

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА»

ЛАЗЕРНАЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
ДЕФЕКТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2008

УДК 621. 375(075)

ББК 34. 58

Л 175

Авторы: В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, С.А. Сорокина, О.В. Шулепова

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Н. Д. Б ы с т р о в

д-р техн. наук, проф. СГУ И. С. З а г у з о в

Л175 Лазерная виброакустическая диагностика дефектов многослойных конструкций : учеб. пособие / [В.И. Мордасов и др.].– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 80 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-0707-7

Изложены принципы построения лазерных систем диагностики дефектов многослойных сотовых конструкций. Выявлены основные параметры и критерии технической эффективности систем диагностирования. Использование виброакустической диагностики позволяет повысить информативность систем контроля качества продукции. Рассмотрены физические аспекты при построении математических моделей лазерной виброакустической диагностики. Описаны методики экспериментальных исследований образцов. Рассмотрены метрологические подходы обеспечения устойчивости и работоспособности виброконтрольной аппаратуры.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 200202 «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике», аспирантов и специалистов, работающих в области создания и применения лазерных диагностических систем.

УДК 621. 375(075)

ББК 34. 58

ISBN 978-5-7883-0707-7

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2008

Светлой памяти
Заслуженного деятеля науки и техники РФ
профессора, доктора технических наук
Владимира Ивановича Кузнецова

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	8
1.1. Назначение виброакустической диагностики.....	10
1.2. Системы виброакустического диагностирования общего назначения.....	11
1.3. Использование вычислительной техники в системах виброакустического диагностирования.....	14
ГЛАВА 2. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	22
2.1. Фильтрация (частотная селекция) виброакустического сигнала.....	22
2.2. Выделение огибающей виброакустического сигнала.....	23
2.3. Стробирование (временная селекция).....	23
2.4. Синхронное накопление.....	24
2.5. Алгоритм диагностирования.....	25
ГЛАВА 3. НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ.....	33
3.1. Методы ударных импульсов.....	33
3.2. Метод спектрального анализа амплитудной огибающей вибросигнала на резонансной частоте датчика ("резонансный метод").....	34
3.3. Метод формирования n- мерного вектора кратных гармоник спектра огибающей вибросигнала на резонансной частоте узла механизма.....	36
3.4. Формирование n - мерного вектора кратных гармоник спектра огибающей вибросигнала в окрестности основных частот возбуждения механизма.....	37
3.5. Обнаружение зарождающихся дефектов по величине коэффициента эксцесса.....	37
3.6. Метод выделения когерентной составляющей.....	38

3.7. Принципы построения аппаратуры для виброакустической диагностики.....	39
ГЛАВА 4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЛАЗЕРНО-МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВИБРОКОНТРОЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ.....	54
4.1. Виброконтрольная аппаратура.....	54
4.2. Лазерный измеритель виброперемещения.....	59
ГЛАВА 5. МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ.....	65
5.1. Область применения методики выявления повреждений.....	65
5.1.1. Разработка методики использования лазерных измерительных систем для выявления поверхностных повреждений.....	65
5.1.2. Выбор параметров оптической системы.....	67
5.1.3. Область применения разработанной методики.....	68
5.2. Устройство для обнаружения повреждений.....	70
5.2.1. Аналитические зависимости характеристик отражённого сигнала.....	70
5.2.2. Описание испытательного оборудования.....	74
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	77

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- S_x - энергетический спектр сигнала $y(t)$;
- S_y - огибающая узкополосного процесса;
- $A_x(t)$ - фаза узкополосного процесса;
- $\varphi_x(t)$ - средняя частота сосредоточения энергетического спектра;
- ω_0 - энергетический спектр;
- Δt - параметр диагностирования;
- z_1 - параметры технического состояния;
- $p(x)$ - плотности вероятности;
- f_p - собственная частота, Гц;
- $P(x)$ - закон распределения сигнала;
- f_z - зубцовая частота, Гц;
- $\max|p_{xy}|$ - функция взаимной корреляции вибросигнала;
- $f_{бок}$ - боковая частота, Гц;
- $f_{об}$ - оборотная частота, Гц;
- $\tau_{об}$ - время одного оборота, с;
- $f_{мод}$ - частота модуляции, Гц;
- U_H - напряжение полезного сигнала, В;
- U_3 - напряжение полезного сигнала на выходе усилителя заряда, В;
- ΔT - изменение температуры окружающей среды, °С;
- $S(t)$ - механические колебания;
- K_p - отношение коэффициента передачи усилителей заряда и напряжения;
- ω_1, ω_2 - круговые частоты, рад;
- α_1, α_2 - модули комплексных напряжений;
- φ_1, φ_2 - аргументы комплексных напряжений;
- δx - относительное измерение параметра вибрации x , %;
- Δx - абсолютное измерение параметра вибрации x ;
- I - интенсивность вибраций;
- δ_{xk} - относительная погрешность калибровки, %;
- δ_{xn} - относительная погрешность колебаний вибростола, %;
- δ_{xt} - относительная погрешность температурной зависимости, %;
- $\delta_{xпр}$ - относительная погрешность прочих факторов, %;
- $\delta_{ид}$ - погрешность измерения воспроизводимых колебаний в идеальных условиях, %;
- λ - длина волны, м;
- $\Delta\lambda$ - погрешность измерения длины волны, %.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития техники и технологии диктует жёсткие требования к качеству деталей, узлов и механизмов. Такие же требования предъявляются и к методам контроля качества. Среди современных методов контроля качества изделий машиностроения в настоящее время всё больше находят применение лазерные методы, в частности - лазерные измерительные системы. Их преимущества - бесконтактность, высокая информативность, быстрое действие, возможность работы в реальном масштабе времени. Сканирование лазерного излучения и визуализация изображения применяются для обнаружения поверхностных трещин, дефектов сварных швов и резьб, определения шероховатости и износа поверхности.

При выявлении дефектов внутренней структуры изделий используются различные методы - нагрев лазерным источником излучения поверхности - с одной стороны и регистрация теплового потока - с другой, исследование акустической эмиссии дефектов на «просвет» и так далее. Но при выявлении дефектов больших конструкций все эти методы трудно реализуются, поэтому используют методы виброакустической диагностики, которая позволяет не только обнаружить дефекты, но и более детально их исследовать. В основе лазерной виброакустической диагностики лежит явление модуляции акустическими волнами оптического сигнала. В совокупности с другими методами диагностики сфера применения лазерных методов расширяется. Подобные средства позволяют контролировать в процессе изготовления и эксплуатации изделий геометрические параметры их элементов конструкций: размеры, форму, расположение и др. Сканирование лазерного излучения и визуализация изображений имеют превосходство перед другими способами контроля. В связи с этим данное направление исследования по совершенствованию подобных лазерных измерительных систем является своевременным и актуальным.

Применение разработанной методики лазерной дефектоскопии позволило повысить уровень использования изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками, в том числе с повышенной адгезионной и когезионной прочностью, на 20%.

Глава 1. ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В настоящее время в мировой практике создания машинных агрегатов актуальной остается проблема обеспечения надежности их работы и проблема безразборного контроля и прогнозирования технического состояния. Дальнейшее увеличение ресурса и повышение надежности машин и механизмов в многих отраслях техники предполагают переход на эксплуатацию технических объектов по фактическому состоянию, а это возможно только при наличии эффективных методов и средств диагностирования [1-6].

Отечественный и зарубежный опыты показывают, что внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования машин и механизмов в народном хозяйстве. Назначение диагностики - не только выявление, но и предупреждение отказов и неисправностей, поддержание нормальных регулировок эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование состояния в целях полного использования доремонтного и межремонтного ресурсов.

Виброакустическая диагностика, являясь одним из разделов технической диагностики, обладает рядом особенностей, выделяющих ее в отдельную отрасль знаний. Основной отличительной особенностью акустической диагностики является использование в качестве источника информации не статических параметров, характеризующих состояние механизма (температуры, давления, состава масла или газа и т.п.), а динамических, вызывающих появление и распространение акустических волн как в самом механизме, так и в окружающей его среде. Форма диагностической информации, заключенной в колебательном процессе независимо от природы его возникновения и способа регистрации, чрезвычайно многообразна. Широкий частотный и динамический диапазоны, малая инерционность, большая скорость распространения обуславливают быструю реакцию акустического сигнала на изменение состояния объекта, что является незаменимым качеством в аварийных

ситуациях, когда определяющим фактором является скорость постановки диагноза и принятия решения.

Наметившаяся тенденция к специализации методов и средств диагностирования отдельных узлов и элементов механизма и усложнению алгоритмов формирования диагностических признаков и процедуры постановки диагноза не случайна. Необходимость перехода от контроля работоспособности технического объекта к диагностированию зарождающихся дефектов приводит к необходимости поиска диагностических признаков, реагирующих на незначительные отклонения параметров технического состояния от нормы. В данной ситуации уровень акустического сигнала в широкой полосе или спектральная плотность мощности в октавной, 1/2- или 1/3-октавной полосах являются слабочувствительными характеристиками технического состояния механизмов.

В связи с этим делаются попытки разработки диагностических систем и отдельных алгоритмов диагностирования на базе диагностических признаков, сформированных из таких характеристик виброакустических процессов, как динамический спектр, кепстр, биспектр, бикогерентность, статистические моменты одномерного и двумерного законов распределения. При обработке сигналов применяются методы оптимальной и гребенчатой фильтрации, синхронного детектирования, резонансного усиления и другие методы подавления помех и извлечения полезной информации, определяющие специфику виброакустической диагностики зарождающихся дефектов работающих машин и механизмов.

Научные основы акустической диагностики разрабатываются на базе общей теории технической диагностики, теории информации, теории сигналов, математической статистики, распознавания образов, теории колебаний, электроники, вычислительной техники др. Методы акустической диагностики получают все большее применение при изготовлении, эксплуатации и ремонтных работах машин и механизмов.

Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов — относительно новое направление в диагностике, обеспечивающее обна-

ружение дефектов функционирующих машин и механизмов на ранней стадии до появления в узлах механизмов необратимых катастрофических изменений. Важность этой проблемы определяется не только возможностью предотвращения аварийных ситуаций и прогнозирования остаточного моторесурса, т.е. обеспечением надежности механического оборудования, но и возможностью исключения ремонта бездефектных узлов и уменьшения потерь на их восстановление.

1.1. Назначение виброакустической диагностики

Физическим носителем информации о состоянии элементов работающего механизма в виброакустической диагностике является виброакустический сигнал — собирательное понятие, включающее не только информацию об акустическом шуме механизма в окружающей среде, но и о других колебательных процессах (вибрационных, гидро- или газодинамических и пр.) [6].

Виброакустическому диагностированию могут подвергаться любые технические объекты, функционирование которых сопровождается возбуждением колебательных процессов. Данная работа затрагивает в основном проблемы диагностирования зарождающихся дефектов узлов машин и механизмов циклического действия и роторных механизмов. Всякое отклонение от нормы параметров функционирования и структуры технического объекта приводит к изменению характера взаимодействия его элементов, а следовательно, и к изменению сопровождающих его взаимодействие виброакустических процессов.

По фактическим характеристикам объекта можно судить о его состоянии, в частности:

- исправности, т.е. состоянии, при котором объект исследования соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией;

- работоспособности, т.е. состоянии, при котором объект способен выполнять заданные функции в пределах, установленных нормативно-технической документацией; проверку работоспособности объекта осуществляют на стадии эксплуатации, она может быть менее полной,

чем проверка исправности, т.е. может оставлять необнаруженные неисправности, не препятствующие применению его по назначению;

- правильности функционирования, т.е. состоянии объекта, при котором он выполняет в текущий момент времени предписанные ему алгоритмы функционирования; проверка правильности менее полна, чем проверка работоспособности, так как она позволяет убедиться лишь в том, что объект правильно функционирует в данном режиме работы в данный момент времени.

Методами виброакустической диагностики двигателя в эксплуатации выявляют: попадание посторонних предметов в компрессор, дисбаланс роторов, обрыв рабочих лопаток, выкрашивание обойм подшипников и увеличение зазоров в них, выкрашивание и износ зубьев шестерен, несоосность валов и другие неисправности ГТД.

Ведутся работы по созданию систем диагностирования на переходных режимах с использованием разнообразных методов синхронного следящего анализа с частотой, функционально связанной с оборотной частотой ротора. Наиболее универсальным и прошедшим проверку на практике является прибор 6727 фирмы "Эндевко". Из отечественной аппаратуры того же назначения высоким качеством обладает многоканальный синхронно-следящий анализатор составляющих взаимного спектра, предназначенный для одновременного автоматического измерения модуля и фазы взаимных спектров пяти пар сигналов.

1.2. Системы виброакустического диагностирования общего назначения

Использование средств вибродиагностирования позволяет: предотвратить внезапные отказы благодаря расширению контроля за работой механизмов и узлов; исключить вскрытие механизмов и узлов для определения их технического состояния; перейти от планового технического обслуживания к обслуживанию в зависимости от технического состояния; определить экономические показатели работы механизмов.

Современные диагностические средства, базирующиеся на анализе информации, содержащейся в виброакустических процессах, сопро-

вождающих функционирование машин и механизмов, условно можно разбить на две группы.

Первая группа включает системы диагностирования, предназначенные для контроля текущих значений виброакустических характеристик любых работающих машин и механизмов и сравнения их с предельными значениями, приводящими к поломкам и авариям. При сближении текущих и предельных значений включается аварийная сигнализация и срабатывает система защиты механизма от возможной аварии.

В то же время есть ряд механизмов, уровень вибраций которых не определяет их пригодность по вибрационному допуску. Аналогичные выводы были получены при исследовании воздушного шума различных машинных агрегатов. Эти выводы подтверждают точку зрения ряда исследователей о необходимости привлечения для целей диагностики не только энергетических, но и других характеристик виброакустических процессов, более чувствительных к изменению параметров технического состояния диагностируемых объектов.

Вторая группа диагностических средств базируется на использовании оптимального алгоритма обработки акустического сигнала и предназначена для более глубокого диагностического анализа виброакустических процессов, чем обнаружение аварийных или предаварийных состояний. Такого рода анализ осуществляется с помощью сложных алгоритмов диагностирования и позволяет обнаруживать дефекты на ранней стадии их развития, а в ряде случаев и локализовать и идентифицировать дефект. Диагностические приборы и системы этой группы более специфичны, поскольку они служат для определения параметров технического состояния конкретных механизмов или их узлов. Помимо спектральных характеристик существует огромное разнообразие параметров акустического сигнала, которые можно с успехом использовать для формирования диагностических признаков технического состояния функционирующих машин и механизмов. Часть из них (взаимные спектры, кепстры, моментные характеристики одномерного закона распределения) получила довольно широкое распространение.

Однако большая часть проходит испытание временем. Эти средства, как более дорогостоящие и менее доступные в техническом отношении, используют главным образом в исследовательских целях на стадиях проектирования и доводки механического оборудования, а также при разработке методов диагностирования отдельных узлов и деталей механизмов, находящихся в эксплуатации.

Системы функционального диагностирования дают возможность немедленно реагировать на нарушение правильности функционирования объекта и в ряде случаев обеспечить нормальное или хотя бы частичное (с потерей качества) выполнение объектом возложенных на него функций даже при наличии неисправностей. Диагностирование осуществляется аппаратными или программными, встроенными или внешними техническими средствами, реализующими тот или иной алгоритм диагностирования, который задает состав, очередность и способ анализа, цель которого — определение технических состояний, в одном из которых находится объект. Результат диагностирования желательно представлять в форме, удобной для практической реализации. В простейшем случае расшифровка результатов диагностического анализа может представлять собой обычное сравнение текущих значений диагностических характеристик в контрольных точках с эталонными значениями. В других случаях для проведения расшифровки требуется использование более сложных алгоритмов. При недостаточном уровне автоматизации процесса диагностирования функции расшифровки могут быть возложены на человека.

Знание технического состояния объекта может быть использовано для различных целей, например для выбора и применения другого алгоритма диагностирования, позволяющего более точно определить техническое состояние объекта, или для организации специальных воздействий на объект.

Диагностическая система состоит из двух подсистем: первичной и вторичной. Первичная система предназначена для сбора информации и регистрации ее на магнитной ленте; она состоит из датчиков колебаний различного типа (акселерометров, тензодатчиков, токовихревых датчи-

ков смещения, датчиков крутильных колебаний, микрофонов), согласующих устройств, усилителей и многоканального магнитофона. Вторичная система предназначена для ввода и обработки информации и может включать в себя как ЭВМ, так и комплекс аналоговой аппаратуры.

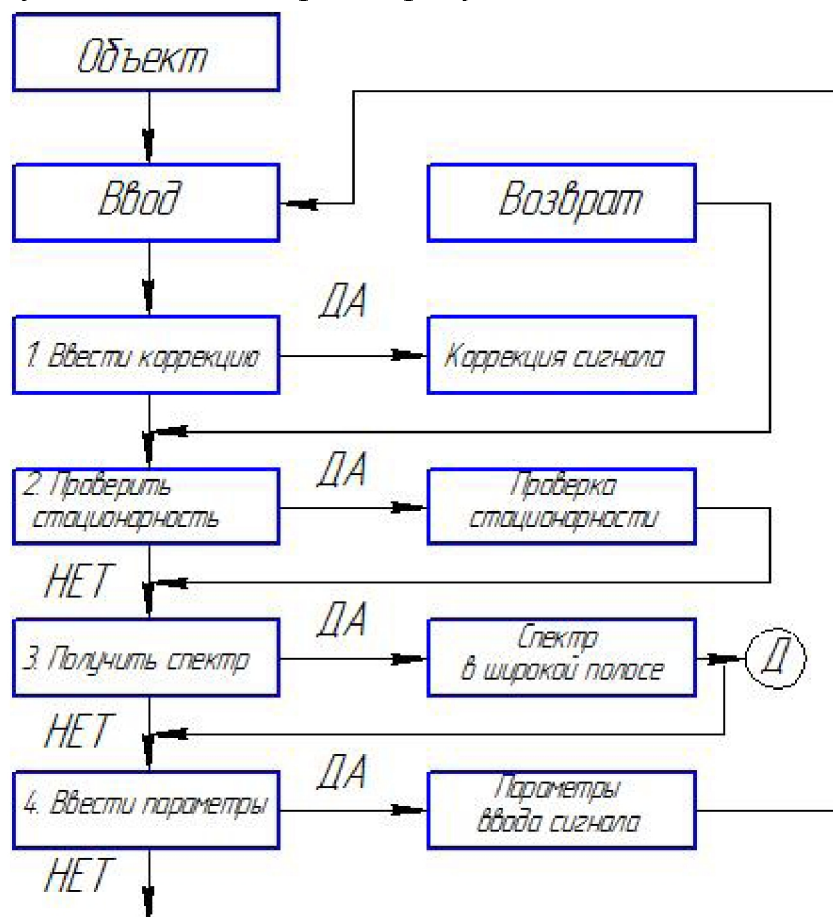
1.3. Использование вычислительной техники в системах виброакустического диагностирования

Виброакустическая диагностика основана на использовании информации, заложенной в колебательных процессах, возбуждаемых работающим механизмом. Вибропроцесс представляет собой стохастический процесс, статистические методы анализа которого требуют обработки значительного объема информации и, следовательно, привлечения вычислительной техники с большой емкостью памяти, быстродействие и гибкость которой дают возможность использовать ее для построения систем вибродиагностирования. Поэтому современные системы виброакустической диагностики базируются на использовании вычислительной техники, которая позволяет реализовать ряд как простых, так и сложных алгоритмов диагностирования технического состояния различных механизмов. В настоящее время все более широкое применение в системах диагностирования находят мини- и микро-ЭВМ, оснащенные алгоритмами обработки, анализа и классификации виброакустических характеристик.

На рис. 1.1, *a* представлена обобщенная структурная схема автоматизированной базовой системы виброакустического диагностирования на основе мини-ЭВМ «Плюримат-С» [7].

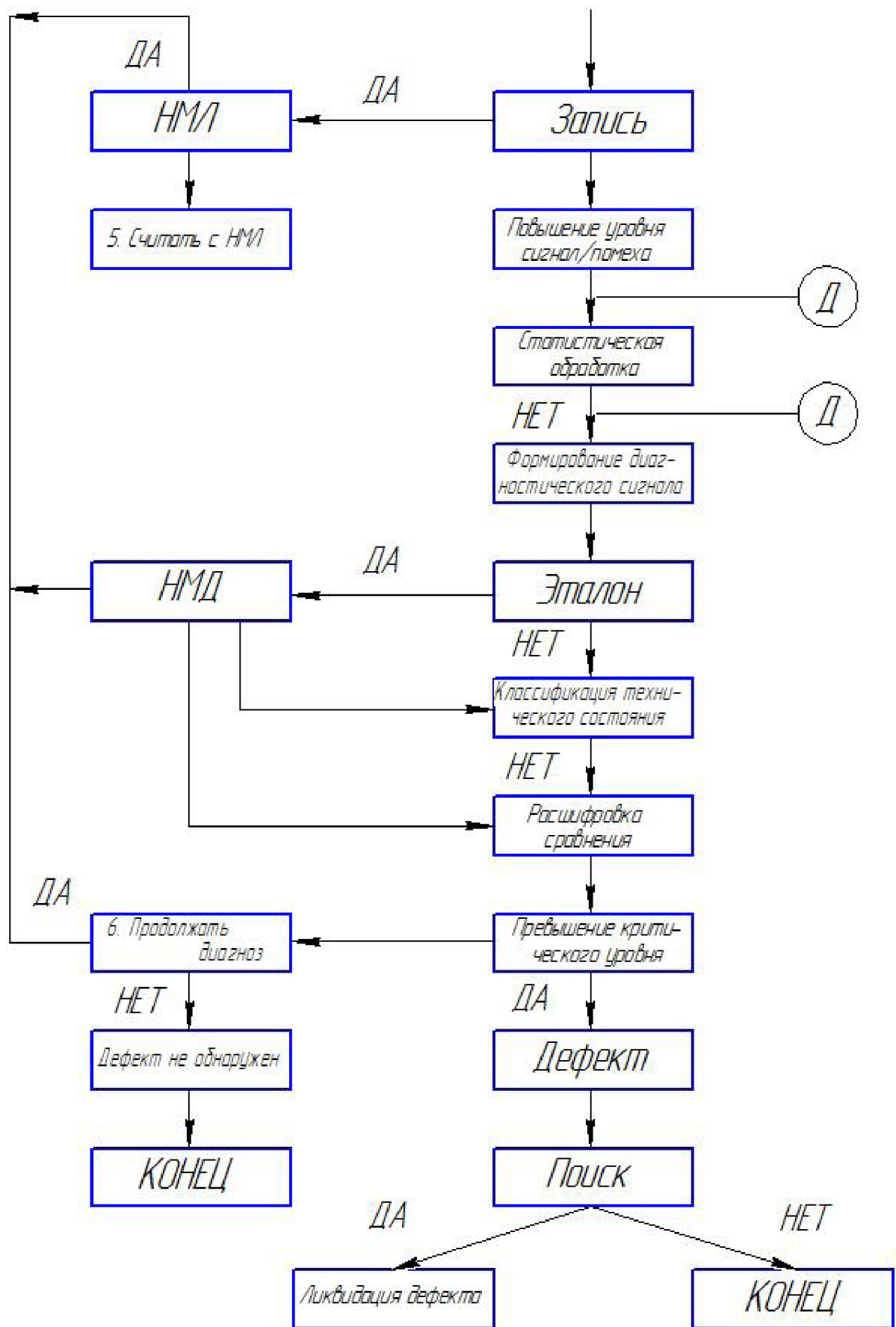
Система включает в себя комплекс модульных программ, позволяющих реализовать различные алгоритмы диагностирования дефектов функционирующих механизмов. Алгоритм диагностирования задает состав, очередность и способ диагноза и в зависимости от цели может быть простым, если требуется установить лишь работоспособность механизма, и сложным, когда осуществляется более тонкий, более глубокий диагноз, позволяющий не только обнаружить, но и локализовать неисправность.

Блок "Ввод" (рис. 1.1, а) осуществляет одно- или многоканальный ввод виброакустического сигнала с объекта или регистрирующего устройства. Ввод контролируется с помощью дисплея, что позволяет видеть форму сигнала и принять меры в случае его искажения. При необходимости поступающий в ЭВМ вибросигнал корректируется вводом масштабных коэффициентов (например, при приведении к натуральным масштабам), устраняется постоянная составляющая, убирается тренд и т.д. На следующем этапе сигнал проверяется на стационарность с помощью одномерных законов амплитудного распределения или моментов первого и второго порядка (математическое ожидание, дисперсия), тем самым определяется степень нестационарности процесса и устанавливаются длина и количество реализаций для усреднения с целью получения достоверных результатов.



а

Рис. 1.1, а. Обобщенная структурная схема автоматизированной базовой системы виброакустического диагностирования на основе мини-ЭВМ «Плюримат-С» (см. также с. 16)



б

Рис. 1.1, б. Окончание

Блок "Спектр в широкой полосе" (рис. 1.1, б) вычисляет и представляет на дисплее спектр процесса. Спектральное представление вибросигнала определяет, в какой полосе и с какой разрешающей способностью следует вести дальнейший анализ для получения информативных диагностических признаков, позволяет в ряде случаев определить способ повышения уровня сигнал/помеха, помогает в выборе алгоритма диагностирования. Так, наличие в спектре характерных частот в определенной полосе предполагает фильтрацию, наличие модуляционных частот, выделение огибающей процесса, наличие полигармонических рядов, использование кепстрального анализа и т.д.

Все описанные выше операции производят предварительную подготовку виброакустического сигнала к направленной обработке и задают режим ввода для последующего анализа, т.е. определяют такие параметры ввода вибросигнала, как длина реализаций, их количество и частота дискретизации процесса. Дальнейшую обработку сигнала, его статистический анализ можно проводить, получая сигнал непосредственно с объекта (с помощью каналов связи), с регистрирующего устройства (чаще магнитофона), но удобнее предварительно записать сигнал в долговременную память ПЭВМ для автоматизации процесса обработки.

Улучшенный одним из этих способов сигнал подвергается статистической обработке. Блок "Статистическая обработка" включает в себя программы спектрального, корреляционного и вероятностного анализа [7]. Спектрально-корреляционный анализ основан на использовании алгоритма быстрого преобразования Фурье и позволяет получить такие характеристики, как авто- и взаимный спектры (модуль, фаза, функция когерентности), биспектр (модуль, бифаза, бикогерентность), кепстр, авто- и взаимная функции корреляции и т.д.

Вероятностный анализ включает в себя получение таких характеристик, как одномерные законы распределения вероятностей и их моменты до k -го порядка; двумерные законы распределения вероятностей и их характеристики: линии регрессии, скедастические линии, корреляционное отношение и т.д. Способ статистической обработки опреде-

ляется характером изменения структуры виброакустического сигнала при функционировании механизма.

В случае стационарного гауссовского процесса [7] спектр мощности дает достаточно полную информацию о статистических свойствах процесса, однако спектр не является помехоустойчивой характеристикой и подавляет практически всю фазовую информацию, а она зачастую представляет интерес, позволяя обнаружить дефект на ранней стадии его развития. В этом случае полезным оказывается биспектральный анализ.

Если развитие дефекта в механизме, особенно на ранней стадии, не влияет на спектральные характеристики (например, появление в сигнале нерегулярных выбросов), для диагностирования используются моментные характеристики процесса или форма его закона распределения вероятностей амплитуд. Возникновение и развитие неисправностей могут привести к нелинейным явлениям в вибрационных процессах, для обнаружения которых рекомендуется прибегать к регрессионному и дисперсионному анализу.

Следующая операция осуществляет формирование диагностического признака технического состояния механизма, представляя его в виде числовых значений, в виде n -мерных векторов для одномерных характеристик или в виде матриц для двумерных. Если полученный диагностический признак (или набор диагностических признаков) характеризует эталонное состояние механизма, то он запоминается в ЭВМ. Сравнение диагностических признаков эталонного и текущего состояний производится блоком "Классификация технических состояний" (рис. 1.2) способом, наиболее очевидным для векторных образов, а именно с интерпретацией векторов как точек в евклидовом пространстве и оценкой их близости, т.е. с классификацией образов по критерию минимума расстояния.

Другой способ классификации — распознавание по степени схожести двух состояний с помощью N -мерной корреляции (рис. 1.2).

Для расшифровки результатов диагностирования и принятия решения о состоянии механизма система должна располагать информа-

цией о поведении правильно и дефектно функционирующего механизма. В ряде случаев достаточно задания допустимых значений контролируемых параметров. Решающее правило — превышение диагностическим признаком или расстоянием его от эталона некоторого порогового уровня, величина которого зависит от типа механизма и определяется экспериментально на этапе обучения системы. В случае превышения порогового уровня система характеризует механизм как неисправный. При желании диагностирование может быть продолжено, и более тонкий анализ позволяет не только обнаружить, но и локализовать, а в ряде случаев и идентифицировать дефект. Но при этом требуется формирование нового алгоритма диагностирования.

В настоящее время все большее применение в автоматизированных системах контроля и диагностирования находят ПЭВМ благодаря своей компактности и транспортабельности. Особенно широко микро-ЭВМ используются в системах, применяемых в авиации и на флоте. В качестве прототипа переносной легко транспортируемой диагностической системы создана диалоговая система диагностирования на базе спектрального анализатора типа 2033 фирмы "Брюль и Кьер" и сопряженной с ним настольной микро-ЭВМ "Хьюлетт-Паккард" типа 9825 В [7]. Система предназначена для диагностирования состояний механизма на основе статистического и гармонического анализа сигналов в реальном масштабе времени. Сочетание анализаторов 2033 и ПЭВМ позволяет полностью использовать преимущества первичной обработки сигнала в анализаторе и вторичной цифровой обработки с применением ПЭВМ. Система диагностирования использует одноканальный ввод сигналов с частотами от 1 до 20 кГц через аналого-цифровой преобразователь анализатора. Имеющийся в анализаторе блок быстрого преобразования Фурье позволяет получать усредненные спектры в реальном масштабе времени; на дисплей анализатора можно вывести выборки временной функции, спектры в линейном или логарифмическом масштабе и результаты вторичной обработки сигналов на ПЭВМ.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

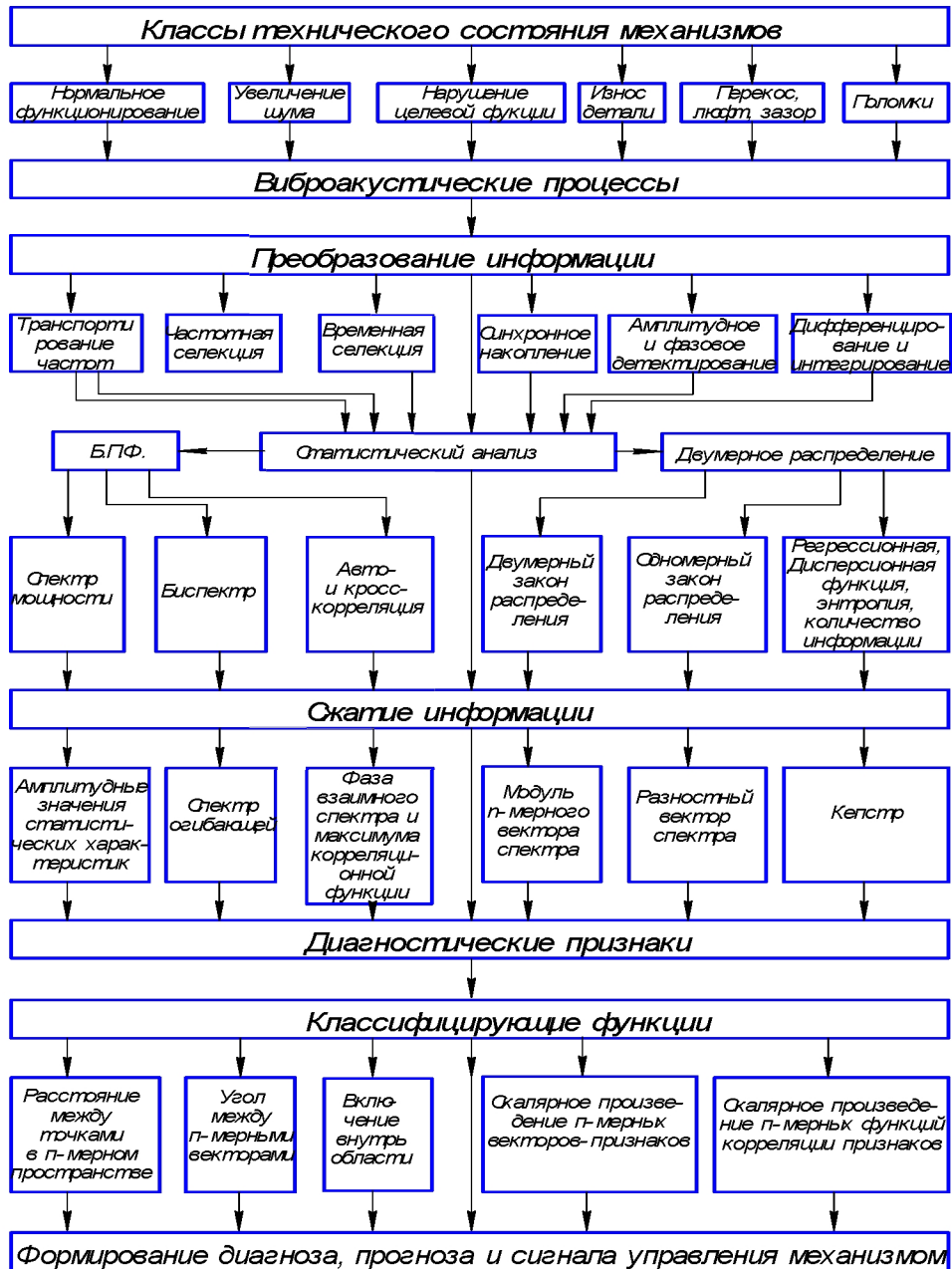


Рис. 1.2. Этапы диагностирования технического состояния механизма

Разработанное программное обеспечение на ПЭВМ "Хьюлетт-Паккард" позволяет в соответствии с упомянутой выше методикой осуществлять получение статистических характеристик процесса, формирование диагностических признаков, выбор наиболее информативных признаков, устанавливать соответствие параметров состояния технической системы диагностическим признакам и с помощью решающих правил оценивать состояния механизмов. Математическое обеспечение системы позволяет для диагностирования состояния механизма

производить как сигнатурный анализ (т.е. определять дефектные состояния механизма сравнением усредненного 1/3-октавного спектра вибросигнала с маской эталонного спектра нормального состояния), так и использовать метрические методы распознавания образов, формируя в качестве набора диагностических признаков n-мерные векторы, компонентами которых являются спектральные составляющие характеристик.

Глава 2. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

При первичной обработке измерительной информации рассмотрены основные приемы обработки измерительной информации, повышающие информативность виброакустического сигнала. Основной предпосылкой для выбора того или иного метода увеличения отношения сигнал/помеха являются физические соображения, связанные с моделью формирования виброакустического сигнала [6,7].

2.1. Фильтрация (частотная селекция) виброакустического сигнала

Назначением операции частотной селекции является выделение информативной компоненты акустического сигнала в ограниченной полосе частот. Основание для фильтрации сигнала – присутствие аддитивных помех, маскирующих компоненты, содержащие информацию о состоянии диагностируемого узла механизма. Выделение компонент гармонического ряда частот вынужденных колебаний, выделение резонансной частоты системы, отделение оборотных компонент от высокочастотных — вот далеко не полный перечень задач, когда необходимо применять операцию частотной селекции. Если $x(t)$ — стационарный случайный процесс на входе фильтра, то на выходе фильтра процесс $y(t)$ определяется выражением

$$y(t) = \int_0^{\infty} h_{\phi}(t')(t - t') dt' \quad (1)$$

или в частотной области

$$S_Y(\omega) = |H_{\phi}(\omega)|^2 S_X(\omega), \quad (2)$$

где h_{ϕ} — импульсная переходная функция; H_{ϕ} — передаточная функция фильтра; S_X , S_Y — энергетические спектры сигналов $x(t)$ и $y(t)$ на входе и выходе фильтра.

Для выделения полезного сигнала используют фильтры верхних и нижних частот (ФВЧ и ФНЧ), полосовые фильтры (ПФ), гребенчатые фильтры (ГФ), синхронные фильтры (СФ).

2.2. Выделение огибающей виброакустического сигнала

В общем случае узкополосный процесс при достаточно широких предположениях [7] может быть представлен в виде

$$x(t) = A_x(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_x(t)],$$

где $A_x(t)$ и $\varphi_x(t)$ — огибающая и фаза процесса, медленно изменяющиеся по сравнению с $\cos \omega_0 t$; ω_0 — средняя частота сосредоточения энергетического спектра $S_x(\omega)$.

Выделение огибающей $A_x(t)$ производится либо с помощью специальных электронных устройств — амплитудных детекторов, а $\varphi_x(t)$ с помощью фазовых детекторов, либо на ЭЦВМ с помощью преобразования Гильберта.

2.3. Стробирование (временная селекция)

Стробирование акустического сигнала применяется для выделения периодического процесса, жестко связанного с определенной фазой кинематического цикла механизма.

Выделение необходимой информации о состоянии диагностируемого узла возможно при использовании процедуры временной селекции сигнала $x(t)$ в соответствии с формулой

$$y(t) = \sum x(t)g(t - kT - \tau),$$

где T — период следования ударных импульсов процесса

$$g(t) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases};$$

1 при $kT + \tau + t' \leq t \leq kT + \tau + t''$, 0 для всех других t ;

$\Delta t = t'' - t'$ — ширина стробирующего импульса; t — время запаздывания стробирующего импульса $g(t)$ относительно синхроимпульса $\xi(t)$ с датчика оборотов одной из вращающихся деталей механизма.

Результирующим процессом является последовательность импульсов нужной длительности Δt , идущих с периодом T протекающего в системе физического процесса $x(t)$. Регулируемыми параметрами временного селектора являются задержка импульса t относительно

синхроимпульса и длительность импульса Δt . Одним из вариантов приборной реализации временного селектора является прибор фирмы "Брюль и Кьер" типа 2972, называемый "электронными воротами".

2.4. Синхронное накопление

Для выделения периодической компоненты акустического сигнала на фоне аддитивной шумовой помехи применяют метод синхронного накопления.

Существуют два основных подхода к задаче распознавания образов: вероятностный и детерминистский, которые, однако, не противоречат друг другу. В обоих случаях требуется найти решающее правило, с помощью которого предъявленная совокупность признаков была бы отнесена к одному из возможных классов состояний. При вероятностном подходе области существования как состояний, так и признаков пересекаются каждый из признаков лишь с определенной вероятностью, что характеризует состояние системы. При детерминистском подходе предполагается, что классы состояний не пересекаются, так как вероятность одного диагноза равна единице, вероятность других равна нулю, а каждому классу W_i соответствует некоторая замкнутая область D_i в n -мерном пространстве признаков. Задача, таким образом, сводится к установлению взаимно однозначного соответствия между пространством признаков D и пространством технических состояний W , причем задача распознавания формулируется на геометрическом языке.

Как для описания классов состояний, так и для описания классов диагностических признаков используются вероятностные меры, отображающие свойства целого класса. Характеристикой центра области существования класса служит усредненный образ данного класса, или эталон V_i . Разброс параметров внутри одного класса (вследствие влияния временного фактора или отличий реализаций технического состояния для разных экземпляров однотипных механизмов или их узлов) оценивается с помощью дисперсии – меры рассеивания. Для того чтобы задача диагностики была разрешимой, расстояния d_{lg} , d_{kg} от этало-

нов до границ области должны быть меньше, чем расстояние d_{lg} между точками, принадлежащими разным классам (рис. 2.1).

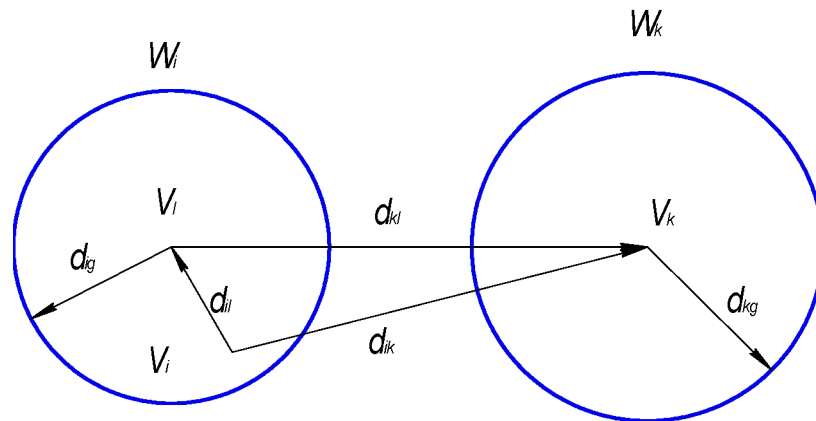


Рис. 2.1. Пространство диагностических признаков, соответствующих состояниям механизма W_i и W_k : V_i и V_k – точки, характеризующие эталонные векторы; V_i – точка, характеризующая испытуемое изображение; d_{ik} – расстояние от эталонов до границ областей; d_{il} – расстояние от испытуемого вектора до эталонов

Степень близости вектора диагностических признаков к одному из эталонных оценивается с помощью классифицирующих функций.

2.5. Алгоритм диагностирования

Совокупность последовательных действий при постановке диагноза называется алгоритмом диагностирования. Алгоритм диагностирования опирается на диагностическую модель, которая устанавливает связь между состояниями механизма и их отображениями в пространстве диагностических признаков. Диагностическая модель процессов возбуждения и распространения колебаний в механизме в ряде случаев помогает сформировать систему характерных диагностических признаков.

Алгоритмы диагностирования разрабатываются на основе предварительного обучения и включают формирование системы информативных диагностических признаков, построение эталонных изображений для каждого класса технических состояний и разработку правил принятия решений о принадлежности к тому или иному классу состояний.

Если к дефекту механизма отнесена и его повышенная виброак-

тивность, выходящая за допустимые рамки, то этапом диагностических исследований, предшествующим этапу установления связи между вектором V диагностических признаков и вектором параметров технического состояния 2, является локализация источников повышенного уровня колебательной энергии. При этом различаются два возможных варианта: либо источники шума независимы, либо они статистически связаны. Уровень трудностей, обусловленный необходимостью разделения влияния коррелированных источников, намного усложняет процедуру постановки диагноза.

Эффективность процессов постановки диагноза определяется не только качеством алгоритма диагностирования, но и в не меньшей степени качеством средств диагностирования. Эффективная организация системы сбора и обработки информации, увеличивающая достоверность диагностирования, уменьшающая влияние субъективных факторов, а также уменьшающая затраты времени, труда и средств, включает разработку автоматизированной системы виброакустического диагностирования сложного объекта уже на стадии его проектирования как необходимую составную часть объекта.

Структура системы виброакустического диагностирования выбирается следующим образом. Диагностирование технического состояния машин и механизмов осуществляется с помощью тех или иных средств (вычислительных и аппаратурных). Взаимодействующие между собой объект и средства диагностирования образуют диагностическую систему. Существуют два вида систем: тестового и функционального диагностирования. Отличительная особенность системы тестового диагностирования состоит в возможности подачи на механизм специально организуемых тестовых воздействий. В системах функционального диагностирования входными воздействиями являются рабочие воздействия, предусмотренные алгоритмом функционирования механизма. В акустической диагностике чаще всего применяется второй подход, так как специфика взаимодействия деталей и узлов механизмов не всегда позволяет заменить естественные воздействия искусственно сформированными.

Процесс постановки диагноза может состоять из отдельных частей, называемых элементарными проверками, каждая из которых характеризуется подаваемым на вход объекта тестовым или рабочим воздействием и снимаемым с выхода объекта ответом. Результатом элементарной проверки является полученное при ее реализации значение ответа объекта. Формальное описание алгоритма диагностирования технического состояния объекта представляет собой безусловную или условную последовательность элементарных проверок и правил анализа результатов последних.

Одним из факторов, существенно влияющих на эффективность данного процесса, является качество алгоритмов диагностирования. Возможность оптимизации алгоритмов определяется следующими обстоятельствами. Число элементарных проверок, достаточных для решения конкретной задачи, как правило, меньше всех допустимых (т.е. физически всех возможных и реализуемых) элементарных проверок данного объекта. Для решения одной и той же задачи можно построить несколько алгоритмов, различающихся между собой либо составом элементарных проверок, либо последовательностью их реализации, либо тем и другим вместе.

Построение оптимальных алгоритмов, как правило, сопряжено с большими вычислительными трудностями, а интуитивные методы не всегда могут гарантировать получение объективного заключения о действительном техническом состоянии объекта. Отсюда следует необходимость привлечения формальных методов, что особенно важно для сложных объектов, состоящих из множества функционально и конструктивно взаимосвязанных компонентов. Применение формальных методов кластеризации позволяет, кроме того, автоматизировать процессы построения алгоритмов диагностирования при помощи вычислительных средств.

В виброакустической диагностике в настоящее время наиболее распространенными являются эвристические методы диагностирования, основанные на неформальном диалоговом взаимодействии вычислительной машины и человека-оператора. Видимо, это связано с не-

формальными способами построения из характеристик акустического сигнала системы информативных диагностических признаков, часто отражающих физическую сущность происходящих в механизме, трудно формализуемых изменений параметров технического состояния.

Создание системы диагностирования предполагает решение целого ряда взаимосвязанных задач:

- детальное изучение самого объекта с целью выявления наиболее уязвимых мест и составления перечня параметров $z_1, z_2 \dots z_m$, выходящих за допустимые нормы, и разбиение на классы $W = \{W_1, W_2, \dots, W_m\}$ технических состояний, подлежащих распознаванию;

- выбор необходимых средств измерения виброакустических параметров и мест размещения первичных вибропреобразователей на объекте;

- локализация источников излучения повышенной колебательной энергии в исследуемом механизме или машине;

- определение динамических характеристик и математических моделей отдельных узлов, агрегатов и объекта диагностирования в целом в целях построения диагностической модели;

- осуществление синтеза системы диагностических признаков $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, чувствительных к изменению параметров технического состояния, установка их пороговых значений по исходной информации о виброакустических параметрах, результатам обработки, увеличивающей отношение сигнал/помеха, и математическим моделям объекта;

- разработка алгоритмов определения текущего технического состояния механизма;

- прогнозирование изменений виброакустических характеристик и параметров технического состояния;

- разработка процедуры обратного воздействия на объект контроля в соответствии с принимаемыми решениями о его фактическом состоянии (выключение, перевод на щадящий режим и т.п.).

Функциональная блок-схема системы диагностирования может быть представлена в виде, изображенном на рис. 2.2.

Система диагностирования технического состояния машин и механизмов, как и любая другая система распознавания образов, состоит: из объекта исследований 1 (см. рис. 2.2.) с набором технических состояний, подлежащих, распознаванию; блоков формирования диагностических признаков 4, блока решающих правил распознавания 6; блока принятия решения 7 и блока управления объектом 9.

Подсистема измерения 3 поставляет исходную информацию о состоянии объекта, содержащуюся в акустическом сигнале. Подсистема включает в себя преобразователи виброакустических процессов в их электрические эквиваленты, а также усилители, нормализаторы, фильтры и другие преобразователи первичной информации, а также многоканальные магнитные регистраторы, предназначенные для длительного хранения информации и ее последующей обработки.

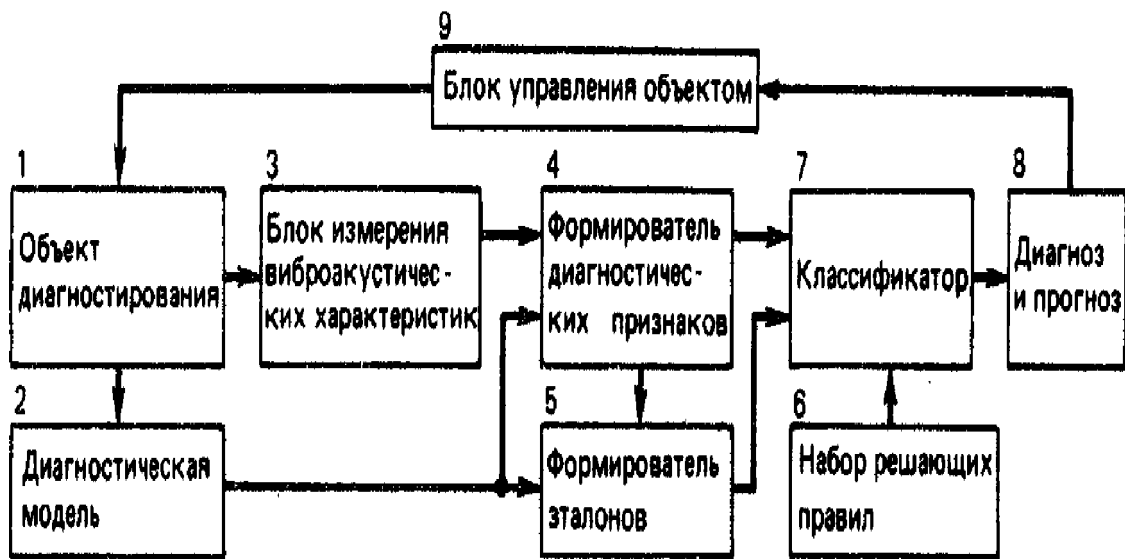


Рис. 2.2. Функциональная блок-схема системы виброакустического диагностирования технического состояния механизмов:

- 1 – объект диагностирования; 2 – диагностическая модель;
- 3 – блок измерения виброакустических характеристик;
- 4 – формирователь диагностических признаков; 5 – формирователь эталонов;
- 6 – набор решающих правил; 7 – классификатор; 8 – диагноз и прогноз;
- 9 – блок управления объектом

Подсистема формирования диагностических признаков 4 технического состояния объекта и отдельных его элементов выполняет функции преобразования исходной информации от системы измерения в соответствии со специально разрабатываемыми для этой цели алгоритмами. Последние выделяют в измеряемых сигналах такие их характеристики, которые обладают требуемыми избирательными свойствами к заданному классу дефектов, подлежащих распознаванию.

На основании обучения системы диагностирования для каждого класса технических состояний формируются эталоны 5 (усредненные для данного класса значения диагностических признаков).

Для формирования системы диагностических признаков и эталонов иногда используют диагностическую модель 2 объекта, в ряде случаев облегчающую процесс поиска информативных компонент в акустическом сигнале.

Специфика методов диагностирования зарождающихся дефектов заключается в использовании разнообразных приемов повышения чувствительности компонент виброакустического сигнала к изменению технического состояния механизма, поскольку на стадии зарождения дефектов помеха значительно превышает уровень полезного сигнала, содержащего информацию об изменении технического состояния.

Помимо описания основных приемов диагностирования приводится описание приемов повышения информативности виброакустического сигнала, что способствует решению проблемы диагностирования зарождающихся дефектов.

Появление или усиление полигармонических колебаний можно уловить с помощью операции гребенчатой фильтрации и формирования n -мерного вектора или с помощью кепстрального анализа, сжимающего информацию об изменениях в сигнале до обозримого количества гармоник, амплитуды которых легко оценить количественно.

Появление нестационарности сигнала, вызванной флуктуациями величины крутящего момента, величины демпфирования колебаний, возникновением случайных выбросов, можно выяснить, например, путем контроля стабильности параметров функции плотности распреде-

ления вероятности мгновенных значений акустического сигнала или ее моментов.

Для уменьшения влияния помех от вынужденных и собственных частот механизма, непременно присутствующих в спектрах работающих механизмов, используется метод повышения чувствительности измерительной системы за счет измерения колебаний на резонансной частоте вибродатчика или самой механической системы.

Для отстройки от вынужденных и собственных частот механизма иногда переходят в область частот выше 200 кГц, что, однако, не мешает выделять сигналы ударных возмущений, имеющих широкополосный спектр.

Возникновение и развитие дефектов в механизмах приводит к появлению нелинейных эффектов, использование которых для формирования диагностических признаков позволяет получить более ценную диагностическую информацию, чем на основе рассмотрения линейных динамических моделей. Для этой цели используют величины амплитуд комбинационных частот, глубину амплитудной модуляции или частотной девиации, компоненты биспектра, данные регрессионного и дисперсионного анализа.

Перечисленные выше методы анализа виброакустических процессов позволяют сформировать характерные диагностические признаки зарождающихся дефектов даже в тех случаях, когда спектр мощности сигнала практически не меняется. При наличии инвариантности диагностических признаков гарантируется достоверность диагностирования даже на ранней стадии развития дефекта.

В качестве примера рассмотрены четыре дефекта зубчатого зацепления (II уровень), наиболее часто проявляющиеся при длительной эксплуатации редактора. На III уровне схемы представлены характерные изменения спектральной картины, вызванные проявлением того или иного дефекта. Внизу (IV уровень) представлен неполный перечень возможных диагностических признаков по каждому дефекту, на основании которого производится отбор характерных признаков.

В тех случаях, когда не удастся обнаружить характерный диагностический признак неисправности, а объект диагностирования не удастся превратить из "черного ящика" в "серый" или "цветной" с помощью методов физического или математического моделирования, прибегают к традиционным методам распознавания акустических образов, заданных в виде n -мерных векторов. Достоверность диагностирования удается повысить за счет увеличения размерности признака или использования дискриминантных функций, достаточно чувствительных к изменениям акустических образов.

В качестве обобщенного акустического портрета механизма в простейшем случае можно использовать n -мерный вектор отсчетов амплитуд обычного спектра мощности виброакустического сигнала, полученного для стационарного оборотно-нагрузочного режима механизма.

Однако информативность такого признака существенным образом зависит от выбора режима работы механизма. Информативность спектра мощности можно повысить за счет использования нестационарных режимов диагностирования механизмов на подъемах или спусках оборотов. Динамические спектрограммы (трехмерные спектры) позволяют выявить неисправности механизма, не проявляющиеся на номинальных режимах эксплуатации.

В качестве помехоустойчивой многомерной характеристики виброакустического сигнала, образованного полигармоническими рядами (характерными для механизмов) или их взаимодействием, проявляющимся в наличии комбинационных частот, используется биспектральная функция как обобщенный акустический портрет механизма.

Хорошие результаты дает также использование двумерного закона распределения вероятностей амплитуд колебаний в двух измерительных точках механизма.

Глава 3. НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ

Как указывалось выше, зарождение и развитие дефектов с монотонным нарастанием степени деградации узла механизма на конечном временном интервале, как правило, сопровождается слабыми изменениями виброакустических процессов, фактически не влияющими на энергетические характеристики вибросигналов, сформированных спектром вынужденных и собственных частот функционирующего механизма. Отсюда вытекает специфика методов диагностирования зарождающихся дефектов, заключающаяся в использовании способов измерения и обработки виброакустической информации, направленных на повышение чувствительности характеристики вибросигнала к диагностируемому дефекту и отстройки от помех. Способы формирования диагностических признаков зарождающихся дефектов в основном базируются на выделении потока акустических импульсов, возникающих при попадании локального дефекта в зону контакта взаимодействующих деталей и распространяющихся по конструкциям механизма со скоростью звука.

3.1. Методы ударных импульсов

Наибольшее распространение получил метод ударных импульсов "SPM" (Shock Pluse Method), разработанный и запатентованный шведской фирмой "SKF" для диагностирования подшипниковых узлов [6].

Метод основан на том, что вследствие отклонений формы и размеров деталей от идеальной подшипники качения уже в состоянии поставки (т.е. в исправном состоянии) работают с механическими ударами, интенсивность которых значительно возрастает при повреждениях. В точке удара тела качения о кольцо подшипника возникают ударные, быстро затухающие в теле обоймы подшипника волны сжатия. Для оценки состояния подшипникового узла используется специально разработанный датчик, устанавливаемый непосредственно на корпусе подшипника. Специфика метода заключается в том, что измерение числа ударных импульсов в единицу времени производится на резонансной частоте подшипника.

нансной частоте датчика в начальной фазе удара. Резонансная частота акселерометра (≈ 32 кГц) выбирается такой, чтобы она отличалась от частот возможных резонансов механической системы.

Сигнал с пьезодатчика подается на детектор повреждений, снабженный регулируемым пороговым устройством и "логикой времени", исключающими ложный сигнал при случайных внешних ударах. С детекторов повреждений сигналы подаются на центральный пульт, оснащенный системой сигнализации.

По данным фирмы "SKF" система диагностирования, построенная на принципе измерения числа ударных импульсов на резонансной частоте акселерометра, зарекомендовала себя как система с достаточно большой помехоустойчивостью благодаря установке датчика непосредственно на корпусе диагностируемого подшипника и высокой динамической чувствительностью из-за работы на резонансе датчика.

Вместе с тем эта система не лишена недостатков, главный из которых состоит в том, что повреждения различных деталей подшипника и различных кинематических звеньев редуктора вызывают появление однотипных импульсов в вибросигнале, различить которые можно только по величине амплитуды, что затрудняет идентификацию поврежденного звена.

3.2. Метод спектрального анализа амплитудной огибающей вибросигнала на резонансной частоте датчика ("резонансный метод")

Метод диагностирования зарождающихся дефектов, предложенный в работе, в какой-то мере свободен от указанного выше недостатка метода ударных импульсов [6].

Суть "резонансного метода" заключается в том, что исследуется поведение спектра огибающей вибросигнала в узкой полосе частот в окрестности резонансной частоты акселерометра и выделяется информация не только об амплитуде ударных импульсов, но и о частоте их повторения, т.е. создается привязка к дефектному узлу механизма. Фактор динамического усиления на собственной частоте вибропреоб-

разователя, равный ≈ 100 , позволяет отстроиться от помех, вызванных работой механизма, путем смещения резонансной частоты в зону 30 – 100 кГц, достаточно удаленную от зоны вынужденных и собственных частот механизма. Этот метод используется в основном для раннего обнаружения эксплуатационных дефектов (типа выкрашивания) подшипников качения и зубчатых механизмов.

Модификацией "резонансного метода", обеспечивающего исключительно высокое отношение сигнал/помеха и не требующего дорогостоящих тарировочных экспериментов, является предложенный в работе метод обнаружения зарождающихся дефектов по спектру амплитудной огибающей вибросигнала на резонансной частоте датчика в зоне до 500 кГц.

Основной идеей этого и упомянутого выше метода является то, что динамические явления, вызванные взаимодействием поврежденных контактирующих поверхностей в процессе функционирования механизмов, порождают амплитудную модуляцию вибросигнала, которая проявляется на всех частотах, в том числе в области частот, лежащей выше области основного акустического излучения.

Используя полосовой фильтр, имеющий несущую частоту $25 \text{ кГц} < f_n < 500 \text{ кГц}$, получают узкополосный случайный высокочастотный процесс. В случае повреждения, например, подшипника несущая частота будет модулироваться частотой прохождения тел качения через ямку выкрашивания. Производя детектирование этого сигнала с последующей спектральной обработкой, получают спектр огибающей, который будет иметь составляющие на частоте повреждения и ее гармониках. Считается, что сравнение спектров огибающей в высокочастотной области во время работы обеспечивает надежное диагностирование повреждений контактирующих поверхностей. Для получения высокочастотных сигналов специально разработан акселерометр, имеющий собственную частоту, позволяющую выбирать несущую частоту фильтра до 500 кГц включительно.

К достоинству этого метода следует отнести обеспечение достаточно высокого отношения сигнал/шум.

Этот метод позволяет обнаруживать возникновение выкрашивания контактирующих поверхностей зубьев, тел и дорожек качения; усталостной трещины в основании зуба. Однако следует сказать, что метод не позволяет обнаружить выкрашивание на одном зубе и усталостную трещину для зубчатых передач, имеющих коэффициент перекрытия больше 2,0.

3.3. Метод формирования n-мерного вектора кратных гармоник спектра огибающей вибросигнала на резонансной частоте узла механизма

Разновидностью "резонансного" метода, позволяющего использовать стандартную виброизмерительную и анализирующую аппаратуру для целей раннего обнаружения дефектов контактирующих поверхностей, является метод анализа огибающей вибросигнала на одной из резонансных частот самого механизма. Предпочтительна настройка системы диагностирования на собственную частоту узла механизма, но это условие не является обязательным, поскольку механическая система откликается на ударное возмущение на всех собственных частотах механизма.

Метод заключается в том, что с помощью операции клиппирования или синхронной гребенчатой фильтрации из амплитуд кратных гармоник Kf_0 оборотной частоты диагностируемой детали вращения формируется n-мерный вектор $(K - 1, 2, \dots, n)$ диагностических признаков.

Простейшим, но достаточно эффективным решающим правилом диагностирования зарождающихся дефектов является сравнение длины разностного n-мерного вектора по Хэммингу с пороговым значением, характеризующим предельное состояние узла механизма.

По разностному вектору кратных гармоник Kf_0 спектра амплитудной огибающей вибросигнала удастся обнаружить на ранней стадии развития и локализовать такие дефекты, как выкрашивание контактирующих поверхностей, появление трещины у ножки зуба и поломку зуба в зубчатой передаче с коэффициентом перекрытия $> 2,0$.

По разностному вектору кратных гармоник Kf_0 спектра фазовой огибающей вибросигнала в окрестности собственной частоты узла механизма удается обнаружить явление схватывания, приводящее к задиру поверхностей подшипников скольжения с частотой вращения f_0 .

3.4. Формирование n-мерного вектора кратных гармоник спектра огибающей вибросигнала в окрестности основных частот возбуждения механизма

Существует метод диагностирования зарождающихся дефектов, основанный на анализе свойств спектра огибающей вибросигнала в узкой 1/3-октавной полосе частот в окрестности одной из основных частот возбуждения mf_z механизма. Для этой цели формируется n-мерный вектор из амплитуд гармоник, кратных оборотной частоте f_0 диагностируемого тела вращения [6].

Метод диагностирования, базирующийся на анализе свойств разностного n-мерного вектора спектральных компонент амплитудной огибающей в окрестности одной из составляющих вибросигнала, хотя и позволяет диагностировать дефекты типа выкрашивания поверхностей, является менее помехоустойчивым, чем метод анализа свойств амплитудной огибающей сигнала в окрестности резонансной частоты механизма.

Вектор кратных гармоник H_0 спектра фазовой огибающей вибросигнала в окрестности вынужденных частот mf_z очень чувствителен к зарождающимся дефектам типа заедания (задира), быстро приводящим к заклиниванию механизма и, следовательно, к катастрофическим последствиям.

3.5 Обнаружение зарождающихся дефектов по величине коэффициента эксцесса

Привлекательным по своей простоте, но безадресным методом диагностирования зарождающихся дефектов является метод, основанный на оценке величины коэффициента эксцесса E_k одномерной плотности вероятности $p(x)$ мгновенных значений вибросигнала в окрестности собственной частоты узла механизма [6]. Выбросы в сигнале при

появлении ударного возмущения искажают форму закона распределения $p(x)$, что сказывается на величине эксцесса. Путем выбора полосы анализа Δf в окрестности собственной частоты f_p можно добиться нормализации закона распределения и равенства $E_k = 0$ для исходного состояния механизма. Превышение $E_k > E_k$ некоторого порогового значения E_k характеризует появление дефектов контактирующих поверхностей.

Модификацией метода является анализ изменения коэффициента эксцесса не самого узкополосного процесса, а его амплитудной огибающей. Данный подход позволяет обеспечить хорошую стабильность параметра E_k при том же объеме выборки, что и для основного процесса.

Метод очень чувствителен к положению датчика на корпусе механизма, поэтому его, так же как и метод ударных импульсов, целесообразно использовать при установке вибропреобразователей непосредственно на диагностируемом узле.

Существует методика диагностирования подшипниковых узлов по изменению величины эксцесса в каждой из четырех полос частот, на которые разбит весь диапазон вибросигнала от 0 до 10 кГц.

3.6 Метод выделения когерентной составляющей

Диагностирование зарождающихся дефектов, как неоднократно указывалось выше, производится путем выделения информативной компоненты малой энергоемкости на фоне большого уровня помех. Одним из методов выделения такой компоненты является метод оптимальной фильтрации. Этот метод применим в тех случаях, когда заранее известны свойства выделяемого из помехи сигнала.

Метод корреляционного выделения когерентной составляющей применяется, например, при диагностировании дисбаланса ротора турбины, развивающегося вследствие неравномерности обгара или запыливания лопаток, при диагностировании выкрашивания зубьев редуктора путем когерентного выделения оборотной частоты f_0 из сигнала амплитудной огибающей вибросигнала в окрестности зубцовой частоты f_z .

Нормирование величины функции взаимной корреляции $\gamma_{\max|pxy|}$ вибросигнала $x(t)$ и выделяемой компоненты (t) , формируемой пилот-сигналом с датчика оборотов, позволяет получить устойчивый диагностический признак неисправности механизма без учета коэффициентов усиления измерительных трактов.

Следует отметить, что в данной главе приведен далеко не полный перечень методов диагностирования зарождающихся дефектов. Проведено описание лишь тех методов, которые получили апробацию в промышленности.

3.7. Принципы построения аппаратуры для виброакустической диагностики

Виброакустическая диагностика объектов заключается в преобразовании вибраций и шумов в электрические сигналы при анализе их и в измерении и сопоставлении полученных данных с «эталоном» по выбранному критерию диагностики.

В последние годы широко используют метод диагностики, в котором исправный и неисправный объекты различают по спектральному составу виброакустического сигнала. Однако такой метод имеет малую точность для определенного класса объектов (например, содержащих зубчатые передачи), поскольку для их виброакустических спектров характерно присутствие большого числа гармонических составляющих, и найти информативный диагностический признак довольно трудно.

Рассмотрим подробнее механизм возникновения виброакустического сигнала в зубчатой передаче. В процессе работы зубчатой передачи изменяется точка приложения равнодействующей сил и сама сила. Эта переменная сила, действуя на упругую систему, вызывает в ней колебания. Возникновение динамических нагрузок и колебаний с зубцовой частотой в прямозубой передаче связано с наличием ошибок основного шага зацепления, исходных погрешностей профилей, а также переменной суммарной жесткостью зубьев по фазе зацепления.

Следует отметить, что колебания с зубцовой частотой (появление

боковых частот) также возникают из-за наличия переменных кинематических условий износа по линии зацепления, приводящих к неодинаковому суммарному износу в различных точках линии зацепления. При этом изменение суммарного износа по линии зацепления связано с колебаниями изнашиваемой передачи с зубцовой частотой.

Колебания с зубцовой частотой (и кратной ей) вызывают модуляцию спектра, причем с увеличением износа поверхностей зубьев меняется частота модуляции. Это объясняется тем, что с увеличением износа уменьшается длина линии зацепления, что приводит к уменьшению длительности ударного взаимодействия между зубьями.

Сокращение длительности ударного импульса расширяет спектр вообще и вокруг зубцовых гармоник - в частности. Модуляционная составляющая спектра становится более низкочастотной, и определить изменение частоты модуляции по спектру уже довольно трудно.

Для виброакустической диагностики объектов, содержащих зубчатые передачи, в нашей стране и за рубежом применяют метод кепстрального анализа, который значительно точнее метода спектрального анализа при выявлении дефекта.

Кепстр представляет собой преобразование Фурье от логарифмического спектра мощности и позволяет разделить во времени информацию о сигнале, полученную в результате многократных отражений, при нелинейных преобразованиях и модуляции. При этом энергия виброакустического сигнала, рассеянная по множеству гармоник в спектральном представлении, локализуется в одной составляющей в кепстральном представлении сигнала.

В кепстральном методе вводится понятие частоты, т. е. величины, обратной разности между зубцовой частотой и усредненным по спектру значением боковой частоты. В силу изменения частоты модуляции спектра происходит изменение частоты в кепстре, а именно: с увеличением износа частота смещается влево, ближе к началу оси частот, что и является основой для диагностического критерия оценки степени износа. Следует отметить, что вариация боковой частоты приводит к линейному изменению значений f_3 и $f_{бок}$, т. е. к линейному изменению

частоты модуляции спектра, а следовательно, и частоты износа. Однако произведение частоты износа на $f_{об}$ для колес с одинаковым износом представляет собой постоянную величину. Эта величина и служит критерием степени износа зубчатых колес.

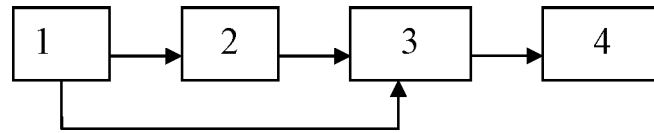


Рис. 3.1. Структурная схема аппаратуры для виброакустической диагностики объектов: 1 – измерительный канал; 2 – анализ кепстра; 3- блок выделения диагностических признаков; 4 – блок вычисления оценки

На рис. 3.1 приведена структурная схема аппаратуры для виброакустической диагностики объектов, принцип действия которой основан на кепстральном методе.

Измерительный канал, как правило, состоит из последовательно соединенных измерительного преобразователя вибрации и усилителя, а также тахометра (для измерения).

Анализатор кепстра представляет собой два анализатора спектральной плотности мощности, соединенные последовательно, между которыми включен логарифмирующий усилитель, и служит для выявления следующих периодичностей в спектре: модуляционной составляющей, равной (или кратной) и обусловленной вращением вала; высших гармоник, кратных зубцовой частоте, приводящих к модуляции спектра зубцовой частотой; боковых частот, расположенных вокруг зубцовой частоты, причем, если первые два вида периодичности не изменяют своего положения на оси частот, то третий вид зависит от степени износа зубчатых колес передачи. Пики, связанные с периодичностью $f_{об}$, определяются легко, так как значения их частот известны: $1/f_{об}; 1/2f_{об}; \dots; 1/nf_{об}$. Пики, связанные с периодичностью боковых частот, заранее неизвестны. Однако в кепстре они также образуют гармонический ряд кратных значений на частотной оси и поэтому могут быть определены. Эту функцию выполняет блок выделения диагности-

ческих признаков. Один из принципов поиска данной модуляционной частоты состоит в следующем.

После определения частоты, соответствующей $f_{об} \rightarrow C(\tau_{об})$, выбирают ближайшее меньшее значение $\tau_1 = \tau_{об} - \tau_{\Delta t}$, где $\tau_{\Delta t}$ - разрешающая способность анализа (шаг дискретизации по времени). Затем находят значения кепстра на данной частоте и кратной ей и вычисляют их произведение, которое запоминают. После этого берут следующее значение $\tau_2 = \tau_{об} - 2\tau_{\Delta t}$ и повторяют все операции снова. Так как периодичностью обладает лишь модуляционная составляющая, то и произведение гармоник ее компонентов будет максимальным по отношению ко всем другим значениям кепстра.

Произведение найденного значения частоты кепстра (ближайшего меньшего $\tau_{об}$) на $f_{об}$ дает величину критерия износа. Эти функции осуществляет блок вычисления оценки, представляющий собой умножитель или делитель сигналов.

Другим принципом построения приборов для виброакустической диагностики механизмов может служить принцип, основанный на использовании Zoom - Фурье преобразования. Он заключается в следующем: сигнал с усилителя поступает на несколько анализаторов спектра с задержкой $\tau = n\Delta t$, где n — номер анализатора; Δt — шаг разрешения по времени. Это обеспечивает высокую разрешающую способность анализа по частоте. При этом вырезают участок спектра с зубцовой частотой в центре, по средней разности между пиками зубцовой и боковых частот вычисляют модуляционную составляющую спектра, проводят деление $f_{бок}$ на $f_{мод}$ и по уменьшению данного критерия судят об износе зубчатых колес.

В последнее время большое внимание уделяется измерению ускорения вибрации одновременно в нескольких точках изделия для выявления его резонансных свойств, особенно если это изделие имеет сложную механическую структуру. Учет резонансных свойств необходим в различных ситуациях. Например, при отработке равнопрочных конструкций резонансные эффекты могут вызвать разрушение дорого-

стоящего изделия, что недопустимо. Как показывают исследования виброполя конструктивно сложного изделия, в процессе испытаний при воздействии вибрации с плавно изменяющейся частотой одни элементы изделия испытывают нагрузки в заданных допусках, другие на определенных частотах оказываются недогруженными из-за антирезонансных эффектов. Эти элементы как бы «недоиспытываются». В условиях эксплуатации, когда нагрузки не соответствуют испытательным, «недоиспытанные» элементы могут стать причиной отказа или нарушения работоспособности изделия.

В связи с этим при отработке конструкции изделия в процессе предварительных исследований их реакций на вибрационные нагрузки важно выявить резонансные и антирезонансные зоны, чтобы своевременно принять меры к конструктивной доработке изделия.

Для управления режимом вибрационного нагружения при резонансных и антирезонансных эффектах в виброизмерительную аппаратуру вводят устройства экстремальной селекции, которые вырабатывают управляющие режимом испытаний сигналы.

Если в изделии со сложной механической структурой преобладают высокочастотные резонансы, то в аппаратуре используют устройства, выделяющие максимальный из всех сигналов и сравнивают его с заранее заданным уровнем сигнала, пропорциональным допустимому для данного изделия ускорению вибрации. Если этот сигнал превышает заданный уровень, то устройство селекции вырабатывает сигнал, воздействующий через усилитель мощности на вибратор таким образом, чтобы уровень ускорения снизился до заданного.

Устройства селекции максимального сигнала выполняют обычно на полупроводниковых диодах, соединенных по схеме «ИЛИ». При этом наибольшее выпрямленное напряжение, пропорциональное максимальному значению измеряемого параметра, выделяется на нагрузке диодной цепочки. Далее напряжение фильтруется и подается на управляющий элемент системы управления вибрационными установками.

На этом принципе основана работа многоканального виброметра ВВМ-131, разработанного в НИИ Интроскопии [2].

Виброметр выполнен по структурной схеме, приведенной на рис. 3.2, и содержит датчики 1, закрепленные на изделии, каналные усилители 2, индикатор 4 текущего значения ускорения, коммутаторы 3 и 5, устройство 6 экстремальной селекции по максимальному сигналу, регулируемый усилитель 7, подключенный к системе управления 10 вибратором 11. Прибор имеет выходы на светолучевой осциллограф, анализатор, электронно-лучевой осциллограф и ПЭВМ. Коммутатором 5 выбирают каналы или комбинацию каналов управления, т.е. тех каналов, по сигналам которых осуществляется экстремальная селекция. Быстродействующий коммутатор 9 подключает выход каждого канала к электронно-лучевому осциллографу 8, на экране которого наблюдают гистограмму распределения уровней ускорения в каждой точке изделия, где установлены датчики.

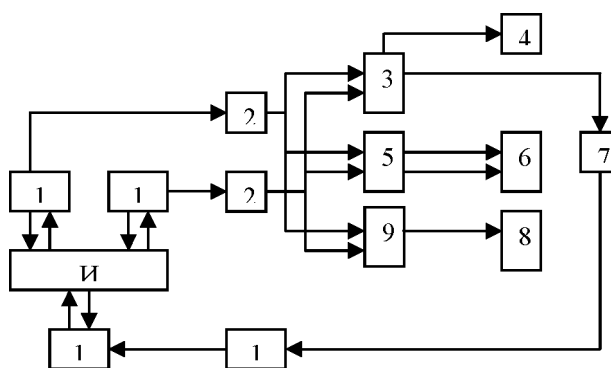


Рис. 3.2. Структурная схема виброметра: 1 – датчики; 2 - каналные усилители; 3, 5 - коммутаторы; 4 - индикатор текущего значения ускорения; 6 - устройство экстремальной селекции по максимальному сигналу; 7 - регулируемый усилитель; 8 - осциллограф; 9 - коммутатор; 10 - система управления вибратором; 11 – вибратор

Низкий коэффициент поперечного преобразования обеспечен симметричной конструкцией, а температурная компенсация коэффициента преобразования и помехозащищенность — специальной схемой встроенного в корпус вибродатчика предусилителя. Принципиальная схема предусилителя приведена на рис. 3.3.

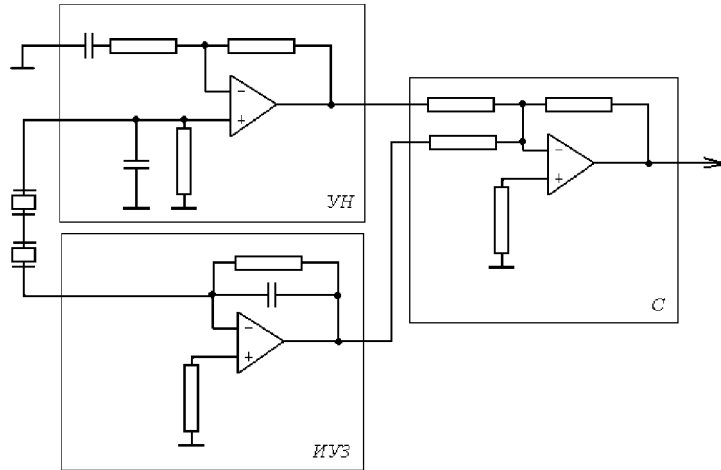


Рис. 3.3. Принципиальная схема предусилителя

Дифференциальный пьезодатчик, состоящий из двух пьезопластин с противоположными направлениями поляризации, преобразует механические колебания $S(t)$ в электрический сигнал в виде заряда. Собственно предусилитель содержит инвертирующий усилитель заряда ИУЗ, усилитель напряжения УН и сумматор С. На выходах усилителя напряжения и инвертирующего усилителя наряду вырабатываются напряжения полезного сигнала одного знака. На сумматоре полезные сигналы складываются, а помехи, например электромагнитные, вычитаются.

Напряжения полезного сигнала на выходе усилителя напряжения U_H и усилителя заряда U_3 можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} U_H &= S(t)K_H = S(t)K_{0H}(1 - \alpha_H \Delta T), \\ U_3 &= S(t)K_3 = S(t)K_{03}(1 - \alpha_3 \Delta T) \end{aligned} \quad (3.1)$$

где K_{0H} и K_{03} коэффициенты преобразования соответственно усилителей напряжения и заряда при температуре 20°C ; α_H , α_3 - удельные коэффициенты изменения чувствительности при включении усилителя напряжения или усилителя заряда; ΔT — изменение температуры окружающей среды.

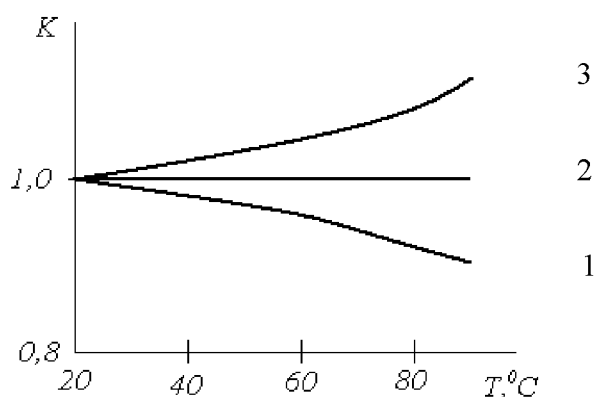


Рис. 3.4. Графики зависимости коэффициентов преобразования от температуры в различных точках схемы: 1 - на выходе усилителя напряжения; 2 - на выходе усилителя заряда; 3 — на выходе сумматора.

На рис. 3.4. изображены графики зависимости коэффициентов преобразования от температуры в различных точках схемы: 1 - на выходе усилителя напряжения, 2 - на выходе усилителя заряда, 3 — на выходе сумматора. Как видно из формул и графиков, коэффициент преобразования пьезокерамики при увеличении температуры уменьшается при работе на усилитель напряжения и увеличивается при работе на усилитель заряда.

На выходе сумматора вырабатывается напряжение:

$$U_C = S(t) \left\{ K_{0H} + K_P K_{03} + \alpha_3 K_{03} \left[K_P - \frac{\alpha_H K_{0H}}{\alpha_3 K_{03}} \right] \Delta T \right\}, \quad (3.2)$$

где K_P — отношение коэффициентов передачи усилителей заряда и напряжения.

Если выбрать K_P равным $\frac{\alpha_H K_{0H}}{\alpha_3 K_{03}}$, что легко осуществить изменением весовых коэффициентов при суммировании, то напряжение на выходе сумматора практически не будет зависеть от температуры.

Испытания разработанного пьезодатчика с предусилителем показали, что погрешность измерения вибрации в диапазоне температур от 10 до 120°C снижается на порядок по сравнению с известной схемой включения.

Основные технические характеристики преобразователя следующие: коэффициент преобразования $20 \text{ мВ} \cdot \text{с}^2/\text{м}$; температурная составляющая погрешности коэффициента преобразования при температурах $10\text{-}120^\circ\text{C}$ не хуже $0,025 \text{ \%}/\text{K}$; собственная резонансная частота не ниже 3 кГц .

При той же методике измерений предложены другие формулы для расчетов входных параметров

$$R_{BX} = \frac{UR_D \left(\frac{f_2^2}{f_1^2} - 1 \right)}{U_1 \frac{f_2^2}{f_1^2} - U \left(\frac{f_2^2}{f_1^2} - 1 \right) - U_2}, \quad (3.3)$$

$$C_{BX} = \frac{\sqrt{(U_2 - U_1) \left[U_1 \frac{f_2^2}{f_1^2} - U \left(\frac{f_2^2}{f_1^2} - 1 \right) - U_2 \right]}}{2\pi f_1 R_D U \left(\frac{f_2^2}{f_1^2} - 1 \right)}. \quad (3.4)$$

Наличие различных формул для определения одних и тех же параметров вызывает необходимость их оценки.

Проверка формул (3.3), (3.4) проведена для следующих исходных условий: $R_D = 108 \text{ Ом}$; паразитная емкость добавочного резистора C_D равна 0 ; 2 и 20 пФ ; $f_1 = 100 \text{ Гц}$, f_2 равно 1000 и 10000 Гц , $R_{BX} = 109 \text{ Ом}$, $C_{BX} = 30 \text{ пФ}$. Указанные значения R_{BX} и C_{BX} соответствуют реальным параметрам виброизмерительных устройств с пьезоэлектрическими преобразователями, а частоты – их рабочему частотному диапазону.

Проведенный анализ показал, что для случая, когда $C_g = 0$, $f_1 = 100 \text{ Гц}$, $f_2 = 10000 \text{ Гц}$, входное сопротивление, рассчитанное по формуле (3.3), приобретает отрицательное значение, что противоречит физическому смыслу. В других случаях, при $C_g \neq 0$ f_2 равно 1000 и 10000 Гц , по формуле (3.3) получаются значения R_{BX} на порядок ниже исходного. Не лучше обстоит дело и с C_{BX} . Так, при $C_D = 2 \text{ пФ}$, $f_1 = 100 \text{ Гц}$, $f_2 = 10000 \text{ Гц}$ результаты вычислений по формуле (3.4) полу-

чились в 50 раз меньше исходных данных. Подобное расхождение результатов недопустимо при оценке исходных параметров виброизмерительных устройств.

Причиной этих расхождений, как показал анализ, является то, что формулы (3.3), (3.4) составлены без учета фазовых сдвигов между измеряемыми напряжениями U_1 и U , U_2 и U . Кроме того, существенно влияние собственной паразитной емкости добавочного резистора при входных сопротивлениях порядка сотен и тысяч мегаом на частотах 100–10000 Гц, соответствующих входным сопротивлениям и рабочим частотам виброизмерительных устройств с пьезоэлектрическими преобразователями. В связи с этим была предпринята попытка вывести новые уточненные формулы для расчета параметров входной цепи исследуемых устройств.

Здесь справедливы соотношения

$$\frac{U}{U_1} = \frac{Z_{BX1}}{Z_{BX1} + Z_{Д1}}; \quad (3.5)$$

$$\frac{U}{U_2} = \frac{Z_{BX2}}{Z_{BX2} + Z_{Д2}}, \quad (3.6)$$

где $Z_{BX1,2}$ и $Z_{Д1,2}$ комплексные сопротивления параллельно соединенных R_{BX} , C_{BX} и $R_{Д}$, $C_{Д}$ соответственно на круговых частотах $\omega_1 = 2\pi f_1$ и $\omega_2 = 2\pi f_2$.

Значения комплексных сопротивлений можно получить из формул

$$\frac{1}{Z_{BX1,2}} = \frac{1}{R_{BX}} + j\omega_{1,2}C_{BX}; \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{Z_{Д1,2}} = \frac{1}{R_{Д}} + j\omega_{1,2}C_{Д}. \quad (3.8)$$

По указанной методике измеряют эффективные значения напряжений, по которым можно вычислить только модули их отношений. Поскольку правые части выражений (3.5) и (3.6) являются комплексными, то и отношения измеряемых напряжений (левые части этих выражений) также должны быть комплексными. Представим комплексные отношения напряжений в тригонометрической форме комплекс-

ного числа:

$$U/U_1 = \alpha_1(\cos \varphi_1 + j \sin \varphi_1);$$

$$U/U_2 = \alpha_2(\cos \varphi_2 + j \sin \varphi_2),$$

где $\alpha_1 = U/|U_1|$ и $\alpha_2 = U/|U_2|$ — модули комплексных отношений напряжений, φ_1 и φ_2 — их аргументы. Подставив в (3.5) и (3.6) последние соотношения, получим

$$Z_{BX1}/(Z_{BX1} + Z_{D1}) = \alpha_1(\cos \varphi_1 + j \sin \varphi_1); \quad (3.9)$$

$$Z_{BX2}/(Z_{BX2} + Z_{D2}) = \alpha_2(\cos \varphi_2 + j \sin \varphi_2). \quad (3.10)$$

Выражения (3.9) и (3.10) образуют систему уравнений, где известны величины $\omega_1, \omega_2, R_D, C_D, \alpha_1, \alpha_2$ и неизвестны $R_{BX}, C_{BX}, \varphi_1, \varphi_2$. Приведем наиболее важные промежуточные преобразования для нахождения решения этой системы в общем виде.

Записав уравнения (3.7) и (3.8) для частот ω_1 и ω_2 , разрешим полученную систему относительно R_{BX} и C_{BX} . Получим

$$R_{BX} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2 / Z_{BX1} - \omega_1 / Z_{BX2}}; \quad C_{BX} = \frac{1/Z_{BX1} - 1/Z_{BX2}}{j(\omega_1 - \omega_2)}.$$

Разрешив (3.9) и (3.10) относительно Z_{BX1} и Z_{BX2} , подставим полученные значения в последние уравнения. В результате получим два уравнения, в левой части которых стоят действительные значения R_{BX} и C_{BX} , а в правой — комплексные. Используя условие равенства комплексных чисел, образуем систему четырех уравнений, которые зависят только от тригонометрических функций углов φ_1 и φ_2 :

$$R_{BX} = \frac{R_D}{\left\{ \frac{[\alpha_2 f_2 (\cos \varphi_1 + 2\pi f_1 R_D C_D \sin \varphi_1) - \alpha_1 f_1 (\cos \varphi_2 + 2\pi f_2 R_D C_D \sin \varphi_2)]}{[(f_2 - f_1) \alpha_1 \alpha_2]} - 1 \right\}}; \quad (3.11)$$

$$C_{BX} = \frac{\alpha_1(2\pi f_2 R_D C_D \cos \varphi_2 - \sin \varphi_2) - \alpha_2(2\pi f_1 R_D C_D \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1)}{2\pi(f_2 - f_1)\alpha_1\alpha_2 R_D} - C_D; \quad (3.12)$$

$$\alpha f_2(2\pi f_1 R_D C_D \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1) - \alpha_1 f_1(2\pi f_2 R_D C_D \cos \varphi_2 - \sin \varphi_2) = 0; \quad (3.13)$$

$$\alpha_1(\cos \varphi_2 + 2\pi f_2 R_D C_D \sin \varphi_2) - \alpha_2(\cos \varphi_1 + 2\pi f_1 R_D C_D \sin \varphi_1) = 0. \quad (3.14)$$

Значения φ_1 и φ_2 можно найти двумя путями. Первый связан с измерениями фазовых сдвигов между напряжениями U_1 и U , U_2 и U , методика проведения которых не рассматривается.

Ниже рассмотрен расчетный метод.

Решением системы уравнений (3.13) и (3.14) относительно φ_1 будет

$$\sin \varphi_1 = a \sin \varphi_2, \quad (3.15)$$

$$\text{где } a = \frac{\alpha_1 f_1 (1 + 4\pi^2 f_2^2 R_D^2 C_D^2)}{\alpha_2 f_2 (1 + 4\pi^2 f_1^2 R_D^2 C_D^2)}. \quad (3.16)$$

Решение этой системы относительно φ_2 сводится к уравнению

$$\alpha_1 \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_2} - \alpha_2 \sqrt{1 - a^2 \sin^2 \varphi_2} + b \sin \varphi_2,$$

$$\text{где } b = 2\pi R_D C_D (a_1 f_2 - a_2 f_1). \quad (3.17)$$

Избавляясь от радикалов в этом уравнении, получим биквадратное уравнение относительно φ_2 , решением которого будет

$$\sin \varphi_2 = \pm \sqrt{\frac{-h \pm \sqrt{h^2 - dm^2}}{d}}, \quad (3.18)$$

$$\text{где } d = b^2 + \alpha_2^2 a^2 - a_1^2 + 4a_1^2 b^2; \quad (3.19)$$

$$h = -m(b^2 + \alpha_2^2 a^2 - a_1^2) - 2\alpha_1^2 b^2; \quad (3.20)$$

$$m = \alpha_2^2 - \alpha_1^2. \quad (3.21)$$

Выведенные формулы справедливы для измерительной схемы и входных цепей согласующих усилителей виброизмерительных устройств, имеющих сосредоточенные параметры.

В результате вычислений по формуле (3.18) могут получиться из-за неоднозначности радикалов в общем случае четыре значения $\sin \varphi_2$, три из которых не удовлетворяют уравнениям (3.13) и (3.14) и могут

привести к отрицательным значениям R_{BX} и C_{BX} при их расчете по (3.11) и (3.12).

Алгоритм вычислений R_{BX} и C_{BX} с помощью предложенных формул по результатам измерений в соответствии с методикой сводится к выполнению следующих операций:

вычисление отношений $U/|U_1| = \alpha_1$ и $U/|U_2| = \alpha_2$;

вычисление значений a, b, d, h, m по формулам (3.16), (3.17), (3.19) — (3.21);

вычисление значений $\sin \varphi_1$ и $\sin \varphi_2$ и соответствующих им значений $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$ по формулам (3.15) и (3.18); в дальнейших расчетах используют только те значения тригонометрических функций, которые удовлетворяют уравнениям (3.13) и (3.14);

вычисление значений R_{BX} и C_{BX} исследуемого согласующего усилителя виброизмерительного устройства по уже известным значениям $\sin \varphi_{1,2}$, $\cos \varphi_{1,2}$, $f_{1,2}$, $\alpha_{1,2}$, R_D , C_D по формулам (3.11), (3.12).

Следует обратить внимание, что если подкоренное выражение $h^2 - dm^2$ при вычислениях по результатам измерений близко или равно нулю, то это означает, что значением емкости C_D при вычислениях можно пренебречь. Если оно получается отрицательным, это означает, что либо значения частот f_1 и f_2 выбраны слишком близкими, либо точность измерения исходных данных недостаточна, либо имеют место оба фактора. При проведении измерений необходимо так выбрать частоты f_1 и f_2 и сопротивление R_D , чтобы значения α_2 и α_1 максимально различались.

Повышение точности, надежности и быстродействия приборов при одновременном уменьшении массы и габаритных размеров — важнейшие задачи в области приборостроения. Для решения их в новых разработках измерительной техники используют средства микроэлектроники, позволяющие создавать максимально надежные и дешевые узлы приборов.

Элементы микроэлектроники широко применяют в одной из от-

раслей приборостроения виброметрии. И это не случайно, поскольку измерительная аппаратура содержит такие основные узлы, как согласующие и измерительные усилители, интеграторы, активные фильтры и компараторы, которые с успехом выполняют на микросхемах.

Характерной особенностью виброизмерительной аппаратуры является необходимость преобразования сигналов в широком диапазоне частот — от долей герца до нескольких тысяч герц. Это предъявляет ряд специфических требований к электронным узлам аппаратуры. Так, в усилителях переменного тока применяют переходные конденсаторы большой емкости. Для уменьшения габаритных размеров используют электролитические конденсаторы, которые обладают довольно большими токами утечки и требуют для нормальной работы поляризирующего напряжения. Токи утечки могут вызывать нарушение режима работы транзисторов и микросхем, особенно в условиях изменяющейся температуры окружающей среды. При использовании в качестве усилителей переменного тока операционных усилителей поляризирующее напряжение обычно не превышает единиц милливольт и изменяется по величине и знаку при изменении температуры и смене экземпляров микросхем. Поэтому в высококачественной аппаратуре вместо электролитических конденсаторов используют конденсаторы других типов, например лакопленочные. Но при этом габаритные размеры конденсаторов, а следовательно и узлов аппаратуры, значительно возрастают, что вынуждает применить конденсаторы меньших емкостей. Чтобы сохранить нижнюю частотную границу на прежнем уровне, необходимо увеличивать входное сопротивление усилительных каскадов, что приводит к использованию во входных цепях резисторов с сопротивлением, составляющим единицы и десятки мегаом. Такие большие сопротивления можно получить только во входных цепях полевых транзисторов, обладающих малыми токами утечки.

Активные фильтры, используемые в виброизмерительной аппаратуре на частотах порядка единиц герц, требуют применения конденсаторов большой емкости. Здесь также для снижения габаритных размеров используют резисторы с сопротивлением единицы и десятки мега-

ом для того, чтобы можно было применить конденсаторы небольших размеров.

Серийно выпускаемая виброизмерительная аппаратура имеет недостаточно высокую точность и стабильность. Это в большой степени обусловлено использованием дискретных полупроводниковых приборов. Применение интегральных операционных усилителей в узлах аппаратуры позволило значительно повысить точность измерения и стабильность работы виброизмерительной аппаратуры благодаря повсеместному использованию глубоких отрицательных обратных связей. Так погрешность измерения электрического сигнала, снимаемого с пьезоакселерометра, достигает 10—15 % в диапазоне температур от -10 до $+50^{\circ}\text{C}$. Доля погрешности измерения размеров вибрации приходится на преобразовательное устройство, состоящее из пьезоакселерометра и согласующего предварительного усилителя.

Один из путей уменьшения этой погрешности — использование предварительного усилителя, встроенного в корпус акселерометра. При этом устраняется влияние соединительного кабеля на выходной сигнал и появляется возможность получения единого унифицированного сигнала на выходе пьезоакселерометра.

Важным узлом виброизмерительной аппаратуры, во многом определяющим точность измерения, является детектор эффективных значений сигнала. Современные схемы таких детекторов, выполненные на микросхемах, позволяют снизить погрешность до 1%.

Во входных цепях виброизмерительной аппаратуры необходимо использовать малошумящие усилители для расширения динамического диапазона.

С учетом сказанного можно сделать вывод, что в виброизмерительной аппаратуре наиболее целесообразно использовать микросхему К544УД1, обладающую низким уровнем шумов инфранизкочастотной области частотного диапазона и малыми входными токами благодаря входным полевым транзисторам, входящим в нее. Низким уровнем шумов в инфранизкочастотной области также отличается микросхема К140УД7.

Глава 4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЛАЗЕРНО-МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВИБРОКОНТРОЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ*

4.1. Виброконтрольная аппаратура

Надежность вибрационного контроля технического состояния машин и механизмов зависит от достоверности измерений информативных параметров вибрации, т.е. от погрешности применяемой виброизмерительной аппаратуры. В общем случае индикатором измерений технического состояния контролируемого объекта является абсолютное Δx или относительное σx измерение измеряемого параметра вибрации x .

Артюшиной В.И. предложено принять нормальный закон распределения погрешностей виброаппаратуры, σx_a и изменений вибрации объекта σx_0 :

$$\sigma x = \sqrt{\sigma x_a^2 + \sigma x_0^2}. \quad (4.1)$$

В вибродиагностике применяется параметр информативность I :

$$I = \frac{\sigma x_0}{\sqrt{\sigma x_a^2 + \sigma x_0^2}}. \quad (4.2)$$

Из формулы (4.1) видно, что $I \rightarrow 1$ при $\sigma x_a \rightarrow 0$, т.е. информативность увеличивается при уменьшении погрешности виброаппаратуры.

Собственно погрешность виброаппаратуры состоит из погрешности калибровки σx_k и суммы дополнительных погрешностей x_i , в которую входят погрешности от нелинейности амплитудной характеристики, неравномерности амплитудно- и фазочастотных характеристик, влияний вибрации в неизмеряемых направлениях и т.д.:

$$\sigma x_a = \sqrt{\sigma x_k^2 + \Sigma(\sigma x_i)^2}. \quad (4.3)$$

Погрешность калибровки составляет основную часть общей погрешности σx_a и зависит главным образом от погрешности воспроизведения вибрации на образцовых и калибровочных установках.

* Глава разработана при участии Артюшиной В.И., Ивановой Е.Г., Максимовой Е.В.

В свою очередь погрешность калибровки σx_a зависит от погрешностей, вносимых нелинейными искажениями формы колебаний σx_k , поперечными колебаниями вибростола σx_n , температурными зависимостями σx_t и прочими факторами влияния σx_{np} . При достоверной вероятности 0,99

$$\sigma x_a = \sqrt{\sigma x_{ид}^2 + 2(\sigma x_k^2 + \sigma x_n^2 + \sigma x_{нс}^2 + \sigma x_t^2 + \sigma x_{np}^2)}, \quad (4.4)$$

где $\sigma x_{ид}^2$ – погрешность измерения воспроизводимых колебаний в идеальных условиях. Погрешность σx_k зависит от типа индикаторов и детекторов в измерительных устройствах вибростендов. В общем случае

$$\sigma x_k \leq \left(\sqrt{1 + \kappa_{Г}^2} - 1 \right),$$

где $\kappa_{Г}$ - коэффициент гармоник формы колебаний на вибростенде. При $\kappa_{Г} < 2\%$ влияние σx_k на σx_a можно практически исключить путем применения электронного или цифрового интегрирования вибрационных сигналов, использования детекторов среднего квадратического значения и цифровых индикаторов. Влияние σx_n можно не учитывать при относительных поперечных колебаниях вибростенда $K_{нс} \leq 10\%$ и поперечной чувствительности образцового вибродатчика $K_{ид} \leq 1\%$. В общем случае

$$\sigma x_k = \frac{K_{нс} \cdot K_{ид}}{100}.$$

Для исключения заметных влияний остальных факторов на погрешность калибровки следует при разработке образцовых виброустановок стремиться выполнять условие:

$$(\sigma x_{нс} + \sigma x_t + \sigma x_{np}) \leq 0,25 \sigma x_{ид}.$$

Для выполнения этого условия применяются высокостабильные генераторы, вибраторы с электромеханической обратной связью по постоянным магнитам и другие конструктивные решения, позволяющие получить высокую стабильность колебаний в течение длительного времени и при изменениях условий эксплуатации.

Минимальное значение $\sigma x_{ид}$ зависит от погрешности образцового виброизмерительного устройства, применяемого при аттестации калибровочных вибростендов. При использовании для этих целей систе-

мы пьезоэлектрический вибродатчик–согласующий усилитель–цифровой вольтметр практически невозможно получить погрешность $\sigma x_{ид} < 2\%$. Для уменьшения $\sigma x_{ид}$ при аттестации вибростендов разработаны лазерные измерители виброперемещения типа ЛИВ-1 [7] и виброскорости ЛИВ-1М [3] интерференционного типа. В этих устройствах в качестве единиц измерений используется длина волны излучения гелий-неонового лазера $\lambda=0,6328$ мкм. Подробные описания этих устройств приведены в работах [6, 7]. При измерении амплитуды виброперемещения S_0 подсчитывается число импульсов N за целое число периодов колебаний m , которые связаны соотношением

$$S_0 = \frac{\lambda \cdot N}{8 \cdot m}. \quad (4.5)$$

Как видно из формулы (4.5), погрешность измерений S_0 определяется только погрешностью длины волны λ и $\sigma S_{ид} \leq 0,01\%$.

При измерении виброскорости счет импульсов производится за фиксированное время T и V_0 определяется по формуле

$$V_0 = \frac{\lambda \cdot N}{8 \cdot T}. \quad (4.6)$$

В работе [7] приведен анализ погрешности измерения виброскорости интерференционными методами и показано, что большая часть погрешности вносится неоднозначностью счета в дробной части периода колебаний. В частотном диапазоне 10 – 1000 Гц при $T \approx 2$ с, $\sigma V_{ид} \leq 0,3\%$.

Таким образом, погрешность воспроизведения колебаний при аттестации вибрационных установок с использованием лазерных интерферометров ЛИВ-1 и ЛИВ-1М не превышает 0,5%.

Для метрологического обеспечения вибродиагностической и виброконтрольной аппаратуры в промышленных и лабораторных условиях разработаны и внедрены портативный вибростенд ВСВ-131 и стационарный образцовый вибростенд ВСВ-132.

Структурная схема вибростенда ВСВ-131 представлена на рис. 4.1. Генератор 1 вырабатывает переменное напряжение с фиксированными частотами 45, 64 и 96 Гц. Напряжение с генератора через сумматор 2

поступает на вход усилителя мощности 3, к выходу которого подключена катушка возбуждения электродинамического возбудителя механических колебаний 4. Корпус возбудителя крепится к основанию вибростенда через подвесную систему с жесткостью c_2 и коэффициентом затухания h_2 . На подвижном столе возбудителя установлен пьезоэлектрический вибродатчик 5, вырабатывающий электрический сигнал, пропорциональный виброускорению. Сигнал с вибродатчика поступает на вход измерительного блока 6, прямо на второй вход сумматора и через интегратор 7 - на третий вход сумматора. По индикаторам измерительного блока 9 производится отсчет параметров воспроизводимых механических колебаний (размах виброперемещения, среднее квадратическое значение виброскорости). Путем подключения ко входам сумматора сигнала с вибродатчика осуществляется электрическая обратная связь по виброускорению и виброскорости, позволяющая производить настройку колебательной системы вибростенда при калибровке вибродатчиков с различными массами, а также уменьшить влияние внешних механических помех.

Подвесная система возбудителя предназначена также для уменьшения влияния внешних механических помех на погрешность калибровки и для уменьшения передачи колебаний от вибростола на основании.

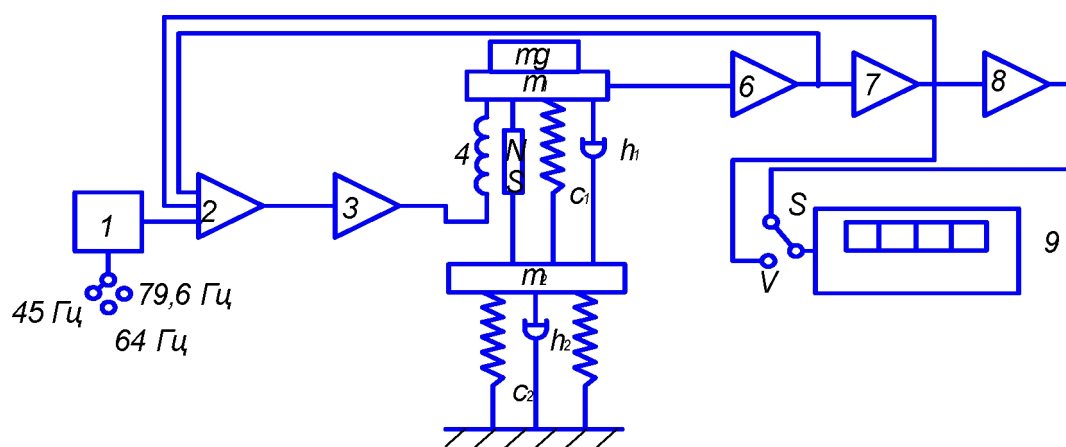


Рис. 4.1. Вибростенд переносной ВСВ-131. Структурная схема: 1 – генератор; 2 – сумматор; 3 – усилитель мощности; 4 – возбудитель механических колебаний; 5 – вибродатчик; 6 – измерительный блок; 7 – интегратор; 8 – усилитель сигнала; 9 – измерительный блок

Собственная частота подвесной системы выбрана из условия

$$\omega_{01} \gg \omega_{02},$$

где $\omega_{01} = \sqrt{\frac{c_1}{m_1}}, \omega_{02} = \sqrt{\frac{c_2}{m_2}}.$

Относительный коэффициент передачи колебаний от вибростола на основание, и наоборот, пропорционален $\omega_{01}^2 / \omega_{02}^2.$

В вибростенде ВСВ-131 $F_{02} \approx 8$ Гц, а F_{01} имеет значение от 45 до 80 Гц в зависимости от массы калибруемого вибродатчика. С помощью вибростенда ВСВ-131 можно калибровать вибродатчики массой до 1 кг с основной приведенной погрешностью не более $\pm 2\%$.

Структурная схема стационарного вибростенда ВСВ-132 изображена на рис. 4.2. Вибростенд состоит из блока возбуждателя вибрации БВ, блока усилителя мощности БУМ и измерительного блока ИБ. Замкнутая цепь рабочая катушка – Кр, усилитель мощности УМ, сумматор СМ, катушки датчика Кд и предварительного усилителя У образуют контур электромеханической обратной связи, который позволил повысить стабильность колебаний более, чем на порядок. Измерительный блок состоит из генератора и блока измерения вибрации. Общий вид алюминиевого сотового прослоя изображен на рис. 4.3.

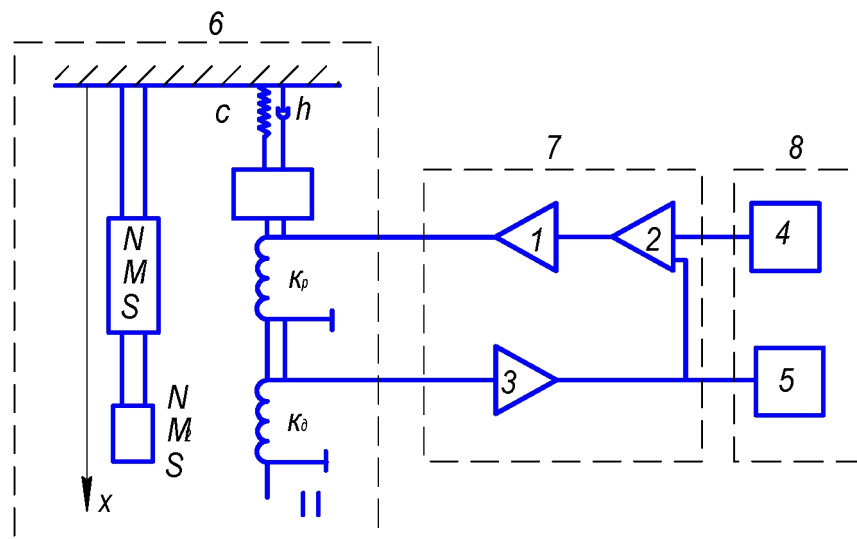


Рис. 4.2. Вибростенд стационарный ВСВ-132. Структурная схема:

- 1 - усилитель мощности; 2 – сумматор; 3 – усилитель; 4 – генератор;
5 - измерительный блок; 6 – возбуждатель вибрации; 7 – блок усилителя мощности



Рис. 4.3. Общий вид алюминиевого сотового прослоя

Погрешность поверки виброаппаратуры на вибростенде ВСВ-132 в частотном диапазоне 10 – 1000 Гц не превышает 2%, а погрешность калибровки < 1%.

4.2. Лазерный измеритель виброперемещения

Для измерения параметров вибрации при аттестации и периодической поверке поверочных установок применяют метод счета интерференционных полос. Амплитуда перемещения в этом случае определяется числом импульсов и длиной волны лазерного источника света. Для нестабилизированного по частоте гелий-неонового лазера ЛГ-66 длина волны 0,6328 мкм задана с погрешностью

$$\Delta\lambda = (0,5 \cdot 10^{-5}) / 0,6328 = 0,78 \cdot 10^{-5} \text{ мкм, т. е. } \delta < 0,001 \% [6].$$

Интерферометр выполнен по схеме Майкельсона. Он состоит из одномодового гелий-неонового лазера, светоделительного куба, двух уголковых отражателей и фотодиода (см. рис. 4.4). Луч лазера ЛГ разделяется светоделительным кубом СК на два пучка I и II приблизительно равной интенсивности, которые далее направляются соответ-

венно на уголкового отражатели У01 и У02. Первый отражатель неподвижен, а второй 7 закреплен на вибростоле, как показано на рис. 4.4.

Смещенные и отраженные пучки вновь объединяются светоделительной плоскостью в один пучок и, интерферируя, падают на фотодиод ФД. Благодаря малому диаметру пучка $D \leq 1$ мм картина в поперечном сечении интерферирующих лучей не содержит структуры полос и представляет собой пятно с равномерной освещенностью, зависящей только от положения отражателя в подвижном плече интерферометра.

Преобразованный фотоприемником оптический сигнал представляет собой чередование максимумов и минимумов тока с периодом, соответствующим перемещению отражателя на половину длины волны излучения. После преобразователя ток – напряжение 1 сигнал преобразуется компаратором 2 в прямоугольные импульсы, соответствующие максимумам фототока. Количество импульсов, подсчитанное за период колебания вибростола, связано с размахом колебания вибростола соотношением $2S = (\lambda N)/4$, где $2S$ – размах колебаний вибростола; N – число импульсов, подсчитанное за один период колебания вибростола; λ – длина волны света. Если счет происходит в течение m -периодов, то $N = (4/\lambda)2Sm$.

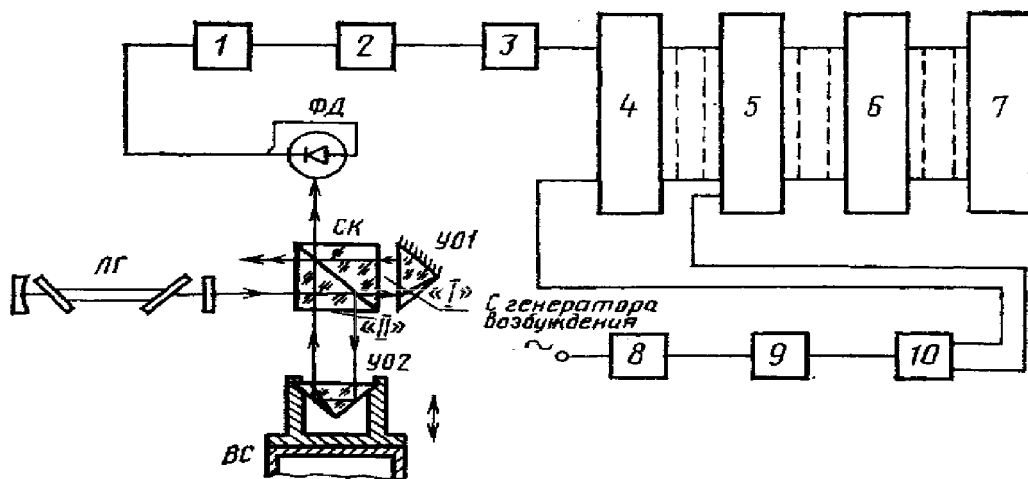


Рис. 4.4. Интерферометр для измерения параметров вибрации:

- 1 – преобразователь тока – напряжение; 2, 8 – компаратор;
- 3, 9 – делитель частоты; 4 – счетчик индикации; 5 – элементы памяти;
- 6 – дешифраторы; 7 – цифровые индикаторы; 10 – схема управления

Для удобства счета необходимо, чтобы коэффициент, связывающий размах колебания с числом импульсов, был кратен 10, т. е. $(4/\lambda)m = 10^n$, откуда при $n=1$; $\lambda = 0,6328$ мкм получаем $m=1,582$.

Умножение на коэффициент m можно осуществить счетом числа импульсов за 1582 периода (или за 791 период). Однако в этом случае значительно увеличивается время измерения, особенно на низких частотах. Более удобно осуществить пересчет, считая импульсы за небольшое число периодов, но предварительно поделив частоту их повторения на некоторое целое число [6]. Наиболее близким коэффициентом является правильная дробь $19/12=1,5833$. Подставим это значение в формулу вместо $m = 1,582$. Тогда дополнительная погрешность счета N не превысит $(0,0013/1,582) = 0,00085$, т. е. $\delta=0,085\%$.

Теперь число импульсов, поделенное на 12 и сосчитанное за 19 периодов колебания, связано с размахом соотношением $N=10 \cdot 2S$, т. е. один импульс соответствует перемещению вибростола на 0,1 мкм.

Для управления работой счетчиков к схеме на отдельный вход подводится сигнал с генератора возбуждителя вибростола. Компаратор 8 преобразует его в импульсы, которые далее поступают на пересчетное устройство. Это устройство, реализующее коэффициент пересчета $19/12$, строится по принципу счета каждого 1-го импульса изменяемой последовательности импульсов за время, равное 19 периодам колебаний вибростола. Измеряемые импульсы проходят схему деления на двенадцать (делитель частоты 5) и подаются на вход счетчиков индикации 4. Импульсы, соответствующие частоте колебаний вибростола, проходят схему деления на девятнадцать (делитель частоты 9) и поступают на схему управления счетчиками индикации 10.

Схема управления 10 обеспечивает перезапись памяти в запоминающих резисторах 5 и установку на нуль счетчиков индикации 4 при поступлении на ее вход каждого импульса последовательности, деленной на 19.

Элементы памяти 5 через дешифраторы 6 подключаются к цифровым индикаторам 7, на которых фиксируется результат измерения. Смена показаний индикаторов и кода в элементах памяти происходит через каждые 19 периодов колебаний вибростола.

Виброметр предназначен для измерения амплитуд перемещения подвижной системы вибрационных установок с коэффициентом нелинейных искажений не более 2% и относительным коэффициентом поперечных колебаний не более 3%.

При параллельном луче лазера, обеспечивающем качество уголкового отражателя и светоделительного куба, поперечные колебания вибростенда не вносят дополнительных погрешностей измерений виброперемещения в основном направлении [8]. Изготавливаемые серийно, уголкового отражатели имеют угловую погрешность шлифовки граней не менее одной угловой минуты. Погрешность, вносимая уголкового отражателем, равна

$$\delta_1 = k_n \sin \alpha ,$$

где k_n — относительный коэффициент поперечных колебаний; $\alpha=1'$.

Лазерный виброметр изготовлен на базе лазеров ЛГ-66 (или ОКГ-13) с углом расходимости луча не более 10 угловых минут при диаметре около 1 мм.

Дополнительная погрешность при поперечных колебаниях может возникнуть из-за интерференции референтного луча с частью луча, отраженного от колеблющегося уголкового отражателя, имеющего различную длину хода за счет угловой расходимости луча. При длине хода луча $l=200$ мм диаметр луча лазера увеличивается на 0,6 мм. При этом увеличивается длина хода по краям конуса на 0,91 мкм, что приводит к появлению интерференционных полос или колец шириной 0,4 мм. Так как фотоприемник вырабатывает один импульс при изменении разности длин хода на $\lambda/2$ (0,3164 мкм), то погрешность измерений увеличивается на 0,3 мкм при перемещении в поперечном направлении на 0,2 мкм.

Дополнительную погрешность от поперечных колебаний вибростенда можно представить в виде зависимости дополнительного числа импульсов, поступивших на счетчик индикации за 19 периодов, от $2S$ и k_n , т.е. $N \approx 0,82Sk_n \cdot 10^{-4}$ мкм, где $2S$ — размах виброперемещений в мкм.

Для вибратора при $2S \leq 1000$ мкм и $\kappa_n < 3\%$ погрешность от его поперечных колебаний при измерениях размаха виброперемещения лазерным виброметром практически отсутствует. Максимальная амплитуда поперечных колебаний вибратора ограничивается зоной совмещения лучей и не должна превышать 0,5 мм. При измерениях поперечных колебаний с амплитудами > 500 мкм необходимо между лазером и светоделительным кубом установить расширитель луча.

Более сложное влияние на точность измерений колебаний лазерным виброметром оказывают высокочастотные составляющие спектра колебаний. Для уменьшения влияния высокочастотных помех в виброметре применен компаратор 2 со знакопеременным порогом, исключая влияние помех, амплитуды которых не превышают 0,2 мкм. Для уменьшения высокочастотных составляющих в поверочной вибрационной установке применены: электромеханическая отрицательная обратная связь по виброскорости; пружины подвески покрыты демпфирующим слоем; оптическая система установлена на виброизолирующих подкладках. Расположение интерференционных полос на торце оптоволокна изображено на рис. 4.5.

Погрешности, вносимые установочным резонансом крепления поверяемых преобразователей и резонансами его отдельных элементов:

$$\delta_2 = 0,25[(A_{\Pi} f_{\Pi}) / (A_0 f_0)]^2,$$

где A_{Π}, f_{Π} — амплитуда и частота посторонних колебаний; A_0, f_0 — амплитуда и частота основных колебаний.

Дополнительная погрешность, вносимая резонансами подвижной системы, не превышает 0,32% при частоте 1 Гц. На частотах свыше 100 Гц она не превышает погрешность, определяемую дискретностью измерений.

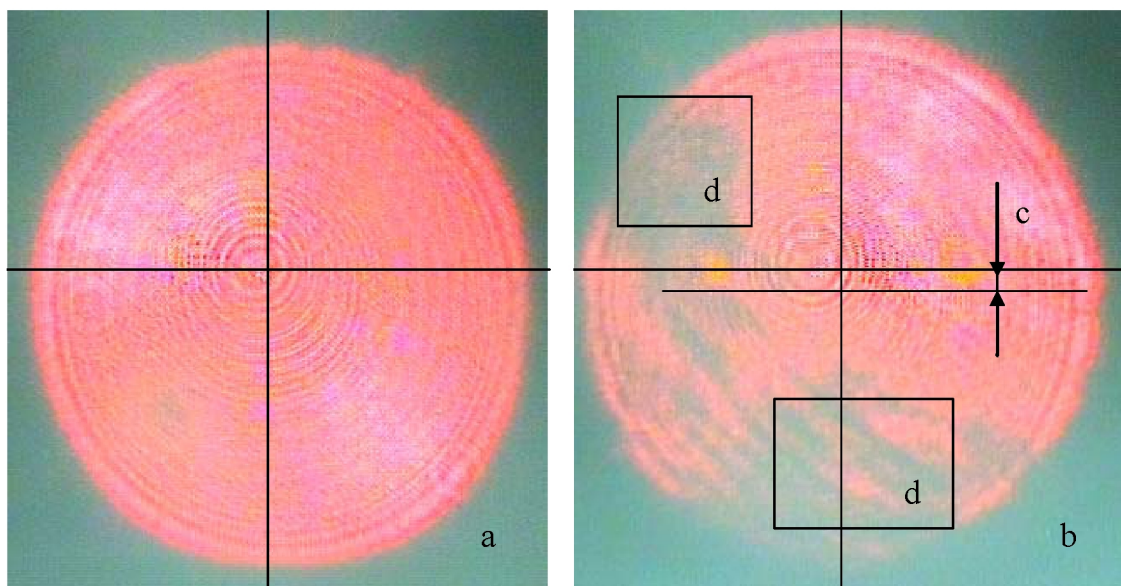


Рис. 4.5. Расположение интерференционных полос на торце оптоволокна:
 а – при колебательном воздействии на многослойную оболочку без наличия дефекта;
 б – при колебательном воздействии на многослойную оболочку
 в случае непрочлея верхнего слоя; с – величина смещения центральной области;
 d – характеристические пятна

Технические характеристики лазерного измерителя следующие: диапазон измерений размаха виброперемещения 0,3—1000 мкм; диапазон частот 1 —1000 Гц; максимальная скорость 100 мм/с; дискретность измерений размаха виброперемещения 0,1 мкм; абсолютная погрешность измерения размаха виброперемещения $2S$ равна $0,85 \cdot 10^{-3}$ мкм; температура воздуха $20 \pm 5^\circ\text{C}$; влажность воздуха при 25°C $65 \pm 15\%$; питание напряжением 220 ± 5 В; частота $50 \pm 0,5$ Гц.

Глава 5. МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

5.1. Область применения методики выявления повреждений

5.1.1. Разработка методики использования лазерных измерительных систем для выявления поверхностных повреждений

Широкое применение для контроля качества изделий среди оптических методов получили лазерные измерительные системы. Их преимущества – бесконтактность, высокая информативность, возможность работы в реальном масштабе времени. Использование лазерных измерительных систем для выявления поверхностных дефектов в виде трещин, забоин, отслоения покрытий, возникающих в процессе эксплуатации обсадных колонн, позволяет повысить показатели надежности их элементов, увеличить гарантируемый срок работы с регламентируемой безопасностью эксплуатируемых изделий, а также значительно снизить себестоимость диагностики [1, 2].

Подобные средства позволяют контролировать в процессе изготовления и эксплуатации изделий геометрические параметры их элементов конструкций, размеры, форму, расположение и др. Сканирование лазерного излучения и визуализация изображений имеют превосходство перед другими способами контроля. В связи с этим данное направление исследования по совершенствованию подобных лазерных измерительных систем является своевременным и актуальным.

Основным безразмерным параметром элемента поверхности (трещины, царапины, забоины, а также элементы шероховатости) является число переотражений излучения в нем n [5]. Значение этого параметра зависит от геометрии дефекта (соотношения ширины и глубины, формы) и угла падения излучения на исследуемую поверхность. Вероятность обнаружения дефекта зависит от соотношения его ширины и диаметра пятна излучения на поверхности. Была выбрана оптическая система, в которой измеряемым параметром являлась интенсивность зеркально отраженного излучения на диаметре, равном диаметру ис-

точника излучения. При этом основными параметрами оптической системы являются: угол падения излучения на исследуемую поверхность α , диаметр пятна излучения на поверхности B_1 и высота расположения приемного объектива над поверхностью H_1 . Данная оптическая система обеспечивает обнаружение поверхностных дефектов при любых значениях H_1 и распознавание видов повреждений при $H_1 < B_1$. Характерные значения параметра n (при $\alpha = \pi/6$):

- глубокие трещины ($n > 6$).
- неглубокие трещины ($2 < n < 6$).
- царапины ($n < 2$).
- износ поверхности ($0 < n < 1$).
- окисная пленка на поверхности ($n \leq 0$).

Выявлена периодическая зависимость величины отраженного сигнала в центре трещины от угла раскрытия трещины и параметра n . Поэтому необходимо сканирование поверхности при двух различных углах падения излучения, при этом величины n_1 и n_2 однозначно определяют геометрию повреждения.

Место разрушения элементов конструкций определяется в процессе измерений следующими характерными параметрами:

- средним значением интенсивности отраженного сигнала W_0 , определяемым параметрами шероховатости поверхности;
- монотонным увеличением или убыванием величины W/W_0 при наличии искривления поверхности;
- участки с абразивным износом или окалиной характеризуются плавным снижением, а затем увеличением величины W/W_0 . В отличие от искривленной поверхности такие участки характеризуются увеличением разброса величины W/W_0 .

Для забоин характерно резкое снижение, а затем и повышение относительной величины интенсивности отраженного излучения и увеличение угла наклона кривой $W/W_0 = f(x/x_0)$. На участке повреждения наблюдается увеличение разброса величины W/W_0 по сравнению с бездефектной поверхностью.

Трещины в поверхностном слое вызывают наиболее резкое снижение величины отраженного сигнала ($\Delta W/W_0 = \max$) с максимальным углом наклона кривой ($d(W/W_0)/d(x/x_0) = \max$). При наличии царапин параметры $\Delta W/W_0$ и $d(W/W_0)/d(x/x_0)$ имеют меньшие значения, чем для трещин.

Процесс выявления дефектов зондирующим лазерным пучком включает в себя следующие стадии: определение исходных данных (характеристик материала и детали, вида их обработки, условий эксплуатации), определение возможных видов дефектов и повреждений, выбор параметров оптической системы и траектории сканирования), определение оптических характеристик поверхности изделия, преобразование полученных оптических характеристик в требуемые физические и механические характеристики поверхностной структуры и составление прогноза работоспособности изделия.

5.1.2. Выбор параметров оптической системы

Исходными данными являются: характеристики детали – геометрические характеристики детали, механические свойства материала; виды обработки – получение (литье, обработка резанием и др.), соединение (резьба, сварка), термообработка, поверхностная обработка, способ и режим нанесения покрытия; параметры оптической системы – источник излучения и его характеристики (длина волны, мощность излучения, модовый состав, диаметр пятна), приемник излучения и его характеристики, элементы оптической системы и их характеристики, расстояние до исследуемой поверхности; условия эксплуатации [1, 2, 5]. Параметры оптической системы выбираются с учетом характеристик материала и детали и предполагаемого диапазона изменения геометрических характеристик выявляемых дефектов.

В условиях эксплуатации выявляются: характер дефекта (поверхностный или внутренний), местоположение дефекта, размер, форма, ориентация: изменение состояния поверхности (коррозия, абразивный износ и др.). Определяемыми параметрами для поверхностных дефектов являются:

- при выявлении трещин ($n > 2$) – определение зависимости $W/W_0 = f(x/x_0)$ и углов падения излучения α_1 и α_2 . Вид зависимости позволяет определить ширину трещины S . Относительная величина сигнала в центре трещины W_{\max}/W_0 и максимальное значение W_{\max}/W_0 позволяют определить значения параметров n_1 и n_2 , а по значениям этих величин - форму и геометрические параметры трещины γ , φ_1 , H_2 , величины напряжений в вершине трещины и коэффициентов интенсивности напряжений, значения приложенных напряжений;

- при изменении состояния поверхности ($n < 2$) – локальное значение коэффициента отражения, абразивный износ, окисная пленка, размеры рассеивающих частиц, искривление поверхности (элементы топологии поверхности); параметры рассеяния.

Выходными параметрами являются: шероховатость поверхности, размеры рассеивающих частиц, состав композиционных материалов и содержание компонентов в них, толщина и состав окисной пленки, геометрические характеристики участков повреждений, величина и характер приложенных напряжений.

В соответствии с результатами теоретических исследований диаметр пятна излучения на поверхности детали не должен превышать наименьшей предполагаемой ширины поверхностных повреждений. В соответствии с выбранным диаметром пятна определяется значение высоты расположения приемного объектива над поверхностью из условия $H_1/B_1 < 1$. Диапазон изменения глубины поверхностных дефектов определяет углы падения излучения α_1 и α_2 .

5.1.3. Область применения разработанной методики

Разработанная методика была применена для выявления поверхностных дефектов обсадных колонн. Параметры оптической системы имели следующие значения: длина волны излучения $\lambda = 0,63$ мкм, угол падения излучения $\alpha = 30^\circ$, диаметр зондирующего пучка $B_1 = 0,3$ мм, высота объектива над исследуемой поверхностью $H = 20$ мм.

С использованием лазерной измерительной системы (рис. 5.1) исследованы поверхности следующих образцов: из титанового сплава

ВТ-14, из химически полированного алюминия АД-1М, из алюминиевого сплава АД-1М с покрытием на основе полисилоксанового масла, из углеродистой стали с наличием окисной пленки на поверхности, из стеклотекстолита АФТ-2П, образца из титанового сплава с покрытием на основе жидкого калиевого стекла с наполнителем ZrO_2 , MgO , ZnO , алюминиевого образца с анодным покрытием черного цвета, образца из полилавсановой пленки с алюминиевым покрытием, алюминиевого образца с покрытием на основе жидкого калиевого стекла с наполнителем ZrO_2 модифицированным, образца с зеркальной поверхностью, образца из алюминиевого сплава, имитирующего трещину.

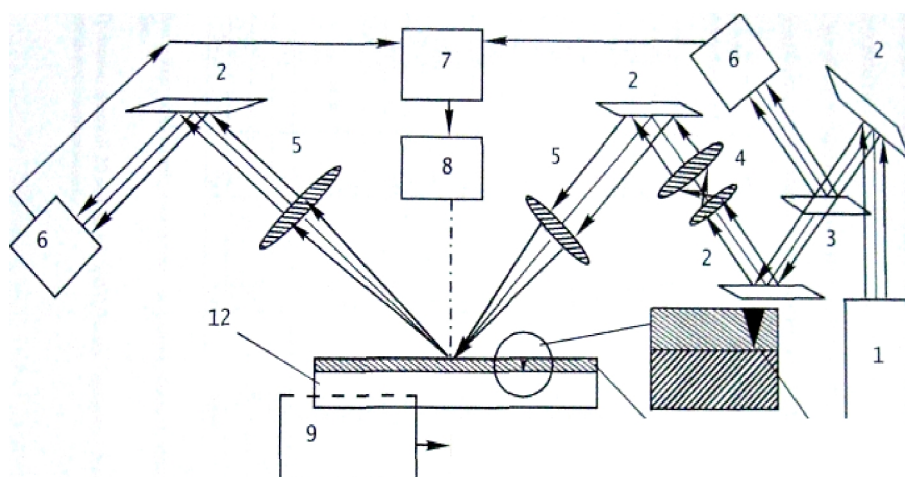


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки для выявления поверхностных повреждений

Выявление повреждений поверхностного слоя образцов осуществлялось по результатам измерения интенсивности зеркально-отраженного излучения при сканировании по поверхности. Зависимости изменения относительной величины сигнала сопоставлялись с профилограммами исследуемых участков поверхности образцов (рис. 5.2).

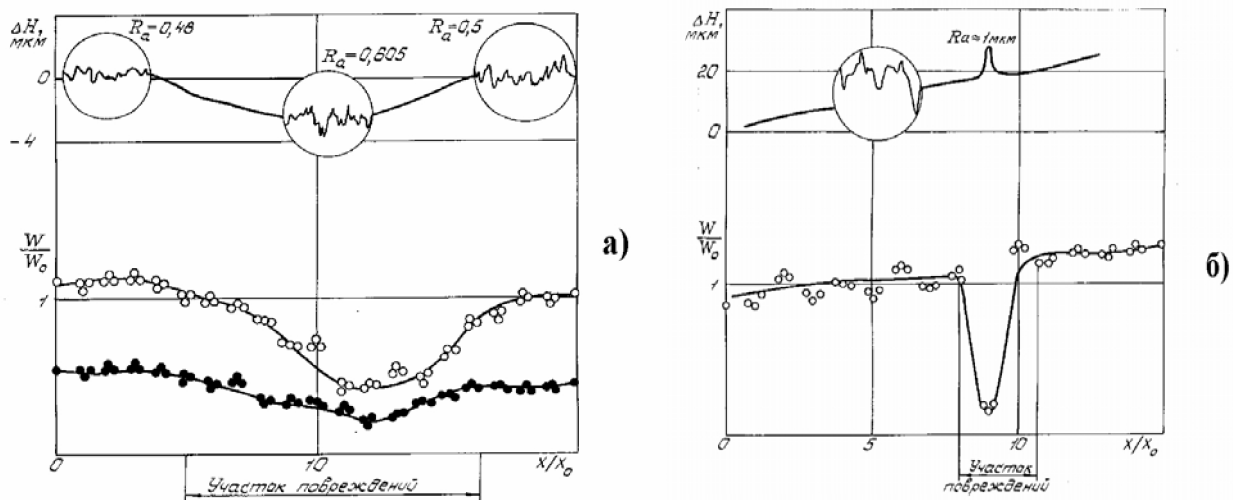


Рис. 5.2. Общий вид профилограмм поверхности и зависимости изменения относительной величины сигнала W/W_0 от координаты x/x_0 для образцов из титанового сплава ВТ-14 ($W_0=0,533$ мВт) (а) и химполированного алюминия с покрытием на основе полисилоксанового масла ($W_0=0,99$ мВт) (б): $x_0 = 1,6$ мм.; \circ чистая поверхность, \bullet поверхность, смачиваемая слоем воды толщиной $\delta=1,5$ мм, вертикальное увеличение на профилограмме - 5000, горизонтальное - 50

Применение разработанной методики лазерной дефектоскопии позволило повысить уровень использования изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками, в том числе с повышенной адгезионной и когезионной прочностью, на 20%.

5.2. Устройство для обнаружения повреждений

5.2.1. Аналитические зависимости характеристик отражённого сигнала

Выявлено, что вариантом для обнаружения поверхностных повреждений обсадных колонн в виде трещин, царапин, забоин и изменений состояния поверхности является лазерная дефектоскопическая система, в которой их наличие определяется по изменению интенсивности зеркально отраженного излучения. При выводе аналитических зависимостей величины характеристик отраженного сигнала применялись законы геометрической оптики с интегральными оценками отражения элементных составляющих зондирующего пучка. Здесь форма поперечного сечения описывалась ломаными прямыми.

Для выявления зависимости величины отраженного сигнала от параметров оптической системы (диаметра пятна, угла падения излучения, диаметра приемного объектива) и геометрических параметров дефекта рассмотрим изменение интенсивности зеркально отраженного излучения при сканировании по поверхности с трещиной произвольного угла раскрытия 2γ .

При распространении излучения точечного источника в трещине (рис. 5.3) и постоянном коэффициенте отражения

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma, \\ \beta_1 &= 2\phi_1 + \alpha = \pi - \alpha - 2\gamma.\end{aligned}\tag{5.1}$$

Из треугольника ABO :

$$\begin{aligned}\frac{\pi}{2} - \phi_1 + \frac{\pi}{2} + \phi_2 + 2\gamma &= \pi, \\ \phi_2 &= -2\gamma + \phi_1 = -\alpha - 3\gamma + \frac{\pi}{2},\end{aligned}\tag{5.2}$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} - \gamma + \phi_2 = \pi - \alpha - 4\gamma,$$

а для произвольного значения n :

$$\begin{aligned}\beta_n &= \pi - \alpha - 2n\gamma, \\ \phi_n &= \frac{\pi}{2} - \alpha - (2n-1)\gamma,\end{aligned}\tag{5.3}$$

где α - угол падения излучения на исходную поверхность; ϕ_1 - угол падения излучения на поверхность трещины; β_1 - угол между отраженной поверхностью трещины излучением и вертикалью при первом отражении; β_2 - угол падения излучения и угол между отраженным лучом и вертикалью при втором отражении от поверхности трещины; ϕ_n, β_n - угол падения излучения и угол между отраженным лучом и вертикалью при выходе из трещины; γ - половина угла раскрытия трещины, n - число переотражений.

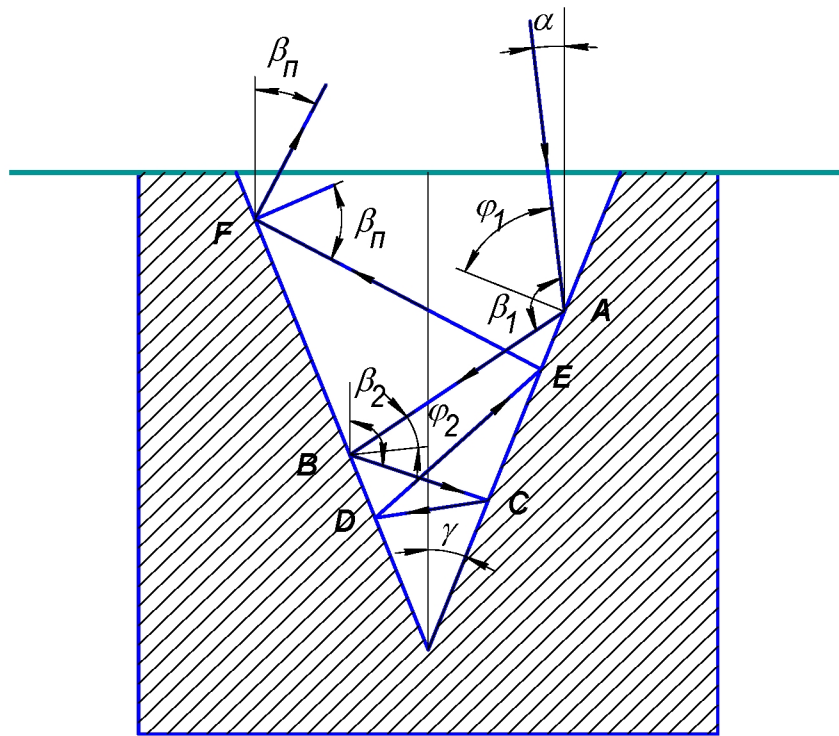


Рис. 5.3. Распространение излучения точечного источника в трещине

Отметим, что после отражения от поверхности трещины излучение идет вниз, если $\phi_n > 0$, и вверх, если $\phi_n < 0$. Соотношение углов α и γ , для которых направление распространения излучения на выходе из трещины соответствует направлению зеркально отраженного от исходной поверхности излучения, определяется в случае $\beta_1 = \alpha$ соотношением $\gamma = (\pi / 2 - \alpha) / n$.

При падении излучения источника с квадратным сечением с равномерным распределением мощности на поверхность с наличием трещины смещение светового пятна относительно края трещины x при котором излучение, выходящее из трещины, попадает на приемный объектив, удовлетворяет неравенству:

$$H_2 \operatorname{tg} \gamma < x < H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha, \quad (5.4)$$

где H_2 - глубина трещины, B_1 - диаметр пятна излучения на исследуемой поверхности.

Отношение величины сигнала W при наличии трещины к величине сигнала на бездефектной поверхности W_0 при $n=2$ для $H_2 \operatorname{tg} \gamma < x < < 2H_2 \operatorname{tg} \gamma$ определяется выражением:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{B_1 / \cos \alpha - x}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 (x - x_1)}{A_1 B_1 / \cos \alpha}, \quad (5.5)$$

а для $H_2 \operatorname{tg} \gamma < x < H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{x - 2H_2 \operatorname{tg} \gamma}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 \left(x_2 - \left(x - \frac{B_1}{\cos \alpha} \right) \right)}{A_1 B_1 / \cos \alpha}, \quad (5.6)$$

где A_1 - коэффициент отражения бездефектной поверхности, A_2 - коэффициент отражения поверхности трещины.

Как видно из выражений (5.5) и (5.6), доля излучения, попавшего на объектив после переотражения в трещине при $n=2$ определяется координатой пятна x и не зависит от высоты расположения объектива над поверхностью H_1 .

Рассмотрим случай, когда половина угла раскрытия трещины увеличивается на $\Delta\gamma$ (рис. 5.4) и определим характеристики пучка, выходящего после 1 переотражения из трещины при прежнем значении угла падения излучения $\alpha=30'$ и глубины трещины ($H_2 = B_1$). В соответствии с условием (5.3) излучение выходит из трещины под углом $\beta'_2 = \beta_2 - 4\Delta\gamma$, $\beta'_1 = \beta_1 - 2\Delta\gamma$, $\beta_1 = \pi/2 - 2\Delta\gamma$, а другая распространяется в сторону источника излучения. Здесь знак «-» соответствует трещине с углом $\gamma + \Delta\gamma$. Если для трещины с углом γ все излучение, попадающее в трещину, выходит из нее под углом β , то для трещины с углом $\gamma + \Delta\gamma$ под углом $\beta'_2 = \beta_2 - 4\Delta\gamma$ распространяется излучение, попадающее в трещину при $x_n < x < x_{\text{обр}}$. При этом $x_n = H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma) - \operatorname{tg} \gamma$, $S = H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma)$, $S/B_1 = 2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma)$. Для $\Delta\gamma = 3^\circ$ $S/B_1 = 1,3$.

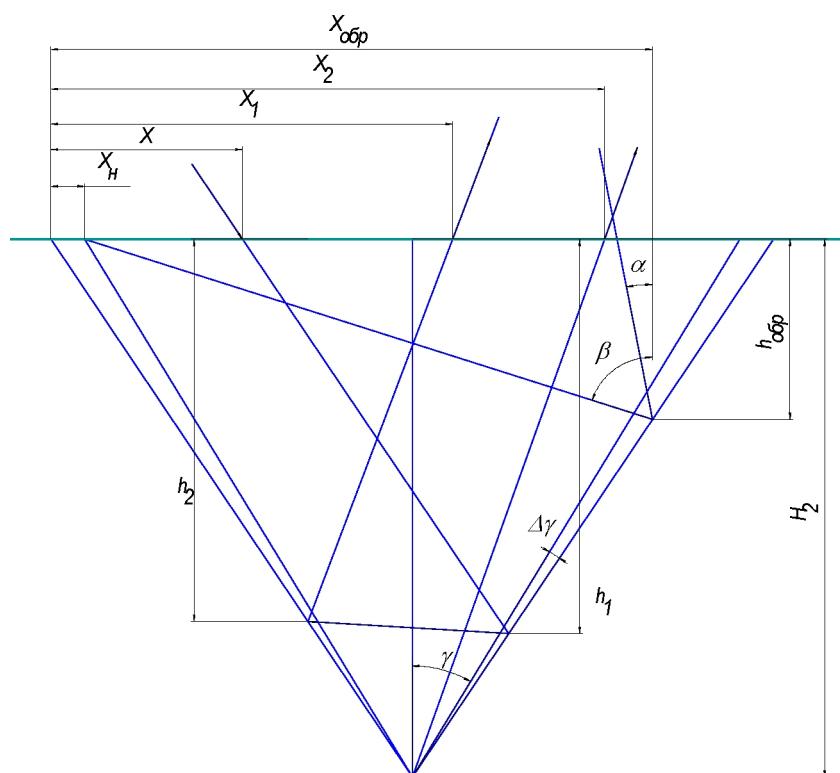


Рис. 5.4. Распространение излучения в трещине при увеличении угла раскрытия трещины на $2\Delta\gamma$

5.2.2. Описание испытательного оборудования

Разработанный стенд для обнаружения поверхностных дефектов по результатам измерения интенсивности отраженного лазерного излучения при сканировании по поверхности детали включает в свой состав гелий-неоновый лазер (ЛГИ-224-1 $\lambda=0,6328$ мкм), стеклянную пластину для формирования опорного сигнала, два оптических ваттметра поглощаемой мощности ОМЗ-65 для регистрации сигналов опорного и измерительного каналов, плоские зеркала и собирающие линзы для направления излучения [1, 2].

Как показали исследования [1, 2], резкое снижение интенсивности отраженного излучения на величину до 50... 98% свидетельствует о наличии царапин, трещин и повреждения покрытий. Размеры дефекта определяются разностью координат, соответствующих резкому снижению сигнала и его возрастанию до прежнего уровня. Вероятность распознавания дефектов зависит от соотношения размеров пятна излучения на поверхности и дефекта, а также шага сканирования и размера дефекта.

Распознавание дефекта невозможно, если его площадь значительно меньше площади сканирующей апертуры и шаг сканирования превышает размеры дефекта. Наибольшая вероятность распознавания дефекта достигается в том случае, если диаметр пятна излучения на поверхности не превышает размеров дефекта и равен шагу сканирования. Разброс величины сигнала W/W_0 увеличивается с ростом шероховатости поверхности (рис. 5.5).

Искривлению поверхности образца соответствует монотонное повышение или снижение величины сигнала W/W_0 с ростом координаты x/x_0 . Изменению шероховатости на участке поверхности образца соответствует изменение среднего уровня величины W/W_0 . Наличие царапин, трещин и повреждений покрытий приводит к резкому снижению сигнала W/W_0 . Возможно также резкое увеличение интенсивности отраженного излучения (образец из стеклотекстолита). Наиболее сильное снижение сигнала отмечается при наличии трещин ($W/W_0 \approx 0,03$). Наличие воды на поверхности образца приводит к снижению среднего уровня сигнала W_0 , величина которого зависит от материала образца. Для образца из титанового сплава ВТ 14 слой воды толщиной 1,5 мм приводит к снижению интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца, в 2 раза. Наличие повреждения регистрируется так же, как и на сухой поверхности. При смачивании поверхности образца водой происходит смещение пятна излучения на фотодиоде, величина которого зависит от толщины слоя жидкости.

Существенное уменьшение габаритов испытательного оборудования возможно при использовании полупроводниковых лазеров в качестве источников излучения. Были проведены исследования их флуктуации мощности, распределения плотности мощности и отклонения излучения в пространстве. Наиболее распространенными материалами для лазерных диодов являются кристаллы, полученные на основе GaAs и InP с активной областью на основе материалов тройных и четверных систем.

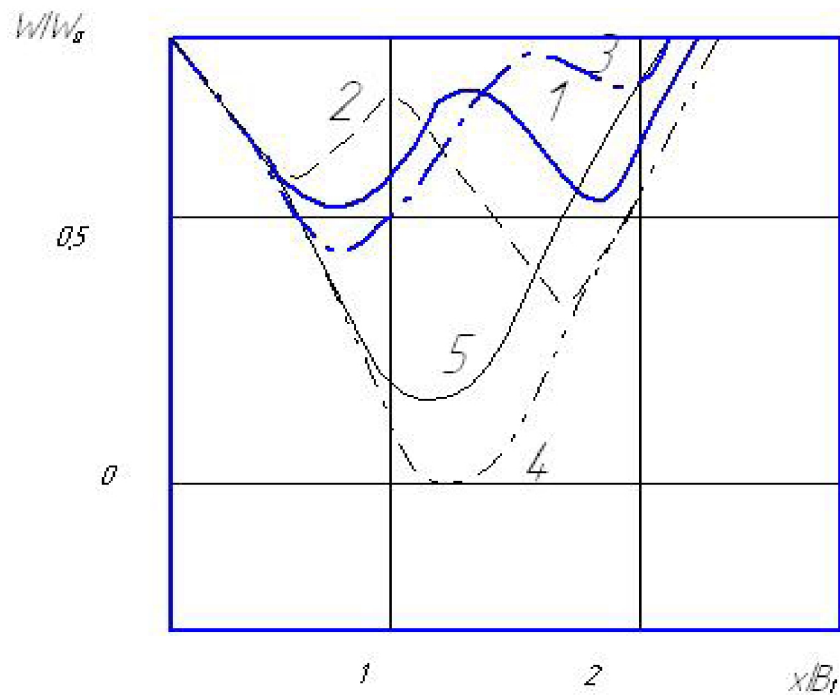


Рис. 5.5. Зависимость изменения относительной величины сигнала W/W_0 от безразмерной координаты x/B_1 для $\alpha=30^\circ$ и различных значений угла раскрытия трещины: 1 - $\gamma=30^\circ$, $n=2$, $S/B_1=1,15$; 2 - $\Delta\gamma=3^\circ$, $n=1,8$, $S/B_1=1,3$; 3 - $\Delta\gamma=3^\circ$, $n=2,2$, $S/B_1=1,02$; 4 - $n \rightarrow \infty$, $H_1/B_1=1$, $S/B_1=1,3$; 5 - $n \rightarrow \infty$, $H_1/B_1=1,02$

Разработанный дефектоскоп включает в свой состав полупроводниковый лазер, отражающее зеркало, направляющее зондирующий пучок на исследуемую поверхность через прозрачное окно. По величине отраженного сигнала, регистрируемого с помощью фотоприемника, выявляются повреждения поверхностного слоя. Для диагностики внутренней поверхности выполняется перемещение светового пятна зондирующего луча по винтовой траектории при вращении вала сканирующей системы с одновременным осевым перемещением устройства. Связь с системой управления, измерительным устройством, источником питания, привода сканирующей системой осуществляется с помощью электрического кабеля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Орнатский, П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. – Киев: Вища школа, 1983.
3. Лазерные и инфракрасные методы дефектоскопии // Надежность и контроль качества: Экспресс-информация. – 1989, № 25 (178).
4. Сазонникова, Н.А. Выявление поверхностных повреждений покрытий оптическим методом / Н.А. Сазонникова, В.И. Мордасов // Перспективные материалы. – 2000, № 3. – С. 95-99.
5. Мордасов, В.И. Проектирование лазерных систем.: учеб. пособие / В.И. Мордасов, С.П. Мурзин, Н.А. Сазонникова [и др.]. – Самара, 2004. – 185с.
6. Балицкий, Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов/ Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова [и др.] – М.: Наука, 1984. – 119с.
7. Виброакустические поля сложных объектов и их диагностика: сб. научн. трудов. – Горький: ИПФ, 1989. – 233с.
8. Шестериков, К.А. Принципы построения аппаратуры для виброакустической диагностики. / К.А. Шестериков, Д.А. Гречинский, В.Г. Рыгалин // Науч.-техн. журнал. – М.: Измерительная техника, 1985, №10 – 21с.
9. Кулеш, В.П. Лазерный интерферометр для градуировки виброизмерительной аппаратуры / [В.П. Кулеш и др.]. – М.: МДНТП, 1975.
10. Андреев, Е.В. Применение элементов микроэлектроники в виброизмерительной аппаратуре / Е.В. Андреев, Д.А. Гречинский, В.Г. Рыгалин // Науч.-техн. журнал. – М.: Измерительная техника, 1985, №10. – 25с.

Учебное издание

Мордасов Василий Иванович
Сазонникова Надежда Александровна
Сорокина Светлана Анатольевна
Шулепова Ольга Викторовна

**ЛАЗЕРНАЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
ДЕФЕКТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Учебное пособие

Редактор Н. С. К у п р и я н о в а
Компьютерная доверстка А. В. Я р о с л а в ц е в а

Подписано в печать 24.11.08. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 5,0.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. С – 14/08.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

