождаемые функционирующим механизмом. Указанные процессы, будучи функционально связаны с техническим состоянием механизма, содержат необходимую информацию. Они называются **диагностическими признаками**.

Например, при диагностировании двигателей наиболее часто используют такие признаки, как эффективность механизма, колебательные процессы, тепловое состояние, герметичность, состав масла и др. Каждый из диагностических признаков можно количественно оценивать при помощи соответствующих **диагностических параметров** (ДП). Такие параметры дают обобщённую информацию о состоянии механизма в целом, являющуюся основой для дальнейшего поэлементного диагностирования.

Эффективность двигателя можно оценить по мощности и темпу её нарастания. Сопутствующие процессы можно оценить при помощи таких диагностических параметров, как величина, скорость и ускорения вибраций, степень и скорость нагрева, компрессия, концентрация в масле продуктов износа и др. Эти параметры дают более узкую, конкретную информацию о техническом состоянии диагностируемого механизма. Кроме того, они достаточно универсальны и широко применимы для сложных технических устройств. Диагностические параметры механизма, так же, как и структурные, являются переменными случайными величинами и имеют соответствующие номинальные (или начальные) и предельные значения.

Начальная величина диагностического параметра характеризует начальную работоспособность механизма. Ее величину можно определить по среднему значению измерений данного диагностического параметра у совокупности заведомо исправных механизмов. Сравнивая фактическую величину диагностического параметра с номинальной, можно судить об израсходованном ресурсе.

Предельную величину диагностического параметра можно определить на основе закона её распределения для механизмов данной совокупности в период их нормальной эксплуатации (т.е. после приработки до начала прогрессивного изнашивания). Так как в этот период интенсивность отказов

механизма примерно постоянна, то плотность распределения диагностического параметра относится к практически исправным механизмам. Поэтому неработоспособными механизмами можно считать такие, у которых диагностический параметр превышает величины, входящие в 95 % случаев его распределения.

По мере ухудшения технического состояния механизма диагностические параметры могут либо увеличиваться (вибрация, расход топлива), либо уменьшаться (давление масла, мощность). Определённая связь между диагностическими и структурными параметрами механизма позволяет без разборки количественно оценить его работоспособность. Для того чтобы обеспечить достоверность, экономичность и стабильность результатов, диагностические параметры должны отвечать требованиям однозначности, воспроизводимости и чувствительности.

Однозначность диагностического параметра означает, что все его текущие значения (в интервале изменений технического состояния механизма от некоторого начального x_n до x_n) однозначно соответствуют структурным параметрам, т.е. зависимость $y = f(x)$ в указанном интервале не имеет экстремума.

Воспроизводимость (или стабильность) параметра определяется дисперсией его величин, многократно измеренных с заданной точностью.

Чувствительность (или информативность) диагностического параметра оценивается величиной и скоростью его приращения при достаточно малом изменении структурного параметра механизма.

Указанные качества диагностических параметров, а, следовательно, и достоверность диагностирования в большой степени зависят от теплового, нагрузочного и скоростного режимов работы диагностируемого механизма. Поэтому при диагностике часто используют устройства, задающие и поддерживающие оптимальные режимы.

1.3. Алгоритм технического диагностирования

Алгоритм технического диагностирования – совокупность предписаний, определяющих последовательность действий при проведении диагностирования [1].

Алгоритм диагностирования устанавливает состав и порядок проведения *элементарных проверок* объекта и *правила анализа* их результатов. Элементарная проверка определяется рабочим или тестовым воздействием, поступающим или подаваемым на объект, а также составом признаков и параметров, образующих ответ объекта на соответствующее воздействие. Конкретные значения признаков и параметров, получаемых при диагностировании, являются результатами элементарных проверок или значениями ответов объекта.

Различают *безусловные алгоритмы диагностирования*, у которых порядок выполнения элементарных проверок определен заранее, и *условные алгоритмы диагностирования*, у которых выбор очередных элементарных проверок определяется результатами предыдущих.

Если диагноз составляется после выполнения всех элементарных проверок, предусмотренных алгоритмом, то последний называется *алгоритмом с безусловной остановкой*. Если же анализ результатов делается после выполнения каждой элементарной проверки, то алгоритм является *алгоритмом с условной остановкой*.

Выбор алгоритма технического диагностирования зависит от задач определения технического состояния объекта. Поэтому различают:

- алгоритм проверки – установление факта наличия дефекта, нарушающего работоспособность объекта и приводящего к появлению отказа;
- алгоритм поиска – определение характера и местоположения возникновения отказа при подаче предусмотренных рабочих воздействий.

Для определения алгоритма диагностирования выполняются следующие мероприятия [4]:

1. Изучается объект диагностирования.
2. Определяются особенности конструкции, характер нагружения и прочностные характеристики элементов механизма.
3. Проводится анализ отказов, характерных поломок и условий эксплуатации.
4. Составляется словарь неисправностей. Словарь неисправностей — перечень возможных неисправностей и их характеристик. Эти данные используются для выбора диагностических параметров, оценки состояния и поиска неисправностей.
5. Выбираются диагностические параметры и средства измерения. Разрабатывается программа проведения измерений.
6. Заключительная фаза разработки — составление диагностической таблицы (матрицы) — таблицы неисправностей с решающими правилами. Например, система распознавания может оформляться в виде представления знаний для диагностирования правилами и логическими выводами типа «если..., то... » (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Таблица неисправностей с решающими правилами

Диагноз	Диагностические параметры			Решающие правила
	S1	S2	S3	
D1	S1 = 1, если $\delta \geq 7,5\%$	S2 = 1, при $\alpha \geq 4,0$ мм	0	$S1 \cdot S2 = 1 \rightarrow D1$
D2	0	S2 = 1, при $\alpha \geq 4,0$ мм		$S2 = 1 \rightarrow D2$
D3	S1 = 1, если $\delta \geq 7,5\%$	0	S3 = 1, если $\beta \leq 3,0\%$	$S1 \cdot S3 = 1 \rightarrow D3$

При решении задач диагностирования необходимо правильно выбрать

объект диагностирования. Если это будет механизм в целом, тогда увеличивается количество диагностических моделей. Если это отдельные элементы, тогда диагностическая модель усложняется из-за необходимости учета взаимодействия элементов.

1.4. Средства диагностирования

Средства диагностирования – аппаратура и программы, с помощью которых осуществляется диагностирование [1].

К *аппаратурным* средствам диагностирования относят различные устройства: приборы, пульты, стенды, специальные вычислительные машины, встроенную аппаратуру контроля вычислительных и управляющих машин и т.п.

Программные средства диагностирования представляют собой программы.

Программа – данные, предназначенные для управления конкретными компонентами системы обработки информации в целях реализации определенного алгоритма [5].

При этом используют как рабочие программы объекта, содержащие дополнительные операции, необходимые для диагностирования объекта, так и программы, специально составленные исходя из требований диагностирования объекта.

Рабочие программы позволяют осуществлять диагностирование объекта в процессе использования его по прямому назначению, а специальные программы требуют перерывов в выполнении объектом его рабочих функций.

Конструктивно средства технического диагностирования могут входить в состав объекта (встроенные) или выполняются отдельно от конструкции объекта (внешние). Исполнение зависит в основном от особенностей использования и эксплуатации объекта, его контролепригодности. Различают

также специализированные и универсальные средства технического диагностирования.

Необходимо отметить, что в процессе диагностирования участвуют, как правило, ОД, средства технического диагностирования и человек-оператор (исполнитель).

Совокупность средств, объекта и исполнителей, необходимых для проведения диагностирования по правилам, установленным в технической документации, составляет **систему технического диагностирования** [6].

Различают системы диагностирования:

- системы тестового диагностирования (системы первого вида) – системы управления, применяемые при изготовлении объектов, на которые подаются специально организуемые целенаправленные тестовые воздействия;
- системы функционального диагностирования (системы второго вида) – типичные системы контроля, которые работают в процессе применения объекта по назначению при поступлении только рабочих воздействий.

В зависимости от назначения сложных комплексных технических устройств, диагностированию подвергают как основное изделие, включая конструкцию и её составляющие (встроенные системы), так и функционально объединённые комплектующие (внешние системы).

Основные функции систем диагностирования технических изделий приведены в табл. 1.2.

Для количественной и качественной оценки свойств систем технического диагностирования применяют следующие характеристики:

- *оперативность* – характеризует возможность своевременного и обоснованного выбора управляющих воздействий в процессе функционирования системы с целью учёта изменений в ситуации;
- *гибкость* – определяет возможность системы перепрограммирования на различные условия и режимы работы;

Таблица 1.2. Основные функции систем диагностирования

Область применения	Системы диагностирования		
	встроенные	мобильные	стационарные
Изготовление			
Выявление дефектов конструкции	+	+	(+)
Контроль функционирования	(+)	-	-
Защита от аварий	(+)	-	-
Эксплуатация			
Адаптация к изменению технологий	(+)	-	-
Адаптация к изменению внешней среды	+	-	-
Обнаружение неисправных элементов	+	+	-
Контроль параметров	+	+	-
Регулировка по динамическим параметрам	+	(+)	-
Накопление данных о параметрах и видах отказа	(+)	+	-
Прогнозирование	+	(+)	-
Примечание: + - безусловно выполняется (+) - возможно выполняется - - обычно не выполняется			

– *мобильность* – определяет быстроту перестройки системы с изменением состояния внешней среды;

– *живучесть* – характеризует возможность временного продолжения функционирования в случае повреждения отдельных деталей и узлов.

К диагностическим системам применимы общие системные принципы:

– принцип целеполагания создания системы (совокупность технических средств и обслуживающего персонала);

– принцип относительности (совокупность элементов системы, рассматриваемая как часть большей системы);

– принцип управляемости (определения возможности изменения структуры системы и иерархичности её построения);

– принцип модулируемости¹ (обеспечение возможности прогнозирования состояния объекта, диагностирования или развития самой системы).

При разработке систем технического диагностирования необходимо [2]:

– изучить (исследовать) объект диагностирования;

– составить перечень возможных дефектов, условия и признаки их появления, передачи признаков в контрольные точки и их обнаружения в этих точках;

– выбрать известную или построить новую математическую модель объекта и соответствующие ей модели возможных дефектов;

– выбрать метод и составить алгоритм диагностирования;

– оценить качество полученного алгоритма диагностирования;

– выбрать средства диагностирования;

– оценить характеристики средств диагностирования;

– исследовать систему диагностирования в целом.

Для реализации диагностического обеспечения в общем случае требуется ввести аппаратную и информационную *избыточность*, а также дополнительно затратить энергию.

Главными показателями качества диагностического обеспечения являются гарантируемые системами диагностирования полнота обнаружения (диагностирования) и глубина поиска отказа (неисправности).

Полнота диагностирования – характеристика, определяющая возможность выявления отказов (неисправностей) в объекте при выбранном методе его диагностирования (контроля) [1].

Полнота обнаружения неисправностей – доля неисправностей, которые могут быть диагностированы в данных условиях [7].

¹ Модулированный – преобразованный, измененный.

Глубина поиска места отказа (неисправности) – характеристика, задаваемая указанием составной части объекта с точностью, до которой определяется место отказа (неисправности) [1].

Полнота обнаружения неисправностей задает долю гарантированно обнаруживаемых неисправностей относительно всех заданных или рассматриваемых неисправностей ОД. Любая диагностическая процедура обязательно связывается с определенным, строго фиксированным списком неисправностей, обнаружение которых обеспечивается при ее проведении. Это фактически определяет ограничение, накладываемое на процесс обнаружения неисправностей, и в конечном итоге определяет глубину диагностирования.

1.5. Разработка методики диагностирования

Общей проблемой технической диагностики является достижение адекватной оценки распознавания истинного состояния объекта и классификации этого состояния (работоспособного или неработоспособного).

При разработке методики технического диагностирования для подтверждения работоспособного состояния объекта выделяют две основные задачи:

- обеспечение получения достоверной информации;
- обеспечение приемлемой оперативности получения информации.

В методике для выявления неработоспособного состояния также должны быть учтены решения двух основных проблем:

- вероятность пропуска дефекта;
- вероятность «ложной тревоги», т.е. вероятность ложного сигнала о наличии дефекта.

Чем выше вероятность «ложной тревоги», тем меньше вероятность пропуска дефекта, и наоборот. Задача методики состоит в нахождении «золотой середины» между этими двумя проблемами.

Начальная и предельная степень работоспособности объекта определяются пороговыми значениями ДП. Измерение пороговых значений ДП ОД может быть проведено во время экспериментальных, предварительных или контрольных износных испытаний [8], когда известно, что износ объекта, а значит изменение структурного параметра, достиг предельного значения, либо при применении элементов, износ которых достиг этих значений и даже более изношенных.

С учетом указанного, методику диагностирования ОД можно представить в виде структурно-логической схемы (рис. 1.2), представляющей собой два блока – предварительный и эксплуатационный этапы.

В блоке формирования эталонов происходит составление матриц структурных параметров работоспособного технического состояния и полученных значений ДП.

Блок формирования диагностических моделей предназначен для обработки испытательных данных, расчета регрессионных зависимостей изменения выбранных ДП от изменения представленных структурных параметров, расчета адекватностей полученных моделей с заданным уровнем значимости и формирования вероятностных моделей процессов деградации.

В блоке формирования пороговых значений ДП происходит составление матриц ДП с учетом полученных предельных значений структурных параметров.

Полученные ДП и ДМ составляют базу данных для дальнейшего сравнения с эксплуатационными параметрами.

На основании сравнения текущих, эталонных и пороговых ДП в блоке определения вида ТС происходит выдача информации о текущем ТС ОД.

Во время эксплуатации ОД производится набор статистической информации по результатам контроля ТС и эксплуатационных испытаний для прогнозирования остаточного ресурса элементов ОД на основе вероятностных

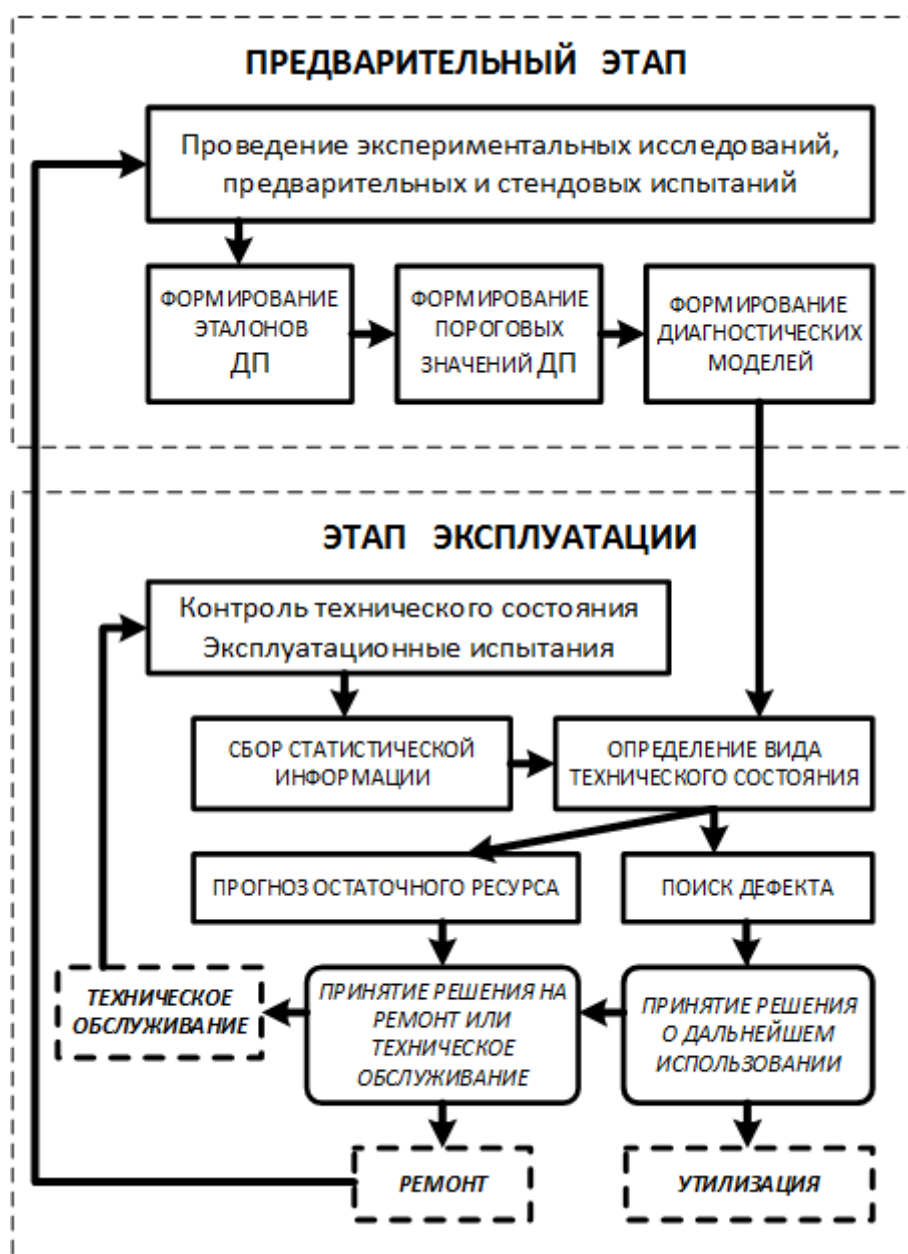


Рис. 1.2. Структурно-логическая схема методики диагностирования

моделей процессов деградации элементов ОД.

Если при определении вида технического состояния ДП не выходят за границы пороговых значений, то производится прогноз остаточного ресурса ОД, по результатам которого может быть проведено техническое обслуживание или обосновано проведение ремонта. В противном случае необходимо принять решение о дальнейшем использовании ОД.

2. Цифровая обработка сигналов

Цифровая обработка сигналов (ЦОС) отличается от других областей компьютерной техники уникальным типом используемых данных – сигналами. В большинстве случаев, эти сигналы поступают из реального мира (от датчиков сейсмических колебаний, изображений, звуковых волн и т.д.). ЦОС – это математика, алгоритмы и устройства, которые используются для манипуляции этими сигналами после их преобразования в цифровую форму. Это делается ради многих целей: повышения качества изображений, распознавания и генерации речи, сжатия данных для передачи и хранения и т.д.

2.1. Понятие сигнала

В теории информации под **сигналом** понимается материальный носитель информации. Сигнал может генерироваться, но его приём не обязателен, в отличие от сообщения, которое рассчитано на принятие принимающей стороной. Сигналом может быть любой физический процесс, параметры которого изменяются (или находятся) в соответствии с передаваемым сообщением.

В цифровой обработке сигналов под **сигналом** понимается его математическое описание, т.е. некоторая вещественная функция, содержащая информацию о состоянии или поведении физической системы при каком-нибудь событии, которая может быть определена на непрерывном или дискретном пространстве изменения времени или пространственных координат.

Классификация сигналов представлена в табл. 2.1.

По способу задания сигналы могут быть случайными или детерминированными.

К **детерминированным** относят сигналы, значения которых в любой момент времени или в произвольной точке пространства (а равно и в зависимости от любых других аргументов) являются априорно известными или могут

быть определены (вычислены) по известной или предполагаемой функции, даже если мы не знаем ее явного вида.

Таблица 2.1. Классификация сигналов

Классификационный признак	Вид сигнала
По физической природе носителя информации	– электрические; – электромагнитные; – оптические; – акустические; – другие.
По способу задания сигнала	– регулярные (детерминированные), заданные аналитической функцией; – нерегулярные (случайные), принимающие произвольные значения в любой момент времени. Для описания таких сигналов используется аппарат теории вероятностей.
В зависимости от функции, описывающей параметры сигнала	– непрерывные (аналоговые), описываемые непрерывной функцией; – дискретные, описываемые функцией отсчётов, взятых в определённые моменты времени; – квантованные по уровню; – дискретные сигналы, квантованные по уровню (цифровые).

Случайные сигналы непредсказуемы по своим значениям во времени или в пространстве. Для каждого конкретного отсчета случайного сигнала можно знать только вероятность того, что он примет какое-либо значение в определенной области возможных значений. Закон распределения случайных значений далеко не всегда известен. Одним из самых распространенных является нормальное распределение, плотность которого имеет вид симметричного колокола. Для его описания достаточно двух первых моментов распределения случайных величин – среднее значение случайных величин (математическое ожидание) и дисперсия (математическое ожидание квадрата

отклонения от среднего), характеризующая разброс значений случайных величин относительно среднего значения.

Понятие сигнала позволяет абстрагироваться от конкретной физической величины, например, тока, напряжения, акустической волны, и рассматривать вне физического контекста явления, связанные кодированием информации и извлечением её из сигналов, которые обычно искажены шумами. В исследованиях сигнал часто представляется функцией времени, параметры которой могут нести нужную информацию. Способ записи этой функции, а также способ записи мешающих шумов называют **математической моделью сигнала**.

2.2. Аналоговый сигнал

Аналоговый сигнал — сигнал данных, у которого каждый из представляющих параметров описывается функцией времени и непрерывным множеством возможных значений [9].

Аналоговый сигнал представляет собой непрерывно изменяющуюся в зависимости от частоты волну, которая может распространяться через множество сред. В качестве примеров таких сред для электромагнитных волн можно назвать проводные линии, такие, как витая пара и коаксиальный кабель, оптоволокно. Этот сигнал может также распространяться через атмосферу или космическое пространство.

Большинство сигналов имеют аналоговую природу, т.е. изменяются непрерывно во времени и могут принимать любые значения на некотором интервале. Аналоговые сигналы описываются некоторой математической функцией времени.

Пример аналогового сигнала — гармонический сигнал:

$$s(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0), \quad (2.1)$$

где **A** — амплитуда сигнала;

$\varphi = \omega \cdot t + \varphi_0$ — фаза гармонического сигнала;

t – время;

ω – циклическая частота сигнала.

Аналоговые сигналы часто используют для представления непрерывно изменяющихся физических величин. Например, аналоговый электрический сигнал, снимаемый с термопары, несет информацию об изменении температуры; сигнал с микрофона — о быстрых изменениях давления в звуковой волне и т.п.

Аналоговые сигналы используются в телефонии, радиовещании, телевидении. Ввести такой сигнал в цифровую систему для обработки невозможно, так как на любом интервале времени он может иметь бесконечное множество значений, и для точного (без погрешности) представления его значения требуются числа бесконечной разрядности. Поэтому очень часто необходимо преобразовывать аналоговый сигнал так, чтобы можно было представить его последовательностью чисел заданной разрядности.

Как и в любой другой технологии, для описания аналоговых сигналов используются базовые концепции и собственная терминология. Непрерывные аналоговые сигналы имеют четыре основные характеристики (рис. 2.1):

- амплитуда, A (м);
- период, T (с);
- частота, f (Гц, с^{-1});
- длина волны, λ (м).

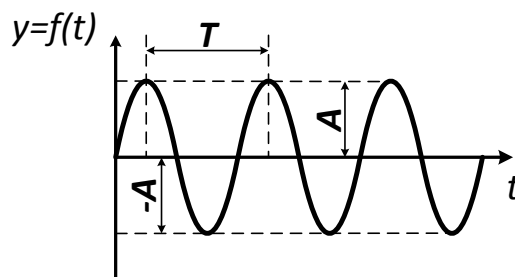


Рис. 2.1. Амплитуда и период аналогового сигнала

Амплитуда — максимальное значение смещения или изменения переменной величины от среднего значения при колебательном или волновом движении (см. рис. 2.1). Неотрицательная скалярная величина, размерность которой совпадает с размерностью определяемой физической величины.

Период — время полного колебания, через который повторяются какие-

либо показатели состояния системы, т.е. система совершает одно полное колебание (возвращается в исходное состояние) (см. рис. 2.1).

Иначе: амплитуда — модуль максимального отклонения тела (колеблющейся величины) от положения равновесия.

Например:

- амплитуда для механического колебания тела, для волн на струне или пружине — это расстояние и записывается в единицах длины;

- амплитуда звуковых волн и аудиосигналов обычно относится к амплитуде давления воздуха в волне, но иногда описывается как амплитуда смещения относительно равновесия (воздуха или диафрагмы говорящего). Её логарифм обычно измеряется в децибелах (дБ);

- для электромагнитного излучения амплитуда соответствует величине напряженности электрического и магнитного поля.

Форма изменения амплитуды называется огибающей волной.

Виды амплитуды:

- пиковая амплитуда (*пик, peak amplitude, peak*) — это отклонение от некоего среднего значения симметричных периодических волн (вроде синусоидальных, прямоугольных или пилообразных);

- пик-пик амплитуда, размах (*пик-пик, peak-to-peak amplitude, pp*) — это разница между положительным и отрицательным пиками;

- среднеквадратичная амплитуда (*root mean square, RMS*) — это квадратный корень среднего по времени значения квадрата отклонения графика от горизонтальной оси асимметричных волн (периодических импульсов в одном направлении; сложных волн, особенно для неповторяющихся сигналов вроде шума). Пиковая амплитуда в этом случае становится неочевидной и обычно не используется. Например, мощность, переносимая акустической или электромагнитной волной, или электрическим сигналом, пропорцио-

нальна квадрату среднеквадратичной амплитуды (и в общем случае не пропорциональна квадрату пиковой амплитуды).

Важно помнить, что для амплитуды расстояние выше и ниже нуля является равнозначным.

Частота — число колебаний в единицу времени. Обратно пропорциональна периоду колебаний:

$$f = 1/T. \quad (2.2)$$

Обычно частота измеряется в герцах (Гц) или килогерцах (кГц = 1000 Гц). Человеческому голосу обычно соответствуют частоты в диапазоне от 50 Гц до 5000 Гц, причем основная активность приходится на диапазон от 300 Гц до 3100 Гц (3,1 кГц). Это означает, что в большинстве голосовых диалогов используется диапазон от 300 до 3100 звуковых колебаний в секунду. Итак, если кто-то говорит о вызове с полосой 3,1 кГц, он имеет в виду специфический диапазон частот, который используется в аналоговой передаче голоса.

В теории электромагнетизма, теоретической физике, а также в некоторых прикладных электрорадиотехнических расчётах удобно использовать дополнительную величину — угловую (круговую, радиальную, циклическую) частоту (обычно обозначается ω). Угловая частота (синонимы: радиальная частота, циклическая частота, круговая частота) — скалярная физическая величина. В случае вращательного движения угловая частота равна модулю вектора угловой скорости¹. В системах СИ и СГС угловая частота выражается в радианах в секунду, её размерность обратна размерности времени (радианы безразмерны). Угловая частота в радианах в секунду выражается через частоту f (выражаемую в оборотах в секунду или колебаниях в секунду), как

$$\omega = 2\pi f. \quad (2.3)$$

¹ Векторная величина, являющаяся псевдовектором (аксиальным вектором) и характеризующая скорость вращения материальной точки вокруг центра вращения. Вектор угловой скорости по величине равен углу поворота точки вокруг центра вращения за единицу времени $\omega = d\varphi/dt$, где φ - угол поворота.

В случае использования в качестве единицы угловой частоты градусов в секунду связь с обычной частотой будет $\omega = 360^\circ \cdot f$.

Введение угловой частоты (в её основной размерности — радианах в секунду) позволяет упростить многие формулы. Решающим соображением в пользу угловой частоты стало то, что множители 2π и $1/(2\pi)$, появляющиеся во многих формулах при использовании радианов для измерения углов и фаз, исчезают при введении угловой частоты.

Длина волны — это расстояние между двумя соседними волнами сигнала (рис. 2.2). Чтобы определить полную длину волны, необходимо измерить расстояние между двумя одинаковыми точками двух соседних волн.

Волна — колебательный процесс, развивающийся (распространяющийся) в пространстве и во времени, в связи с этим изменяющаяся в волновом процессе физическая величина является функцией пространственных координат

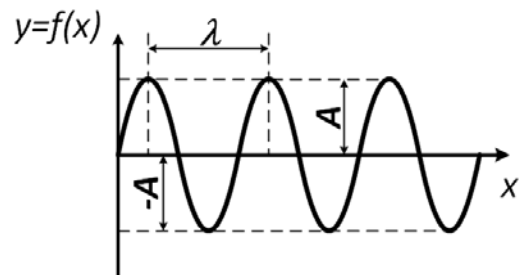


Рис. 2.2. Амплитуда и длина волны аналогового сигнала

и времени (т.е. особого вида пространственно-временной функцией). Волновой процесс в частности может быть периодическим (например, гармоническим). По аналогии с «временным» периодом Δt (интервалом времени, за который периодический колебательный процесс повторяется) длину волны λ можно рассматривать как пространственный период волнового процесса. Следует заметить, что «временной» *угловой частоте*

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T \text{ (радиан/с)}, \quad (2.4)$$

показывающей, на сколько радиан изменится фаза колебания за 1 с, соответствует «пространственная круговая частота»

$$k = 2\pi/\lambda \text{ (радиан/м)}, \quad (2.5)$$

называемая *волновым числом* и показывающая, на сколько радиан отличаются фазы колебательного процесса в двух точках в пространстве, расположенных

вдоль направления распространения волны на расстоянии 1 м друг от друга. При этом очевидно, что фазы колебательного процесса в двух таких точках, расположенных друг от друга на расстоянии в λ , отличаются ровно на 2π .

Получить соотношение, связывающее длину волны с *фазовой скоростью*¹ v и частотой f , можно из определения. Длина волны соответствует пространственному периоду волны, т.е. расстоянию, которое точка с постоянной фазой «проходит» за интервал времени, равный периоду T колебаний, поэтому

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f} = \frac{2\pi v}{\omega}. \quad (2.6)$$

Для электромагнитных волн в вакууме скорость v в этой формуле равна скорости света (299 792 458 м/с), и длина волны

$$\lambda = \frac{299792458}{f}. \quad (2.7)$$

Если значение f подставить в герцах, то размерность получаемого значения λ — метр.

Метрическая система, или указание длины волны в метрах, чаще всего используется в радиосвязи для обозначения полосы или диапазона частот. Например, если в приведенную выше формулу подставить значение частоты, равное 2498 кГц (2498000 Гц), то длина волны будет равна 120,0129935948759 м. После округления получим длину волны, равную 120 м.

¹ Скорость перемещения точки, обладающей постоянной фазой колебательного движения в пространстве, вдоль заданного направления. Обычно рассматривают направление, совпадающее с направлением волнового вектора, и фазовой называют скорость, измеренную именно в этом направлении, если противное не указано явно (т.е. если явно не указано направление, отличное от направления волнового вектора). Фазовая скорость по направлению волнового вектора совпадает со скоростью движения фазового фронта (поверхности постоянной фазы). Её можно рассматривать при желании как векторную величину.

2.3. Цифровой сигнал

Любой непрерывный (аналоговый) сигнал $x(t)$ может быть подвергнут *дискретизации по времени* и *квантованию по уровню* (оцифровке), т.е. представлен в цифровой форме.

Дискретизация – преобразование непрерывной функции в дискретную [10].

Дискретизация аналогового сигнала состоит в том, что сигнал представляется в виде последовательности значений, взятых в дискретные моменты времени t_i (где i — индекс). Обычно промежутки времени между последовательными отсчётами ($\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$) постоянны; в таком случае, Δt называется **интервалом дискретизации**. Сами же значения сигнала $x(t)$ в моменты измерения, т.е. $x_i = x(t_i)$, называются **отсчётами** (рис. 2.3).

При дискретизации только по времени, непрерывный аналоговый сигнал заменяется последовательностью отсчётов, величина которых может быть равна значению сигнала в данный момент времени. Возможность точного воспроизве-

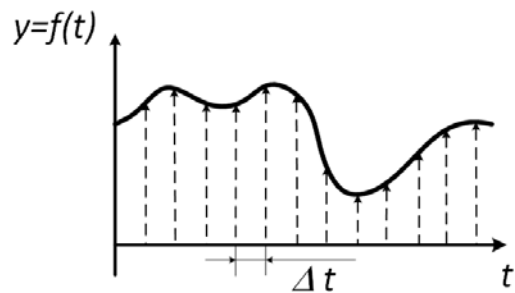


Рис. 2.3. Дискретизация сигнала

дения такого представления зависит от интервала времени между отсчётами Δt . Согласно теореме Котельникова¹ (в англоязычной литературе теорема Найквиста – Шеннона, теорема отсчётов [11])

$$\Delta t < \frac{1}{2 \cdot F_{max}}, \quad (2.8)$$

где F_{max} — наибольшая частота спектра сигнала.

¹ Фундаментальное утверждение в области цифровой обработки сигналов, связывает непрерывные и дискретные сигналы и гласит, что «любую функцию $F(t)$, состоящую из частот от 0 до f_1 , можно непрерывно передавать с любой точностью при помощи чисел, следующих друг за другом через $1/(2 \cdot f_1)$ секунд».

Квантование (англ. *quantization*) – (в информатике) разбиение диапазона значений непрерывной или дискретной величины на конечное число интервалов (рис. 2.4).

Существует также векторное квантование – разбиение пространства возможных значений векторной величины на конечное число областей. Квантование часто используется при обработке сигналов, в том числе при сжатии звука и изображений. Простейшим видом квантования является деление целочисленного значения на натуральное число, называемое коэффициентом квантования [12].

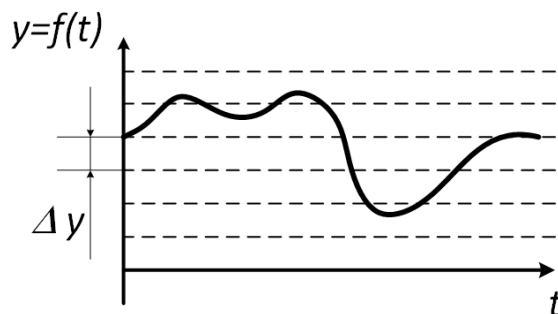


Рис. 2.4. Квантование сигнала

Однородное (линейное) квантование – разбиение диапазона значений на отрезки равной длины. Его можно представлять, как деление исходного значения на постоянную величину (шаг квантования) и взятие целой части от частного

$$\Delta y = \left\lfloor \frac{y - y_0}{h} \right\rfloor. \quad (2.9)$$

Не следует путать квантование с дискретизацией (и, соответственно, шаг квантования с частотой дискретизации). При дискретизации изменяющаяся во времени величина (сигнал) измеряется с заданной частотой (частотой дискретизации). Таким образом, дискретизация разбивает сигнал по временной составляющей (на графике – по горизонтали). Квантование же приводит сигнал к заданным значениям, т.е. разбивает по уровню сигнала (на графике – по вертикали) [13].

Сигнал, к которому применены дискретизация и квантование, называется **цифровым** (рис. 2.5).

При оцифровке сигнала уровень квантования называют также **глубиной дискретизации**, или **битностью**. Глубина дискретизации измеряется в битах

и обозначает количество бит, выражающих амплитуду сигнала. Чем больше глубина дискретизации, тем точнее цифровой сигнал соответствует аналоговому. В случае однородного квантования глубину дискретизации называют

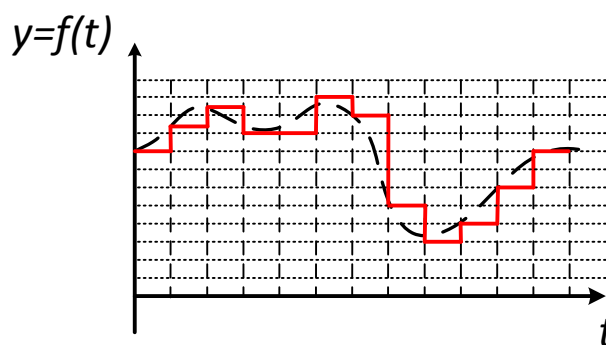


Рис. 2.5. Оцифровка сигнала

также **динамическим диапазоном** и измеряют в децибелах (1 бит $\approx$ 6 дБ).

Квантование по уровню – представление величины отсчётов цифровыми сигналами. Для квантования в двоичном коде диапазон напряжения сигнала от U_{min} до U_{max} делится на 2^n интервалов. Величина получившегося интервала (шага квантования)

$$\Delta = \frac{U_{max} - U_{min}}{2^n}. \quad (2.10)$$

Каждому интервалу присваивается n -разрядный двоичный код – номер интервала, записанный двоичным числом. Каждому отсчёту сигнала присваивается код того интервала, в который попадает значение напряжения этого отсчёта. Таким образом, аналоговый сигнал представляется последовательностью двоичных чисел, соответствующих величине сигнала в определённые моменты времени, т.е. цифровым сигналом. При этом каждое двоичное число представляется последовательностью импульсов высокого (**1**) и низкого (**0**) уровня.

2.4. Преобразование сигнала в цифровую форму

Преобразование сигнала в цифровую форму выполняется аналого-цифровыми преобразователями (АЦП). Они являются устройствами, которые принимают входные аналоговые сигналы и генерируют соответствующие им цифровые сигналы, пригодные для обработки микропроцессорами и другими цифровыми устройствами.

Принципиально не исключена возможность непосредственного преобразования различных физических величин в цифровую форму, однако эту задачу удастся решить лишь в редких случаях из-за сложности таких преобразователей. Поэтому в настоящее время наиболее рациональным признается способ преобразования различных по физической природе величин сначала в функционально связанные с ними электрические, а затем уже с помощью преобразователей напряжение-код – в цифровые. Именно эти преобразователи имеют обычно в виду, когда говорят об АЦП.

В настоящее время известно большое число методов преобразования напряжение-код. Эти методы существенно отличаются друг от друга потенциальной точностью, скоростью преобразования и сложностью аппаратной реализации. На рис. 2.6 представлена классификация АЦП по методам преобразования.

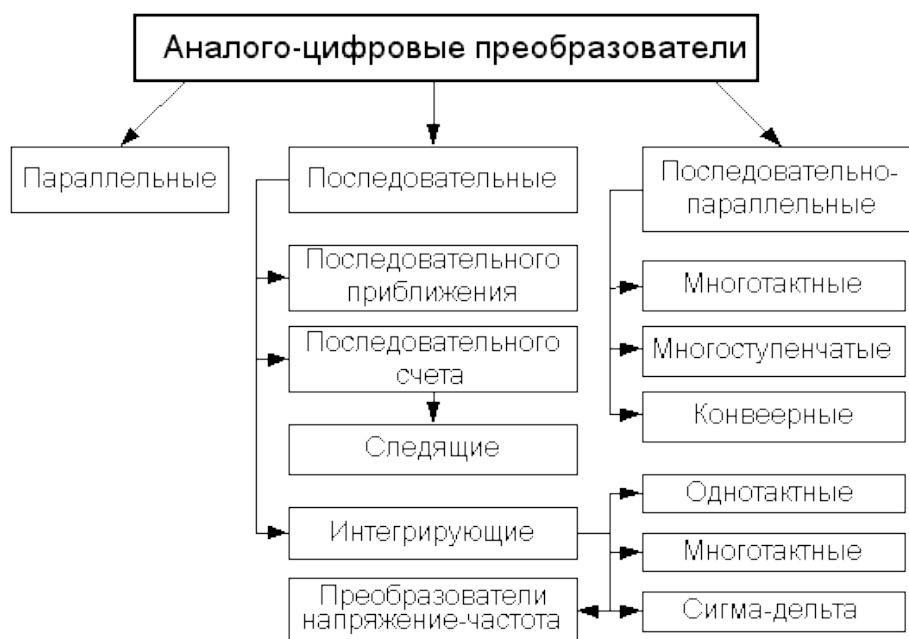


Рис. 2.6. Классификация АЦП

В основу классификации АЦП положен признак, указывающий на то, как во времени разворачивается процесс преобразования аналоговой величины в цифровую. В основе преобразования выборочных значений сигнала в цифровые эквиваленты лежат операции квантования и кодирования. Они могут

осуществляться с помощью либо последовательной, либо параллельной, либо последовательно-параллельной процедур приближения цифрового эквивалента к преобразуемой величине.

Аналого-цифровое преобразование включает дискретизацию сигнала по времени, квантование по уровню и цифровое кодирование (рис. 2.7) [14].

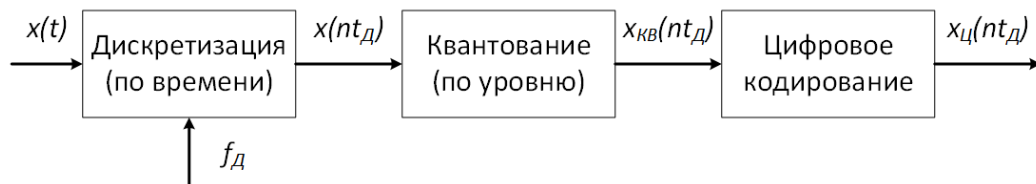


Рис. 2.7. Последовательность операций аналого-цифрового преобразования сигнала

В результате образуются *дискретный сигнал $x(nt_d)$* , соответствующий выборкам аналогового сигнала $x(t)$ в дискретные равноотстоящие моменты времени nt_d ($t_d = 1/f_d$ – период дискретизации сигнала), *дискретный квантованный сигнал $x_{кв}(nt_d)$* , отличающийся *конечным* множеством принимаемых им значений, и *цифровой сигнал $x_ц(nt_d)$* в виде последовательности цифровых двоичных кодов с числом разрядов, соответствующим разрядности АЦП.

2.5. Система цифровой обработки аналоговых сигналов

Обработка аналоговых сигналов является наиболее общей задачей ЦОС. Она включает преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму, их алгоритмическую обработку и при необходимости обратное преобразование цифрового сигнала в аналоговый. Общая структурная схема системы цифровой обработки аналоговых сигналов приведена на рис. 2.8.

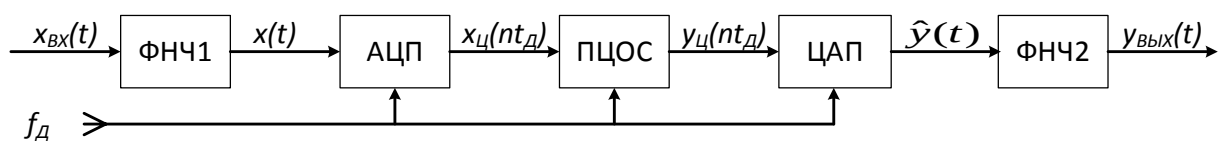


Рис. 2.8. Общая структура системы ЦОС

Входной аналоговый сигнал $x_{\text{вх}}(t)$ в этой схеме поступает на АЦП через аналоговый фильтр нижних частот ФНЧ1 с частотой среза f_c . Фильтр обеспечивает ограничение полосы частот входного сигнала (включая и сопутствующие сигналу шумы и помехи) максимальной частотой $f_m \approx f_c$, соответствующей используемой в АЦП частоте дискретизации сигнала по времени $f_d > 2 \cdot f_m$. Он ослабляет искажения наложения при дискретизации сигналов с неограниченным по частоте спектром и называется *противомаскировочным фильтром*, или *аналоговым преселектором*.

Процессором ЦОС в соответствии с заданным *алгоритмом цифровой обработки* (оператором Φ) входной цифровой сигнал $x_c(nt_d)$ преобразуется в выходной цифровой сигнал системы

$$y_c(nt_d) = \Phi[x_c(nt_d)]. \quad (2.11)$$

Аналоговый выходной сигнал системы $y_{\text{вых}}(t)$ получается (или восстанавливается) из цифрового сигнала $y_c(nT_d)$ с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП), преобразующего его в *квантованный по уровню аналоговый сигнал* $\hat{y}(t)$ ступенчатой формы, и аналогового ФНЧ2, которым ограничивается частотный спектр и подавляются высокочастотные компоненты выходного сигнала. Этот фильтр с частотой среза $f_c < f_d/2$ называют также *сглаживающим*.

Совокупность элементов ФНЧ1, АЦП, ЦАП и ФНЧ2 системы цифровой обработки аналоговых сигналов, выполняющих преобразования сигналов вида А/А, А/Ц и Ц/А, образует *подсистему аналогового ввода-вывода*, или аналого-цифрового интерфейса системы ЦОС.

2.6. Методы ЦОС

В зависимости от области применения, в ЦОС используются различные методы. На рис. 2.9 показаны некоторые из популярных областей применения

ЦОС [15]. Как видно, применение ЦОС весьма обширно. И для каждого направления существуют свои методы.

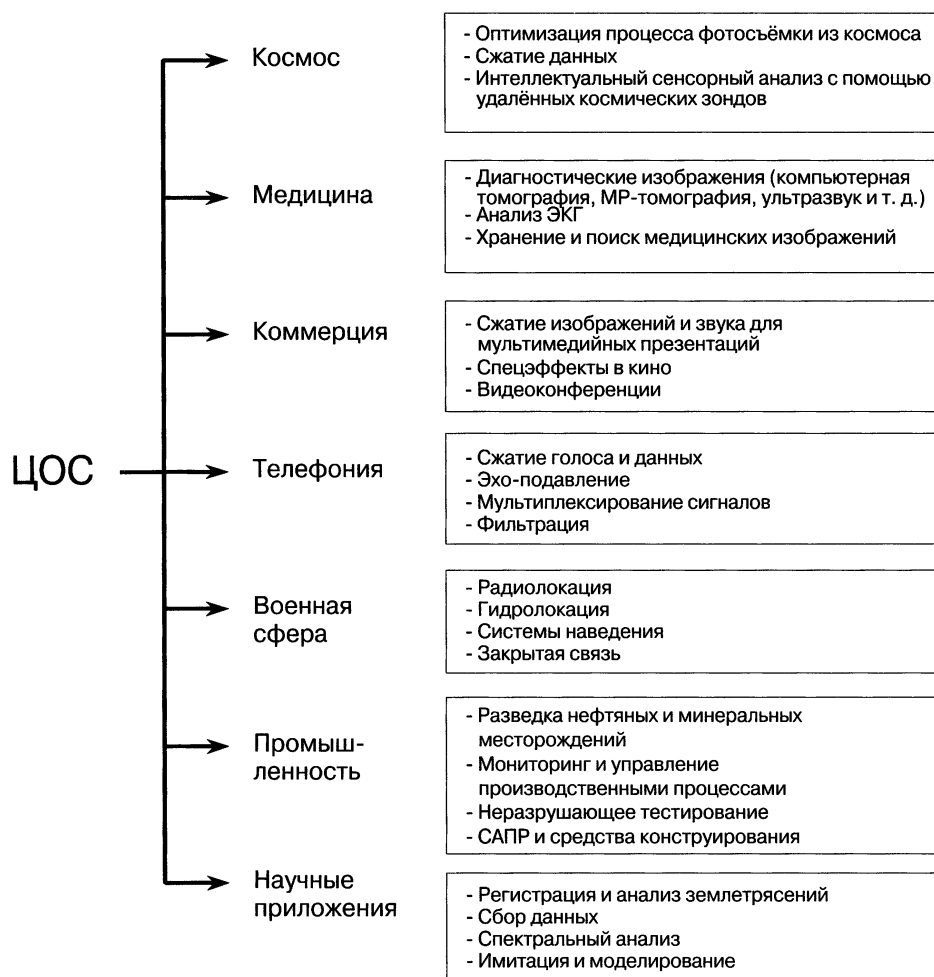


Рис. 2.9. Некоторые из областей применения ЦОС

Назовем основные из методов ЦОС и решаемые этими методами задачи:

- **линейная фильтрация** — селекция сигнала в частотной области; синтез фильтров, согласованных с сигналами; частотное разделение каналов; цифровое преобразование Гильберта; коррекция характеристик каналов;
- **спектральный анализ** — обработка речевых, звуковых, сейсмических, гидроакустических сигналов; распознавание образов;
- **частотно-временной анализ** — компрессия изображений; гидро- и радиолокация; разнообразные задачи обнаружения сигнала;

- **адаптивная фильтрация** — обработка речи, изображений; распознавание образов; подавление шумов; адаптивные антенные решетки;
- **нелинейная обработка** — вычисление корреляций, медианная фильтрация; синтез амплитудных, фазовых, частотных детекторов; обработка речи; векторное кодирование;
- **многоскоростная обработка** — интерполяция (увеличение) и децимация (уменьшение) частоты дискретизации в многоскоростных системах телекоммуникации, аудиосистемах;
- **свертка**;
- **секционная свертка**.

При этом надо понимать, что обработка цифровых сигналов выполняется либо специальным вычислительным устройством – **цифровым сигнальным процессором** (ЦСП)¹, либо на универсальных ЭВМ и компьютерах по специальным программам, иначе называемым пакетами расширения (чаще всего под именем **Signal Processing**) систем компьютерной математики **MATLAB, Octave, Mathcad, Mathematica, Maple** и др.

¹ Цифровой сигнальный процессор (англ. Digital signal processor, DSP) — специализированный микропроцессор, предназначенный для цифровой обработки сигналов (обычно в режиме реального времени).

3. Виброакустическое диагностирование

3.1. Вибрация

Вибрация — это движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин [16], иначе (менее строго) – колебательное движение тела относительно положения равновесия.

Вибрация, при которой значения колеблющейся величины (характеризующей вибрацию) изменяются во времени по синусоидальному закону, называется гармонической. На практике более часто встречается почти гармоническая вибрация, вибрация с дискретным частотным спектром (иногда её называют полигармонической) (рис. 3.1) и вибрация с непрерывным частотным спектром (обычно это случайная вибрация).

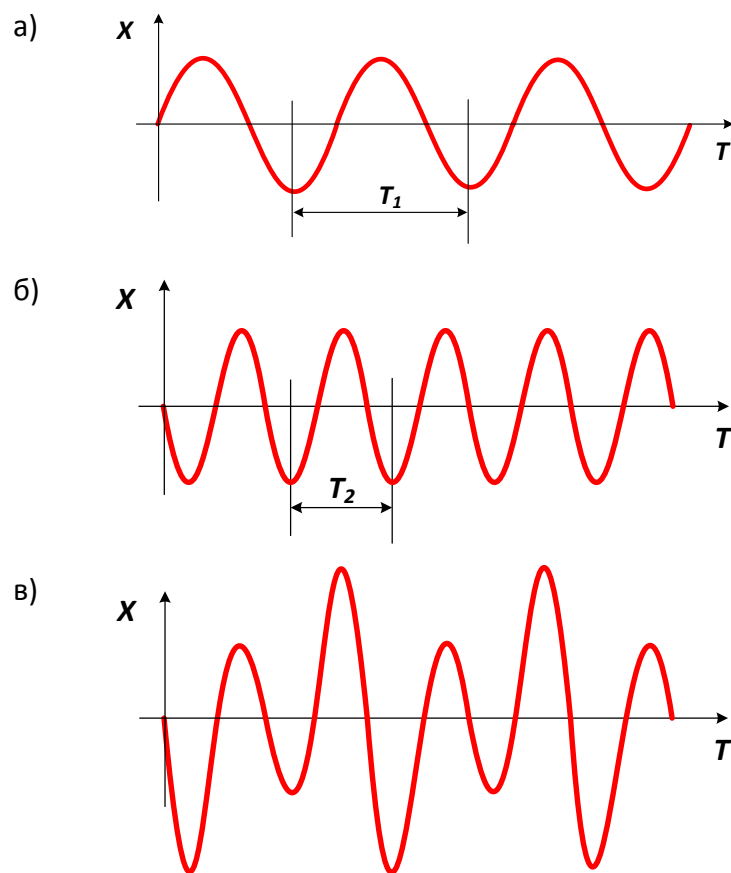


Рис. 3.1. Временные сигналы вибрации:

- а - гармонические колебания с периодом T_1 ;
- б - гармонические колебания с периодом T_2 ;
- в - полигармонический сигнал

При вибрационной диагностике анализируются виброперемещение, виброскорость, виброускорение.

Виброперемещение (S) измеряется при низкочастотной вибрации, верхняя граница спектра частот не более 200 Гц. Эти измерения актуальны в строительной виброакустике, при проведении балансировки роторов, при исследовании машин с малыми зазорами между узлами и деталями, при исследовании упругих деформаций и прогнозе усталостных разрушений.

Виброскорость (v_A) характеризует колебательную энергию. Амплитуда составляющих спектра частот виброскорости в достаточно широкой полосе частот (10...1000 Гц) равномерна, что упрощает измерение и повышает достоверность. По уровню виброскорости определяют техническое состояние машин, их узлов и деталей. Кроме того, виброскорость измеряется в промышленной санитарии.

Виброскорость – производная по времени от виброперемещения. Характеризует мощность колебательного (вибрационного) процесса

$$P = m \cdot v_A, \quad (3.1)$$

где P , m , v_A – мощность, масса объекта, скорость механического колебания, соответственно.

Виброускорение (a_A) измеряется при наличии вибрации в широкой полосе частот, от 100 до 10000 Гц и более. Эти измерения актуальны при виброакустической диагностике.

Виброускорение – в свою очередь, производная по времени от виброскорости. Характеризует инерционную силу, которая воздействует на объект при вибрации

$$F = m \cdot a_A, \quad (3.2)$$

где F , a_A – инерционная сила и виброускорение, соответственно.

Виброскорость и виброускорение связаны с виброперемещением и частотой колебаний соотношениями

$$v_A = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot S_A; a_A = 2(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot S_A. \quad (3.3)$$

В практике измерения вибрации применяют единицы: мкм, м/с, м/с² для виброперемещения, виброскорости и виброускорения, соответственно.

Учитывая, что абсолютные значения величин, характеризующих вибрацию, изменяются в очень широких пределах, в практике виброакустических исследований и инженерных расчетах используют логарифмические уровни колебаний – децибелы (дБ). Под децибелом понимается сравнительная характеристика колебаний двух одноименных физических величин, пропорциональная десятичному логарифму отношения оцениваемого и исходного значений величины

$$L = 20 \cdot \lg \left(\frac{b}{b_0} \right), \quad (3.4)$$

где b – оцениваемое значение величины (скорость, ускорение и т.п.);

b_0 – исходное (пороговое) значение величины (скорости, ускорения и т.п.).

Согласно международному соглашению принято $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с и $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ м/с².

Большинство дефектов машин выражается в повышении уровня вибрации. Анализ вибросигнала представляет собой хорошее средство для их диагностирования. При этом каждый дефект или повреждение имеет свой вид в смысле вибрации [17].

Современные методы виброметрии базируются на достижениях в области **акустической динамики машин** – научного направления, возникшего на стыке теории машин с акустикой [18]. К наиболее популярным методам относятся [19, 20]:

- анализ уровня вибрации;
- спектральный анализ.

3.2. Методы виброакустического диагностирования

3.2.1. Анализ уровня вибрации

Анализ уровня вибрации – один из самых грубых методов, но используется широко благодаря простоте и надежности. Чувствительность низкая, но возрастание уровня вибрации объекта на 5...10 дБ свидетельствует, что с ним не все в порядке [21].

Уровень вибрации – суммарная энергия вибрации (виброскорость, мм/с), измеренная в установленном частотном диапазоне (обычно 10...1000 Гц). Измерение уровней вибрации машины или её компонентов и сравнение полученных уровней с эталонными позволяют судить о текущем состоянии машины. Уровень вибрации выше нормального означает, что у машины имеются проблемы (дисбаланс, расцентровка, ослабление механических креплений, проблемы с фундаментом и т.д.).

Уровень может быть измерен по **Пикам**, по размаху **Пик-Пик**, по среднему уровню или по среднеквадратичному значению (**СКЗ**). Эти факторы могут быть математически связаны друг с другом, если речь идёт о синусоидальной вибрации (рис. 3.2):

- Пик = 1,
- СКЗ = $0.707 \times \text{Пик}$,
- Пик-Пик = $2 \times \text{Пик}$.

В зависимости от класса машин по уровню вибрации можно определить общее состояние согласно стандартам.

Очень распространенный, хотя и устаревший, стандарт ISO 2372 [22] определял интенсивность вибрации как среднеквадратичное значение скорости вибрации, измеренное в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц. В этом стандарте даны нормы для четырех классов технического состояния объектов: хорошее (А), допустимое (В), приемлемое

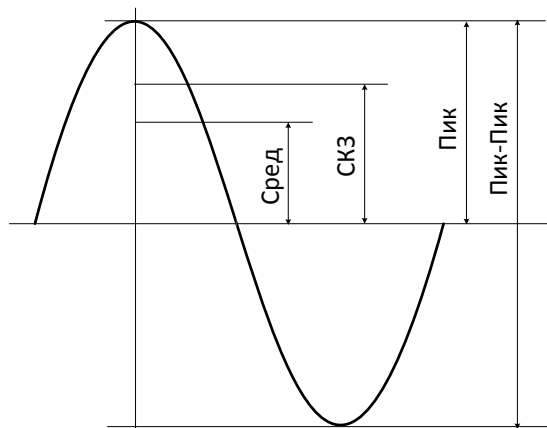


Рис. 3.2. Уровни вибрации

(С), недопустимое (D) (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Нормы технического состояния машин

Диапазон виброскорости		Уровни вибрации, характерные для машин, принадлежащих:			
максимальное значение (РК), дюйм/с	СКЗ (RMS), мм/с	класс I < 15 кВт	класс II 15...75 кВт	класс III > 75 кВт	класс IV > 75 кВт
0,015	0,28	A	A	A	A
0,025	0,45				
0,039	0,71	B	B	B	B
0,062	1,12				
0,099	1,8	C	C	C	C
0,154	2,8				
0,248	4,5	D	D	D	D
0,392	7,1				
0,617	11,2				
0,993	18,0				
1,54	28,0				
2,48	45,0				
3,94	71,0				

Примечание:

класс I – небольшие (до 15 кВт) машины и узлы крупных машин.

класс II – среднего размера (15...75 кВт) машины без специальных фундаментов, или машины до 300 кВт, жестко закрепленные на специальных фундаментах.

класс III – большие ротационные машины, жестко закрепленные на фундаментах, которые являются жесткими в направлении измерения вибрации.

класс IV – большие ротационные машины, устанавливаемые на фундаменты, которые являются гибкими в направлении измерения вибрации.

Современный стандарт ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [23] рекомендует, в основном, такие же измерения, но при этом дополнительно рекомендует различные частотные диапазоны и различные измеряемые величины вибрации (скорость, ускорение и перемещение) для различных видов вращающегося оборудования.

Оба указанных стандарта имеют много общего:

- состояние оборудования диагностируется на основе широкополосных измерений вибрации с выдачей среднеквадратичных значений параметров;
- все виды оборудования группируются по классам в зависимости от типа, мощности, жесткости фундамента и пр.;
- для каждого класса оборудования представлена таблица предельных

значений вибрации, которая различает допустимую вибрацию, при которой оборудование обычно может работать в течение неограниченного времени (зеленая зона), неудовлетворительную вибрацию, при которой оборудование обычно может работать только в течение ограниченного времени до возникновения удобной возможности устранить неисправность (желтая зона), и опасную вибрацию, которая обычно считается достаточно интенсивной для того, чтобы привести к повреждению оборудования (красная зона);

– измерения проводятся в трех направлениях (горизонтальное, вертикальное, осевое).

Самый высокий результат определяет состояние оборудования.

Так как каждая машина уникальна в смысле вибрационного поведения, наиболее эффективным методом определения наличия неисправностей машины является **сравнение результатов измерений уровня вибрации во времени** на этой самой машине. Такое сравнение целесообразно производить с помощью построения трендов¹ (рис. 3.3).

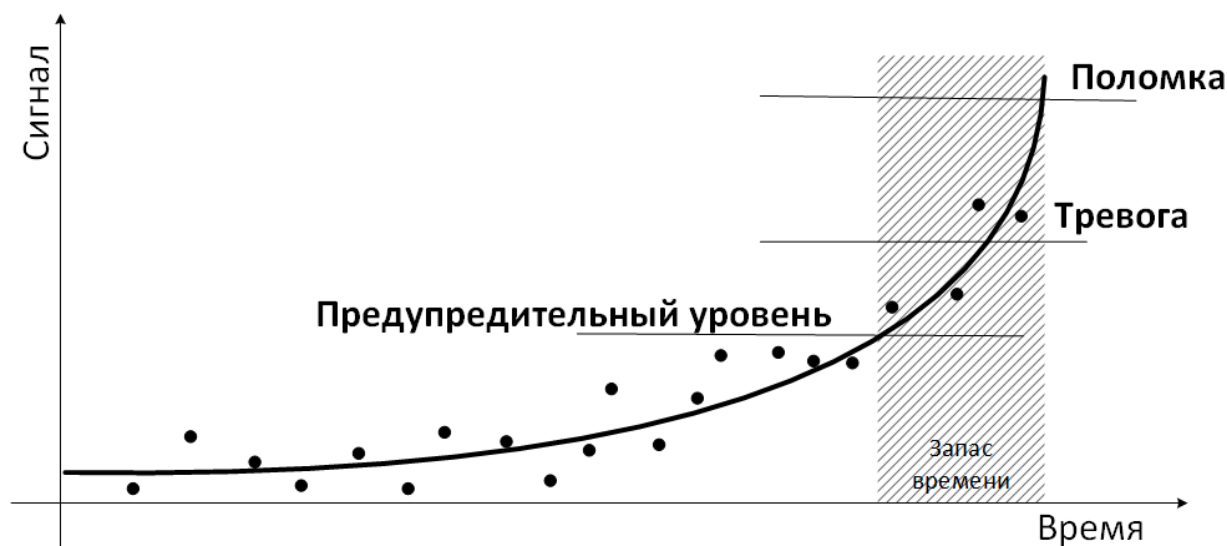


Рис. 3.3. Тренд изменения уровня (амплитуды) вибрации по времени

¹ Тренд (*англ.* trend – тенденция) — основная тенденция изменения чего-либо: например, в математике — временного ряда. Тренды могут быть описаны различными уравнениями — линейными, логарифмическими, степенными и т.д. Фактический тип тренда устанавливают на основе подбора его функциональной модели статистическими методами либо сглаживанием исходного временного ряда.

При отсутствии проблем уровень вибрации на машине будет оставаться стабильным на протяжении длительного времени. Последующие периодические результаты измерений сравниваются с этим базовым уровнем. Периодичность измерений зависит от типа машины и от критичности её состояния. На графике тренда могут быть установлены предупредительный и аварийный уровни. Предупредительный уровень устанавливает границу, в пределах которой повышение уровня сигнала может иметь случайный характер. Устойчивый рост амплитуды выше предупредительного уровня является сигналом к тому, что периодичность измерений необходимо сделать более частой.

3.2.2. Спектральный анализ

3.2.2.1. Общие положения

Существует два способа описания сигнала вибрации – во временной области и частотной области (рис. 3.4).

Спектральный анализ – это метод обработки сигналов, позволяющий выявить частотный состав сигнала. Выявление повышенных амплитуд вибрации на частотах, совпадающих с частотами возможных повреждений элементов, резонансных частотах деталей, на частотах протекания рабочего процесса помогает обнаружить и идентифицировать неисправность на ранних стадиях зарождения и развития.

Измерение на определённой частоте даёт информацию о неисправности раньше, чем измерение общего уровня вибрации. При спектральном анализе используются ряд последовательных фильтров или перемещаемый полосовой фильтр. Анализ проводится в частотных областях:

- с постоянной относительной шириной частотной полосы (ПОШП) – с
- одинаковой шириной по логарифмической шкале частот (ширина полосы в октаву¹, половину или треть октавы);

¹ Октава в акустике и оптике — внесистемная безразмерная единица частотного интервала между двумя частотами (f_1 и f_2), отношение которых $f_2/f_1 = 2$.

— с постоянной абсолютной шириной частотной полосы (ПАШП) (применяются ширины полос: 0,25; 0,75; 1,0; 2,5; 5,0; 7,5; 25,0 и т.д. Гц).

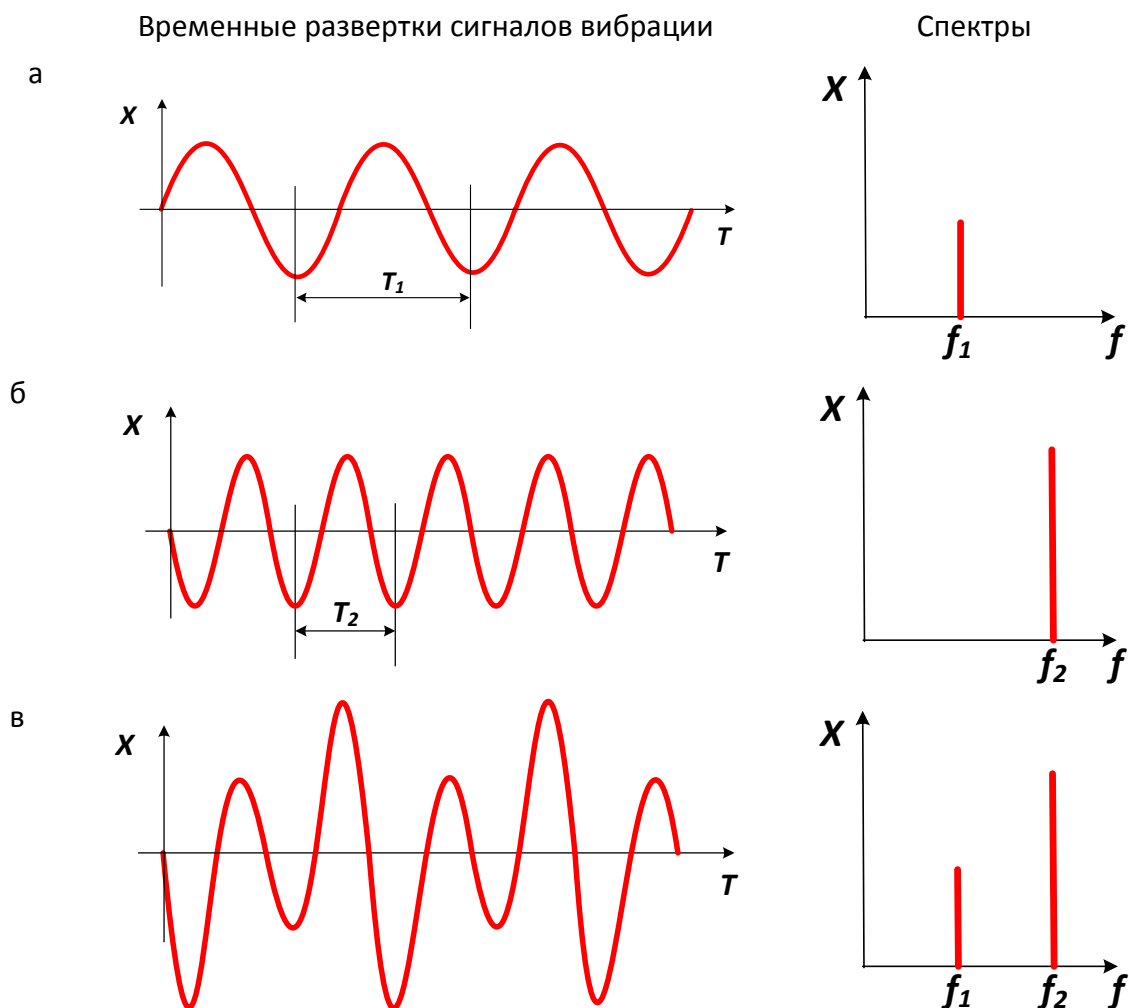


Рис. 3.4. Временные сигналы вибрации и их спектры:

а - гармонические колебания с периодом T_1 ;

б - гармонические колебания с периодом T_2 ;

в - полигармонический сигнал

В основе решения большинства задач спектрального анализа лежит преобразование Фурье.

3.2.2.2. Преобразование Фурье

Преобразование Фурье (символ $\mathcal{F}$) — операция, сопоставляющая одной функции вещественной переменной другую функцию вещественной переменной. Эта новая функция описывает коэффициенты («амплитуды») при разложении исходной функции на элементарные составляющие — гармонические

колебания с разными частотами (подобно тому, как музыкальный аккорд может быть выражен в виде амплитуд нот, которые его составляют).

Преобразование Фурье функции f вещественной переменной является интегральным и задаётся следующей формулой:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx. \quad (3.5)$$

Физический смысл преобразования Фурье: правая часть — (бесконечная) сумма гармонических колебаний $e^{-i\omega t}$ с частотами ω , амплитудами $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} |\hat{f}(\omega)|$ и фазовыми сдвигами¹ $\arg \hat{f}(\omega)$, соответственно.

Разные источники могут давать определения, отличающиеся от приведённого выше выбором коэффициента перед интегралом, а также знака «–» в показателе экспоненты. Но все свойства будут те же, хотя вид некоторых формул может измениться.

В алгоритмах цифровой обработки сигналов используют дискретное преобразование Фурье.

3.2.2.3. Дискретное преобразование Фурье

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ, англ. *Discrete Fourier Transform*, DFT) — преобразование конечных последовательностей (комплексных) чисел, которое, как и в непрерывном случае, превращает свёртку в поточечное умножение. ДПФ требует в качестве входа дискретную функцию, т.е. оцифрованный сигнал.

Различают прямое преобразование

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.6)$$

и обратное

¹ Аргументом комплексного числа называется угол, который этот вектор образует с положительным направлением оси абсцисс, отсчитанный против часовой стрелки.

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn}, k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.7)$$

где N – количество значений сигнала, измеренных за период, а также количество компонент разложения;

$x_n, n = 0, 1, \dots, N-1$ – измеренные значения сигнала (в дискретных временных точках с номерами $n = 0, 1, \dots, N-1$), которые являются входными данными для прямого преобразования и выходными для обратного;

$X_k, k = 0, 1, \dots, N-1$ – N комплексных амплитуд синусоидальных сигналов, составляющих исходный сигнал; являются выходными данными для прямого преобразования и входными для обратного; поскольку амплитуды комплексные, то по ним можно вычислить одновременно и амплитуду, и фазу;

k — индекс частоты. Частота k -го сигнала равна $\frac{k}{T}$,

где T — период времени, в течение которого брались входные данные.

Вычисление N -точечных последовательностей требует N^2 операций [24]. С целью уменьшения такого большого объема вычислений был реализован алгоритм быстрого преобразования Фурье.

3.2.2.4. Быстрое преобразование Фурье

Быстрое преобразование Фурье (БПФ, англ. *Fast Fourier Transform, FFT*) – алгоритм быстрого вычисления ДПФ.

При рассмотрении выражения для ДПФ видно, что N отсчетам комплексного сигнала x_n ставят в соответствие N комплексных спектральных отсчетов X_k . Для вычисления одного спектрального отсчета требуется N операций комплексного умножения и сложения. Таким образом, вычислительная сложность алгоритма ДПФ составляет N^2 операций комплексного умножения и сложения.

Поскольку сложность алгоритма растет квадратично относительно размера входного сигнала, можно достичь существенного ускорения вычисления,

если нам удастся свести расчет N -точечного ДПФ к двум $N/2$ -точечным ДПФ, как это показано на рис. 3.5.

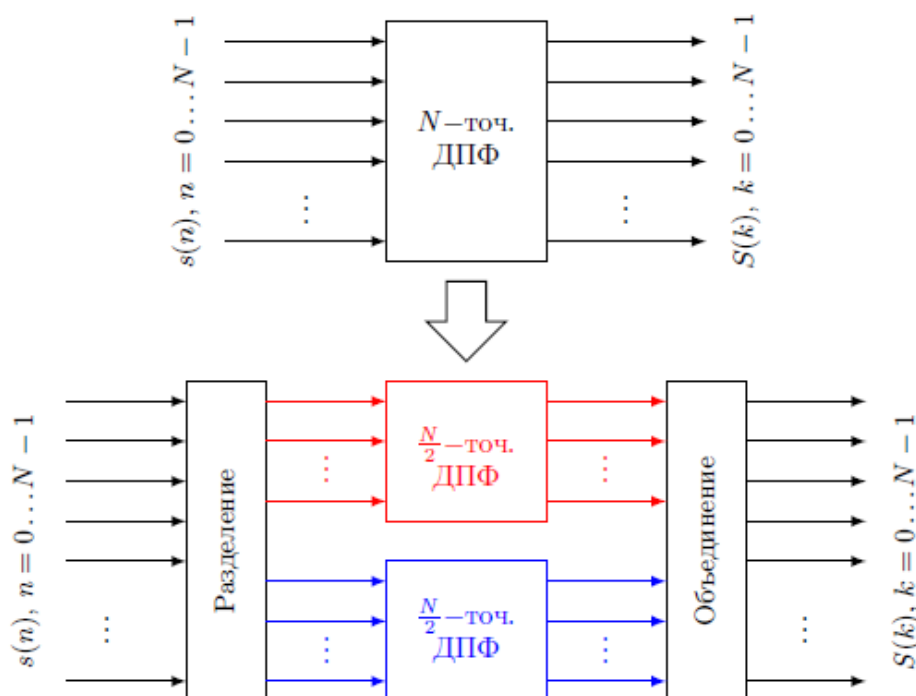


Рис. 3.5. Замена N -точечного ДПФ двумя $N/2$ -точечными ДПФ

Замена одного N -точечного ДПФ двумя $N/2$ -точечными ДПФ приведет к уменьшению количества операций в 2 раза, но дополнительно требуются операции разделения последовательности на две и объединения двух $N/2$ -точечных ДПФ в одно N -точечное.

При этом каждое из $N/2$ -точечных ДПФ также можно вычислить путем замены $N/2$ -точечного ДПФ на два $N/4$ -точечных, которые, в свою очередь, можно рассчитать через $N/8$ -точечные ДПФ. Эту *рекурсию* можно продолжать, пока возможно разбить входную последовательность на две.

В нашем случае, если $N=2^L$, где L – это положительное целое, мы можем разделить последовательность пополам L раз. Для $N=8$ ($L=3$) такое разделение представлено на рис. 3.6.

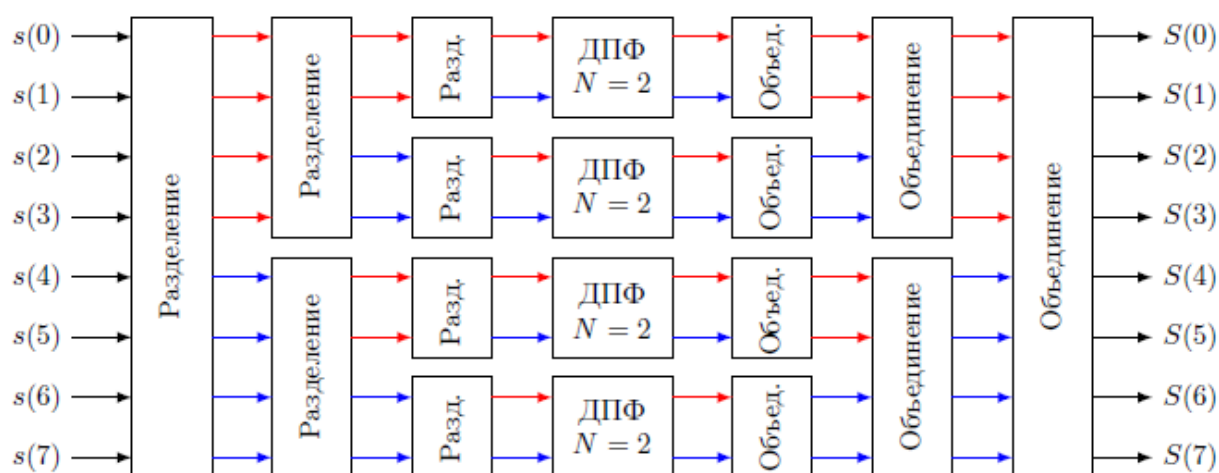


Рис. 3.6. Разделение и объединение последовательности для $N=8$

Таким образом, при вычислении одномерного ДПФ длиной N необходимо выполнить $(N/2) \cdot \log_2 N$ двухточечных ДПФ, каждое из которых требует одно комплексное умножение и два комплексных сложения.

Алгоритмы БПФ, которые используют выборки длиной $N=2^L$, называются «алгоритмами БПФ по основанию 2» [25]. Впервые этот алгоритм был опубликован авторами Кули и Тьюки [26]. Данные алгоритмы получили наибольшее распространение из-за их высокой эффективности и относительной простоты программной реализации.

3.2.2.5. Методы цифрового спектрального анализа

Методы цифрового спектрального анализа принято разделять на классические и современные (альтернативные).

К классическим методам относят:

- **одномерный спектральный анализ;**
- **анализ корреляционных и ковариационных функций;**
- **анализ взаимных спектров;**
- **анализ частотных характеристик;**
- **многомерный спектральный анализ.**

Классические методы спектрального анализа относятся к числу наиболее устойчивых методов спектрального анализа. Они применимы почти ко

всем классам сигналов, обладающих стационарными свойствами. В них используется алгоритм БПФ. Основной недостаток обусловлен искажающим воздействием просачивания по боковым лепесткам из-за неизбежного взвешивания в них конечных последовательностей данных. Обработка конечных записей данных требует принятия определенных компромиссов относительно разрешения, устойчивости (минимизации дисперсии) и подавления просачивания.

Разновидностью спектрального анализа является **кепстральный анализ**, основанный на логарифмировании и преобразовании Фурье от логарифмического спектра мощности. Такой метод позволяет разделить информацию о сигнале, полученную в результате многократных отражений при нелинейных преобразованиях и модуляции. При этом вся энергия виброакустического сигнала, рассеянная по множеству гармоник в спектральном методе, локализуется в одной составляющей при кепстральном методе анализа сигнала.

Кепстральный метод используют для формирования диагностических параметров только в тех случаях, когда колебательный процесс имеет периодически модулированный спектр, что наблюдается при явлениях нелинейного взаимодействия узлов и деталей механизмов, при наличии амплитудной и частотной модуляции, при преобразованиях типа свертки нескольких временных процессов, а также при изменении физических параметров механизма: износе, изменении жесткости, ударных взаимодействиях.

Методы, которые позволяют улучшать или сохранять высокое разрешение без значительного ухудшения устойчивости спектральных оценок называются современными (альтернативными) методами спектрального анализа. Эти методы разделяют на параметрические и непараметрические.

К параметрическому описанию приходят, рассматривая модель временного ряда, соответствующего анализируемому случайному процессу.

В случае **авторегрессионной модели** (англ. *autoregressive model*, **AR**)¹ спектральный анализ проводится по методу максимальной энтропии. В рамках этого метода ищется спектральная оценка, которая была бы наиболее случайна (обладала бы максимальной энтропией) среди всех возможных спектров, не противоречащих данным наблюдений.

Модель скользящего среднего (англ. *moving average*, **MA**)² приводит к спектральным оценкам максимального правдоподобия.

А метод, основанный на использовании **модели авторегрессии-скользящего среднего** (англ. *autoregressive moving-average model*, **ARMA**), не имеет специального названия. Модель ARMA обобщает две более простые модели временных рядов — модель авторегрессии (AR) и модель скользящего среднего (MA).

Если входной процесс является импульсом, то используется **метод Прони** (обобщенный или модифицированный).

К непараметрическим методам спектрального анализа относят спектральный анализ по **методу минимума дисперсии** и методы, основанные на **анализе собственных значений автокорреляционной матрицы или матрицы данных**.

3.3. Средства виброакустического диагностирования

Виброизмерительная аппаратура предназначена для измерения параметров: виброперемещения, виброскорости, виброускорения, частоты и фазы вибрации [19]. К этой аппаратуре относят также устройства для балансировки,

¹ Модель временных рядов, в которой значения временного ряда в данный момент линейно зависят от предыдущих значений этого же ряда

² Модель скользящего среднего предполагает, что в ошибках модели в предшествующие периоды сосредоточена информация обо всей предыстории ряда. В этой модели каждое новое значение - среднее между текущей флуктуацией и несколькими (в частности, одной) предыдущими ошибками.

спектрального анализа вибрации и для измерения энергетических характеристик процесса, связанных со случайными вибрациями и шумом [27].

Средства вибродиагностирования, в зависимости от предназначения, создаются либо переносными, либо стационарными.

К переносным приборам относят:

- виброметр – простой показывающий прибор для определения общего уровня вибрации оборудования (по СКЗ виброскорости);
- виброанализатор (анализатор спектра) – многофункциональный прибор с возможностями определения амплитудно-частотных спектров колебаний, с реализацией различных методов получения информации о состоянии оборудования по виброакустическим сигналам, сбора и анализа диагностических данных, балансировки роторов.

Стационарные системы создаются в виде многоканальных измерительных комплексов, предназначенных для измерения, регистрации и анализа вибрации контролируемого стационарного оборудования.

Многоканальная измерительная аппаратура, широко применяемая в последнее время в системах вибродиагностики, классифицируется по основным принципам измерения:

- последовательного измерения параметра вибрации в отдельных точках объекта;
- параллельного измерения параметра вибрации одновременно во всех контролируемых точках объекта;
- комбинированные приборы с параллельной записью параметра вибрации во всех исследуемых точках и с последовательным измерением этого параметра в каждой точке.

Для измерения и анализа вибрации аналоговыми способами, обработки результатов цифровыми способами и получения на выходе гистограмм распределения уровней вибрации, фазовых диаграмм, частотной и временной

зависимости уровня или фазы вибрации используют многофункциональные автоматизированные системы диагностирования [6, 28].

Автоматизированные системы подразделяют на три основные группы.

В первой группе систем ЭВМ используют для оперативной обработки сигналов.

Во второй группе ЭВМ обрабатывает сигналы и выдает сигнал корреляции при изменении режима испытаний.

К третьей группе относят полностью автоматизированные системы, в которых ЭВМ включена в цепь обработки, анализа и управления всем режимом работы по программе исследований. Простейшие автоматизированные системы диагностирования оперативно измеряют и анализируют характерные вибрации и сличают их с эталонными.

Наблюдающаяся в настоящее время тенденция к усложнению современной техники предъявляет все более высокие требования к системам диагностирования. Очевидно, что получение объективной информации о техническом состоянии объекта, сравнение текущих диагностических параметров с начальными и прогнозирование технического состояния возможно только с помощью автоматизированной системы диагностирования, обеспечивающей выполнение следующих процедур [29]:

- автоматизированный многоканальный сбор информации;
- экспресс-обработка информации при помощи ЭВМ;
- формирование диагностических параметров нормального и дефектного состояний;
- хранение текущей и эталонной информации;
- сравнение текущей информации с начальной и эталонами неисправных состояний;
- документирование информации о текущем техническом состоянии и прогнозе на будущее в удобной для оператора форме.

Для измерения параметров вибрации используют различные преобразователи механических колебаний в электрический сигнал – вибродатчики.

3.3.1. Вибродатчики

Для измерения параметров вибрации используется 3 типа датчиков:

- проксиметры – для измерения виброперемещений;
- велосиметры – для измерения виброскорости;
- акселерометры – для измерения виброускорения.

3.3.1.1. Проксиметры

Проксиметры – вихретоковые датчики (рис. 3.7).

Датчики для измерения относительных колебаний вала в работающем агрегате должны соответствовать некоторым специальным требованиям: бесконтактное измерение значения вибрации; отсутствие чувствительности к среде между датчиком и измеряемой поверхностью; большой линейный диапазон измерений с высоким разрешением; простота установки, регулировки и калибровки.

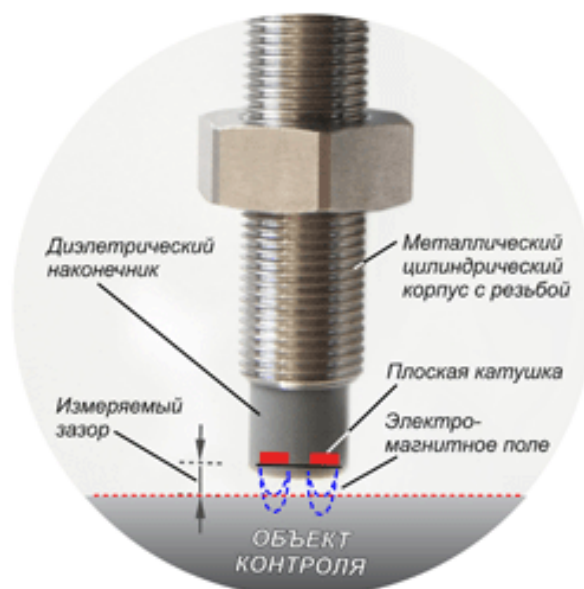


Рис. 3.7. Конструкция вихретоковых датчиков

Измерительное преобразование основано на явлении вихревых токов (токи Фуко). Эффект обнаружен французским физиком Жаном Фуко в 1855 г. и назван его именем. Вихревые токи – замкнутые индукционные токи в массивных проводниках, которые возникают под действием вихревого электрического поля, порождаемого переменным магнитным полем катушки преобразователя. Эти вихревые токи поглощают часть мощности катушки на создание магнитного поля во вращающемся роторе. Эта инверсия мощности более

сильная, если проводящий материал более плотен, или если большее количество магнитных линий замыкается в материале ротора (при уменьшении зазора между поверхностью вращающегося ротора и измерительной катушкой). Эффект проявляется себя снижением амплитуды напряжения в преобразователе токов (осцилляторе). После выпрямления и обработки результат преобразуется в нормализованный измерительный сигнал, пропорциональный расстоянию между катушкой и проводящим материалом (например, 8 мВ/мкм).

Характеристики: механические и электрические характеристики цепей для измерения вихревых токов всесторонне описаны в стандарте API 670 "Вибрация, осевое положение и несущие системы контроля температуры". Поэтому данный стандарт используется во всем мире для оценки измерительных цепей этого типа. Другие требования содержатся в стандарте DIN ISO 10817-1-1999 "Системы измерения вибрации вращающихся валов. Часть 1. Относительные и абсолютные измерения радиальной вибрации".

Достоинства проксиметров:

- возможность непосредственного измерения колебаний и положения ротора относительно подшипников;
- возможность измерения малых уровней колебаний вала;
- может использоваться с любым проводящим электричеством материалом;
- не подвержен влиянию каких-либо диэлектрических сред, таких как масло, вода и т.д.;
- замена датчика возможна без перекалибровки измерительной системы;
- минимальное влияние остаточной намагниченности.

Недостаток метода заключается в том, что на результат измерения может влиять неоднородность структуры материала вала ротора.

3.3.1.2. Велосиметры

Велосиметр (лат. *velox (velocis)* быстрый, скорый) – датчик виброскорости, преобразует параметры колебательного процесса в электрический сигнал на основе электродинамических явлений. Возникновение электродвижущей силы (ЭДС индукции) в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через площадь, ограниченную этим контуром, называется законом электромагнитной индукции. Электрический ток, вызванный этой ЭДС, называется индукционным током. Это явление открыто в 1831 г. английским ученым Майклом Фарадеем.

В катушке, которая помещена в постоянное магнитное поле, возникает напряжение, пропорциональное скорости перемещения магнитного сердечника (рис. 3.8).

Катушка, установленная без трения на двух упругих мембранных пружинах в корпусе датчика, образует колебательную систему – пружина-масса. Когда датчик закреплен или присоединен к вибрирующему объекту, катушка остается неподвижной (при любой ча-

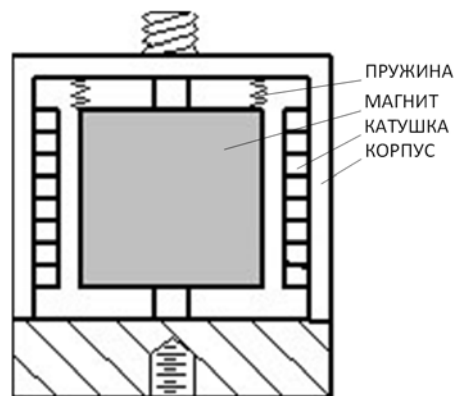


Рис. 3.8. Конструкция велосиметра

стоте выше собственной частоты колебательной системы) в пространстве, в то время как постоянный магнит вибрирует вместе с объектом. Катушка пересекает линии магнитного потока постоянного магнита, создавая электродвижущую силу в обмотках. При этом не требуется какое-либо питание для преобразования измеряемой величины в электрический сигнал. Поэтому датчик виброскорости называется также активным измерительным преобразователем.

Собственная частота датчика – обычно 8 или 15 Гц – зависит от его конструкции. В измерительном устройстве предусматривают электронную схему линеаризации амплитудно-частотной характеристики, позволяющую определить с высокой точностью абсолютную вибрацию на частотах, намного ниже

собственной частоты датчика. В настоящее время электронные схемы линейзации являются стандартной принадлежностью современных анализаторов, выпускаемых ведущими фирмами (Bruel&Kjaer, Schenck, CSI, DLI и др.).

Кроме того, все диагностические приборы обладают электронным интегратором, позволяющим преобразовывать виброскорость, пропорциональную напряжению, вырабатываемому в обмотках катушки, в сигнал, пропорциональный виброперемещению.

Если частота и точность измерений критические, рекомендуется зафиксировать датчик в точке измерения с помощью резьбового соединения. Этот метод монтажа позволяет использовать весь рабочий частотный диапазон датчика (1...1000 Гц) без привнесения каких-либо ошибок в результат измерений. В частотном диапазоне до 500 Гц использование датчика с магнитным держателем или со щупом дает хорошие и достаточно точные результаты.

Соединительный кабель между диагностическим прибором и датчиком виброскорости может быть длиной до 300 м, при этом величина вырабатываемого сигнала не требует какого-либо промежуточного усилителя.

Преимущества велосиметра: прочная конструкция; высокая чувствительность даже при низких частотах; высокий уровень выходного сигнала и низкое внутреннее сопротивление; активный датчик, не требующий какого-либо внешнего источника питания; маслостойкий, водонепроницаемый, химически стойкий, герметичный корпус (обычно из нержавеющей стали).

Недостатки велосиметра: верхнее ограничение частоты 1000 Гц; чувствительны к сильным магнитным полям.

3.3.1.3. Акселерометры

В основе большинства современных методов измерения виброускорения лежит эффект, обнаруженный в 1880 г. братьями П. и Ж. Кюри, наблюдавшими возникновение на поверхности пластинок, вырезанных при определённом

ной ориентировке из кристалла кварца, электростатических зарядов под действием механических напряжений. Эти заряды пропорциональны механическому напряжению, меняют знак вместе с ним и исчезают при его снятии. Образование электростатических зарядов на поверхности диэлектрика и возникновение электрической поляризации внутри него в результате воздействия механического напряжения называют прямым пьезоэлектрическим эффектом. Для усиления сигнала пластины из пьезоматериалов можно собирать в пакеты.

Акселерометр (лат. *accelerare*, ускорять) – пьезоэлектрический датчик, измерительный преобразователь механического усилия в электрический сигнал. В качестве чувствительного элемента в настоящее время используется искусственно поляризованная ферроэлектрическая керамика. Конструкция датчика показана на рис. 3.9.

Внешний вид современных акселерометров на рис. 3.10.

Датчик состоит из корпусных деталей, пьезоэлемента, прикрепленного с одной стороны к основанию датчика, с другой – к инерционной массе. Измерительный сигнал формируется под действием давления на пластины из пьезоматериала со стороны инерционной массы. На внешней и внутренней сторонах пластин пьезоэлектрика возникают электрические заряды, причём суммарная ЭДС между выводом и корпусом изменяется пропорционально ускорению

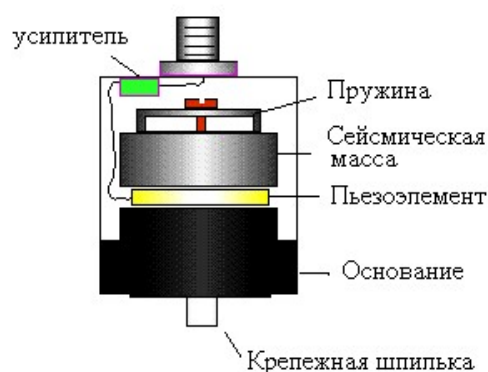


Рис. 3.9. Схема пьезоэлектрического акселерометра



Рис. 3.10. Различные конструкции современных акселерометров фирмы Брюль и Кьер: датчики 8315, 8324 и 8325 (слева направо)

объекта, на котором установлен датчик. Датчик относится к преобразователям генераторного типа,

однако формируемый сигнал, как правило, необходимо усиливать. Для этого в корпусе датчика устанавливается усилитель сигнала.

Пьезодатчики являются активными датчиками, генерирующими пропорциональный ускорению механических колебаний электрический сигнал, поэтому при их эксплуатации не требуется источник питания. Отсутствие движущихся элементов конструкции исключает возможность износа и гарантирует исключительную долговечность пьезодатчиков.

Достоинства пьезоакселерометров: активный датчик; прочная конструкция; нечувствительны к внешним электромагнитным полям; остронаправлены (чувствительные элементы слабовосприимчивы к поперечным деформациям); имеют малые размеры; смонтированы в герметично закрытом корпусе из нержавеющей стали.

Недостатком пьезоакселерометров является низкий уровень сигнала, требующий усиления и, следовательно, внешнего источника питания.

3.3.1.4. Способы крепления датчиков измерения вибрации

Качественное и надежное крепление вибродатчика на поверхности исследуемого объекта является одним из самых важных условий получения точных и надежных результатов при измерениях вибрации и распознавании состояния оборудования. Ненадежное крепление датчика приводит к уменьшению линейной области амплитудно-частотной характеристики датчика и, следовательно, значительному уменьшению диапазона измерений акселерометра.

При проведении измерений измерительный кабель не должен подвергаться интенсивным колебаниям и должен быть удален (по мере возможности) от источников сильных электромагнитных полей.

Основные способы крепления датчика:

- а) крепление датчика на шпильке (рис. 3.11а);
- б) крепление датчика на магните (рис. 3.11б);
- в) крепление датчика на ручном щупе (рис. 3.11в).

Наилучшим считается крепление датчика на гладкой плоской поверхности с помощью прочной стальной шпильки. На рабочую поверхность датчика рекомендуется наносить слой консистентной (силиконовой) смазки, что увеличивает общую жесткость механического соединения датчика и объекта измерений и создает хороший акустический контакт.

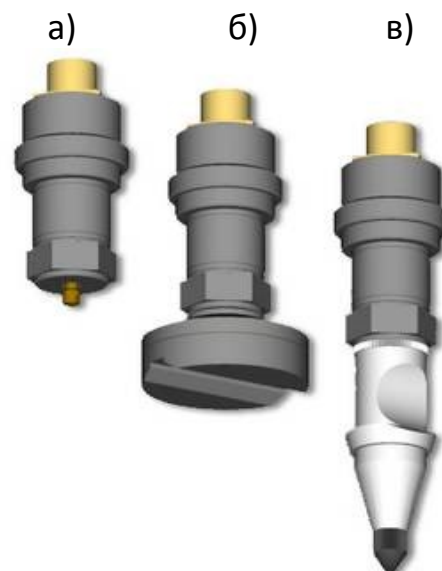


Рис. 3.11. Способы крепления датчиков измерения вибрации

Широкое распространение в силу простоты и дешевизны нашло крепление датчиков на гладкой поверхности объекта с помощью постоянного магнита. При этом статическая сила сцепления магнита с измерительной поверхностью во многом влияет на диапазон измерений. Требования к обработке поверхности те же, что и для шпилечного соединения. Резонансная частота в этом случае уменьшается примерно до 4,5 кГц и зависит от типа магнита.

Наиболее простым и быстрым является измерение вибрации с помощью щупа, соединяющего вибродатчик с измерительной точкой. Однако рабочий частотный диапазон при этом в большинстве случаев сужается до 200...400 Гц. Угол между измерительной осью вибродатчика и направлением измерения на должен превышать 25° . Следует также учитывать, что при применении различных типов щупов рабочий частотный диапазон может существенно изменяться.

Обозначение точек измерения устанавливается регламентом предприятия для разных типов оборудования по единой схеме. Обычно, в буквенно-цифровую комбинацию, составляющую код измерительной точки, могут вносить:

- индекс принадлежности к узлу агрегата (например, Г - генератор, Д - двигатель, К - компрессор и т. д.);

- номер и тип подшипника (например, передний подшипник упорного типа - ПУ или 1У);
- направление измерения (например, V или Вер - вертикальное, Н или Гор - горизонтальное и А или Ос – осевое).

Обычно карты регистрации уровней вибрации и программы обработки информации содержат наименования узлов агрегата, принятые регламентом предприятия.

3.3.2. Виброметр

Виброметр – это прибор для измерения параметров вибрации: виброускорения, виброскорости, виброперемещения и частоты колебаний.

Выделяют две группы виброметров [30]:

- для измерения вибрации вращающегося оборудования;
- для измерения вибрации, воздействующей на человека для целей охраны труда.

Виброметры для измерения вибрации вращающегося оборудования

Виброметр измеряет и оценивает вибрацию агрегатов с вращающимися частями. Это – двигатели, насосы, вентиляторы, генераторы. Вибрация таких агрегатов повторяется с каждым оборотом вала.

Для того, чтобы получать одинаковые значения с разных приборов, в расчётах используется частотный диапазон от 10 до 1000 Гц.

Виброметры измеряют интегральное значение вибрации (одно число). Самое популярное значение – СКЗ виброскорости, так как существуют стандарты для определения состояния агрегата по СКЗ виброскорости. Это число пропорционально мощности сил, вызывающих вибрацию агрегата.

Максимальное значение вибрации, при котором состояние агрегата не считается аварийным называется *норма*.

В России эти нормы определены ГОСТ ИСО 10816-1-97 [31], в зарубежных странах - ISO 10816-1:1995 [32].

Норма на вибрацию – предельное значение СКЗ виброскорости для любой проекции, выше которой вибрации считаются аварийными. Общеизвестным считается ряд, из которого выбираются значения норм: 0,45; 0,71; 1,12; 1,8; 2,8; 4,5; 7,1; 11,2; 18; 28 и 45 (мм/с) (таблица 3.2).

Таблица 3.2. Нормы вибрации

V, мм/с	Группа 1 Средние машины 15-20 кВт или до 300 кВт на специальных фундаментах	Группа 2 Большие машины с жесткими и тяжелыми фундаментами, у которых частоты собственных колебаний превышают частоту вращения >300 кВт	Группа 3 Большие машины, работающие при частотах вращения, превышающих собственные частоты фундамента
45	Недопустимое состояние	Недопустимое состояние	Недопустимое состояние
28			
18			
11,2			
7,1			
4,5	Удовлетворительное состояние	Удовлетворительное состояние	Удовлетворительное состояние
2,8			
1,8	Хорошее состояние	Хорошее состояние	Хорошее состояние
1,12			
0,71			
0,45			

Значение задаётся в паспорте на агрегат или в [31]. Сравнение текущей вибрации с нормой позволяет оценить состояние агрегата.

Измерение вибрации виброметром (рис. 3.12) очень быстрое и не требует подготовительных работ. Можно измерить 100 агрегатов за смену с выдачей отчётов о состоянии оборудования на предприятии.

Значения вибрации, измеренные через некоторое время (например, через 1 месяц) позволяют строить прогноз развития вибрации и планировать сроки следующих ремонтов. Это даёт значительную экономию денег, по сравнению с плановыми ремонтами.



Рис.3.12. Измерение вибрации виброметром

Значение вибрации, измеренное виброметром можно использовать и

для диагностики дефектов агрегата. Например, по СКЗ виброскорости отлично диагностируется расцентровка и небаланс. Состояние крепления к фундаменту тоже проще оценить виброметром. Виброметром даже можно балансировать агрегат не используя отметчик фазы (метод трех пусков с пробными массами).

Самые маленькие виброметры имеют размер авторучки и управление одной кнопкой. Такие приборы называют виброручки (рис. 3.13).

Современные виброметры дополнительно имеют режимы измерения спектров и сигналов, память для сохранения замеров и передачи их в компьютер, режим измерения по маршруту, датчики температуры, оборотов и ударных импульсов от подшипников качения.



Рис. 3.13 Виброручка ViPen

Виброметры имеют внутренний датчик вибрации, встроенный в корпус прибора (рис. 3.14) или внешний датчик, подключённый к прибору проводом (рис.3.15).



Рис.3.14. Внутренний датчик



Рис. 3.15. Внешний датчик

Внутренний датчик – это компактность прибора, а внешний датчик позволяет измерить вибрацию в труднодоступных местах.

Виброметры для измерения вибрации, действующей на человека

Измерение такой вибрации используется в сфере охраны труда. Приборы отличаются от приборов для измерения вибрации вращающегося оборудования. Они называются виброметры-шумомеры.

Прибор измеряет мощность вибрации за какой-то период времени, например, за рабочую смену, показывает мощность вибрации в полосах частот. Вибрация разных частот оказывает разное влияние на человека, поэтому используются нормирующие коэффициенты для частных полос. В дополнение шумомеры умеют измерять акустический шум на рабочем месте.

Предельные значения вибрации нормируются СанПиНами.

Например, СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [33]. Настоящие Санитарные нормы устанавливают классификацию, нормируемые параметры, предельно допустимые значения производственных вибраций, допустимые значения вибраций в жилых и общественных зданиях.

3.3.3. Виброанализатор (анализатор спектра)

Анализаторы спектра с помощью разнообразных программных приложений и аппаратных конфигураций нашли применение в широком спектре вибрационных и акустических измерений.

На базе одного анализатора спектра можно создать различные комплексы для проведения испытаний, систем контроля и мониторинга технологических процессов.

Основные функции виброанализаторов.

3.3.3.1. Узкополосный спектральный анализ

Данный вид анализа часто используется при виброакустическом анализе различных механизмов с электрическим приводом, поскольку он обеспечивает оптимальное частотное разрешение, позволяющее выделять тона, наличие гармоник, а также структурные резонансы.

Узкополосный спектральный анализ предназначен для узкополосной спектральной обработки сигналов, поступающих с входных каналов модулей АЦП и анализаторов спектра (в реальном масштабе времени или в режиме воспроизведения записанных временных реализаций), а также просмотра различных спектральных характеристик сигналов.

Спектральный анализ используется для разделения сигналов на простейшие составляющие в частотной области. В основе данного типа анализа лежит принцип разложения временной реализации сигнала в частотный спектр с равномерным шагом по частоте с помощью преобразования Фурье.

При помощи узкополосного спектрального анализа пользователь по форме спектра может определить наличие в измерительном канале тональных сигналов (дискретных составляющих) и шумовых компонент. Дополнительные возможности построения спектрограмм (в 2-мерном или 3-мерном виде) позволяют проследить динамику нестационарных процессов. Спектрограмма представляет собой изображение зависимости спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала от времени. Построение сечений спектрограммы производится по времени и по частоте позволяет измерить параметры нестационарных процессов.

Возможность получения максимальных и усредненных спектров и сравнение их с заданным спектром (нормой) позволяет легко определить различие между заданным и реальным уровнем спектров. Это необходимо при проведении различного вида мониторинга оборудования, входного/выходного контроля.

Одновременный спектральный анализ в различных частотных диапазонах одного и того же сигнала дает возможность наблюдать спектр как во всем частотном диапазоне (панорамный режим), так и детальный анализ спектра в выбранных частотных диапазонах. Это необходимо при наличии в сигнале высокочастотных и низкочастотных дискретных составляющих.

Высокое частотное разрешение позволяет с высокой точностью определить частоту стационарного тонального сигнала; разделить несколько близлежащих частотных компонент. Эта ситуация часто наблюдается при виброакустическом анализе различных механизмов с электрическим приводом. В

окрестности центральной частоты в 50 Гц, как правило, наблюдается несколько дискретных составляющих, связанных с электромагнитной наводкой, механическими колебаниями, например, связанными с вращением асинхронного электродвигателя. Как правило, все эти источники находятся в полосе не более 0,5 Гц.

При виброакустическом анализе обычно используется пьезоэлектрические акселерометры. Эти датчики отдадут сигнал, пропорциональный ускорению в точке крепления. Нормы на уровни вибрации и их спектральный состав часто задаются по виброскорости. Для того чтобы получить сигнал виброскорости, необходимо проинтегрировать по времени сигнал виброускорения. Для балансировки важно получать виброперемещение в точке крепления датчика. Двойной интеграл по времени сигнала виброускорения позволяет получить сигнал виброперемещения.

Для измерения уровня дискретных составляющих обычно используют измерение уровня среднеквадратического значения (СКЗ) в полосе фильтра. В этом случае уровень дискретной составляющей практически не меняется от полосы анализа. Для измерения уровня шумовых компонент необходимо измерять спектральную плотность мощности (СПМ), которая задается в $Вт/Гц$. Это необходимо, так как спектральная плотность мощности шума не зависит от полосы анализа.

3.3.3.2. Долеоктавный спектральный анализ

Стандартизированные анализы с использованием цифрового фильтра на основе октавных, 1/3-, 1/12- и 1/24-октавных полос частот для мониторинга машинной вибрации, анализа шума и определения уровня силы звука.

Долеоктавный спектральный анализ предназначен для долеоктавной спектральной обработки сигналов, поступающих с входных каналов анализа-

торов спектра (в реальном масштабе времени или в режиме просмотра записанных временных реализаций), а также просмотра различных спектральных характеристик сигналов.

Долеоктавный анализ используется для разделения сигналов на простейшие составляющие в частотной области в октавных, 1/3-, 1/12-, 1/24-октавных спектральных полосах по ГОСТ 17168-82 и по ГОСТ Р 8.714-2010. Применяется для спектрального анализа шумов при акустических и вибрационных измерениях.

3.3.3.3. Балансировка роторов и диагностика зубчатых передач

Во вращающихся и поршневых механизмах, различные уровни нагрузки и несовершенства вызывают вынужденные вибрации и связанные с этим звуки.

Порядковый анализ (синхронное накопление) – один из удобных и эффективных способов диагностики и балансировки вращающихся механизмов и зубчатых передач. При наличии датчика оборотов и вибродатчиков можно исследовать временные характеристики сигналов вибрации зубчатых передач. Практика показывает, что сигнал вибродатчика зашумлен сигналами от других источников. Для того чтобы отстроиться от помех реализуется метод синхронного накопления сигналов. На каждом обороте вала датчик оборотов дает метку оборота. Этот сигнал является запускающим стробом для развертки сигнала вибродатчика. Получаемые развертки сигналов суммируются. При этом все источники сигналов, связанных с частотой вращения, накапливаются и увеличиваются в сумматоре линейно пропорционально количеству оборотов N . Все остальные сигналы, некоррелированные с частотой вращения, накапливаются пропорционально $N^{1/2}$, и при большом количестве усреднений полезный сигнал превышает уровень помехи.

3.3.3.4. Модальный анализ и поиск резонансов

Модальный анализ и поиск резонансов используется для обработки

и визуализации вибросигнала и спектра вибросигнала, автоматического определения резонанса, фаз, отношения пиковых амплитуд двух сигналов и декремента затухания различных механизмов, деталей, конструкций и прочих объектов методом измерения частот свободных колебаний, в режиме ударного возбуждения.

Модальный анализ предназначен для анализа импульсных и переходных характеристик сигналов, поступающих с входных каналов анализаторов спектра и сейсмостанций в реальном масштабе времени или в режиме воспроизведения записанных временных реализаций. Позволяет определять собственные частоты и логарифмические декременты свободных колебаний механизмов и конструкций методом ударного возбуждения. Модальный анализ может применяться при обследовании состояния конструкций зданий по ГОСТ 53778-2010 для получения ударных спектров и расчета значения основного тона собственных колебаний и логарифмического декремента основного тона собственных колебаний.

Области применения модального анализа.

Снижение вибрации, связанной с резонансом конструкции и обнаружение повреждения изделия.

Испытания на воздействие одиночного удара применяется как способ определения качества конструкции образца и оценки его структурной прочности. Испытание проводят путем воздействия на образец одиночных ударов на ударном вибростенде со стандартными формами импульсов определенной длительности и пиковым ускорением. Важными параметрами проведения этого вида испытания являются: степень жесткости удара и изменение скорости. Ударные спектры ускорения дают во многих практических случаях полную информацию о потенциальном повреждении, возникшем в ходе эксплуатации.

Контроль изготовления и сборки ответственного оборудования, и прогнозирование регламентных работ по техобслуживанию.

В результате эксплуатации в изделии могут происходить усталостные деформации, микротрещины в соединительных швах, которые не приводят к изменениям геометрических размеров изделия, но приводят к изменению динамических характеристик конструкции. Анализ этих изменений позволяет прогнозировать проведения регламентных работ по техническому обслуживанию.

Поверка датчиков.

Поверка датчиков на ударном вибростенде производится методом сличения чувствительности поверяемого и образцового вибродатчиков. Поверка производится одиночными ударами с различными длительностями и пиковыми ускорениями. Программа рассчитывает длительности амплитуд, импульсов, отношения амплитуд, крутизну фронтов, импульс ударного ускорения. Эти параметры являются первичными данными при проведении поверки.

3.3.3.5. Взаимный корреляционный анализ

Используется для обнаружения и определения координат источников повышенного шума излучения в сложных механических системах, или при определении времени реверберации¹, при архитектурном проектировании больших камерных залов, которые должны иметь определенное время реверберации для достижения оптимальной эффективности.

Предназначен для проведения взаимного корреляционного анализа сигналов, поступающих с входных каналов анализаторов спектра в реальном масштабе времени или в режиме просмотра записанных временных реализаций и для просмотра различных корреляционных характеристик сигналов. Корреляционный анализ – это совокупность основанных на математической

¹ Процесс постепенного уменьшения интенсивности звука при его многократных отражениях.

теории корреляции методов обнаружения корреляционной зависимости между двумя случайными признаками или факторами. Для решения ряда диагностических задач часто используется взаимный корреляционный анализ сигналов в двух или более разнесенных в пространстве точках контроля.

Взаимный корреляционный анализ сигналов чаще всего используется для выделения слабого сигнала на фоне сильных статических несвязанных помех, а также для определения пространственных координат их источника по величине временного сдвига. Он позволяет обнаружить не только узкополосные, но и коррелированные случайные широкополосные сигналы, поэтому более эффективно используется, например, для поиска утечек в трубопроводах по шумам, возникающим в зоне утечки и распространяющимся по потоку жидкости (газа).

Следует, однако, отметить, что в задачах обнаружения утечек чаще используются не корреляционные, а спектральные методы анализа, так как взаимный спектральный анализ стационарных процессов дает больше информации. Но взаимный корреляционный анализ оказывается более эффективным при пространственном обнаружении нестационарных, в том числе импульсных, процессов и может использоваться, например, для обнаружения и определения координат источников акустической эмиссии в однородных нагруженных металлических конструкциях.

3.3.3.6. Вейвлет-преобразование

Вейвлет-преобразование широко используется для анализа сигналов. В дискретном вейвлет-преобразовании наиболее значимая информация в сигнале содержится при высоких амплитудах, а менее полезная — при низких. Сжатие данных может быть получено за счет отбрасывания низких амплитуд. Вейвлет-преобразование позволяет получить высокое соотношение сжатия в сочетании с хорошим качеством восстановленного сигнала. Однако, при малых сжатиях вейвлет-преобразование уступает по качеству в сравнении с

оконным Фурье-преобразованием.

Выбор конкретного вида и типа вейвлетов во многом зависит от анализируемых сигналов и задач анализа. Для получения оптимальных алгоритмов преобразования разработаны определенные критерии, но их еще нельзя считать окончательными, так как они являются внутренними по отношению к самим алгоритмам преобразования и, как правило, не учитывают внешних критериев, связанных с сигналами и целями их преобразований. Отсюда следует, что при практическом использовании вейвлетов необходимо уделять достаточное внимание проверке их работоспособности и эффективности для поставленных целей по сравнению с известными методами обработки и анализа.

3.3.3.7. Измерение уровня шума и вибрации (функция виброметра)

Измерения уровня шума проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 17187-2010 (IEC 61672-1:2002).

Измерение и оценка вибрации производятся в соответствии с санитарными нормами СН 2.2.4-2.1.8.566-96.

3.3.3.8. Взаимный узкополосный спектральный анализ (диаграмма Найквиста)

Поиск частотного отклика (собственных частот) в сложных механических системах.

На графике в одной плоскости объединяются амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики.

Основные функции анализа

- измерение и отображение уровней сигнала в узких спектральных полосах. Количество полос может быть равным степени 2 (128, 256, 512, 1024, 2048), или произвольным (например, 100, 200, 500, ..., 2000) с использованием Z-преобразования;

- измерение и отображение долеоктавных характеристик сигнала с различными типами усреднения (линейное, экспоненциальное), обработки (интегрирование, дифференцирование сигнала) и представления (средне-квадратическое (СКЗ) или пиковое значения);
- измерение и отображение действительной и мнимой частей, разности фаз и коэффициента когерентности сигналов;
- измерение и отображение модуля взаимного спектра;
- измерение комплексного частотного отклика и когерентной мощности спектральной составляющей.

3.3.3.9. Передаточные характеристики и АЧХ

Определение амплитудно-частотных характеристик постоянного, переменного или селективного значения сигнала в логарифмическом или линейном масштабе.

3.3.3.10. Запись сигналов

Обработка сигналов, поступающих с входных каналов анализаторов спектра, может производиться как в *реальном масштабе времени*, так и в *режиме воспроизведения* записанных сигналов. Запись сигналов может производиться по нескольким каналам одновременно.

4. Диагностирование дизелей

4.1. Отказы и дефекты дизелей

4.1.1. Виды дефектов и повреждений дизелей

Классификации, исчерпывающей все разновидности дефектов деталей и узлов дизеля, до сих пор еще не создано. Прежде всего, задача осложняется тем, что дефекты трудно разграничить на неизбежные и такие, которых можно избежать.

Существующая классификация дефектов согласно ГОСТ 15467-79 [34] разделяет дефекты на конструктивные и производственные.

К **конструктивным дефектам** относятся такие, как: неточность теплового расчета дизеля; неточность динамического расчета дизеля; неверная оценка жесткости наиболее нагруженных узлов дизеля; завышение толщины стенок деталей, работающих при высоких температурах; резкое изменение сечений деталей, работающих в условиях переменных напряжений; качество материалов для изготовления дизеля, не соответствующее условиям работы; неудачная конструкция поршневых колец; резкое изменение толщины стенок деталей; неудачная конструкция системы охлаждения; неправильный подбор угла распыливания топлива форсунками и др.

Производственные дефекты можно разделить на дефекты отливок и поковок и дефекты постройки дизелей. К ним относятся, например: нарушение технологии изготовления отливок и поковок; несоблюдение допусков; несоблюдение посадок; несоблюдение точности и чистоты обработки; нарушение режимов термообработки; неправильная разметка отверстий в деталях; отступление от заданных зазоров; перекосы в деталях и узлах, возникающие при обработке и сборке; дефекты сварных швов; грязь в узлах от небрежной сборки; нарушение технологии заливки подшипников и нанесения электролитических покрытий; отступления материалов от марок, указанных в чертежах или технических условиях.

В процессе эксплуатации дизеля в его деталях естественным образом накапливаются повреждения, вызванные так называемыми **эксплуатационными дефектами**.

Повреждения, вызванные эксплуатационными дефектами, можно разделить на две группы:

трещины различного происхождения (усталостные, коррозионно-усталостные, фреттинг-усталостные, термической усталости, термические) ~30 %;

изнашивание и коррозионные поражения (механическое, коррозионно-механическое, адгезионное, усталостное, кавитационное, окислительное, изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии) ~70 %.

Каждый из этих процессов достигает определенной предельно-допустимой величины, после которой наступает момент, когда дизель невозможно эксплуатировать по техническим причинам или нецелесообразно по экономическим соображениям или по соображениям безопасности.

4.1.2. Распределение отказов и повреждений по элементам

Как известно, наличие дефекта или повреждения еще не означает того, что произойдет отказ, но любой отказ происходит только при наличии дефектов или возникновении повреждений.

Классификация отказов по характеру, видам и причинам достаточно хорошо представлена в технической литературе, в частности в ГОСТ 27.002-89 [35].

В практике эксплуатации дизелей причины отказов традиционно разделяют на конструктивные, производственно-технологические, ремонтные и эксплуатационные. Такая классификация позволяет конкретизировать разрабатываемые методы или мероприятия по предупреждению исследуемых отказов и устранению их причин.

Систематический контроль и диагностирование состояния элементов дизелей, определение характера и величины износа деталей, обнаружение

незначительных повреждений поверхностей позволяют принять своевременные меры и устранить повреждения, когда это еще возможно. Контроль и диагностирование способствуют сохранению элементов дизелей для дальнейшей работы, увеличению срока их службы и сохранению механизма в целом.

Необходимо отметить, что определение отказавшего элемента весьма важно как с точки зрения решения организационно-технических вопросов, так и с экономической стороны. Одной из важных сторон этого процесса является организация сбора информации. Эта задача решается ведением рекламационной и претензионно-исковой работы, представлением отчетов по техническому состоянию, а также путем дефектации и изучения отказов при нахождении дизелей в ремонте.

Основываясь на проведенных исследованиях и анализируя представленный материал, распределить отказы и повреждения по элементам конструкции различных дизелей с учетом приоритета проведения технического диагностирования можно следующим образом:

- | | |
|--|--------|
| – детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) | ~50 %; |
| – детали топливной аппаратуры | ~20 %; |
| – детали кривошипно-шатунного механизма (КШМ) | ~10 %; |
| – детали газораспределительного механизма (ГРМ) и механизма управления | ~10 %; |
| – корпусные детали и системы двигателя | ~5 %; |
| – иные | ~5 %. |

4.2. Методы безразборного функционального диагностирования дизелей

Дизель представляет собой комплексный агрегат, который можно схематично представить в виде системы, состоящей из определенного числа бло-

ков, набранных из конечного количества элементов. Причем целостность дизеля как системы заключается в общей цели, которой служат все его элементы. Исследование системы, состоящей из большого числа элементов, связано с определенными трудностями. Поэтому, как правило, выделяются наиболее существенные элементы и связи. Остальные части системы представляются в виде укрупненных подсистем (блоков). Условное изображение дизеля, приведенное в работе [36] в виде блочной функциональной модели, как показано на рис. 4.1, позволяет выделить основные диагностические параметры.



Рис. 4.1. Блочная функциональная модель дизеля

Как видно на рис. 4.1, функционирование дизеля как энергетического объекта зависит от качества осуществления рабочего процесса, определяемого состоянием топливной аппаратуры, газораспределительного механизма и турбокомпрессора (при наличии), а функционирование дизеля как механического объекта определяется параметрами, характеризующими состояние деталей движения – цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма [37].

Таким образом, глубину диагностирования дизеля можно представить в четырех уровнях:

- по выходным параметрам, характеризующим общее состояние дизеля;
- по выходным параметрам дизеля, характеризующим его как энерго-механическую систему;

- по выходным параметрам, характеризующим состояние основных узлов;
- по выходным параметрам, характеризующим состояние отдельных элементов.

В настоящее время для безразборного функционального диагностирования дизелей традиционно используются следующие группы методов:

- анализа рабочего процесса;
- спектрального анализа масла и отложений;
- газового анализа;
- радиоактивных индикаторов;
- акустические.

4.2.1. Методы анализа рабочего процесса

Рабочий процесс дизеля зависит от величины и стабильности основных входных и выходных параметров, характеризующих функционирование дизеля и отражающих его техническое состояние (ТС), таких как цикловой подачи топлива, частоты вращения, индикаторного КПД, давления сжатия. При этом оценка изменения ТС двигателя по параметрам рабочего процесса осуществляется по комбинации относительных изменений таких параметров, как максимальное давление сгорания, степень тепловой напряженности, давление и температура наддувочного воздуха и отработавших газов, частота вращения турбокомпрессора и т.д. Значительную часть диагностических параметров, характеризующих теплотехническое состояние дизеля, составляют индикаторные показатели. Индикаторная диаграмма несет в себе информацию о рабочем процессе в цилиндре, ТС и нагрузке дизеля.

Благодаря возможности определения индикаторных и эффективных показателей рабочего процесса дизеля параметрические методы получили широкое распространение для диагностирования транспортных и стационарных двигателей.

Основными недостатками методов анализа рабочего процесса являются их слабая чувствительность к изменению ТС, малая глубина поиска дефектов и зависимость от влияния внешних условий.

4.2.2. Методы спектрального анализа масла и отложений

Работоспособность деталей и узлов двигателя в значительной степени определяется степенью износа их рабочих поверхностей. При работе двигателя металлические продукты износа вымываются из узлов трения смазочным маслом, накапливаясь в нем и частично оседая в фильтрах, на поверхности деталей, масляных каналов и трубопроводов в виде отложений. Изменение концентраций продуктов износа (Fe, Cu, Al, Cr, Pb, Sn и др.) в масле является признаком изменения ТС трущихся деталей, поэтому представляет практический интерес как параметр, обладающий большой информативностью [38].

Методы спектрального анализа масла и отложений обладают высокой чувствительностью и позволяют регистрировать частицы продуктов изнашивания размером 1...20 мкм. Различают абсорбционный и эмиссионный спектральный анализ. Первый осуществляют по спектрам поглощения электромагнитного излучения, второй – по спектрам излучения, испускаемым атомами, молекулами, ионами [39].

Недостатками методов спектрального анализа масла и отложений является необходимость строгого контроля за сменой смазочного масла в двигателе, они непригодны для выяснения закономерностей и особенностей изнашивания отдельных сечений трущихся поверхностей, для их применения требуется специальная лаборатория.

4.2.3. Методы газового анализа

Состав отработавших газов непосредственно зависит от организации процесса сгорания, регулировки и исправности топливной аппаратуры, газотурбинного наддува, газораспределительного механизма и состояния ци-

линдропоршневой группы. В настоящее время отечественная промышленность выпускает газоанализаторы, позволяющие оперативно определять концентрации основных компонентов отработавших газов дизелей. Методы газового анализа, кроме диагностических задач, предоставляют возможность решать важные экологические проблемы, но им присущи определенные трудности в организации отбора проб. Существенным недостатком является непригодность методов для решения задачи прогнозирования ТС дизелей [40].

4.2.4. Методы радиоактивных индикаторов

Для безразборного определения величин износа основных деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) применяются следующие методы радиоактивных индикаторов: метод радиоактивных продуктов изнашивания (РАПИ) и метод искусственных радиоактивных баз (ИРАБ).

При использовании метода РАПИ в контролируемые детали вводятся радиоактивные изотопы. В процессе работы двигателя продукты изнашивания деталей, в том числе и активированные, вымываются из узлов трения маслом и уносятся в систему смазки. По мере увеличения износа поверхности контролируемой детали количество радиоактивных частиц в масле возрастает. Радиоактивное излучение продуктов изнашивания может непрерывно регистрироваться радиометрической аппаратурой. По скорости нарастания радиоактивности смазочного масла определяется скорость изнашивания поверхности контролируемой детали, а по энергетическому уровню излучения - величина износа. Этот метод отличается высокой чувствительностью и способностью обеспечить автоматическое получение непрерывной информации об изнашивании деталей дизеля. Однако при его применении необходима организация специализированной лаборатории и соблюдение санитарных правил техники безопасности, применяющихся при работе с радиоактивными веществами [38].

Метод ИРАБ основан на создании искусственных радиоактивных баз на рабочих поверхностях контролируемых деталей (поршня, втулки, кольца). В процессе изнашивания искусственных баз радиометрической аппаратурой регистрируется снижение их активности от первоначальных значений и определяются величина и скорость износа рабочих поверхностей исследуемых деталей. Применяемые в методе ИРАБ активности не требуют специальной защиты, поэтому их можно широко использовать, однако метод существенно уступает по чувствительности методу РАПИ.

4.2.5. Акустические методы

Акустические методы в зависимости от диапазона используемых частот делятся на методы, использующие колебания в диапазонах частот: звуковом (20 Гц...20 кГц) – вибро- и шумодиагностические; низкочастотном ультразвуковом (до 100 кГц) – ультразвуковые; и метод, использующий колебания в высокочастотном ультразвуковом диапазоне (свыше 100 кГц) – акустоэмиссионный [41].

Возникающие при работе двигателя механические, газо- и гидродинамические шумы и вибрации отражают в реальном масштабе времени протекание основных физических процессов [42]. Обладая наибольшей информативностью, они позволяют не только выявить уже развившуюся неисправность и предупредить катастрофические разрушения, но и обнаруживать развивающийся дефект на очень ранней стадии, что дает возможность прогнозировать аварийную ситуацию и обоснованно планировать сроки и объем ремонта дизелей. Однако акустические методы обладают низкой помехозащищенностью [43].

Таким образом, в практике эксплуатации дизелей может использоваться достаточно большое число различных методов диагностирования. Большинство методов достаточно хорошо изучено и нашло применение при решении

задач диагностирования дизелей. Однако существующие трудности в применении большинства указанных методов не могут позволить достаточно эффективно использовать их. С этой точки зрения большой интерес представляют виброакустические методы диагностирования. Многочисленные теоретические разработки и результаты экспериментальных исследований позволяют предположить о возможности увеличения глубины и качества диагностирования дизелей при минимальных затратах времени. Это возможно также вследствие появившихся возможностей автоматизации процесса диагностирования и обработки большого количества информации.

5. Виброакустическое диагностирование дизелей

5.1. Источники вибрации

Колебательные процессы, сопровождающие функционирование дизелей, – непосредственный результат взаимодействия деталей. Свойства или изменение свойств деталей проявляются в их взаимодействии, именно поэтому виброакустический сигнал (вибросигнал) – побочный результат взаимодействия – является носителем информации о техническом состоянии элементов дизеля, образующих кинематические пары: пару колес в зубчатом зацеплении; обоймы, тела качения, сепаратор – в подшипнике качения; цилиндр и поршень и т.п. Одновременно с этими явлениями в механизме имеет место взаимодействие движущихся или вращающихся элементов с внешней средой: вращение лопаток турбины в потоке газа; кавитация в жидкости; явление гидравлического удара и др. [44].

Важнейшей задачей виброакустического диагностирования является построение адекватной модели машины и установление связи между параметрами машины и характеристиками вибросигналов, т.е. информативными диагностическими параметрами.

Сложность определения структурных параметров при формировании диагностической модели дизеля заключается:

- в многообразии типов колеблющихся поверхностей, имеющих различные условия закрепления;
- в большом числе источников вибрации;
- в величине и форме возмущающих импульсов;
- в разнообразии путей и видов волн упругих колебаний, распространяющихся по элементам конструкции механизма.

При формировании диагностической модели необходимо решить два основных вопроса:

- какие узлы дизеля подлежат диагностированию;

– какие параметры в наилучшей степени характеризуют изменение технического состояния этих узлов.

Аналитического решения этих задач не существует. Поэтому для обоснованного назначения узлов и деталей дизеля, подлежащих диагностированию, необходимо использовать статистический материал по отказам, повреждениям и дефектам наиболее ответственных элементов.

В связи с этим для формирования диагностических параметров, чувствительных к дефектам, используют специальные методы обработки вибросигналов.

Поиск информативных диагностических параметров неисправностей относится к числу наиболее трудно формализуемых операций, поэтому очень важно изучить объект диагностирования.

Дизель является энергетической машиной, преобразующей поступательное движение поршней под действием сил давления газов во вращательное движение коленчатого вала. При этом поршни и шатуны перемещаются со значительно изменяющимися скоростями, благодаря чему возникают периодически действующие силы инерции. Давление газа в цилиндре также широко изменяется во время движения поршней [45]. Действие этих периодических возмущений приводит к возникновению сложной картины вибрации дизеля.

В двигателе имеются и другие источники вибрации, среди которых остаточные дисбалансы многочисленных вращающихся частей, удары поршней при перекладке, газодинамические колебания, воспламенение и сгорание топлива в цилиндрах, удары в зубчатой передаче, удары клапанов, импульсы выхлопных газов, разновес комплекта шатунно-поршневой группы и другие [46].

Поэтому дизели обладают очень сложными и трудно интерпретируемыми спектрами виброакустических процессов. Эти спектры характеризуются

наличием бесчисленного числа гармоник частоты вращения коленчатого вала двигателя с подчеркиванием частот перекадки поршня, частот, кратных числу цилиндров и числу тактов двигателя. Ударные возмущения вызывают отклик механической системы машины на множестве собственных частот.

Основными источниками вибрации в порядке убывания их интенсивности в [47] определены:

- процесс сгорания;
- удары поршней при перекадках;
- топливная аппаратура;
- клапанно-распределительный механизм;
- зубчатые передачи.

При этом в [48] определено, что между вибрацией и возмущающими усилиями существует корреляционная связь.

Периодические возмущающие усилия могут быть разделены на две категории [45]:

- силы давления газов при сгорании топлива в цилиндрах;
- силы, сопровождающие рабочие процессы (удары и трения в подвижных сочленениях, неуравновешенные силы инерции).

Силы первой категории определяют заданные энергетические параметры процесса. Силы второй категории являются наиболее важными с точки зрения виброакустического диагностирования [44].

Переменность нагрузки и изменение направления действующих сил в элементах дизеля при наличии между сопряженными деталями зазоров приводят к ударам, что вызывает вибрацию деталей и узлов всего двигателя. Колебания деталей под действием ударов при этом происходят с собственными частотами, характерными для каждого узла (подшипников, клапанов, колец, поршней), что облегчает их выделение из общего спектра вибраций.

Таким образом, главной особенностью вибросигнала работающего двигателя является его нестационарность, затрудняющая применение обычного спектрального подхода к формированию диагностических параметров.

Второй, не менее важной особенностью вибросигнала дизеля является то, что колебания, вызванные ударным воздействием, могут быть с достаточной точностью привязаны к углу поворота коленчатого вала двигателя (фаза цикла). При этом ударные воздействия происходят с частотой вращения коленчатого вала или с кратными ей частотами. Смещение возмущающих процессов в ту или иную сторону по фазе свидетельствует об аномалиях работы механизма, о появлении зазоров, о неправильности регулировок и т.п.

Таким образом, диагностирование можно осуществлять, анализируя вибросигнал лишь на определенных временных интервалах, жестко связанных с углом поворота коленчатого вала. Эта операция осуществляется с помощью фазовой селекции сигнала.

Совмещение операций фазовой и частотной селекции дает возможность диагностировать состояние отдельных деталей механизма путем исследования виброакустических процессов в определенные моменты времени по углу поворота коленчатого вала и в диапазоне частот собственных колебаний элементов дизеля.

Исследования последних лет доказали перспективность использования методов виброакустического диагностирования в мероприятиях по обеспечению безразборного контроля технического состояния поршневых двигателей в эксплуатационных условиях. Особенно актуален виброакустический подход при контроле состояния таких узлов машины, как цилиндропоршневая группа, подшипники, клапаны и форсунки.

5.2. Физические процессы дизеля

В работающем дизеле можно различить три вида физических процессов:

- движение деталей;
- взаимодействие (обмен энергией, а иногда и веществом) с внешней средой;
- разрушение деталей.

Разрушение деталей приводит к изменению состояния дизеля. Процессы взаимодействия дизеля с внешней средой служат диагностическим сигналом. Благодаря движению деталей дизеля устанавливается связь между состоянием его элементов и диагностическим сигналом [49].

5.2.1. Движение деталей

Рассмотрение движения деталей, соединенных в кинематические пары, опирается на ряд допущений, которые приводят к определенным погрешностям. Первым из них является рассмотрение относительного движения таких пар изолированно от движения других элементов дизеля. Вторым является отказ от попытки проследить движение каждой детали отдельно и сосредоточение внимания только на перемещении деталей относительно друг друга.

5.2.1.1. Цилиндропоршневая группа

Перекладка поршня

Физической основой для оценки технического состояния сопряжения поршень-втулка служит явление перекладки поршня в пределах зазора, определяемого суммарным износом образующей цилиндровой втулки, юбки поршня и тепловым зазором, который предусмотрен условиями эксплуатации [40].

Перекладка происходит при изменении направления равнодействующей боковых сил, приложенных к поршню, и сопровождается ударным им-

пульсом. Момент появления этого импульса позволяет опознать его происхождение, а его амплитуда или энергия – оценить величину зазора в паре поршень-гильза.

Общее свойство для всех механических систем, испытывающих ударную нагрузку, – возникновение собственных затухающих колебаний одновременно всех форм и частот после окончания действия такого возмущения [50]. Очевидно, что собственные колебания втулки являются непосредственным носителем диагностической информации.

Существует зависимость между уровнем регистрируемой вибрации и зазором. Максимальная интенсивность виброакустических процессов наблюдается в частотном диапазоне 2...4 кГц при переключке поршня в верхней “мертвой” точке (ВМТ) на такте рабочего хода [51, 52]. Доказано, что именно на этой фазе рабочего цикла двигателя вибросигнал обладает наибольшей информативностью.

Рабочий ход поршня

На такте рабочего хода также происходят вынужденные колебания втулки, обусловленные газодинамическими процессами. Газодинамический источник характеризуется колебаниями газового столба в камере сгорания, частота которых зависит от скорости распространения ударной волны и линейных размеров камеры сгорания [53], и колебаниями давления газа в каждой точке камеры, где происходит сгорание. Эти колебания носят случайный характер, их частотный спектр расположен в диапазоне 0,2...40 кГц и имеет практически равномерную амплитудную интенсивность.

Изнашивание поршневых колец

Диагностирование износа поршневых колец базируется на анализе огибающей виброакустического сигнала, усредненной на периоде кинематического цикла. Для колебательных процессов дизелей характерна достаточно

высокая повторяемость процесса по фазе газораспределения при значительном разбросе амплитуд в каждой фазе, т.е. наблюдается большая дисперсия амплитуд и малая дисперсия начальных фаз основных импульсных компонент вибрационного процесса, обусловленных вспышкой, перекладкой поршня, прорывом газов в выпускные окна и т.п.

Импульс сигнала огибающей в районе угла поворота коленчатого вала $220^{\circ} \dots 240^{\circ}$ определяется перекладкой поршня в нижней мертвой точке и является хотя и информативной, но очень нестабильной характеристикой. Наиболее полезная информация заключена в импульсах, возникающих при углах 86° ; 104° ; 118° , соответствующих прохождению выпускных окон кольцами и головкой поршня.

Задир поверхностей сопряжения поршень-штулка

Дефект такого рода является чрезвычайно опасным по своим последствиям как для машины, так и для обслуживающего персонала, так как создается аварийная ситуация, которая может привести к обрыву шатунов, отрыву поршней и другим подобным явлениям, вызвав тем самым выход машины из строя и прочие тяжелые последствия.

В литературе практически не описывается проявление этого дефекта в вибрации. Однако некоторые экспериментальные исследования, проведенные в этом направлении, позволяют сделать определенные выводы. В частности, в работе [51] задир стимулировался нанесением поперечной насечки на поверхность поршня. Развитие задира не доводилось до крайних пределов. Ставилась задача обнаружения дефекта на ранней стадии.

Исследования показали, что наиболее информативным критерием является изменение плотности распределения вероятностей мгновенных значений амплитуд, что достаточно хорошо характеризуется коэффициентом эксцесса. Его значения при номинальном техническом состоянии для узкополос-

ной компоненты вибрации, взятой в области одной из собственных частот со-пряжения поршень-штуцер, лежат вблизи нуля. В других случаях при отклонении технического состояния от нормы, вызванным другими причинами, коэффициент эксцесса не превышает значения 3, а при развитии задира он значительно превосходит этот уровень, достигая значений 12...15.

5.2.1.2. Форсунка

Виброакустические процессы, возникающие в работающей форсунке, определяются двумя основными факторами – ударными воздействиями иглы при ее подъеме и посадке и гидродинамическими явлениями в процессе топливоподачи. При этом колебательные процессы в форсунке, вызванные ударным воздействием иглы, обусловлены усилием затяжки пружины, которое может меняться в процессе эксплуатации дизеля [40]. Поэтому величину усилия предварительной затяжки пружины можно использовать в качестве структурного параметра, определяющего степень регулировки топливной аппаратуры.

В качестве диагностического параметра многие исследователи выбирают максимальный размах амплитуды виброимпульсов, возникающих соответственно при подъеме и посадке иглы [54]. По расстоянию между передними и задними фронтами этих виброимпульсов оценивают продолжительность впрыскивания топлива, а по расстоянию от фазовой отметки опорного сигнала до переднего фронта первого виброимпульса определяют изменение угла опережения впрыскивания [55].

Особенности протекания процесса подачи топлива дают основания считать его кратковременным единичным импульсом, который возникает во входном сечении нагнетательного трубопровода вследствие выталкивания топлива плунжером насоса из объема камеры нагнетания.

Скачкообразный переход от проходного сечения нагнетательного трубопровода к проходным сечениям распыливающих отверстий тормозит движение топлива и повышает его давление, вследствие чего возникает гидравлический удар.

В момент впрыскивания через распыливающие отверстия поток топлива имеет турбулентный характер. Турбулентность возникает также в результате сжатия струи в сопле и последующего расширения, наличия шероховатостей и острых кромок. Турбулентное движение жидкости характеризуется нерегулярным, беспорядочным изменением скорости во времени в каждой точке потока. Скорость потока как бы пульсирует около своего среднего значения, изменяясь от больших до малых значений, т.е. имеет широкий спектр амплитуд. Турбулентный поток вследствие этого характеризуется также пульсациями давления, причем спектр их амплитуд и частот широк, как и спектр пульсаций скорости.

Еще одним источником возбуждения колебаний может быть периодическое изменение давления, связанное со срывом вихрей в топливе из отверстия распылителя. Частота срыва вихрей может занимать полосу спектра до семи октав.

Таким образом, одними из основных источников колебаний корпуса форсунки являются гидродинамические процессы, возникающие вследствие подачи и впрыскивания топлива и имеющие широкий частотный спектр амплитуд давлений и скоростей. Установлено в [44], что важными факторами являются изменение спектра вибрации форсунки в диапазоне частот 12...18 кГц при изменении цикловой подачи топлива и увеличение длительности пакета импульсов.

5.2.1.3. Турбокомпрессор

Источники колебательных процессов в турбокомпрессоре могут быть механическими и аэродинамическими. Спектральные составляющие колебаний этих источников подразделяют на главные и второстепенные. К главным обычно относят составляющие, определяемые первыми роторными гармониками, гармониками вращающегося срыва, частотой вращения лопаток компрессора и турбины, собственными частотами взаимосвязанных колебаний элементов конструкции турбокомпрессора. К второстепенным относят составляющие, амплитуды которых обычно незначительны. Это вибрации, генерируемые взаимодействием деталей в подшипниковых узлах, турбулентностью воздушного потока и др.

Анализ источников возбуждения колебательного процесса в турбокомпрессоре, проведенный в [40], показывает, что его составляющие образуют сложное по характеру и составу виброакустическое поле. Частотный состав этого поля будет определяться спектральными компонентами, которые обусловлены наличием дисбаланса и ударного взаимодействия цапфы с внутренней обоймой подшипника.

Однако, как отмечается в [44], в ряде случаев в работающем механизме наблюдается постепенное увеличение неуравновешенности за счет различного рода факторов: температурных и других деформаций, образования нагара, обгара, эрозии и коррозии, появления зазоров и связанных с ними перекосов и т.п.

Наиболее употребляемый диагностический параметр неуравновешенности ротора – уровень первой гармоники частоты вращения. Однако при малых приращениях дисбаланса рекомендуется использовать в качестве диагностических параметров вероятностные характеристики вибросигнала (закон распределения, эксцесс, коэффициент корреляции).

5.2.2. Взаимодействие с внешней средой

Изучение распространения акустических колебаний по машинным конструкциям и их взаимодействие с внешней средой представляет одну из основных задач акустической динамики машин [18]. В целях проведения диагностирования основное внимание здесь необходимо уделять установлению зависимости между потоками колебательной энергии и параметрами дизелей.

В большинстве случаев эта зависимость определяется системой стохастических уравнений, а распознавание технических состояний функционирующего дизеля осуществляется в условиях ограниченной информации при большом уровне помех, вызванных несоблюдением постоянства внешних условий, неполнотой описания классов состояний, неопределенностью границ между классами состояний и, соответственно, классами диагностических параметров.

Поэтому одна из основных задач виброакустического диагностирования заключается в том, чтобы выделить сигнал и подавить помеху. Все методы выделения сигнала из фона маскирующих его помех основаны на использовании различий в свойствах сигнала и помехи. Задача заключается в том, чтобы найти различия в сигналах, генерируемых различными кинематическими параметрами одного механизма.

Диагностический сигнал – это колебания, возбужденные взаимодействием деталей обследуемой кинематической пары в точке установки датчика. Информацию о состоянии деталей приносят два параметра сигнала: амплитуда (или энергия) и величина запаздывания (опережения) сигнала относительно опорного импульса, которым задается начало отсчета времени.

Различия в сигналах определяются только различием процессов взаимодействия деталей, которыми они генерируются. Взаимодействия деталей от-

личаются друг от друга в общем случае пятью основными показателями: длительностью, периодом следования, моментом времени, формой зависимости параметров от скоростного режима дизеля, формой зависимости параметров от нагрузочного режима.

Каждый из этих показателей находит отражение как в спектре сигнала, так и в его временной реализации, но степень их влияния на характеристики сигнала различна. Распознавание различий в сигналах существенно облегчается в том случае, когда удастся построить диагностическую модель, устанавливающую зависимость между пространством состояний механизма и пространством диагностических параметров.

Замена реальных устройств их идеализированными моделями позволяет широко использовать различные математические методы. В качестве диагностических моделей могут рассматриваться динамические модели, представленные в виде системы алгебраических или дифференциальных уравнений, феноменологические модели, имитационные, логические соотношения, функциональные, структурные, регрессионные и другие модели, позволяющие связать параметры технических состояний с виброакустическими характеристиками дизеля [56, 57].

Сложность виброакустических процессов, различие физических моделей и методов их описания на различных участках частотного спектра послужили основанием для разбиения его на диапазоны:

- диапазон низких частот от 0 до 300 Гц;
- диапазон средних частот от 300 Гц до 2 кГц;
- диапазон высоких частот от 2 до 20 кГц.

Полезность такого деления объясняется тем, что каждому диапазону свойственны свои возмущающие силы, своя физическая модель дизеля как колебательной упругой системы и своя диагностическая модель.

Низкочастотная вибрация носит преимущественно гармонический характер, так как одной из ее характерных причин является неуравновешенность вращающихся масс. Наиболее вероятными причинами низкочастотных колебаний по [45] являются:

- неуравновешенность;
- отклонение от соосности валов;
- нарушение геометрии узлов;
- периодические силы, создаваемые рабочим процессом.

Машина при этом рассматривается как единая упругая система: каждый из источников неуравновешенности заставляет колебаться механизм как единое целое, и разделение влияния источников с помощью математических методов является крайне трудной задачей.

Колебания среднечастотного диапазона обычно связаны с высшими гармониками сил неуравновешенности роторов, обусловленными нелинейностью системы, нарушениями геометрии кинематических пар и динамическим взаимодействием элементов машины между собой и с окружающей средой. Наличие параметрического и нелинейного взаимодействия деталей приводит к существенному усложнению физической и математической моделей, к проявлению случайного возбуждения как результату совместного воздействия технологических, кинематических, регулировочных и других случайных факторов.

В **диапазоне высоких частот** колебания представляют собой упругие волны, распространяющиеся по неоднородным конструкциям. Они несут небольшую долю колебательной энергии и при распространении хорошо демпфируются [58]. Кроме того, в машинах и механизмах возбуждаются колебания на собственных частотах, их суб- и супергармониках и комбинационных частотах основных частот возбуждения, причем их спектр уплотняется с ростом частоты.

Однако информативными составляющими вибросигнала чаще всего оказываются не амплитуды основных частот возбуждения, а их окраска, т.е. характер фазовой и амплитудной модуляции, соотношения между амплитудами гармоник, вид случайных выбросов в резонансных зонах и т.д.

5.2.3. Разрушение деталей

Изучение свойств виброакустических процессов, сопровождающих функционирование поршневых двигателей, показало, что при появлении неисправности меняется структура сигнала, т.е. меняется соотношение между его компонентами или появляются новые компоненты. Характер изменений вибрационных процессов, вызванных изменением состояния контактирующих поверхностей, имеет ряд общих черт, несмотря на различие конструкций и назначений кинематических узлов.

Истирание (абразивное изнашивание) контактирующих поверхностей сопровождается появлением микронеровностей в зоне контакта, нарушением микро- и макрогеометрии деталей, следствием чего является рост шумовой компоненты, увеличением амплитуд гармонического ряда основной частоты возбуждения кинематического узла и перераспределением амплитуд между гармониками этого ряда.

Выкрашивание (локальное изнашивание) контактирующих поверхностей проявляется в развитии раковин в зоне контакта, вызывающих появление периодических всплесков вибросигнала, модулирующих основной колебательный процесс.

Периодическое попадание раковин в зону контакта приводит к появлению в спектре сигнала комбинационных частот в окрестности основных частот возбуждения, вызванных амплитудной модуляцией. Рост числа выбросов при увеличении их амплитуд, вызванных развитием данного дефекта, приводит к увеличению глубины амплитудной модуляции, росту числа комбинационных

частот и перераспределению между ними при неизменности амплитуд основных частот возбуждения. Одновременно наблюдается явление амплитудно-импульсной модуляции в окрестности собственных частот.

Развитие трещин в теле детали вращения, приводящее к поломке, очень сходно по своему проявлению в спектре сигнала с развитием выкрашивания, но скорость развития данного дефекта значительно выше.

Задир контактирующих поверхностей, являющийся следствием увеличения коэффициента демпфирования механической системы, сопровождается мгновенным разогреванием локальных участков, “схватыванием” поверхностей в зоне контакта, и последующим наволакиванием металла. Как правило задир и заедание развиваются при неправильных условиях эксплуатации дизелей.

Явление задира приводит к нарушению периодичности движения деталей механизма, флуктуациям скорости вращения, появлению выбросов в вибросигнале, явлению фазовой модуляции на основных частотах возбуждения. С развитием задира вибросигнал становится существенно нестационарным из-за нерегулярности выбросов. В спектре сигнала наблюдается падение амплитуд основных частот возбуждения при одновременном росте амплитуд комбинационных частот.

5.3. Способ вибродиагностирования дизелей

5.3.1. Подготовка вибросигналов к цифровой записи

Процесс распознавания технического состояния поршневых машин по виброхарактеристикам основан на записи аналогового вибросигнала, перевода его в цифровой вид и дальнейшей обработке. Запись и оцифровка аналогового вибросигнала производятся при помощи датчиков и аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Датчики и АЦП имеют свои характеристики, ко-

которые оказывают решающее значение на полноту виброакустической информации. Поэтому необходимо очень тщательно произвести подготовку измерительного тракта для получения вибросигнала в цифровом виде.

Безусловным лидером в методах цифровой обработки сигналов (ЦОС) является алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Основная идея БПФ – деление дискретного временного ряда Фурье (ДВРФ) на два и более меньших ДВРФ, каждый из которых можно вычислить отдельно, а затем линейно просуммировать с остальными, с тем, чтобы получить ДВРФ исходной последовательности. Эти ДВРФ меньшего размера можно в свою очередь поделить на еще меньшие ДВРФ, соответственно, меньших последовательностей.

Анализ характеристик вибросигнала удобно проводить через оценку функции СПМ, получаемой посредством алгоритма БПФ – функции, описывающей распределение мощности сигнала в зависимости от частоты, т.е. мощности, приходящейся на единичный интервал частоты.

Вычисление односторонней СПМ в случае реализации процесса неограниченной длины T можно производить по формуле

$$P(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} M[|X(f, T)|^2], \quad (5.1)$$

где $X(f, T)$ – БПФ случайного стационарного процесса $x(t)$

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-i2\pi ft} dt, \quad (5.2)$$

где T – длительность реализации, с.

Оценку величины P можно получить, опуская в формуле (5.1) знаки предела и математического ожидания

$$\hat{P}(f) = \frac{2}{T} |X(f, T)|^2. \quad (5.3)$$

При этом обеспечивается максимально высокая разрешающая способность

$$B = \frac{1}{T}. \quad (5.4)$$

Точность оценки СПМ случайного стационарного процесса характеризуется средним квадратом ошибки, который состоит из двух частей. Первая часть – это дисперсия оценки, характеризующая долю случайности в величине ошибки. Вторая часть есть квадрат смещения оценки, характеризующий ее систематическое отклонение. Установлено в [59], что ошибка смещения пренебрежимо мала. Поэтому обычно ее исключают, а на практике используют нормированную среднеквадратичную ошибку, которая, с учетом указанного, может быть записана в виде

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{M \left[\left(\hat{P}(f) - P(f) \right)^2 \right]}{P^2(f)}} = \frac{\sigma(\hat{P}(f))}{P(f)}. \quad (5.5)$$

Согласно [60], каждая частотная составляющая оценки $\hat{P}(f)$ имеет выборочное распределение

$$\frac{\hat{P}(f)}{P(f)} = \frac{\chi_n^2}{n}, \quad (5.6)$$

где χ_n^2 – величина, подчиняющаяся χ^2 -распределению с n степенями свободы.

А поскольку среднее значение и дисперсия величины, подчиняющейся χ^2 -распределению, составляют n и $2n$ соответственно, нормированная среднеквадратичная ошибка в этом случае

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{n}}, \quad (5.7)$$

где n – среднее значение $\hat{P}(f)$, подчиняющемуся χ^2 -распределению, равное 2 – числу степеней свободы для первых трех членов ряда Фурье.

Как видно, эта ошибка будет равна 1, т.е. оцениваемой величине, что неприемлемо.

Поэтому на практике спектральную оценку получают путем вычисления

оценок по k различным участкам реализаций длиной T_K каждая и их последующего усреднения, что приводит к сглаженной оценке

$$\hat{P}(f) = \frac{2}{k \cdot T_K} \sum_{i=1}^k |X_i(f, T_K)|^2. \quad (5.8)$$

В этом случае, согласно [60], сглаженная оценка имеет ошибку

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{k}}, \quad (5.9)$$

а разрешение спектральной оценки по частоте задается равенством

$$B_f = \frac{1}{T_K}. \quad (5.10)$$

Очевидно, что минимальная длина реализации должна быть

$$T^{min} = k \cdot T_K. \quad (5.11)$$

Следовательно, ошибка оценки спектра будет определяться как

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{B_f \cdot T^{min}}}. \quad (5.12)$$

Из этой формулы вытекает заключение, что если B_f – известный параметр, определяемый, например, характеристиками применяемой аппаратуры, то длина минимальной реализации может быть определена из соотношения

$$T^{min} = \frac{1}{B_f \cdot \varepsilon^2}. \quad (5.13)$$

Следовательно, задаваясь значением ошибки оценки СПМ, можно рассчитывать длину необходимой реализации и необходимое число усреднений k .

При получении СПМ для дискретно-временных последовательностей (которыми являются вибросигналы поршневых машин, записанные в цифровом виде) необходимо по конечному количеству отсчетов данных получать статистически устойчивые спектральные оценки с максимально возможным

разрешением. Обработка конечных записей данных требует принятия определенных компромиссов относительно разрешения, устойчивости (минимизации дисперсии) и подавления просачивания.

Для этого необходимо произвести выбор функций окна (для взвешивания данных и корреляционных функций) и параметров усреднения во временной и частотной областях, которые позволяют сбалансировать требования к снижению уровня боковых лепестков, выполнению эффективного усреднения по ансамблю и к обеспечению приемлемого спектрального разрешения.

Устойчивые результаты (малые спектральные флуктуации) и хорошая точность (малое смещение относительно истинных спектральных значений на всех частотах) достижимы только тогда, когда

$$T \cdot B \gg 1, \quad (5.14)$$

где T – полный интервал записи данных, с;

B – эквивалентная ширина полосы, Гц.

В этом случае для всех спектральных оценок будет выполняться

$$Q \cdot T \cdot B_S \approx 1, \quad (5.15)$$

где B_S – эффективная статистическая ширина полосы окна, которая в случае спектрального окна $\Omega(f)$ определяется выражением

$$B_S = \frac{\left[\int_{-\frac{1}{2}T}^{\frac{1}{2}T} \Omega(f) df \right]^2}{\int_{-\frac{1}{2}T}^{\frac{1}{2}T} \Omega(f) df}; \quad (5.16)$$

Q – статистический показатель качества оценки, определяемый как отношение дисперсии оценки СПМ к квадрату математического ожидания этой оценки

$$Q = \frac{\sigma^2(\hat{P}(f))}{[M(\hat{P}(f))]^2}. \quad (5.17)$$

Таким образом, для достижения наибольшей разрешающей способности по частоте и учитывая циклический характер работы поршневых машин, длина исследуемой реализации должна соответствовать рабочему циклу машины. Ширина окна также должна быть равной этой величине. Следовательно, для обеспечения условия устойчивости спектральных оценок частота вращения поршневой машины должна быть постоянной. При этом разрешающая способность по частоте будет тем больше, чем меньше частота вращения поршневой машины.

5.3.2. Расчет требуемых характеристик измерительной аппаратуры

Согласно формуле (5.2), снимая дискретные значения функции $X(f)$ в точках, разделенных на шкале частот интервалом $\Delta f = 1/T$ (интервал Найквиста) в промежутке от минус B до плюс B Гц, можно найти число дискретных значений, необходимое для описания функции $x(t)$

$$N = \frac{2 \cdot B}{\frac{1}{T}} = 2 \cdot B \cdot T. \quad (5.18)$$

Поэтому при переводе аналогового сигнала в дискретную форму необходимо правильно выбрать величину интервала дискретности Δt . Минимальное число отсчетов, необходимое для описания реализаций длиной T при ширине спектра B определяется формулой (5.18).

При постоянном шаге во времени максимальный интервал дискретности

$$\Delta t = \frac{1}{2 \cdot B}. \quad (5.19)$$

Для того чтобы дискретная реализация содержала все те же частоты, что и исходный непрерывный сигнал, на каждый период соответствующего колебания должно приходиться по меньшей мере два отсчета (согласно теореме Котельникова). Поэтому наиболее высокая частота (частота Найквиста), кото-

рая может быть выделена при дискретизации со скоростью $1/\Delta t$ отсчетов в секунду, равна

$$f_N = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} . \quad (5.20)$$

Содержащиеся в исходном сигнале более высокие частоты будут свернуты в диапазон $0 \dots 1/(2 \cdot \Delta t)$ Гц и будут неотличимы от более низких частот этого диапазона (маскировка частот). Единственный способ избавиться от этого заключается в том, чтобы еще до аналогово-цифрового преобразования информации подавить в исходном аналоговом сигнале частоты, превышающие частоту Найквиста.

Для этого необходимо перед АЦП установить аналоговый низкочастотный фильтр. Верхнюю частоту пропускания (вырезающую частоту) фильтра задают обычно равной 0,8 частоты дискретизации

$$f_H = 0,8 \cdot f_N . \quad (5.21)$$

Необходимо также иметь в виду, что длительность реализации T должна быть существенно больше периода самой низкочастотной составляющей процесса.

Это условие необходимо, чтобы можно было выделить низкочастотные колебания. Иначе эти колебания могут быть приняты за нестационарный тренд. Следовательно, перед переводом сигнала в цифровой вид необходимо убедиться, что период самой низкочастотной составляющей не превышает длины реализации. В противном случае перед преобразованием сигнала необходимо его пропустить через высокочастотный фильтр.

Для циклических машин представляет интерес не весь кинематический цикл, а участки, соответствующие источникам вибрации (например, перекладка поршней). Поэтому длина участка реализации предполагается соответствующей фазе проявления такого источника

$$T_k = \frac{\varphi_k}{n \cdot \varphi_{\text{Ц}}} , \quad (5.22)$$

где n – частота вращения, с^{-1} ;

φ_k – угол, соответствующий кинематической фазе источника вибрации, град;

$\varphi_{\text{Ц}}$ – угол кинематического цикла, град.

Исходя из этого можно определить нижнюю частоту пропускания высокочастотного аналогового фильтра. С учетом крутизны спада

$$f_B = 1,2 \frac{1}{T_k} = 1,2 \frac{n \cdot \varphi_{\text{Ц}}}{\varphi_k}. \quad (5.23)$$

Таким образом, отфильтровав исходный вибросигнал, его можно подвергать оцифровке и записи на магнитный носитель. Оцифровка выполняется АЦП, выбор которого выполняется с учетом (5.19). Запись оцифрованного сигнала выполняет специальная программа-утилита. В этой программе необходимо решить задачу точности оценки СПМ.

Расчет параметров аппаратуры для перевода вибросигналов в цифровой вид желательно начинать с определения частотного диапазона исследования. Примерная процедура расчета характеристик виброакустической аппаратуры может быть представлена в виде структурно-логической схемы на рис. 5.1.

5.3.3. Обработка вибросигналов дизеля

Поскольку дизель является циклической машиной, в которой процессы зарождения вибросигналов согласуются с кинематическими фазами, то очевидно, что для получения достоверного диагноза необходимо получить распределение СПМ по этим кинематическим фазам.

Решить эту задачу возможно, для начала получив распределение СПМ во временной области. Получение такой характеристики основано на вычислении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) в скользящем спектральном окне. Исходная реализация – виброакустический сигнал полного кинематического цикла – разбивается на перекрывающиеся блоки, на каждый из которых накладывается спектральное окно. Выполняется БПФ блоков. Каждое из этих

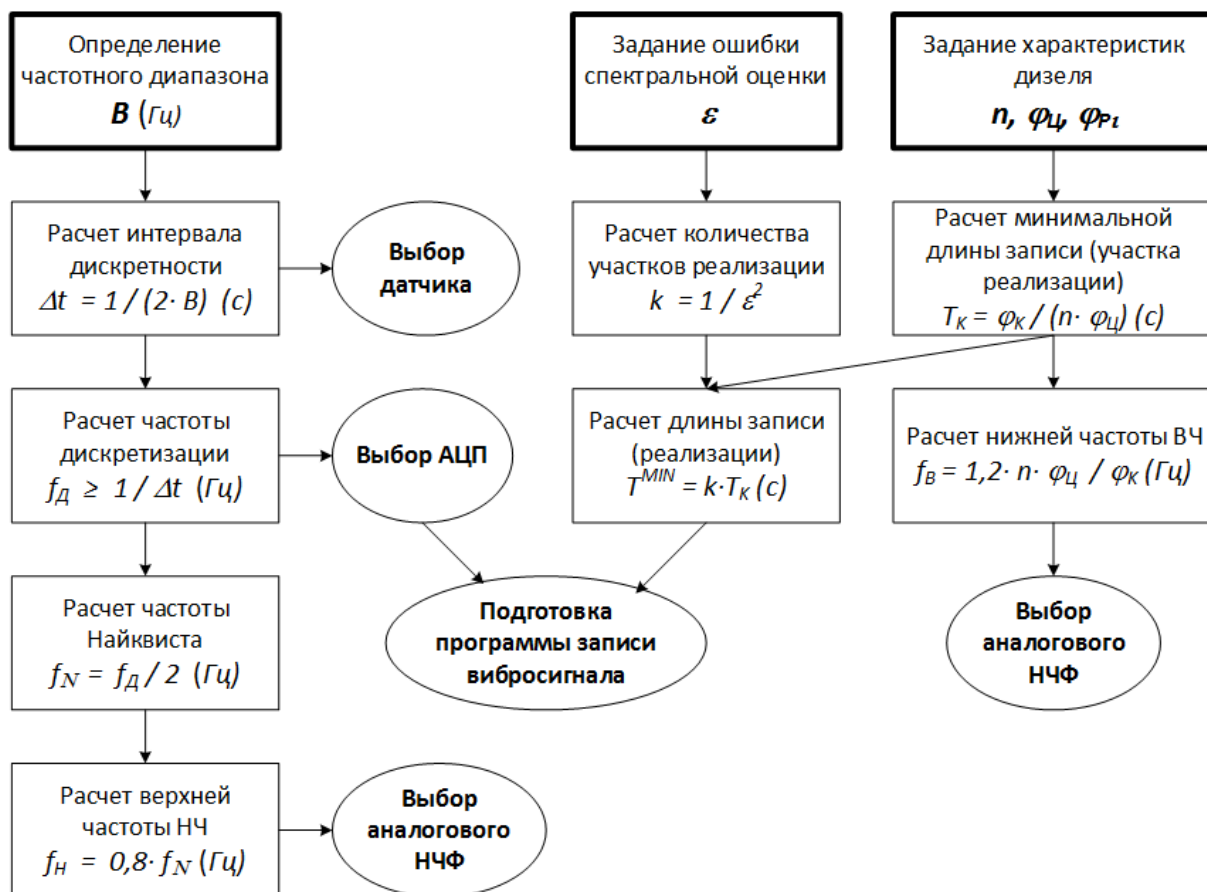


Рис. 5.1. Схема перевода аналогового виброакустического сигнала в цифровой вид и расчета требуемых характеристик измерительной аппаратуры

преобразований соответствует своему отрезку времени. Таким образом получаем СПМ в зависимости от времени прохождения вибросигнала – эволюционирующую СПМ, или спектрограмму, представленную на рис. 5.2.

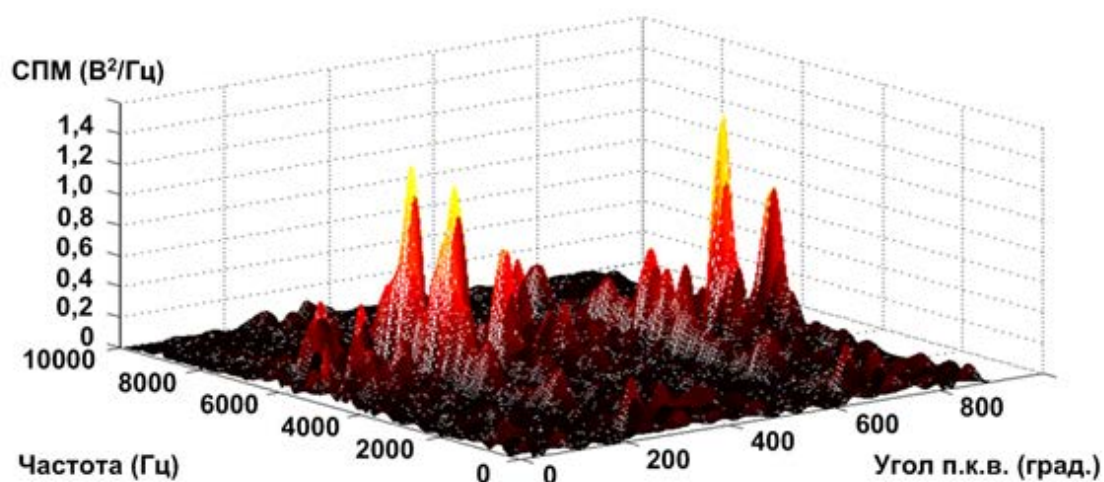


Рис. 5.2. Эволюционирующая СПМ (спектрограмма) вибросигнала 2-цилиндрового дизеля

Однако разбиение реализации на блоки ведет к уменьшению временного интервала и, соответственно, к уменьшению спектрального окна, что негативно скажется на частотном разрешении. Это наглядно можно проиллюстрировать рис. 5.3, на котором для удобства спектрограммы представлены в линиях уровня (амплитуды) в координатных осях частоты и угла поворота коленчатого вала (п.к.в.) (фазы).

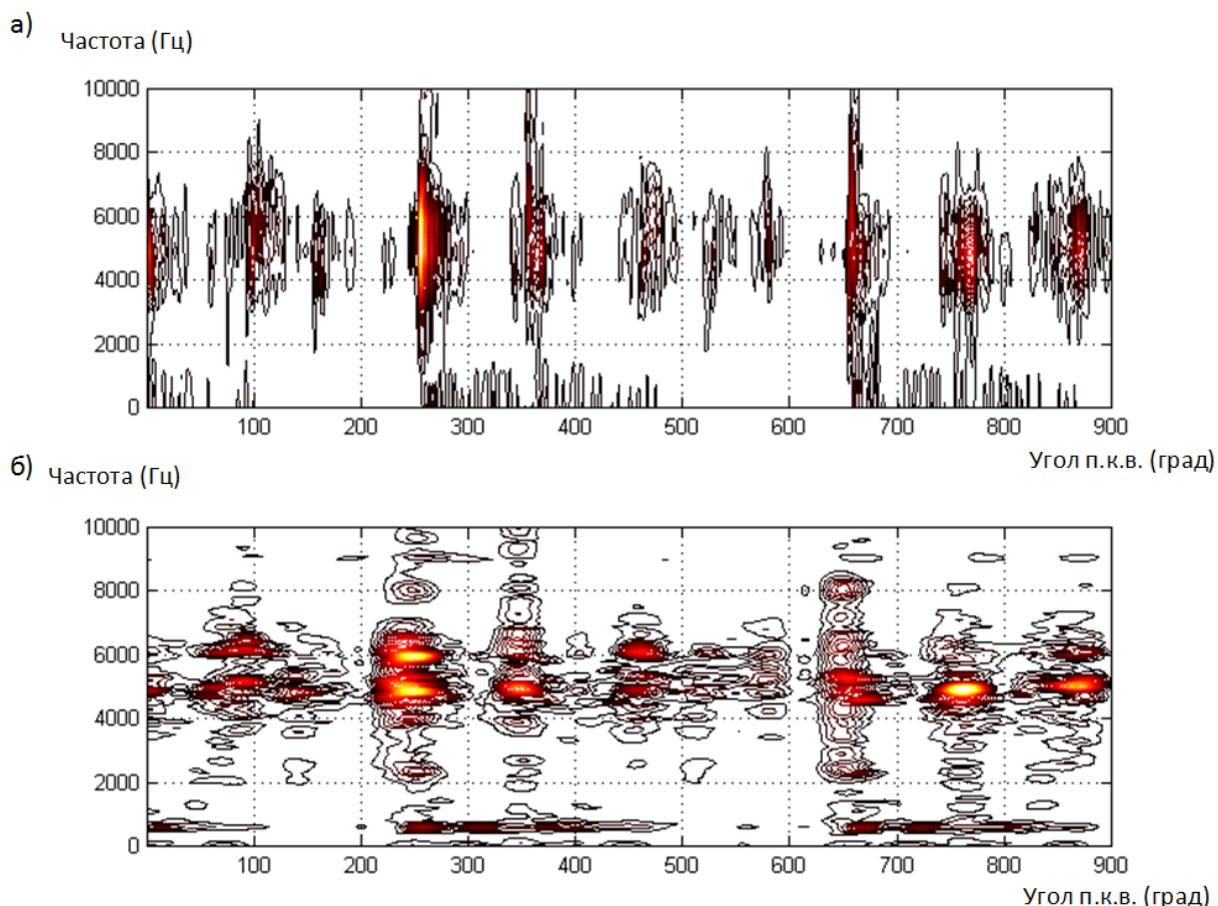


Рис. 5.3. Спектрограммы одного вибросигнала, полученные при обработке реализации:
а - 100-точечным спектральным окном Хэннинга
б - 1000-точечным спектральным окном Хэннинга

Как видно на рис. 5.3, увеличение спектрального окна ведет к “размыванию” СПМ по фазе кинематического цикла, и, наоборот, его уменьшение ведет к “размыванию” СПМ по частоте (т.е. увеличение разрешающей способности по частоте).

Также негативное влияние могут оказать случайные помехи, возможные в условиях эксплуатации.

С учетом изложенных фактов и соображений можно предложить следующий способ обработки сигнала.

Прежде всего, необходимо определить наличие сигнала в кинематической фазе, соответствующей определенному динамическому процессу. Для этого реализации обрабатываются скользящим спектральным окном, ширина которого позволит позиционировать пиковые СПМ по кинематической фазе (углу п.к.в.) с наименьшей погрешностью оценки фазового угла. Результат этой обработки представлен на рис. 5.4.

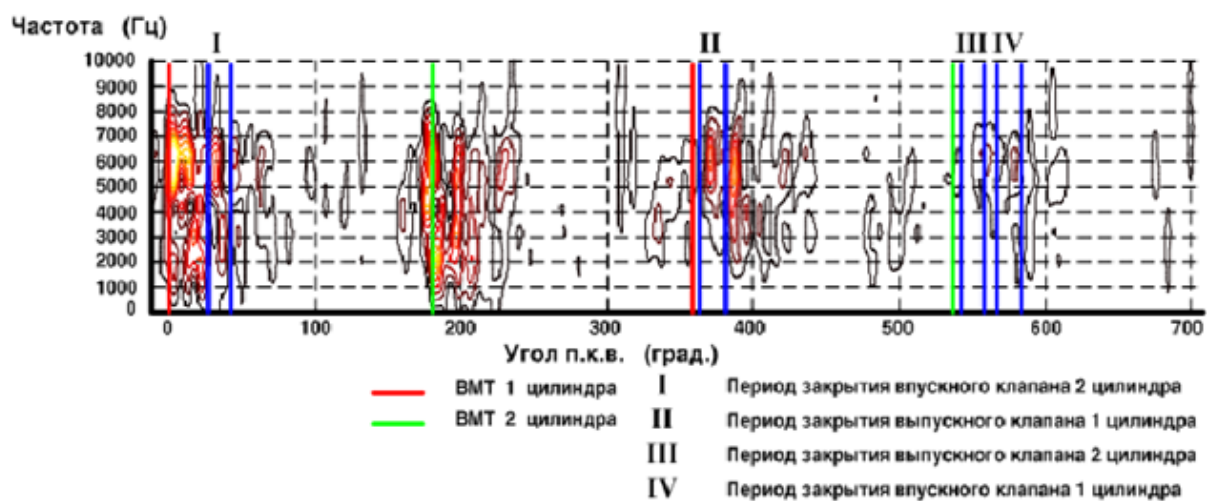


Рис. 5.4. Спектрограмма вибросигнала, совмещенная с кинематическим циклом 2-цилиндрового дизеля

Далее производится операция синфазного накопления и осреднения спектрограмм для снижения вероятности попадания случайного сигнала по каждому фазовому стробу.

Определяются частоты наибольших пиковых СПМ, соответствующих определенным динамическим процессам.

Производится фильтрация реализации в частотных полосах, ширина которых определится разрешающей способностью выбранного спектрального окна, с центральными частотами, соответствующими частотам наибольших пиковых СПМ (рис. 5.5).

Отфильтрованные реализации обрабатываются спектральным окном шириной, равной длине реализации.

Производится операция синфазного накопления и осреднения.

Определяются частоты и значения наибольших пиковых СПМ (рис. 5.6).

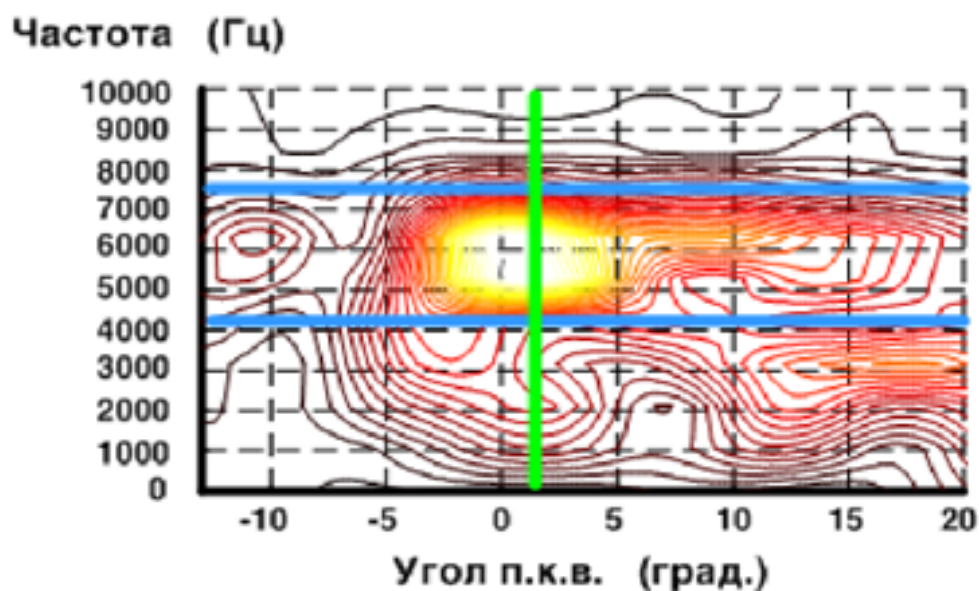


Рис. 5.5. Определение фазы и частотного диапазона исследуемого процесса

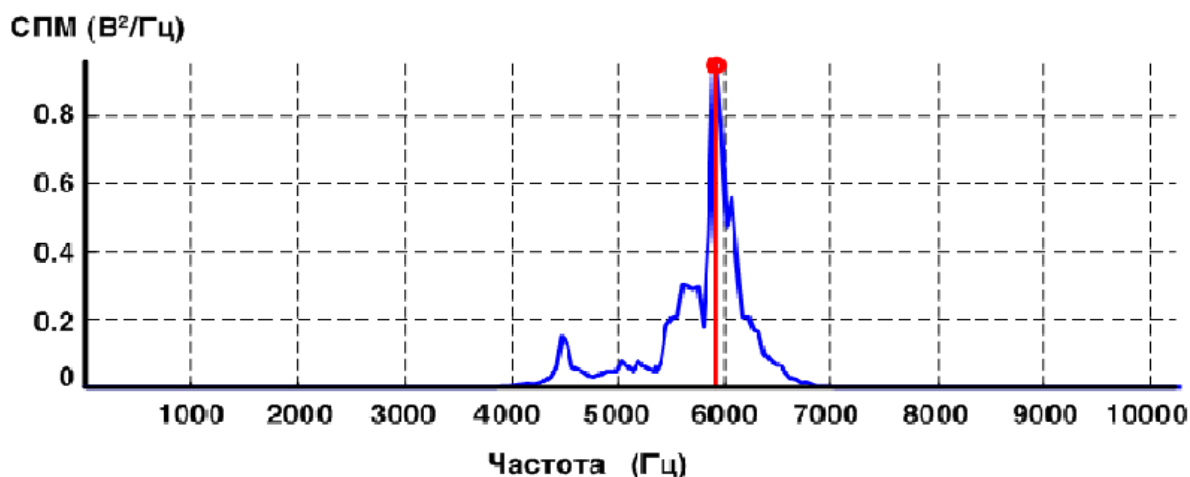


Рис. 5.6. Определение частоты и величины пиковой СПМ

Обработав вибросигнал таким способом, получаем диагностические параметры, а именно:

- частота наибольшей пиковой СПМ динамического процесса;
- величина наибольшей пиковой СПМ динамического процесса.

Для исключения наложения сигналов динамических процессов различных цилиндров дизеля предлагается исходные реализации по каждому цилиндру представлять от момента подачи топлива в этот цилиндр до момента подачи топлива в следующий по кинематическому циклу цилиндр дизеля.

Таким образом, диагностирование дизеля по вибросигналам может быть осуществлено по результатам обработки функции СПМ информативных частотных диапазонов, анализируя вибросигнал лишь на определенных временных интервалах, жестко связанных с углом поворота коленчатого вала. Эта операция осуществляется с помощью фазовой селекции сигнала. Информативными диагностическими параметрами при этом являются частота пиковой СПМ и ее величина в информативном частотном диапазоне соответствующего динамического процесса.

Библиографический список

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1989.
2. Надежность и эффективность в технике: справочник / под ред. В.В.Клюева, П.П.Пархоменко. Т.9. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1987.
3. ГУМБЕЛЬ Э. Статистика экстремальных значений. – М.: Мир, 1965.
4. СИДОРОВ В.А., КРАВЧЕНКО В.М., СЕДУШ В.Я. и др. Техническая диагностика механического оборудования. — Донецк: Новый мир, 2003.
5. ГОСТ 19781-90. Обеспечение систем обработки информации программное. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1990.
6. МОЗГАЛЕВСКИЙ А.В., КАЛЯВИН В.П. Системы диагностирования судового оборудования: учеб. пособие. – Л.: Судостроение, 1987.
7. ГОСТ Р 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2010.
8. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1997.
9. ГОСТ 17657-79. Передача данных. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1979.
10. ЛИДОВСКИЙ В.И. Теория информации. – М.: Высшая школа, 2002.
11. БИККЕНИН Р.Р., ЧЕСНОКОВ М.Н. Теория электрической связи. – М.: ИЦ «Академия», 2010.
12. ЗЮКО А.Г., КЛОВСКИЙ Д.Д., НАЗАРОВ М.В., ФИНК Л.М. Теория передачи сигналов. – М: Радио и связь, 2001.
13. ЦАПЕНКО М.П. Измерительные информационные системы. – М.: Энергоатомиздат, 2005.

14. ГЛИНЧЕНКО А.С. Цифровая обработка сигналов. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: курс лекций. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008.
15. СМИТ С. Цифровая обработка сигналов: практическое руководство для инженеров и научных работников / пер. с англ. А.Ю. Линовича, С.В. Витязева, И.С. Гусинского. – М.: Додэка-XXI, 2012.
16. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1980.
17. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. / под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1995.
18. АРТОБОЛЕВСКИЙ И.И., БОБРОВНИЦКИЙ Ю.И., ГЕНКИН М.Д. Введение в акустическую динамику машин. – М.: Наука, 1979.
19. ИОРИШ Ю.И. Измерение вибрации. Общая теория, методы и приборы. – М.: Машгиз, 1956.
20. ПОПКОВ В.И., МЫШИНСКИЙ Э.Л., ПОПКОВ О.И. Виброакустическая диагностика в судостроении. – Л.: Судостроение, 1989.
21. Технические средства диагностирования: справочник / под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1989.
22. ISO 2372. Механическая вибрация машин с рабочими скоростями от 10 до 200 об/с. Основы для определения оценочных стандартов.
23. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин(-1). – М.: Стандартиформ, 2007.
24. СЕРГИЕНКО А. Б. Цифровая обработка сигналов. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006.
25. ВОЕВОДИН В.В., КУЗНЕЦОВ Ю.А. Матрицы и вычисления. – М.: Наука, 1984.
26. COOLEY J.W., TUKEY J.W. An algorithm for the machine calculation of the

complex fourier series. Mathematics Computation, 19:297-301, 1965.

27. АБРАМОВ И.Л. Вибродиагностика энергетического оборудования [Электронный ресурс]. – Кемерово, 2011.

28. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования / под ред. И.М.Синдеева. – М.: Транспорт, 1984.

29. ПАРХОМЕНКО П.П., СОГОМОНЯН Е.С. Основы технической диагностики: Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства. – М.: Энергоиздат, 1981.

30. ГОСТ Р 8.669-2009. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки. – М.: Изд-во стандартов, 1991.

31. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть I. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1998.

32. ISO 10816-1:1995. Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 1: General guidelines.

33. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы. – М.: ИИЦ Минздрава России № 1994.

34. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1991.

35. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990.

36. КАРПОВ Л.Н., ТИТОВ Е.А. Выбор объема контролируемых параметров судового дизеля для безразборной диагностики его технического состояния // Труды ЦНИИМФ “Техническая эксплуатация морского флота”. Транспорт, 1973. Вып. 174. С. 19-40.

37. КУРИЦ А.А., ЧЕРНЯКОВ А.А. Диагностика тепловозов и эксплуатация. В кн. Поиск неисправностей в технических системах при их производстве и эксплуатации. – Л.: ЛДНТП, 1977.– С. 77-79.
38. МАГАРИК К.Н. Износоустойчивость и ресурсы корабельных дизелей. – Л.: ВМОЛУА, 1972.
39. КОЛЛАКОТ Р.А. Диагностирование механического оборудования. – Л.: Судостроение, 1980.
40. НИКИТИН Е.А., СТАНИСЛАВСКИЙ Л.В., УЛАНОВСКИЙ Э.А. и др. Диагностирование дизелей. – М.: Машиностроение, 1987.
41. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля: практ. пособие / под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. школа, 1991.
42. ГРИЦАЙ Л.Л., ГОРБУНОВ В.Ф., КАЛУГИН В.Н., ЛЕВИН Б.М. Диагностические параметры главных судовых малооборотных дизелей // Труды ЦНИИМФ “Техническая эксплуатация морского флота”. Транспорт, 1973. Вып. 174. – С. 3-19.
43. СКУЧИК Е. Основы акустики. В 2 т. / пер. с англ.; под ред. Л.В. Лямшева – М.: Мир, 1976. Т.1.
44. ГЕНКИН М.Д., СОКОЛОВА А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987.
45. Вибрация энергетических машин: справ. пособие под ред. Н.В. Григорьева. – Л.: Машиностроение, 1974.
46. Дизели: справочник / под ред. В.А. Ваншейдта. – Л.: Машиностроение, 1964.
47. ТУЗОВ Л.В. Основные источники повышенной вибрации и шума дизелей // Транспортное машиностроение, 1960, № 5.
48. СКОБЦОВ Е.А., ИЗОТОВ А.Д., ТУЗОВ Л.В. Методы снижения вибрации и шума дизелей. – М. – Л.: Машгиз, 1962.

49. ПАВЛОВ Б.В. Акустическая диагностика механизмов. – М.: Машиностроение, 1971.
50. ХАРРИС С.М., КРИД Ч.И. Справочник по ударным нагрузкам; пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980.
51. БАЛИЦКИЙ Ф.Я. и др. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. – М.: Наука, 1984.
52. ЖДАНОВСКИЙ Н.С., АЛИЛУЕВ В.А., НИКОЛАЕНКО А.В., УЛИТОВСКИЙ Б.А. Диагностика автотракторных двигателей. – Л.: Колос, 1977.
53. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т.3. Колебания машин, конструкций и их элементов / под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1978.
54. ТУЗОВ Л.В. Методы технической диагностики дизелей 12 чн 18/20. В сб.: Двигатели внутреннего сгорания двадцать первого века. – СПб.: ГМТУ, 2000. – С. 46.
55. НИКОЛАЕНКО А.В., АЛЛИЛУЕВ В.А., ЖДАНОВСКИЙ Н.С. Техническая диагностика тракторов и зерноуборочных комбайнов. – М.: Колос 1978.
56. ЯВЛЕНСКИЙ К.В., ЯВЛЕНСКИЙ А.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. – Л.: Машиностроение, 1983.
57. КОРАБЛЕВ С.С. Вибродиагностика механических систем // Вопросы динамики и прочности. – Рига, 1983. Вып.43. – С. 40-46.
58. ЛЯПУНОВ В.Т., НИКИФОРОВ А.С. Виброизоляция в судовых конструкциях. – Л.: Судостроение, 1975.
59. ДЖЕНКИНС Г., ВАТТС Д. Спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. – М.: Мир, 1971, вып.1; 1972, вып.2.
60. БЕНДАТ Дж., ПИРСОЛ А. Прикладной анализ случайных данных / пер. с англ. – М.: Мир, 1989.

Учебное издание

Юрий Витальевич Волков

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ, АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Часть 2

Учебное пособие

Редактор и корректор Н.П.Новикова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2017 г., поз. 37

Подп. к печати 28.03.17.	Формат 60x84/16.	Бумага тип. № 1
Печать офсетная.	Печ.л. 7,5.	Уч.-изд. л. 7,5
Тираж 50 экз.	Изд. № 37.	Цена "С".
		Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.