

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

О.А. ЖУРАВЛЕВ, Ю.Н. ШАПОШНИКОВ, А.В. ИВЧЕНКО

ЛАЗЕРНАЯ ВИБРОМЕТРИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

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

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

УДК 621.373.826

ББК 31.294

Л17



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий"**

Авторы: *О.А.Журавлев, Ю.Н.Шапошников, А.В.Ивченко,
С.Ю.Комаров, Ю.Д.Щеглов*

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Н. Д. С е м к и н
канд. физ.-мат. наук, доц. СамГУ М. Н. О с и п о в

Л17 **Лазерная виброметрия механических конструкций:** учеб. пособие /
[О.А. Журавлев и др.] – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та,
2006.-72 с.: ил.

ISBN 5 7883-0406-7

Применительно к задачам вибродиагностики механизмов и машин рассмотрены характеристики параметров механических колебаний и дан анализ методов измерения параметров вибрации на основе традиционных измерительных преобразователей и лазерных средств дистанционного контроля. Рассмотрены физические основы работы и принципы построения лазерных виброметров на основе фотоэлектрических, интерференционных и доплеровских методов. Указаны характеристики лазерных приборов вибрационного контроля.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Автоматические системы энергетических установок» и предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению «Оптотехника» специальности 200202 «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике». Учебное пособие будет полезно студентам других технических специальностей.

УДК 621.373.826

ББК31.294

ISBN 5 7883-0406-7

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ.....	7
1.1. Характеристики параметров механических колебаний и ударов.....	8
1.1.1. Роль и задачи виброметрии ГТД.....	13
1.2. Классификация методов измерения параметров вибрации	14
1.2.1. Датчики (измерительные преобразователи) вибрации и удара.....	14
1.2.2. Методы лазерной виброметрии.....	17
Контрольные вопросы.....	22
2. ЛАЗЕРНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВИБРОМЕТРЫ.....	23
2.1. Позиционно-чувствительные фотоэлектрические виброметры.....	25
2.2. Амплитудные фотоэлектрические виброметры.....	29
Контрольные вопросы.....	32
3. ЛАЗЕРНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ВИБРОМЕТРЫ.....	33
3.1. Особенности оптической интерферометрии.....	33
3.2. Интерференционные виброметры на основе счета полос.....	36
3.2.1. Метод повышения виброустойчивости интерферометра.....	38
3.3. Лазерные виброметры с амплитудной модуляцией	40
3.4. Интерференционные виброметры в поверочных приборах.....	45
Контрольные вопросы.....	50
4. ЛАЗЕРНЫЕ ДОПЛЕРОВСКИЕ ВИБРОМЕТРЫ.....	51
4.1. Основы лазерных доплеровских измерительных систем	53
4.2. Лазерные виброметры с частотной модуляцией излучения.....	60
Контрольные вопросы.....	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	65
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	67
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	71

ПРЕДИСЛОВИЕ

Готовясь к самостоятельной работе по избранной специальности, студенты должны иметь в виду, что измерения пронизывают все сферы инженерного труда. С измерениями связана деятельность инженеров, работающих по профилям исследователей, конструкторов, технологов. Диагностика состояния машин и механизмов, а также оценка степени повреждения на основе данных измерения вибрации и шума являются одним из наиболее действенных и целесообразных видов неразрушающего контроля.

Бесспорные преимущества бесконтактных методов и средств вибрационного контроля с использованием лазеров по сравнению с контактными методами определили причины широкого их применения в самых различных отраслях машиностроения. Особенно большая потребность в лазерных приборах в метрологической практике, так как они являются образцовыми.

Учебное пособие подготовлено как основная литература по одному из разделов учебного курса «Лазерные контрольно-измерительные системы» специальности «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике». Данный раздел связан с важным направлением лазерной метрологии – применением лазеров в виброметрии конструкций. Основная цель пособия – дать студентам единое рассмотрение вопросов теории, принципов построения и применения лазерных виброметров.

Следует отметить, что в данном учебном пособии рассмотрены лишь лазерные виброметры локального типа. К такому классу относятся приборы дающие информацию о параметрах колебательных процессов в отдельных точках поверхности исследуемого объекта.

Лазерные виброметры позволяющие получать информацию о распределении параметров колебаний получили название интегральных (или панорамных). Такие виброметры основаны на лазерных методах голографической и спекл-интерферометрии. Данный класс лазерных виброметров подробно рассмотрен нами в учебном пособии [1].

ВВЕДЕНИЕ

Получение опережающего научно-технического задела в обеспечение развития двигателей летательных аппаратов невозможно без тонкого физического эксперимента, направленного на детальное исследование того или иного процесса или явления, без экспериментальных проверок новых теоретических моделей, где иногда нужны измерения «экзотических» параметров и широкие измерительные возможности и, наконец, без испытаний новых образцов техники, сопровождающихся новыми видами измерений и более высокими требованиями к измерительной процедуре.

Для решения этих задач требуется разработка новых, нестандартных экспериментальных методов и средств, совершенствование и адаптация под поставленные задачи методов и средств, разработанных ранее, использование в эксперименте самой современной измерительной и вычислительной техники. Повышаются требования к точности, ширине диапазона, информативности измерений. Необходимо добавить, что все эти измерения проводятся, как правило, в сложных условиях (в высокотемпературных, высокоскоростных, высокотурбулентных потоках, на вращающихся деталях, в нестационарных условиях).

Указанным требованиям в большей мере отвечает новый класс контрольно-измерительных систем, основанный на применении источников когерентного излучения – лазеров.

Лазер – уникальный источник излучения, обладающий удачным сочетанием таких свойств, как монохроматичность излучения, малая угловая расходимость, когерентность и большая спектральная плотность энергии излучения. Благодаря этим свойствам лазер оказался способным обеспечить бесконтактность и дистанционность измерений, увеличить разрешающую способность существующих методов измерения, повысить их производительность и точность.

Быстрое развитие претерпевают методы и средства лазерной виброметрии конструкций. Высокая точность определения физических величин, характеризующих различные колебательные процессы

сочетается здесь с высокой информативностью и возможностью автоматизации измерений, что позволяет применять лазерные приборы вибрационного контроля в качестве средств диагностики, открывает новые возможности для перехода на эксплуатацию энергетических установок по фактическому состоянию.

Бесконтактные методы виброметрии основаны на сравнении параметров, подлежащих контролю, с длиной волны излучения лазера. Эти методы являются наиболее точными по сравнению с другими методами измерения. С помощью лазерных приборов могут быть измерены амплитуды колебаний от долей ангстрема до нескольких метров в практически неограниченном частотном диапазоне.

Одной из важнейших задач на современном этапе является разработка новой лазерной измерительной техники и внедрение в различных отраслях машиностроения уже зарекомендовавших себя приборов. Особенно большая потребность в лазерных виброметрах в метрологической практике, т.к. они являются образцовыми.

Однако практическая реализация лазерных виброметров сталкивается с определенными трудностями, которые в значительной степени обусловлены тем, что для сознательного использования лазерных измерительных приборов требуется сочетание достаточно высокого уровня знаний в таких разнородных областях науки и техники, как когерентная оптика, лазерная техника, механика, прикладная математика.

Применение и внедрение методов лазерной виброметрии сдерживается отсутствием учебно-методической литературы, охватывающей весь круг вопросов, связанных с реализацией их в экспериментальной механике. Данное пособие преследует цель восполнить указанный пробел последовательным рассмотрением вопросов физических основ работы и принципов построения лазерных виброметров, особенностей их применения и анализа получаемой информации.

1. ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ

Вибрация представляет собой периодическое колебание точек поверхности объекта и характеризуется амплитудой, частотой, фазой и направлением перемещения.

В настоящее время для измерения параметров вибрации относительно массивных объектов широко применяются контактные методы, основанные на использовании вибродатчиков, закрепляемых непосредственно на объекте.

Для контроля малоразмерных или тонкостенных объектов, объектов труднодоступных или нагретых до высоких температур, используются бесконтактные, в основном, – оптические методы.

Любой оптический метод измерения параметров вибрации включает в себя операции:

- освещение объекта;
- преобразование параметров вибрации объекта в параметры оптического излучения, характеризующегося изменением во времени по заданному закону амплитуды, частоты, фазы или поляризации электромагнитной волны (модуляция света);
- детектирование отражённого от объекта излучения по соответствующему параметру;
- математическая обработка сигнала детектора и представление параметров вибрации в заданных единицах измерения.

В качестве светочувствительного элемента фотодетекторов в настоящее время наиболее широко используются так называемые фотоэлектрические приёмники оптического излучения: фоторезисторы, фотодиоды, фотоумножители и более сложные приборы, сделанные на их основе (фотопотенциометр, диссектор, матрица фотодиодов).

Перечисленные элементы чувствительны только к интенсивности излучения, поэтому для извлечения информации, заключённой в

частоте, фазе или поляризации отражённого от объекта (или прошедшего сквозь него) оптического сигнала, в состав фотодетекторов входят различные интерференционные или поляризационные оптические дискриминаторы, линзы и диафрагмы.

В качестве источников света наиболее удобны лазеры, излучение которых помимо интенсивности характеризуется ещё и высокой когерентностью и острой направленностью.

Для математической обработки сигнала фотодетектора, удобного и оперативного представления результатов, как правило, используются персональные ЭВМ с соответствующим аппаратным и программным обеспечением.

1.1. Характеристики параметров механических колебаний и ударов

Из общего числа параметров, подлежащих контролю в машиностроении, наибольшая доля принадлежит параметрам механических колебаний и ударов. Определение параметров механических колебаний и ударов — динамические измерения.

Простейшая форма механических колебаний — гармонические колебания. Такие колебания при распространении вдоль оси x описываются уравнениями

$$S = S_{\max} \sin \omega_0 t; \quad (1.1)$$

$$V = \frac{dS}{dt} = V_{\max} \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right) = \omega_0 S_{\max} \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right); \quad (1.2)$$

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2 S}{dt^2} = -\omega_0^2 S_{\max} \sin \omega_0 t = a_{\max} \sin(\omega_0 t + \pi), \quad (1.3)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ - угловая частота; $S_{\max}$ - максимальное перемещение; t - время; $V_{\max}$ - максимальная скорость; $a_{\max}$ - максимальное ускорение.

Частота колебаний f_0 связана с периодом T соотношением $f_0 = 1/T$.

Как видно из приведенных выше уравнений, формы и период колебаний остаются неизменными независимо от того, рассматриваются ли смещение, скорость или ускорение. Однако скорость опережает смещение на фазовый угол $\pi/2$, а ускорение опережает скорость на фазовый угол $\pi/2$.

Для пересчета параметров гармонических колебаний удобна номограмма, приведенная в Приложении 1. Номограмма построена в логарифмическом масштабе координат «виброскорость - частота» [2]. В данном случае логарифмические шкалы виброперемещений и виброускорений имеют вид наклонных параллельных прямых. Каждая точка номограммы определяет значение 4-х параметров гармонической вибрации S , V , a , f , два из которых независимы. По любым двум известным параметрам легко определяются два остальных.

На практике механические колебания, как правило, не являются чисто гармоническими колебаниями. В этом случае периодические колебания сложной формы рассматривают как множество синусоидальных, разложенных в ряд Фурье. Различные члены ряда составляют частотный спектр колебаний

$$f(t) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t), \quad (1.4)$$

где

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \omega t dt; \quad (1.5)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt; \quad (1.6)$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt. \quad (1.7)$$

На рис. 1.1 показаны способы изображения колебаний в виде спектральных составляющих.

В практике измерений в машиностроении часто приходится сталкиваться со стационарными случайными колебаниями, которые являются функциями времени.

Стационарные случайные колебания - это колебания, которые протекают во времени примерно однородно с одинаковым рассеиванием вокруг некоторого среднего значения. При изучении стационарных случайных колебаний используют понятие плотности распределения вероятности

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x) - P(x + \Delta x)}{\Delta x}, \quad (1.8)$$

где $P(x)$ представляет собой вероятность того, что некоторые мгновенные значения амплитуды превысят уровень x ; $P(x + \Delta x)$ — вероятность появления мгновенных значений амплитуды, превышающих уровень $(x + \Delta x)$.

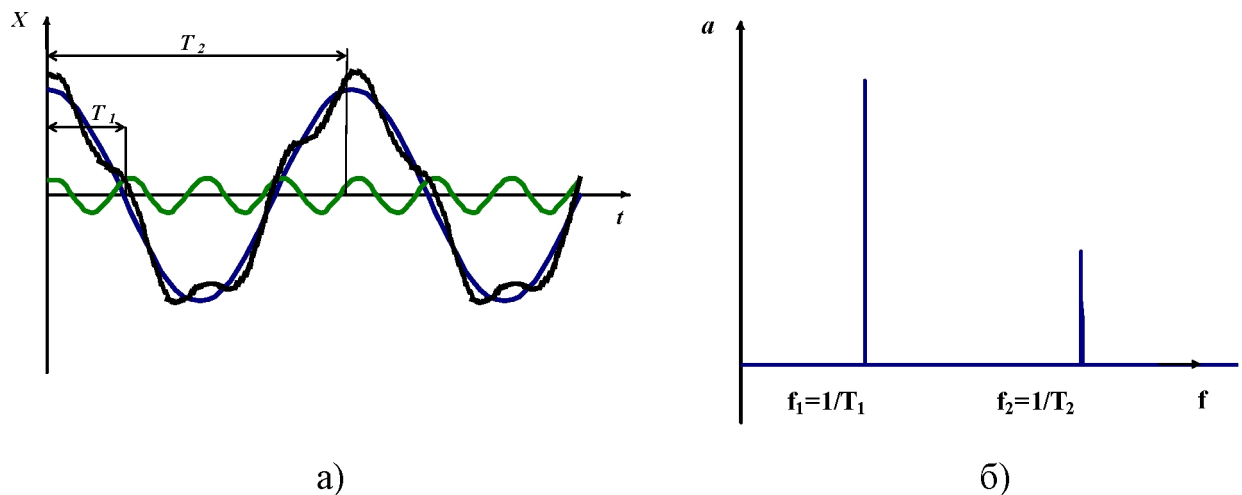


Рис .1.1. Разложение в ряд Фурье периодических сигналов: а -периодические колебания сложной формы; б - частотный спектр

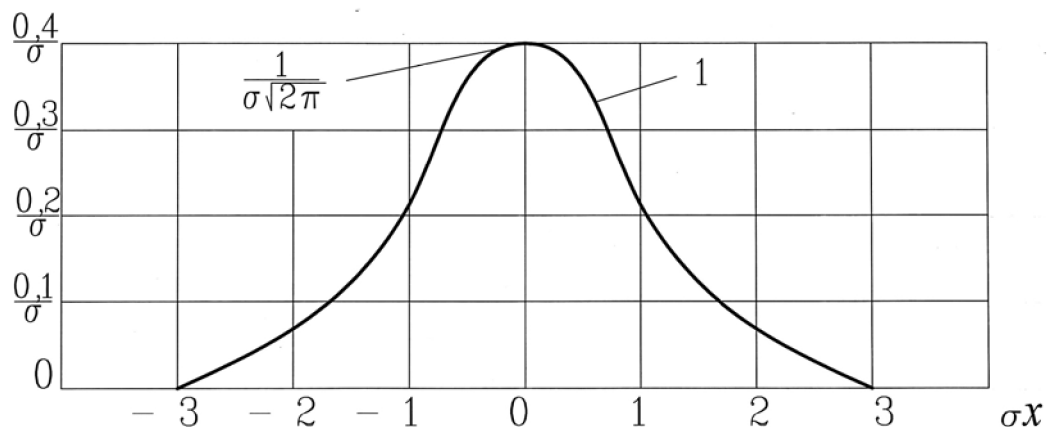


Рис. 1.2. Гауссова кривая плотности распределения вероятности 1: σ – среднее квадратичное значение измеряемой величины;

$$1 - f(x) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \exp(-x^2 / 2\sigma^2)$$

Получение экспериментальных данных в виде кривых плотности вероятности позволяет непосредственно сопоставлять данные между экспериментами независимо от ширины интервала амплитуды Δx , использованной в эксперименте. Наиболее распространенная гауссова кривая плотности распределения вероятности показана на рис. 1.2.

Спектральное описание можно дать и стационарному случайному колебанию. В этом случае амплитуды колебаний будут случайными величинами. Спектр стационарной случайной функции описывает распределение дисперсий по различным частотам. Спектральной плотностью стационарного случайного процесса называют кривую, описывающую плотность распределения дисперсий по частотам непрерывного спектра:

$$s_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} k_x(\tau) \exp\{-j\omega\tau\} d\tau, \quad (1.9)$$

где $k_x(\tau)$ - автокорреляционная функция;

$$k_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} s_x(\omega) \exp\{j\omega\tau\} d\omega; \quad (1.10)$$

Интегральное соотношение Фурье между $k_x(\tau)$ и $s_x(\omega)$ называют соотношением Винера—Хинчина. Учитывая, что в физически реализуемых стационарных процессах имеют дело лишь с положительными частотами, и считая $\tau = 0$, получим соотношение

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt = \int_0^{\infty} s_x(f) df. \quad (1.11)$$

Оба интеграла представляют собой масштаб мощности процесса: один в виде функции от времени $f(t)$ данного процесса, другой в виде частотной функции $s_x(f)$. В экспериментальных исследованиях обычно измеряют $s_x(f)$ с помощью аналоговых частотных анализаторов. Предполагая, что анализатор измеряет сигнал в полосе частот и не вносит усиления или ослабления в предельном случае при $\Delta f \rightarrow 0$, имеем

$$s_x(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f T} \int_0^T f_{\Delta f}^2(t) dt. \quad (1.12)$$

При анализе случайных механических колебаний это выражение является основой аналоговых экспериментальных исследований.

Удары могут быть описаны в виде силы, ускорения, скорости или смещения. Удар определяют как передачу кинетической энергии системе, происходящей в относительно короткий срок по сравнению с собственным периодом колебаний системы.

В большинстве случаев форма ударной волны может служить для предварительной оценки эффекта, вызываемого ударом, на механическую систему. Более эффективную оценку ударных процессов можно выполнить с помощью преобразования Фурье.

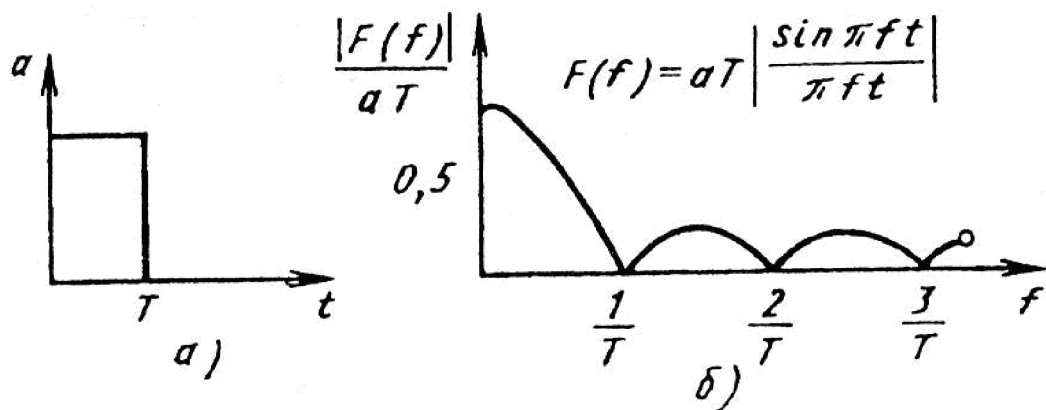


Рис. 1.3. Спектр ударного импульса: а – ударный импульс, б – спектр

Преобразование Фурье ударной временной функции можно записать в виде:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp\{-j\omega t\} dt. \quad (1.13)$$

На рис. 1.3, а, б приведены соответственно ударный импульс и его спектр, найденный с помощью выражения (1.13). Ударный импульс содержит энергию, распределенную по всем частотам от 0 до бесконечности, т.е. имеет непрерывный спектр. Как видно из рис. 1.3, б, амплитуда спектра при низких частотах равна площади ударного импульса независимо от его формы. Это имеет большое практическое значение при проведении контроля удара. Пока ударный

импульс краток по сравнению с собственным периодом механической системы, на которую он воздействует, его сила определяется лишь площадью ударного импульса.

1.1.1. Роль и задачи виброметрии ГТД

Диагностирование состояния машин и оценка степени опасности повреждения на основе данных контроля вибрации – один из наиболее эффективных методов повышения надёжности оборудования [3].

Методы вибрационной диагностики применяют при проектировании (на стадиях конструирования и доводки опытных образцов), производстве, эксплуатации и ремонте двигателя.

Задачи вибродиагностики ГТД можно разделить на две группы. Первая группа задач - определение технического состояния двигателя и его элементов, а также раннее обнаружение неисправностей для обеспечения требуемой надёжности двигателя и уменьшения затрат, связанных с устранением последствий неисправностей. Эти задачи решают на этапе эксплуатации, при стендовых испытаниях, во время доводки и в производстве.

Вторая группа задач – оценка вибрационного состояния двигателя и его элементов с целью предупреждения неисправностей, вызванных колебаниями. Эти задачи решают на всех этапах создания и эксплуатации двигателя. Под вибросостоянием объекта понимают совокупность параметров, характеризующих вибрацию данного объекта. Вибросостояние определяется для данной точки объекта, некоторой его зоны или объекта в целом, а также для семейства объектов.

К диагностике вибросостояния ГТД относятся оценка и прогнозирование динамической нагруженности конструкции, выявление опасных колебаний и причин их появления, выявление и оценка опасных динамических воздействий на конструкцию, распознавание колебаний, возбуждаемых отдельными источниками возмущений, выявление и оценка факторов, влияющих на колебание, оценка и

прогнозирование устойчивости элементов конструкции к колебаниям, идентификация вибрационных процессов.

Вибрация двигателей, рассматриваемая при диагностических исследованиях в широком диапазоне частот и амплитуд, является комплексным диагностическим сигналом, представляющим собой совокупность комбинаций более простых составляющих. При этом частотный состав большинства “элементарных” сигналов связан с частотой вращения роторов двигателей и значительно изменяется даже на установившихся режимах работы двигателя.

Спектр вибрации работающего двигателя занимает почти весь диапазон звуковых частот и определяется частотами: роторной вибрации; вибрации аэродинамического происхождения; динамических процессов в газоздушном тракте двигателя; вибрации, возбуждаемой в зубчатых передачах, подшипниковых узлах, насосах.

1.2. Классификация методов измерения параметров вибрации

1.2.1. Датчики (измерительные преобразователи)

вибрации и удара

Важнейшей составной частью аппаратуры вибрационного контроля являются датчики, предназначенные для получения информации о вибрационных процессах в форме, удобной для дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но недоступной для непосредственного восприятия наблюдателем. В виброметрии используют два принципа измерения: динамический и кинематический.

Динамический принцип измерения реализуется в датчиках инерционного действия. При этом измеряются абсолютные значения параметров вибрации исследуемых объектов.

Кинематический принцип измерения используется в бесконтактных датчиках. При этом измеряется изменение во времени координат точек исследуемых объектов относительно вибрационной неподвижной системы координат. Классификация датчиков абсолютной вибрации по используемым для преобразования физическим принципам приведена на рис. 1.4.

Классификация датчиков относительной вибрации в соответствии с используемыми для преобразования физическими принципами приведена на рис. 1.5.



Рис. 1.4. Классификация датчиков абсолютной вибрации по используемым для преобразования физическим принципам

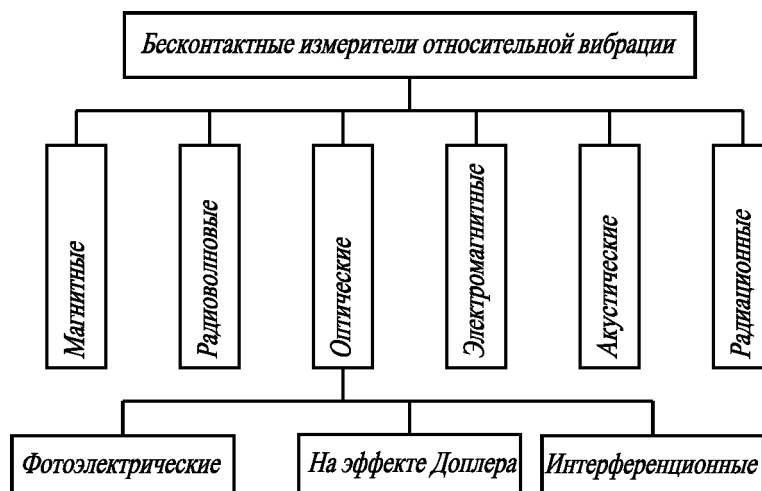


Рис. 1.5. Классификация датчиков относительной вибрации в соответствии с используемыми для преобразования физическими принципами

Из рис.1.4 видно, что преобразователи абсолютной вибрации в электрический сигнал делят на два класса: генераторные, преобразующие энергию механических колебаний в электрическую; параметрические, преобразующие механические колебания в изменение параметров электрических цепей, например, индуктивности, ёмкости, активного сопротивления, частоты или сдвига фаз и т. д.

Из датчиков абсолютной вибрации наибольшее распространение получили пьезоэлектрические датчики. Их отличают малые габаритные размеры, широкие частотный и динамический диапазон, незначительные коэффициенты влияния внешних факторов: температуры, магнитного и электрического полей, звукового давления, деформации исследуемого объекта.

Принцип действия пьезоэлектрических датчиков основан на использовании прямого пьезоэффекта, заключающегося в том, что под действием внешней силы, в том числе знакопеременной, некоторые кристаллы или пьезокерамики генерируют электрические заряды. Наиболее распространёнными пьезоэлектрическими материалами являются кварц, турмалин, ниобат лития, цирконат титаната свинца, титанат висмута, окись цинка и др.

Одним из основных факторов, ограничивающих применение пьезоэлектрических датчиков, является температура, при которой они эксплуатируются. При превышении определённого предела температуры пьезоэлектрический элемент теряет часть своей поляризации и коэффициент преобразования датчика снижается. При достижении точки Кюри материала пьезоэлемента поляризация полностью исчезает и датчик выходит из строя. В области низких температур ограничения на применение пьезоэлектрических датчиков определяются возможностью растрескивания пьезоэлектрического материала. Следует учитывать, что датчик должен оказывать минимальное влияние на вибрирующий объект. Резонансная частота объекта изменяется под влиянием массы датчика. Этот эффект описывается выражением:

$$f_p = f_0 \sqrt{\frac{m}{m + m_0}}, \quad (1.14)$$

где f_p - резонансная частота объекта; f_0 - резонансная частота объекта вместе с датчиком; m - масса объекта; m_0 - масса датчика.

Следует отметить, что в зависимости от соотношения демпфирования и жёсткости датчики абсолютной вибрации могут работать в

дореzonансной, резонансной и послерезонансной областях частот. В первом случае их выходной сигнал пропорционален ускорению. Такие датчики называют акселерометрами. Во втором случае выходной сигнал пропорционален скорости, а датчики называют велосиметрами. У датчиков, работающих в послерезонансной области и называемых виброметрами, выходной сигнал пропорционален перемещению.

В бесконтактных измерителях наибольшее применение в вибродиагностике нашли оптические методы и средства измерения параметров вибрации, которые по способу выделения информации об измеряемом параметре делят на амплитудные и частотные. К амплитудным методам измерений относят фотоэлектрические (или фотомодуляционные [4]) и интерференционные методы измерения.

Измерение параметров вибрации, основанное на изменении частоты излучения, отражённого от объекта, проводят измерительными устройствами, действие которых основано на использовании эффекта Доплера.

1.2.2. Методы лазерной виброметрии

Из всех источников излучения оптического диапазона лазерные источники характеризуются наибольшей степенью когерентности и монохроматичности генерируемого ими излучения. Кроме того, лазеры обладают следующими положительными свойствами: высокой стабильностью и воспроизводимостью частоты излучения, малым углом расходимости, малой чувствительностью к изменению температуры окружающей среды, что особенно важно при метрологических исследованиях. Поэтому при разработке приборов, предназначенных для прецизионного измерения параметров движения в машиностроении, лазерные источники нашли широкое применение.

Методы преобразования параметров вибрации в электрический сигнал можно классифицировать по способу выделения информации о параметрах движения (фотоэлектрические, интерференционные,

доплеровские) и по способу приема информации о параметрах движения (одночастотные, двухчастотные и т.д.).

Наиболее полная классификационная схема методов лазерной виброметрии приведена Ю.Ф. Застрогиным в [5]. Основные методы лазерной виброметрии, получившие реальное воплощение в приборах, приведены на рис. 1.6.

Фотоэлектрические методы преобразования основаны на измерении изменения интенсивности лазерного излучения, интерференционные – на использовании явления интерференции в оптическом диапазоне, доплеровские – на изменении частоты излучения лазера, отраженного от объекта вибрационного контроля.

Прежде чем рассматривать методы преобразования параметров вибрации в электрический сигнал, дадим определения некоторым понятиям и величинам.

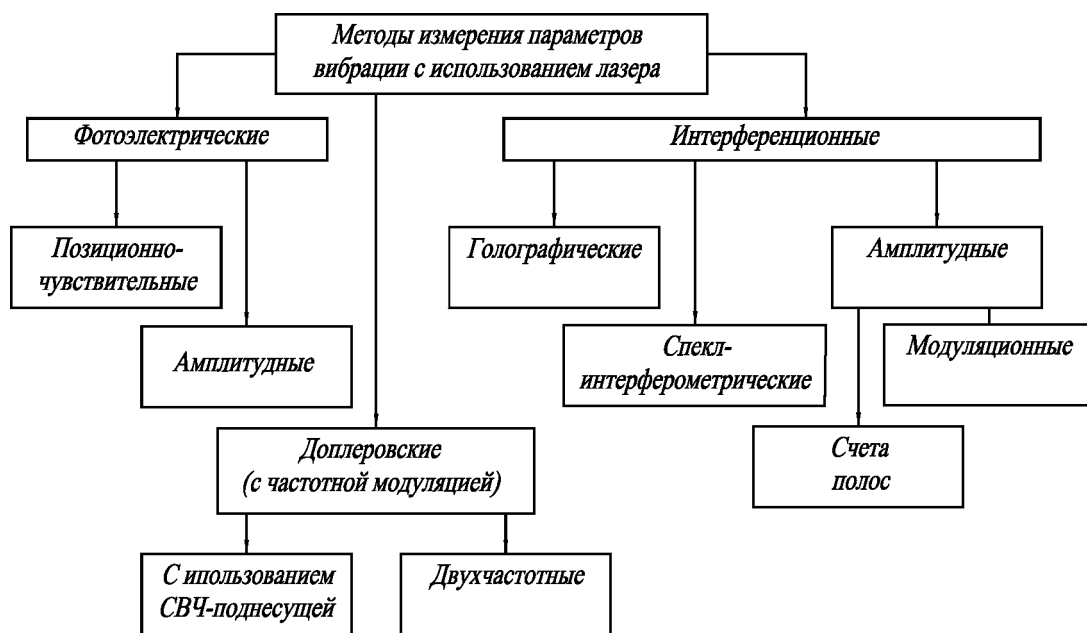


Рис. 1.6. Классификация методов лазерной виброметрии

Как в интерференционных, так и в доплеровских методах получил распространение двухлучевой интерферометр Майкельсона. Рассмотрим схему интерферометра (рис. 1.7) более подробно. Излучение лазера 1 поступает на светоделительный кубик 2 и разделяет на две части. Полученные лучи направляются соответственно на неподвижный отражатель 3 и на перемещающийся вместе с измеряе-

мым объектом отражатель 4. Отраженные от подвижного 4 и неподвижного 3 зеркал оптические лучи совмещаются на разделительной плоскости кубика 2 и интерферируют. В окуляре 5 наблюдается интерференционная картина. Если разность хода лучей интерферометра $\delta_0 = 0; \pm\lambda/2; \pm2\lambda/2; \dots; \pm n\lambda/2$, то интерференционное поле имеет максимум освещенности. При разности хода $\delta_0 = \pm\lambda/4; \pm3\lambda/4; \dots; \pm(2n+1)\lambda/4$ лучи сходятся в противофазе и интерференционное поле имеет минимум освещенности. Таким образом, можно измерить величину перемещения зеркала 4 по числу переходов изменения освещенности, прошедших через диафрагму 6. Один период соответствует половине длины волны лазерного излучения.

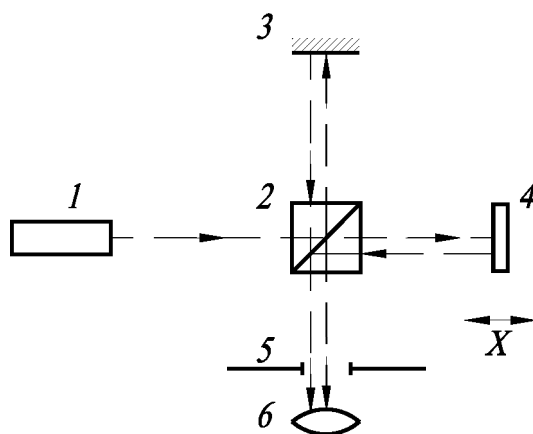


Рис. 1.7. Схема интерферометра Майкельсона: 1-лазер; 2-светоделительный кубик; 3-неподвижное зеркало; 4-подвижное зеркало; 5-окуляр; 6-диафрагма

В настоящее время к наиболее быстро развивающимся относятся лазерные виброметры, базирующиеся на эффекте Доплера. Они имеют следующие преимущества:

- определяют возможность получения высокого соотношения сигнал/шум;
- обеспечивают частотное и пространственное подавление фона внешней засветки без применения оптических фильтров;
- позволяют измерять параметры механических колебаний сложной формы на значительных расстояниях от объекта измерения;
- обладают высокой помехозащищенностью;

– допускают осуществление анализа выходного сигнала фотоприемника в частотном диапазоне, превышающем область низкочастотных шумов фотоприемника и лазера.

Эффект Доплера заключается в изменении частоты электромагнитного излучения при относительном движении приемника и источника излучения. Если приемник и источник излучения находятся в одной системе координат, а излучение отражается от другой, то при относительном движении этих двух инерциальных систем координат имеет место двукратный эффект Доплера. В этом случае доплеровское изменение частоты отраженного излучения определяется как:

$$\omega_d = 2\omega V / c, \quad (1.15)$$

где ω - круговая частота излучения; V - радиальная составляющая скорости движения объекта; c - скорость света.

Под несущей частотой колебания понимают частоту выходного сигнала фотоприемника в лазерной измерительной системе при отсутствии частотной модуляции (например, доплеровского сдвига частоты). Несущая частота, как правило, определяется разностью между частотой излучения ω лазера 1 (рис. 1.8) и частотой $\omega + \Omega$ излучения лазера, сдвинутого на величину Ω с помощью каких-либо устройств сдвига частоты 6 (электрооптических, ультразвуковых и т.д.). Совмещение в пространстве излучений с частотами ω и $\omega + \Omega$ осуществляют с помощью светоделительных элементов 2, 3 и отражающих зеркал 5, 7. Выходной сигнал фотоприемника 4 имеет вид :

$$u(t) = U \sin \Omega t, \quad (1.16)$$

где $\Omega = (\omega + \Omega) - \omega$ - несущая частота.

При вибрации объекта 4 (рис. 1.9), например гармонической, доплеровское изменение частоты излучения, отраженного от объекта вибрационного контроля, определяется выражением:

$$\omega_d = \frac{2\omega V_0}{c} \cos(\omega_0 t), \quad (1.17)$$

где ω - круговая частота излучения лазера; ω_0 - круговая частота колебаний объекта вибрационного контроля; V_0 - амплитуда скорости вибрации объекта измерения.

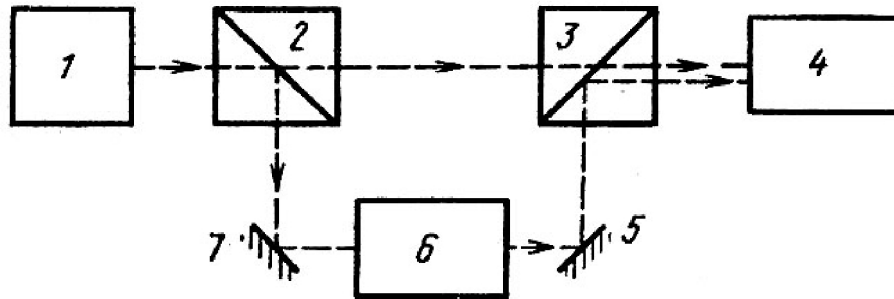


Рис. 1.8. Схема интерферометра со смещением частоты: 1 - лазер; 2, 3 - светоделительный кубик; 4 - фотоприемник 5, 7- зеркало; 6 - устройство сдвига частоты

Выходной частотно-модулированный сигнал фотоприемника 6:

$$u(t) = U \cos \left(\Omega t + \frac{2\omega V_0}{c\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right). \quad (1.18)$$

Величина $m_f = \frac{2\omega V_0}{c\omega_0}$ характеризует степень частотной модуляции. Ее называют индексом частотной модуляции.

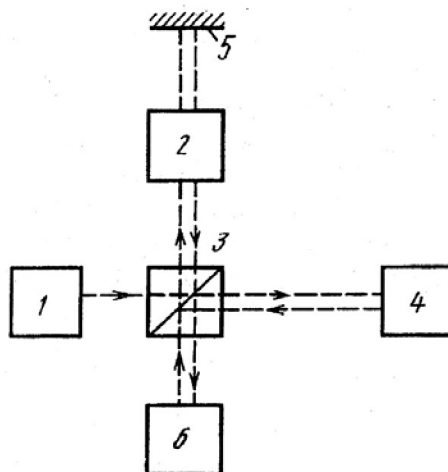


Рис. 1.9. Схема интерферометра Майкельсона со сдвигом частоты: 1- лазер; 2 - устройство сдвига частоты излучения лазера; 3 - светоделительный элемент; 4 - объект вибрационного контроля; 5 - неподвижное зеркало; 6 - фотоприемник.

Девиейцией частоты называют отношение $\Delta\omega = \frac{2\omega V_0}{c}$, равное частоте Доплера. Девияция $\Delta\omega$ обычно много меньше несущей частоты.

При гармоническом колебании объекта измерения, т.е. при $y = S_0 \cos \omega_0 t$, переменная составляющая выходного сигнала фотоприёмника одночастотного лазерного интерферометра имеет вид

$$u(t) = U \cos \left(\frac{2\pi\delta_0}{\lambda} + \frac{2\omega V_0}{c\omega_0} \sin \omega_0 t \right), \quad (1.19)$$

или согласно (2) и выражению для скорости света $c = v\lambda = \omega\lambda/2\pi$:

$$u(t) = U \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \delta_0 + \frac{4\omega S_0}{\lambda} \sin \omega_0 t \right), \quad (1.20)$$

где δ_0 - разность хода лучей интерферометра, S_0 - максимальное перемещение объекта измерения ($S_0 = V_0 / \omega_0$).

В выражениях (1.19), (1.20), в отличие от формулы (1.18), отсутствует несущая частота. Таким образом, одночастотный лазерный интерферометр можно рассматривать как лазерную измерительную систему с частотной модуляцией с несущей частотой, равной нулю.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения для вибрации и гармонического колебания.
2. Какие операции включает в себя оптический метод измерения вибрации?
3. Что означает термин «модуляция света»?
4. Что означает термин «детектирование света»?
5. Какова связь между параметрами гармонического колебания?
6. Приведите классификацию датчиков абсолютной вибрации.
7. Назовите основные методы лазерной виброметрии.
8. Какой разности хода лучей в интерферометре Майкельсона соответствует период полос?
9. Что такое несущая частота колебания?
10. Объясните понятие «индекс модуляции».

2. ЛАЗЕРНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВИБРОМЕТРЫ

Действие измерительных преобразователей, реализующих фотоэлектрические методы, основано на пространственной модуляции светового пучка или модуляции его интенсивности колеблющейся поверхностью. Данные виды модуляции могут происходить за счет отражения, перекрытия или пересечения пучка излучения колеблющимся элементом конструкции. Данные методы не критичны к источнику излучения, однако на практике чаще используют лазерные источники монохроматического когерентного излучения.

Рассмотрим для примера схему виброметра с обычным источником света, основанную на частичном перекрывании диафрагмы рассеянным на колеблющемся объекте излучением. Контроль параметров вибрации этим методом осуществляется в случае, когда направление вибрации заранее известно и есть возможность предварительной калибровки измерительной схемы. Объект 1 (рис. 2.1) освещается источником света 2.

Изображение кромки объекта с помощью объектива 3 формируется в плоскости диафрагмы 4. Световой поток, прошедший сквозь диафрагму, направляется с помощью линзы 5 на светочувствительную площадку фотодиода 6.

Иногда, для того чтобы ослабить вредное влияние неравномерности зонной характеристики фотодиода, перед фотодиодом ставят матовый светорассеиватель 7 или применяют фотометрический шар 8 (рис. 2.1, а). Фотодиод, как правило, смещают в запорном направлении. Электрический сигнал с нагрузки R фотодиода усиливается усилителем 9 и отображается измерительным прибором 10. Сигнал фотодиода зависит от мощности и спектрального состава излучения источника света, коэффициента отражения поверхности объекта, удаления объекта, фактического коэффициента усиления усилителя, температуры окружающей среды и т. д., поэтому непосредственно

перед измерением амплитуды колебаний объекта, измерительный тракт необходимо калибровать.

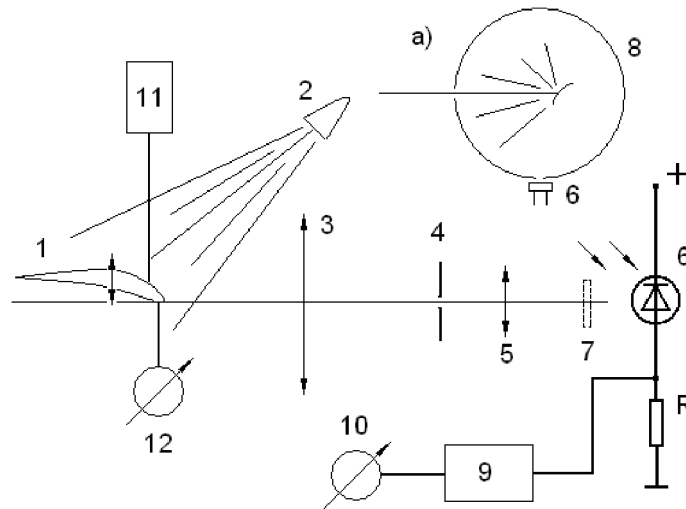


Рис. 2.1. Оптическая система виброизмерителя с частичным перекрытием диафрагмы изображением объекта: 1 - исследуемый объект; 2 - источник света; 3 - объектив; 4 - диафрагма; 5 - линза; 6 - фотодиод; 7 - светорассеиватель; 8 - фотометрический шар; 9 - усилитель; 10 - регистратор

Для этой цели с помощью нагрузочного приспособления 11 объект деформируется в предполагаемом направлении колебаний на величину, контролируемую измерительной головкой 12, и определяется коэффициент U [мм/В] пропорциональности между выходным напряжением усилителя (в вольтах) и величиной смещения кромки объекта (в миллиметрах). При вибрации объекта световой поток, падающий на фотодиод, будет изменяться по синусоидальному закону, амплитуда которого пропорциональна амплитуде колебаний. Если диафрагма прямоугольная, то электрический сигнал с нагрузки R фотодиода так же будет изменяться по синусоидальному закону. Для того, чтобы получить амплитуду колебаний объекта, необходимо измерить амплитуду переменной составляющей сигнала фотодиода и умножить её на коэффициент U . Прибор 10 имеет возможность переключения на измерение постоянного (в режиме калибровки) и переменного напряжений. При определении амплитуды колебаний необходимо учесть, что вольтметры переменного напряжения обычно

калибруются в действующих величинах. Поэтому для получения амплитуды показания прибора необходимо умножить на $\sqrt{2}$.

Основные недостатки рассмотренной схемы:

- контроль доступна только проекция колебаний на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения;
- требуется предварительная калибровка, что не всегда осуществимо;
- применение обычного некогерентного источника излучения затрудняет выделение анализируемой области колеблющейся поверхности, что приводит к снижению достоверности измерений;
- выделение полезного сигнала с помощью диафрагмы и одиночного фотоприёмника не позволяет получить высокую чувствительность виброметра.

2.1. Позиционно-чувствительные фотоэлектрические виброметры

Метод пространственной модуляции светового пучка основан на последующем преобразовании пространственного смещения пучка, линейного или углового, позиционно-чувствительным фотоприёмником (ПЧФ).

Блок-схемы двух вариантов такого устройства приведены на рис. 2.2 и 2.3 [6].

Работа оптической системы (рис. 2.2) основана на преобразовании излучения лазера 1, отраженного от зеркальной пластинки 2, закрепленной на исследуемом объекте, в пространственное перемещение, пропорциональное амплитуде колебаний с последующей обработкой этого излучения с помощью ПЧФ 3 и схемы обработки 4. Для повышения чувствительности в качестве фотоприемника используется полупроводниковый элемент 5 с дополнительными электродами модулятором напряжения 8 (рис. 2.3).

Схема включения электродов ПЧФ к измерительным каналам и источнику переменного напряжения показана на рис. 2.4. К пластине

ПЧФ 5 присоединены кольцевой электрод 14 (по периферии) и точечный электрод 9 (в центре нижней поверхности пластины). На электроды 9, 14 от модулятора 8 подается переменное напряжение $u(t) = U_0 \sin \omega_m t$. На поверхности пластины размещены четыре точечных коллекторных электрода 10, 11 и 12, 13.

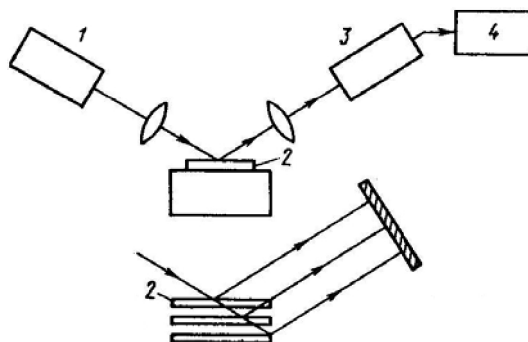


Рис. 2.2. Оптическая система с пространственной модуляцией:
1 - лазер; 2 - зеркальная пластинка; 3 - позиционно - чувствительный фотоприемник; 4 - схема обработки сигнала

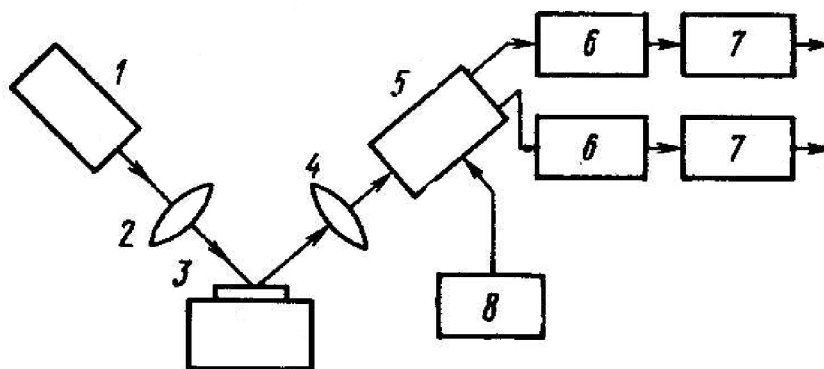


Рис. 2.3. Оптическая система повышенной чувствительности с пространственной модуляцией: 1 - лазер; 2, 4 - оптическая система; 3 - исследуемый объект; 5 – позиционно - чувствительный приемник; 6 - усилитель; 7 - детектор; 8 - модулятор

Под действием лазерного излучения, попадающего на поверхность полупроводниковой пластины, в ней образуются носители заряда, которые модулируются в соответствие с переменным электрическим напряжением, приложенным к электродам 14 и 9. При этом, если излучение лазера попадает в центр пластины, концентрации но-

сителей заряда коллекторных электродов 10, 11 и 12, 13 равны, и сигнал, снимаемый с электродов, равен нулю. При смещении излучения лазера от центра пластины равенство концентрации зарядов у коллекторных электродов нарушается, и с них снимается сигнал переменного тока, частота которого определяется напряжением питания u , а амплитуда пропорциональна величине смещения.

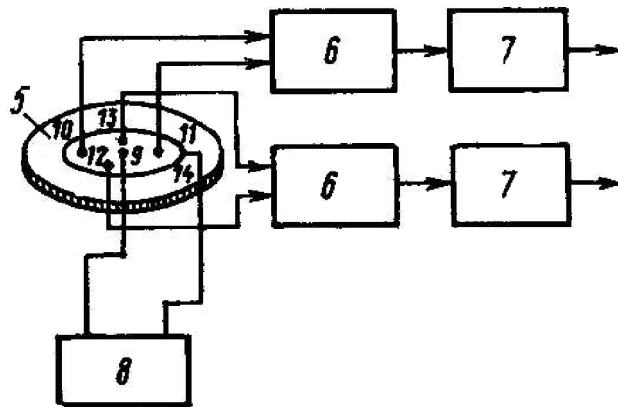


Рис. 2.4. Схема включения позиционно-чувствительного фотоприемника

При вибрациях зеркальной пластины 2 (см. рис. 2.2), закрепленной на испытуемом объекте 3, сигнал, снимаемый с коллекторных электродов 10, 11 и 12, 13 (см. рис. 2.4), оказывается промоделированным по амплитуде с частотой вибрации испытуемого объекта, а глубина модуляции определяется амплитудой вибрации объекта. Сигналы, снимаемые с коллекторных электродов 10, 11 и 12, 13, усиливаются усилителями 6, затем детектируются каскадами 7, измеряются по частоте частотомером, а по амплитуде колебаний электронным вольтметром (на рис. 2.3, 2.4 эти приборы не показаны).

Частоту переменного напряжения ω_m , приложенного к электродам 9 и 14, выбирают из условия $\omega_m \gg \omega$, которое определяется требованиями обеспечения фильтрации переменного напряжения $u(t) = U_0 \sin \omega_m t$ в детекторных каскадах. На практике достаточно выполнить условие $\omega_m = 5-10\omega$. Учитывая, что частота вибрации исследуемого объекта обычно не превышает 10 кГц, частоту переменного напряжения выбирают в пределах 50 кГц.

Достоинством устройства является возможность измерения вибрации в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Исследования показали, что минимально обнаруживаемые величины смещений и амплитуд вибраций с помощью данной системы составляют 0,5 мкм. Относительная погрешность измерения не превышает 0,5%.

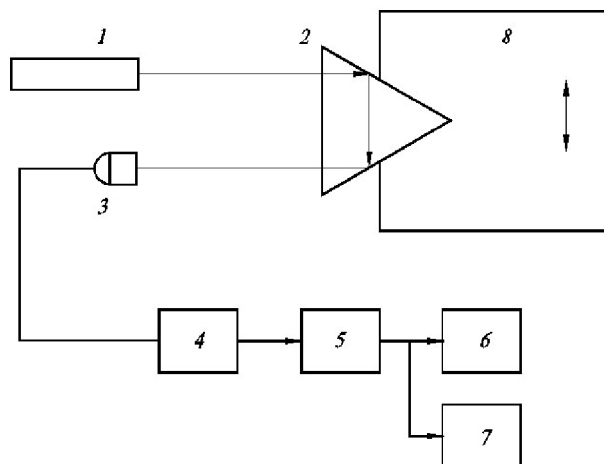


Рис. 2.5. Блок-схема лазерного виброметрического датчика: 1-лазер; 2-трипель-призма; 3-позиционно-чувствительный фотоприемник; 4, 5 –усилитель; 6-ЭВМ; 7- осциллограф; 8- объект измерения

К рассмотренному типу виброметров относится лазерный датчик с трипель-призмой (рис. 2.5), предназначенный для измерения параметров вибрации технологических систем и крупногабаритных деталей.

Система работает следующим образом. Колимированный пучок излучения лазера 1 направляется на отражательную трипель-призму 2, установленную на технологической конструкции 8. Вибрация объекта 8 приводит к тому, что вершина призмы 2 колеблется вместе с объектом и перемещает отраженный от неё луч лазера по поверхности позиционно-чувствительного фотоприемника (ПЧФ) 3 в двух взаимно - перпендикулярных направлениях. Колебания лазерного пучка по поверхности ПЧФ 3 вырабатывают на его выходе электрические сигналы, которые усиливаются усилителями мощности 4, 5 и далее передаются на ЭВМ 6 или осциллограф 7. При этом частота, амплитуда, фаза и форма этих колебаний соответствует параметрам механических колебаний технологической конструкции 8. Предлагаемая измерительная система позволяет производить изме-

рения амплитуды колебаний в диапазоне от 10 мкм до 10 мм с погрешностью не более 0,5 мкм при частоте колебаний до 10 кГц как в линейных, так и нелинейных системах.

Трипель-призма 2 отражает луч в противоположном направлении параллельно падающему лучу. Смещение отраженного луча определяется только смещением вершины призмы и не зависит от ее углового положения в пределах угла отклонения $\pm 5^\circ$. В качестве ПЧФ применена полупроводниковая *p-n* – структура, разделенная с помощью фотолитографии на четыре сектора. В начальный момент (при юстировке установки) лазерный пучок освещает центр ПЧФ. При изменении положения лазерного пучка на выходных клеммах ПЧФ вырабатываются электрические сигналы, величина которых пропорциональна перемещению пучка, а полярность напряжения зависит от направления этого перемещения.

2.2. Амплитудные фотоэлектрические виброметры

При проведении усталостных испытаний, компрессоров и турбин ГТД на электродинамических вибростендах возникает необходимость в контроле амплитуды колебаний пера испытываемой лопатки в связи с возможностью выхода тензодатчика из строя до конца испытания. Особенно остро это ощутимо при усталостных испытаниях лопаток турбин в условиях рабочих температур.

Известные бесконтактные преобразователи (емкостные, индуктивные, токовыхревые) не могут работать в таких условиях.

Наиболее перспективными для контроля амплитуды колебаний пера лопатки при высоких температурах являются оптические методы, один из которых – метод модуляции лазерного пучка краем испытываемой лопатки (рис. 2.6).

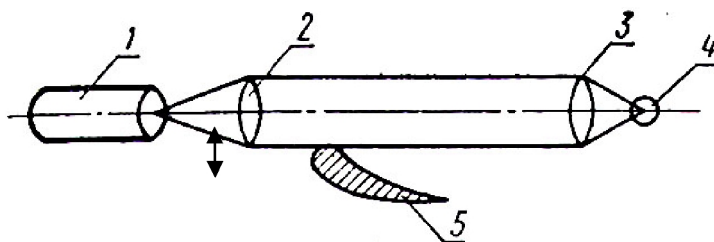


Рис. 2.6. Принцип действия преобразователя с модуляцией луча:
1-лазер; 2-коллиматор;
3 - объектив; 4-фотоприемник; 5-лопатка

Блок-схема установки для проведения усталостных виброиспытаний при высоких температурах с лазерной системой контроля режима испытания представлена на рис. 2.7.

Испытуемая лопатка закрепляется в рабочем объеме электропечи с помощью специального кронштейна, установленного на электродинамический вибростенд. В печи имеется два окна, закрытых кварцевыми стеклами. Луч лазера проходит через оптическую систему, которая способствует расширению его до величины, определяемой амплитудой контролируемых колебаний, и через одно из окон попадает внутрь печи, где модулируется испытуемой лопаткой. Промодулированный луч через второе окно выходит из печи и через диафрагму с щелевым отверстием, обеспечивающую линейность системы контроля, попадает на фотоприемник, преобразующий переменный световой поток в электрический сигнал.

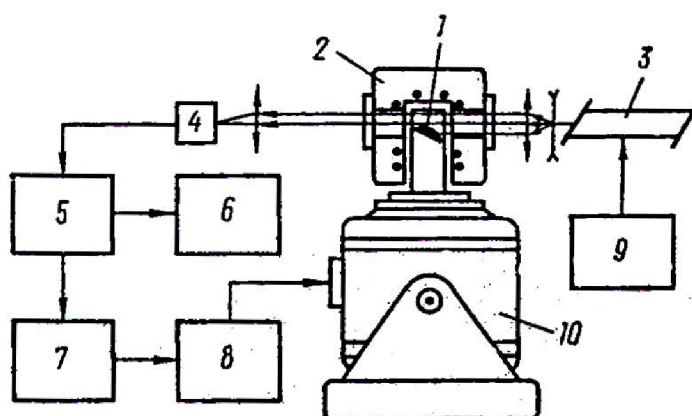


Рис. 2.7. Блок-схема установки для проведения виброиспытаний лопаток при высоких температурах с лазерной системой контроля: 1 - испытуемая лопатка; 2 - нагревательная печь; 3 - излучатель лазера; 4 - фотоприемник; 5 - усилитель сигнала; 6 - регистратор; 7 - система автоматического управления режимом виброиспытаний; 8 - усилитель мощности; 9 - блок питания лазера; 10 - электродинамический вибростенд

Пройдя через усилитель, сигнал поступает на регистратор и систему автоматического управления виброиспытаниями. Указанная система в зависимости от амплитуды и фазы колебаний лопатки регулирует величину и частоту сигнала возбуждения, который через усилитель мощности подается на электродинамический вибростенд. Таким образом, имеем замкнутый контур регулирования, позволяю-

ший проводить виброиспытания с постоянным уровнем нагружения на резонансной частоте. При реализации приведенной схемы была обнаружена большая (до 20%) погрешность при контроле амплитуды колебаний лопатки. Выявлены следующие источники погрешностей: нестабильность мощности излучения лазера во времени; влияние собственного излучения испытываемой лопатки при температуре выше 1000К; влияние коробления лопатки в процессе нагрева.

Для уменьшения влияния нестабильности мощности излучения лазера в была предложена специальная система стабилизации мощности луча (в пособии она не рассматривается).

Влияние собственного излучения лопатки при высоких температурах устранялось с помощью диафрагм. Для этого одна из диафрагм устанавливалась непосредственно на фотоприемнике, а вторая - на выходном окне нагревательной печи.

Влияние коробления лопатки в процессе нагрева на точность контроля амплитуды колебания заключалось в изменении постоянной составляющей освещенности фотоприемника. Чтобы устранить влияние это явления, фотоприемник использовался в фотодинамическом режиме.

Основное уравнение амплитудных фотоэлектрических устройств может быть представлено в виде:

$$\Delta\Phi = \Phi(x_0 + \Delta x) - \Phi_0(x_0), \quad (2.1)$$

где x_0 - исходное значение контролируемой величины; Δx - ее изменение; Φ - величина светового потока, падающего на фотоприемник.

Оценим чувствительность преобразователя для величины вибросмещения $x = 2,5$ мкм для схемы с диафрагмой и одиночным фотодиодом.

Плотность светового потока, падающего на фотоприемник, может быть записана в виде:

$$B_i = \eta\beta^2 B_s, \quad (2.2)$$

где B_s - яркость источника; β - увеличение оптической системы; η - коэффициент светопередачи оптической системы.

Амплитуда модуляции светового потока

$$\Delta\Phi = bx\eta\beta^2 B_s, \quad (2.3)$$

где b - ширина светового луча.

Величина светового сигнала фотоприемника

$$u_{\text{вых}} = S_y \Delta \Phi R_n = S_y b x \eta \beta^2 B_s R_n, \quad (2.4)$$

где S_y - чувствительность фотоприемника; R_n - сопротивление нагрузки.

При использовании фотодиода ФД-3 в качестве фотоприемника имеем: $S_y = 15$ мА/лм; $b = 4$ мм; $\eta = 0,8$; $\beta = 1,0$; $B_s = 1590$ кд/м²; $R_n = 100$ кОм. В этом случае

$$u_{\text{вых}} = S_y b x \eta \beta^2 B_s R_n = 19,2 \text{ мВ}. \quad (2.5)$$

При сопротивлении нагрузки $R_n = 100$ кОм величина шумов фотодиода составляет 200 мкВ. Тогда отношение полезного сигнала к эффективному значению шумов на выходе

$$\frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{ш.ф.}}} = \frac{S_y b x \eta \beta^2 B_s R_n}{u_{\text{ш.ф.}}} = 96 \quad (2.6)$$

Отсюда видно, что применение фотоэлектрического преобразователя обеспечивает высокую чувствительность даже при столь малой величине амплитуды вибрации.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные способы модуляции излучения, применяемые в фотоэлектрических виброметрах.
2. Какие недостатки связаны с использованием в схеме фотоэлектрического виброметра обычного некогерентного источника излучения?
3. Приведите схемы позиционно - чувствительных фотоприемников.
4. Назовите составляющие, определяющие амплитуду модуляции излучения фотоэлектрических виброметров.
5. Назовите области применения фотоэлектрических виброметров.
6. Предложите схему виброметра, основанную на лазере - указке.
7. Объясните способ повышения чувствительности виброметра с ПЧФ.
8. Объясните работу схемы виброметра с триппель - призмой.

3. ЛАЗЕРНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ВИБРОМЕТРЫ

Обширную группу лазерных виброметров составляют интерференционные измерители, основанные на использовании интерференции излучения. Лазерные интерференционные виброметры (ЛИВ) создаются на основе таких методов как амплитудные, голографические и спекл-интерферометрические. Действие всех ЛИВ основано на информации, содержащейся в фазе световой волны, отраженной от вибрирующей поверхности.

По виду получаемой информации интерференционные виброметры делятся на локальные (дающие информацию о параметрах вибрации отдельных точек поверхности исследуемого объекта) и интегральные (дающие информацию о распределении параметров вибрации по поверхности объекта). Интегральные (или панорамные) ЛИВ основаны на методах голографической- и спекл-интерферометрии. Интерференционным виброметром данного типа посвящено учебное пособие [1].

Рассмотрим физические основы работы и принципы построения амплитудных интерференционных виброметров локального типа.

3.1. Особенности оптической интерферометрии

Известно, что характерное время реакции всех используемых приемников оптического излучения значительно превышает период световой волны. Поэтому фотоприемники регистрируют только один компонент светового сигнала – его интенсивность I :

$$I = (Ee^{i\varphi})(Ee^{i\varphi})^* = E^2, \quad (3.1)$$

где E - амплитуда волны, а φ - ее фаза.

Казалось бы, информация о фазе световой волны бесследно теряется. Однако давно известны приборы, реализующие когерент-

ный прием оптического сигнала $Ee^{i\varphi}$ с помощью опорной волны $E_0e^{i\varphi_0}$. В этих приборах (интерферометрах) информация об исследуемом объекте или процессе регистрируется, прежде всего, за счет точной фиксации именно фазы световой волны. В области интерференции предметной и опорной волн суммарная амплитуда равна:

$$E_{\Sigma} = E_1e^{i\varphi_1} + E_0e^{i\varphi_0}, \quad (3.2)$$

а интенсивность:

$$I_{\Sigma} = |E_1e^{i\varphi_1} + E_0e^{i\varphi_0}|^2 = E_1^2 + E_0^2 + 2E_1E_0 \cos(\varphi_1 - \varphi_0). \quad (3.3)$$

Рассмотрим для примера схему получения интерферограммы оптически прозрачного объекта (рис. 3.1). Луч лазера 1 с помощью полупрозрачного зеркала 2 разделяется на составляющие. Коллиматоры 4 и 5 формируют соответственно опорный и предметный пучки с плоским волновым фронтом.

В различных точках поверхности, где наблюдается интерференция, разность фаз волн $\varphi_1 - \varphi_0$ меняется из-за оптической задержки предметной волны в различных участках просвечиваемого объекта.

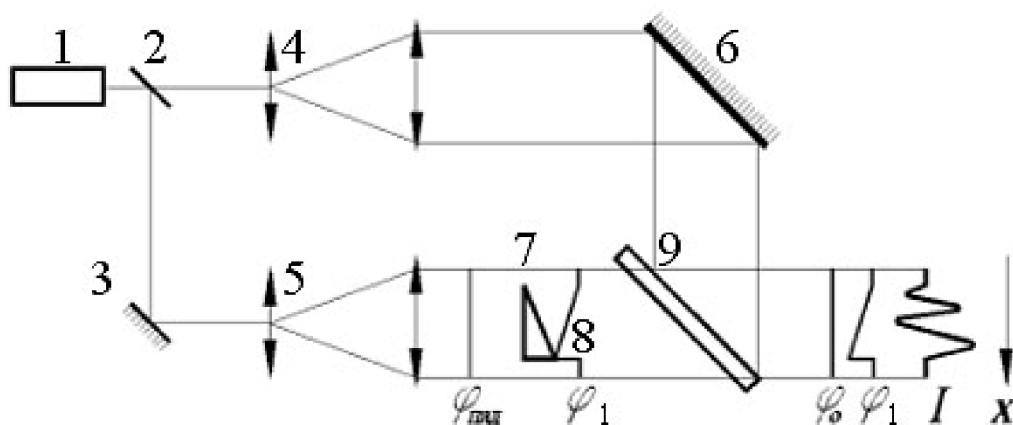


Рис. 3.1. Схема получения интерферограммы с помощью плоских волновых фронтов: 1-лазер; 2, 9 - полупрозрачное зеркало 3, 6-зеркало; 4, 5-коллиматор; 7 - прозрачный объект, 8-предметная волна. Фронты соответствующих волн обозначены φ_0 , $\varphi_{\text{пад}}$, φ_1 . I -распределение интенсивности в плоскости X интерферограммы

В соответствии с изменениями $\varphi_1 - \varphi_0$ модулируется по гармоническому закону распределение интенсивности в плоскости X интерферограммы (3.3). Следовательно, фазовые сдвиги, вносимые объектом кодируются на интерферограмме в виде числа и местоположения интерференционных полос. Из того же выражения (3.3) видно, что поглощающие свойства объекта влияют на амплитуду светового поля предметной волны E_1 и, следовательно, на контраст интерференционной картины μ :

$$\mu = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2E_1E_0}{E_1^2 + E_0^2}. \quad (3.4)$$

Из (3.4) видно, что контраст максимален при $E_1 \rightarrow E_0$, а при любых отклонениях от этого условия значение μ падает. Следовательно информация об оптической плотности объекта кодируется в виде контраста интерферограммы, а форма интерференционных полос содержит сведения о распределении фазовых задержек $\Delta\varphi$ по сечению пучка, т.е.

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 = \frac{2\pi l}{\lambda}(n_1 - 1), \quad (3.5)$$

где n_1 и l – коэффициент преломления и геометрическая толщина объекта вдоль каждого из лучей, проходящих через него.

К сожалению, интерференционный метод в описанном виде может быть использован для изучения объектов весьма узкого класса. Классические интерферометры непригодны для изучения объектов, содержащих светорассеивающие объемы или поверхности. Физическая причина этого ограничения состоит в трудностях, возникающих при интерференционном сравнении опорных волновых фронтов, имеющих обычно простую конфигурацию (плоские или сферические), со статистически флуктуирующим полем, несущим информацию о светорассеивающем объекте.

3.2. Интерференционные виброметры на основе счета полос

Интерференционные виброметры данного типа строятся с неразведенным пучком излучения и имеют в оптической схеме дополнительное малоразмерное зеркало, которое закрепляется на поверхности исследуемого объекта. По способу деления исходной волны на опорную и предметную данные интерферометры относят к амплитудным.

Наибольшее распространение получили ЛИВ, состоящие из интерферометра Майкельсона и блока счета интерференционных полос. На рис. 3.2 приведена структурная схема вибрационной установки с интерференционным измерителем, обеспечивающим определение амплитуды виброперемещения методом счета полос за целое число периодов колебаний виброустановки.

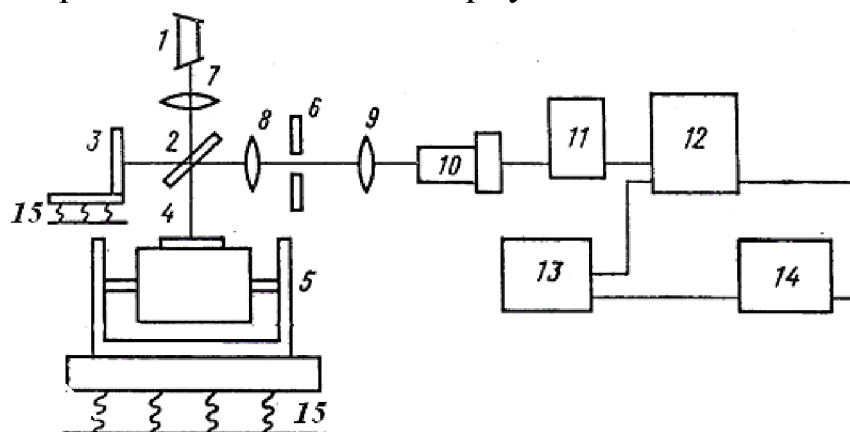


Рис. 3.2. Структурная схема вибрационной установки с лазерным интерферометром: 1 - источник излучения; 2 - полупрозрачная пластина; 3, 4 - зеркало; 5 - вибратор; 6 - щелевая диафрагма; 7, 8, 9 - объектив; 10 - фотоприемник; 11 - катодный повторитель; 12 - импульсный счетчик; 13 - счетчик числа периодов колебаний; 14 - синхронизирующее устройство; 15 - виброизоляция

Для осуществления счета интерференционных полос сигнал с выхода фотоприемника 10 после катодного повторителя 11 поступает на вход электронного импульсного счетчика 12, работающего в режиме пуска и остановки счета внешними импульсами. Сигналы пуска и остановки подаются на синхронизирующее устройство 14,

запускающееся от прямоугольных импульсов, период которых равен периоду колебаний вибратора 5. Сигнал поступает на счетчик числа периодов 13.

Амплитуду перемещения A определяют по числу интерференционных полос из соотношения:

$$A = \lambda \frac{N}{(4n)}, \quad (3.6)$$

где n - число периодов колебаний; N - число полос отсчитанное за все периоды колебаний ($N > 10$).

Для гелий-неонового лазера с $\lambda=0.638$ мкм для счета полос число периодов выбирают постоянным ($n = 791$). Тогда формула для измерения амплитуды имеет вид:

$$A = 10^{-4} N \quad (3.7)$$

Для измерения скорости вибрации методом счета периодов колебаний n сигнал на выходе фотоприемника 10 фиксируется счетчиком периода колебаний 13 пропорционально средней вибрационной скорости V_{cp} . Фиксация производится в течение периода времени, определяемого частотой вибрации зеркала 4. Средняя скорость вибратора, а следовательно и средняя скорость вибрации зеркала 4 определяется как

$$V_{cp} = \frac{4A}{T} = \frac{\lambda}{2} \frac{N}{nT}, \quad (3.8)$$

где T - период вибрации.

Множитель 4 в соотношениях (3.6) и (3.8) связан с тем, что счет полос происходит четыре раза за период при прямом и обратном ходах подвижной системы вибратора 5. Пределы измерения методом счета амплитуды виброперемещения составляют 5-100 мкм при погрешности 0,1 -0,3 мкм.

Для измерения малых амплитуд вибрации применяется метод счета исчезновения интерференционных полос [7] или метод «нулей» функции Бесселя [5]. Данный метод основан на следующем явлении: при амплитуде вибрации, пропорциональной корням функ-

ции Бесселя первого рода нулевого порядка, интерференционная картина исчезает. Действительно, для интенсивности двулучевой интерференционной картины можно записать.

$$I_{\Sigma} = k \left[1 + J_0 \left(\frac{4\pi A_i}{\lambda} \right) \cos \frac{2\pi x}{b} \right], \quad (3.9)$$

где k - постоянная; $J_0 \left(\frac{4\pi A_i}{\lambda} \right)$ - функция Бесселя первого рода нулевого порядка; x -линейная координата, перпендикулярная интерференционным полосам; b -ширина полос.

Функция Бесселя $J_0 \left(\frac{4\pi A_i}{\lambda} \right)$ принимает первое нулевое значение при $x_1 = 2,405$. Это достигается при $A_1 = \frac{x_1 \lambda}{4\pi} = 0,121$ мкм.

Таблица 3.1

Амплитуды колебаний, соответствующие «нулям» функции Бесселя

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{4\pi}{\lambda} A$	2,405	5,520	8,654	11,792	14,931	18,071	21,212	24,352
A, мкм ($\lambda = 0,633$)	0,121	0,278	0,436	0,594	0,752	0,910	1,069	1,227
A, мкм ($\lambda = 0,514$)	0,098	0,226	0,354	0,482	0,611	0,739	0,868	0,996

В таблице 3.1 приведены расчетные значения амплитуд вибрации для восьми «нулей» функции Бесселя при $\lambda=0,633$ мкм и с $\lambda = 0,514$ мкм.

3.2.1. Метод повышения виброустойчивости интерферометра

Случайные вибрации являются наиболее трудно устранимыми источниками погрешностей измерения. Рассмотрим виброустойчивый метод измерений, реализуемый с помощью лазерной измери-

тельной системы, позволяющей в значительной степени устранить влияние паразитных вибраций.

Методы измерения с использованием явления интерференции основаны на сложении когерентных волн: $E_1 \exp j(\omega t + \varphi_1)$ и $E_2 \exp j(\omega t + \varphi_2)$

Амплитуда результирующей волны:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (3.10)$$

где $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \delta_0$ (здесь δ_0 - оптическая разность хода, равная разности расстояния $l_1 - l_2$ в опорном и измерительном плечах).

В двухчастотных лазерных измерительных системах переменная составляющая выходного сигнала фотоприемника при неподвижных отражающих зеркалах в опорном и измерительном плечах описывается выражением:

$$u(t) = U \cos(\Omega \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda} \delta_0) = U \cos\left[\Omega \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda} (l_1 - l_2)\right]. \quad (3.11)$$

При наличии вибрации корпуса лазерной системы или при относительном движении лазерной системы и объекта измерения происходит изменение оптической разности хода, то есть паразитная модуляция. Так, например, при $l_1 \sin \omega_0 t$ и $l_2 \sin \omega_0 t$ выходной сигнал фотоприемника имеет вид:

$$u(t) = U \cos\left[\Omega \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda} (l_1 - l_2) \sin \omega_0 t\right]. \quad (3.12)$$

При равенстве $l_1 = l_2$ или при одновременном их изменении в сторону уменьшения или увеличения величина

$$\frac{2\pi}{\lambda} (l_1 - l_2) \sin \omega_0 t = 0. \quad (3.13)$$

Измерение при таком условии возможно, если опорное и измерительное зеркала находятся на объекте измерения. Метод измерения заключается в следующем.

Излучение двухчастотного лазера 1 (рис. 3.3) через четверть-волновую пластинку 2, светоделительный кубик 3, расщепится из-

лучения 6, поляризаторы 7, 8 направляются на отражающие поверхности 9, 10, расположенные на опоре 11.

Отраженные опорный и измерительные оптические сигналы через поляризатор 4 направляются на фотоприемник 5. Выходной сигнал фотоприемника при гармоническом колебании отражающей поверхности 9 объекта измерения имеет вид:

$$u(t) = U \cos \left[\Omega \cdot t + \frac{4\pi V}{\lambda \omega_0} \sin \omega t + \frac{2\pi}{\lambda} (l_1 - l_2) \sin \omega_n t \right], \quad (3.14)$$

где $\frac{2\pi}{\lambda} (l_1 - l_2) \sin \omega_n t = 0$; ω_0 - частота колебаний объекта измерения; ω_n - частота паразитной вибрации.

Таким образом, описанный метод позволяет исключить влияние паразитных вибраций, что особенно важно при измерении малых амплитуд механических колебаний.

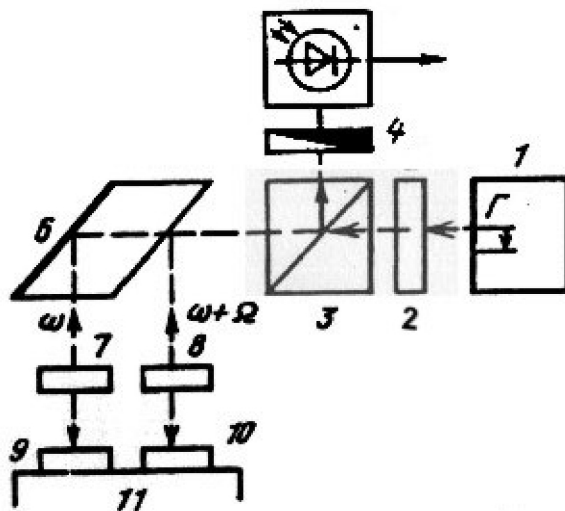


Рис. 3.3. Схема повышения виброустойчивости метода измерений:

1-лазер; 2-четвертьволновая пластинка; 4, 7, 8 - поляризатор; 5 - фотоприемник; 6 - призма-расщепитель; 9, 10 - зеркало; 11- виброопора

3.3. Лазерные виброметры с амплитудной модуляцией

Особенность лазера как источника излучения состоит в том, что он фактически является интерферометром. Поэтому включение лазера в схему с другим интерферометром, являющимся измерительным преобразователем, создает оптическую обратную связь (ООС)

между ними — явление, проявляющееся в модуляции интенсивности излучения лазера.

В качестве примера на рис. 3.4 дана применяемая в виброметрии схема трехзеркального интерферометра с ООС. Лазер, состоящий из активного элемента 3, помещенного в резонатор (интерферометр Фабри-Перо, образованный зеркалами 2, 4), излучает в сторону объекта 6 с закрепленным на нем зеркалом 5 и на фотоприемник 1. Виброперемещение зеркала 5 приводит к чередованию максимумов и минимумов ООС, что вызывает пропорциональное изменение интенсивности излучения лазера, регистрируемое фотоприемником 1. Фазовая информация, заключенная в возвращенном луче, проявляется в форме амплитудной модуляции выходного излучения непрерывно работающего лазера. Таким образом, лазер одновременно выполняет функции, как источника излучения, так и детектора интерферометра. Очевидная простота и эксплуатационная надежность этого гомодина выгодно отличают его от большинства классических схем.

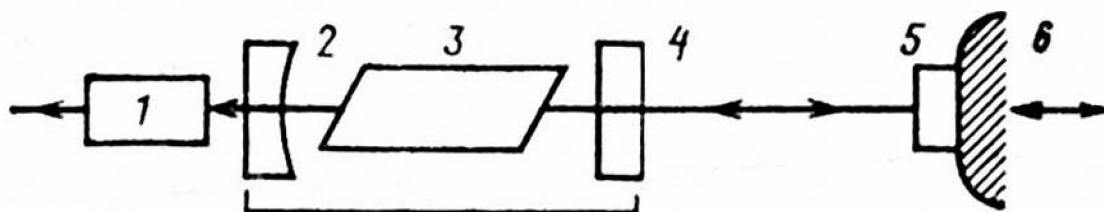


Рис. 3.4. Интерферометр с оптической обратной связью: 1 – фотоприемник, 2, 4 – зеркало, 3 – активный элемент, 5 – внешнее зеркало, 6 – объект

При соответствии некоторым условиям такой интерферометр обладает чувствительностью к смещению 10^{-8} мкм в диапазоне амплитуд $\pm 4 \cdot 10^{-4}$ мкм [2].

Рассмотрим более подробно принцип работы ЛИВ на основе трехзеркального интерферометра. Механизм возникновения модуляции непрерывного излучения лазера при фиксированных положениях подвижного зеркала можно представить по схеме, приведенной на рис. 3.5. Пусть луч 1 в газоразрядной трубке лазера движется к

зеркалу M_2 , тогда часть его отражается обратно, а часть проходит в пассивный резонатор, образуя луч 2. Если в положении (а) подвижного зеркала M_3 оптический путь во внешнем резонаторе, образованном зеркалами M_2 и M_3 , равен $\Delta = N\lambda / 4$ (N -целое нечетное число), то резонатор $M_2 M_3$ характеризуется высокой прозрачностью для луча лазера, и отдаваемая им через зеркало M_1 мощность минимальна. Это можно объяснить тем, что после отражения от зеркала M_3 луч 2 входит в разрядную трубку лазера в противофазе с лучом 1. При использовании внешнего зеркала с подходящим коэффициентом отражения излучение лазера можно вообще погасить.

Если в положении (б) зеркала M_3 оптический путь $\Delta = N\lambda / 4$ ($N = 1, 2, 3, \dots$), то резонатор $M_2 M_3$ обладает хорошими отражательными свойствами и отдаваемая лазером мощность через зеркало M_1 - максимальна. Это объясняется тем, что луч 2 после отражения от зеркала M_3 входит в разрядную трубку лазера уже в фазе с лучом 1 (отр.). В положении (в) зеркала M_3 картина аналогична ситуации с зеркалом M_3 в положении (а), только оптические пути отличаются на $\lambda_0/2$.

Таким образом, одна полоса модуляции соответствует изменению оптического пути в пассивном резонаторе на половину длины волны. Интенсивность излучения лазера, выходящего через зеркало M_1 , регистрируется фотоприемником.

Эффект амплитудной модуляции излучения лазера описывается более полно и просто, если рассматривать внешнее зеркало M_3 и зеркало M_2 на рис. 3.5 как резонатор Фабри-Перо. Такое составное зеркало затем рассматривается как одно из зеркал в резонаторе лазера.

Интенсивность света, отраженного от интерферометра Фабри-Перо, содержащего зеркала M_2 и M_3 с разными коэффициентами отражения, определяется следующей формулой

$$I^R = \left[\frac{R_2 + R_3(1 - K_2)^2 - 2\sqrt{R_2 R_3}(1 - K_2)\cos \delta\varphi}{1 + R_2 R_3 - 2\sqrt{R_2 R_3} \cos \delta\varphi} \right] \cdot I_0, \quad (3.15)$$

где R_2 , R_3 – коэффициенты отражения зеркал M_2 , M_3 соответственно; K_2 – суммарный коэффициент потерь, обусловленных рассеянием, поглощением и т.д. в зеркале M_2 ; $\delta\phi$ – фаза между двумя последовательными интерферирующими лучами.

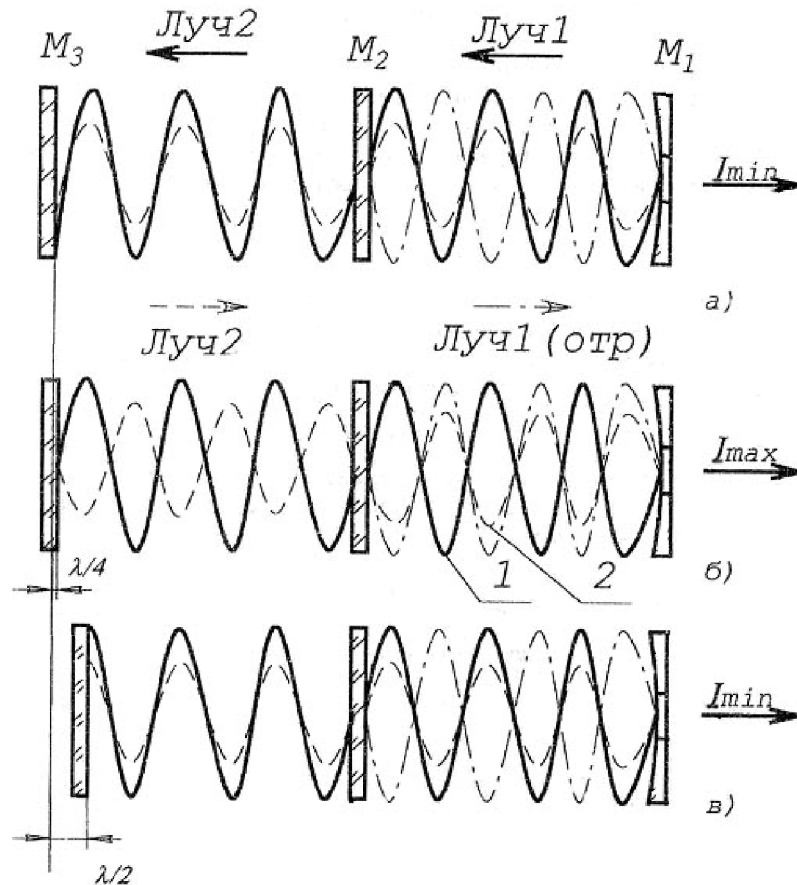


Рис. 3.5. Схема, поясняющая принцип работы трёхзеркального интерферометра с подвижным зеркалом M_3

При этом

$$\begin{cases} I_{\max}^R = \left[\frac{\sqrt{R_2} + \sqrt{R_3}(1 - K_2)}{1 + \sqrt{R_2 R_3}} \right]^2 \cdot I_0 \\ I_{\min}^R = \left[\frac{\sqrt{R_2} - \sqrt{R_3}(1 - K_2)}{1 - \sqrt{R_2 R_3}} \right]^2 \cdot I_0 \end{cases} \quad (3.16)$$

Иначе говоря, для данного коэффициента пропускания зеркала M_2 эффективная отражающая способность интерферометра Фабри-

Перо может быть вычислена как функция отражательной способности внешнего зеркала M_3 .

Представим, что зеркало M_3 колеблется от крайнего положения A до крайнего положения B (рис. 3.6). Допустим, что в какой-то момент времени зеркало сместилось на $\lambda/2$. Луч 2 на пути к зеркалу M_3 и обратно приобретает разность хода λ_0 по отношению к лучу 1. Следовательно, в случае движущегося зеркала M_3 одна "полоса" модуляции будет соответствовать смещению M_3 на $\lambda_0/2$. Зеркало M_3 , двигаясь от A до B , проходит путь $2\Delta x = N\lambda_0/2$, где N - число интерференционных "полос" на экране осциллографа. Отсюда смещение или амплитуда колебания зеркала:

$$\Delta x = N\lambda_0 / 4. \quad (3.17)$$

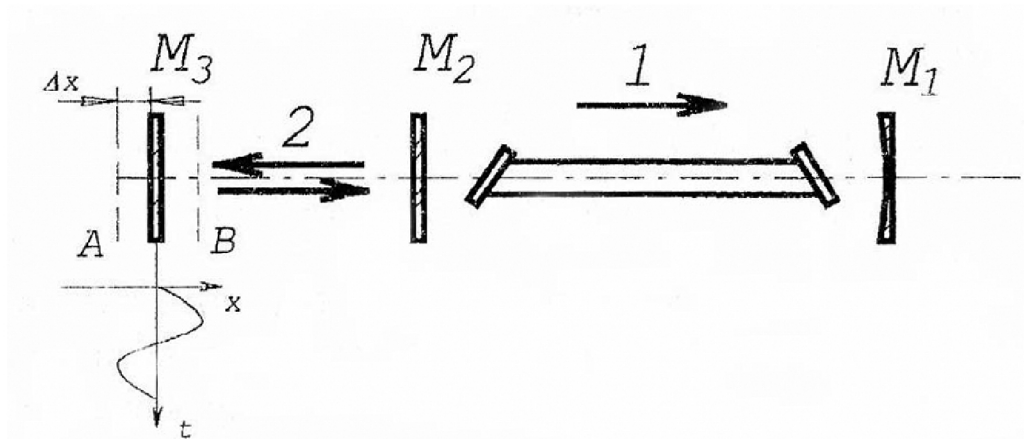


Рис. 3.6. Определение малых смещений при помощи трехзеркального интерферометра

Характерный вид получаемой на экране осциллографа картины модуляционных циклов представлен на рис. 3.7.

Точки A и B на кривой соответствуют тем положениям, в которых зеркало M_3 (см. рис. 3.6) имеет нулевую скорость. Наличие этих циклов или "полос" свидетельствует об амплитудной модуляции излучения лазера.

Определив в соответствии с (3.17) величину виброперемещения и, зная постоянную времени развертки луча осциллографа, можно найти значение виброскорости колеблющегося объекта. Для повышения разрешающей способности ЛИВ применяют многократное

отражение оптического излучения от измеряемой поверхности. Пример реализации такого подхода для трехзеркального лазер-интерферометра дан в [7].

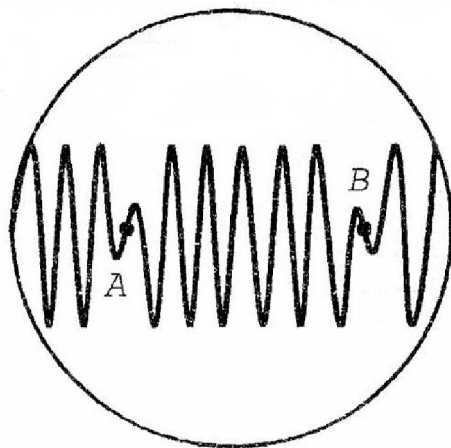


Рис. 3.7. Осциллограмма, наблюдаемая при перемещении подвижного зеркала

3.4. Интерференционные виброметры в поверочных приборах

Лазерные приборы измерения параметров вибрации, состоящие из интерферометра Майкельсона и блока счета интерференционных полос, нашли применение в качестве эталонных средств контроля.

Рассмотрим рабочий эталон (РЭ) единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела, предназначенный для поверки образцовых и рабочих средств измерения параметров вибрации и состоящий из средств задания механических колебаний (пьезоэлектрического, электродинамического и камертонного вибраторов) и средств измерения механических колебаний (двух малогабаритных и одного многоходового лазерных интерферометров).

Оптическая схема многоходового лазерного интерферометра приведена на рис. 3.8. Луч от лазерного излучателя 1 подается на светоделительный кубик 2, который разделяет его на два пучка. Первый пучок направляется в референтное плечо на отражатель 3, размещенный на пьезокорректоре 4, второй - в измерительное плечо на подвижный трехгранный уголкового отражатель 5, находящийся на пьезовибраторе. Отражаясь от его граней, пучок попадает на непод-

вижный трехгранный уголкового отражатель 6. Между подвижным и неподвижным уголковыми отражателями пучок проходит m' раз. При последнем проходе пучок попадает на зеркальную поверхность 7 среза вершины неподвижного уголкового отражателя и возвращается по тому же пути в обратном направлении, совершая те же m' проходов. Таким образом, пучок в измерительном плече совершает $2m'$ проходов, что увеличивает чувствительность многоходового интерферометра по сравнению с двухходовым в m' раз. Число $2m'$ проходов зависит от смещения оснований уголковых отражателей друг относительно друга и ширины среза вершины неподвижного уголкового отражателя. Число m' можно определить из следующего соотношения:

$$m = b/a + 1 \text{ при } a > c/2,$$

где b - половина ширины основания уголкового отражателя; a - смещение вершины подвижного уголкового отражателя относительно неподвижного; c - ширина среза вершины неподвижного уголкового отражателя.

Пучки из измерительного и опорного каналов интерферируют на полупрозрачном покрытии кубика 2, и оптический интерференционный сигнал воспринимается фотодетектором 8.

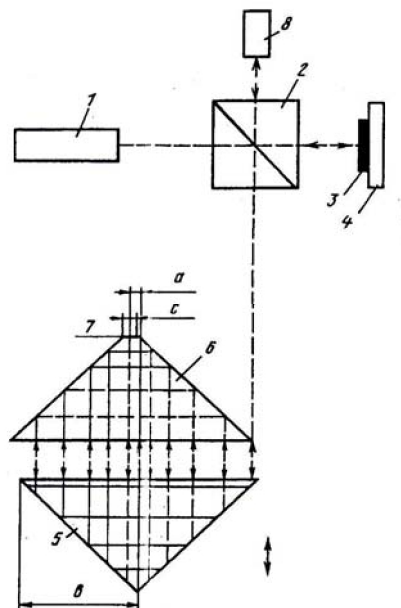


Рис. 3.8. Оптическая схема многоходового лазерного интерферометра: 1-лазер; 2-ветоделительный кубик; 3-зеркало; 4-пьезокорректор; 5-подвижный уголкового отражатель; 6- неподвижный уголкового отражатель; 7-зеркальная поверхность

На рис. 3.9 приведена структурная схема РЭ. В ней объединены устройство задания и измерения механического перемещения методом счета интерференционных полос, устройство задания и измерения сверхмалых перемещений методом "нулей" функции Бесселя. Оба устройства работают от генератора напряжения 1. В первом из указанных устройств (переключатель П1 находится в левом положении) сигнал напряжения синусоидальной формы поступает через усилитель мощности 2 на один из вибраторов - камертонный вибратор 3 или электродинамический вибратор 7 (переключатель П2 находится соответственно в левом или правом положении). Обмотка подмагничивания камертонного вибратора питается от источника постоянного тока 4. Камертонный вибратор 3 работает с малогабаритным двухходовым интерферометром 5, оптический интерференционный сигнал которого преобразуется фотоэлектрическим преобразователем 6 в последовательность электрических импульсов. Электродинамический вибратор 7 работает с малогабаритным двухходовым интерферометром 8, оптический сигнал которого преобразуется фотоэлектрическим преобразователем 9.

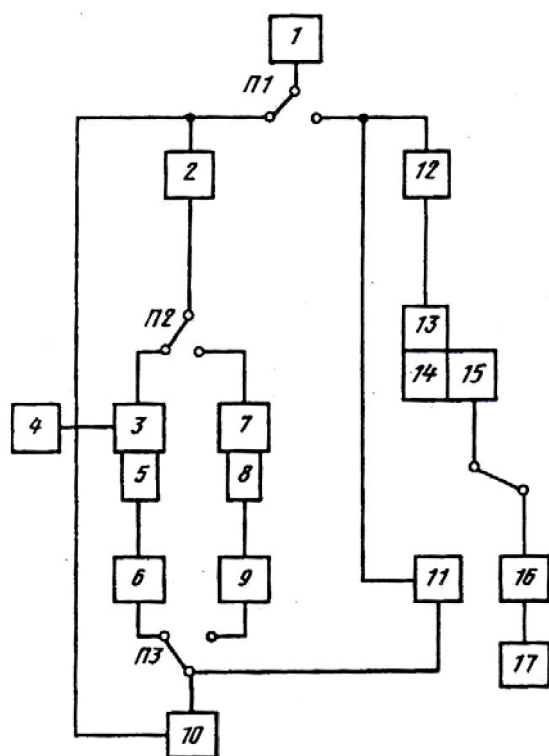


Рис. 3.9 Структурная схема рабочего эталона: 1 - генератор напряжения; 2, 12 - усилитель мощности; 3 - камертонный вибратор; 4 - источник постоянного тока; 5, 8 - малогабаритный двухходовый интерферометр; 6, 9, 15 - фотоэлектрический преобразователь; 7 - электродинамический вибратор, 10 - цифровой измеритель перемещения; 11 - цифровой частотомер; 13 - пьезоэлектрический вибратор; 14 - многоходовый интерферометр; 16 - анализатор; 17 - цифровой вольтметр

Измерение размаха механического колебания, воспроизводимого любым из указанных вибраторов, осуществляется подсчетом числа электрических импульсов цифровым измерителем перемещений 10 или цифровым частотомером 11, работающим в режиме измерения отношения частот (переключатель ПЗ находится соответственно в левом или правом положении).

Устройство задания и измерения сверхмалых перемещений методом "нулей" функции Бесселя также работает от генератора напряжения 1 (переключатель П1 находится в правом положении). Сигнал напряжения синусоидальной формы, усиленный усилителем мощности 12, подается на пьезоэлектрический вибратор 13. В свою очередь, указанный вибратор работает с многоходовым интерферометром 14, оптический интерференционный сигнал которого преобразуется фотоэлектрическим преобразователем 15 в последовательность электрических импульсов. Выход преобразователя 15 связан с входом спектроанализатора 16. Спектроанализатор выделяет спектральную составляющую частоты задающего сигнала и преобразует ее в напряжение постоянного тока, измеряемое с помощью цифрового вольтметра 17.

Систематическая составляющая погрешности РЭ при использовании нулевого метода измерения определяется отличием выходного напряжения узкополосного фильтра (среднего значения) от нулевого значения и не превышает 0,88 % для многоходового интерферометра и 0,15% - для малогабаритного двухходового.

Рассмотренный рабочий эталон единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела имеет диапазон частот $0,3-2 \cdot 10^4$ Гц и ускорения до $5 \cdot 10^3$ м/с².

В связи с введением нормирования эффективного значения виброскорости крупных вращающихся механизмов (турбоагрегатов, газокompрессорных установок) возникла необходимость поверки виброизмерительной аппаратуры по этому параметру. Описанный в [6] интерференционный измеритель виброскорости позволяет производить непосредственный отсчет ее эффективного значения по цифровому индикатору. Принцип действия прибора основан на счете ин-

терференционных полос не за целое число периодов, как в (3.6), а за время счета $T_{сч}$.

Число импульсов, зарегистрированное в счетчиках индикации, связано с размахом виброперемещения, частотой и временем счета зависимостями:

$$N_{сч} = (4S_0 / \lambda) T_{сч} F = (4S_0 / \lambda) (T_{сч} / T_0), \quad (3.18)$$

где $T_0 = 1/F$.

Если за время $T_{сч}$ укладывается не целое число периодов колебаний (или четвертей периодов), то

$$N_{сч} = (4S_0 / \lambda) n + (4S_0 / \lambda) (\Delta T_{сч} / T_0), \quad (3.19)$$

где n — целое число периодов за время счета; $\Delta T_{сч}$ — дробная часть периода за то же время.

Так как колебания вибростенда происходят по синусоидальному закону $S = (S_0/2) \sin 2\pi Ft$, а счет числа импульсов за дробную часть периода проводится для линейного изменения виброперемещения $S = (S_0/2)(\Delta T_{сч} / T_0)$, то именно эта часть периода счета определяет основную погрешность измерений. Считая колебания вибростола симметричными, погрешность можно рассматривать в зависимости от дробной части четверти периода, т.е.:

$$N_{сч} = 16S_0 n / \lambda + (16S_0 / \lambda) (\Delta T_{сч} / T_0) \quad (3.20)$$

Погрешность счета дробной части периода определим по формуле:

$$\delta N_{\partial p} = \sin 2\pi (\Delta T_{сч} / T_0) - 4\Delta T_{сч} / T_0, \quad (3.21)$$

при $0 < \Delta T_{сч} < T_0/4$. Максимальное значение погрешности $\delta N_{\partial p}$, найденное из уравнения

$$\frac{d}{dt} \left(\sin 2\pi \frac{\Delta T_{сч}}{T_0} - \frac{4\Delta T_{сч}}{T_0} \right) = 0, \quad (3.22)$$

составляет 0,21.

Суммарная погрешность измерений виброскорости, определяемая в процентах по формуле

$$\delta N = \delta N_{\partial p} T_0 100 / (4T_{сч}) \leq 100 N_{\partial p} / n_1, \quad (3.23)$$

где n_l – целое число четвертей периода колебаний за время счёта импульсов, уменьшается с увеличением $T_{сч}$. Поэтому, если заданы наименьшая частота измеренных колебаний и допустимая погрешность, то можно определить минимальное время счёта числа интерференционных полос (в секундах) по формуле

$$T_{сч_{\min}} \geq 21/(\delta N 4 F_{\min}), \quad (3.24)$$

где $F_{\min}$ – минимальная частота измеряемой вибрации.

Значительно сократить $T_{сч}$ и уменьшить погрешность можно при проверке на фиксированных частотах F_i , при которых

$$T_{сч} F_i = n \quad (3.25)$$

Лазерный измеритель виброскорости предназначен для работы на поверочной установке в частотном диапазоне $10 \dots 1 \cdot 10^3$ Гц с погрешностью воспроизведения не более 0,5% и коэффициентом гармоник не выше 1%. При этих параметрах время счёта должно быть не менее 2 сек.

Контрольные вопросы

1. Почему амплитудные интерференционные виброметры дают информацию о параметрах колебаний лишь отдельных точек объекта?
2. Объясните механизм регистрации с помощью фотоприемника изменения фазы световой волны, отраженной от вибрирующей поверхности.
3. Каким образом отображается на интерферограмме информация о фазовом сдвиге, вносимым исследуемым объектом?
4. Поясните принцип работы метода счета полос при определении амплитуды виброперемещения и средней скорости колеблющегося объекта.
5. Каков принцип работы метода «нулей» функции Бесселя при измерении сверхмалых вибросмещений?
6. В чем заключается лазерный метод повышения виброустойчивости интерферометра?
7. Объясните принцип работы виброметра на основе трехзеркального интерферометра.
8. Назовите пути повышения чувствительности амплитудных интерференционных виброметров.

4. ЛАЗЕРНЫЕ ДОПЛЕРОВСКИЕ ВИБРОМЕТРЫ

Виброметрия – область измерительной техники, к компетенции которой относятся получение информации и измерение кинематических величин, характеризующих колебательный процесс. Основным элементом виброизмерительной аппаратуры является вибродатчик, воспринимающий на входе механические перемещения и выдающий на выходе величины, соответствующие этим перемещениям.

Лазерные доплеровские датчики вибраций наиболее полно реализуют идею бесконтактных измерений. Доплеровский сдвиг частоты излучения, рассеянного на движущихся частицах или поверхностях, относится к числу давно известных и хорошо изученных явлений [8]. Однако до внедрения лазерных источников излучения из-за спектрометрических трудностей можно было измерять лишь сравнительно большие скорости.

Лазерное излучение, обладая высокой монохроматичностью, имеет и несравненно лучшие характеристики в отношении расходимости и интенсивности пучка, по сравнению с излучением от других источников. Все это позволяет измерять меньшие поперечные сечения рассеяния с большим угловым разрешением. Кроме того, высокая монохроматичность лазерного излучения позволяет использовать такие методы обработки светового сигнала, как гетеродинное детектирование и узкополосная фильтрация.

К достоинствам доплеровских датчиков следует отнести:

- локальность измерений, что позволяет производить замеры в точках, величина которых ограничена лишь дифракционным пределом (порядка длины волны генерации лазера);
- возможность проведения измерений в процессе сканирования пучка по всей поверхности объекта;

- возможность измерения параметров механических колебаний объектов сложной формы, расположенных на значительном расстоянии от измерительной системы;
- высокую помехозащищенность и высокое отношение сигнал/шум.

Основные проблемы применения доплеровских датчиков, заключаются в наличии требований к светопроводящей среде между лазером и поверхностью измеряемого объекта, а также к отражающей способности поверхности объекта. Основными сдерживающими факторами на пути широкого применения доплеровских датчиков являются достаточно глубокие физико-математические основы метода, а также сложность и высокая цена приборного обеспечения.

Тем не менее области применения лазерных доплеровских измерительных систем (ЛДИС) быстро расширяются. Основные направления использования ЛДИС включают:

- измерение параметров движения объекта контроля в рабочих условиях, когда имеется значительное влияние внешних факторов (температура, давление, агрессивная среда и т.п.);
- измерение параметров механических колебаний деталей и конструкций в условиях воздействия высоких динамических нагрузок, возникающих при проведении вибрационных испытаний;
- измерение параметров механических колебаний при метрологической аттестации виброизмерительной и виброиспытательной аппаратуры;
- измерение параметров движения объекта под воздействием ударных и случайных процессов, позволяющих исследовать не только отклик объекта на ударное или случайное воздействие, но и восстановить форму и параметры воздействия.

ЛДИС применяются при испытаниях в самолето- и двигателестроении, оптической связи, приборостроении, при сейсмических измерениях, метрологической аттестации виброизмерительной аппаратуры, аэродинамических и медицинских исследованиях и т.д. [5, 6].

4.1. Основы лазерных доплеровских измерительных систем

Как известно, принцип действия лазерных измерительных систем основан на определении и анализе параметров рассеянного объектом света (амплитуда, направление распространения, частота, фаза). Доплеровские измерительные системы используют для анализа движения исследуемого объекта изменение частоты рассеянного излучения.

Принципиальная схема ЛДИС приведена на рис. 4.1.

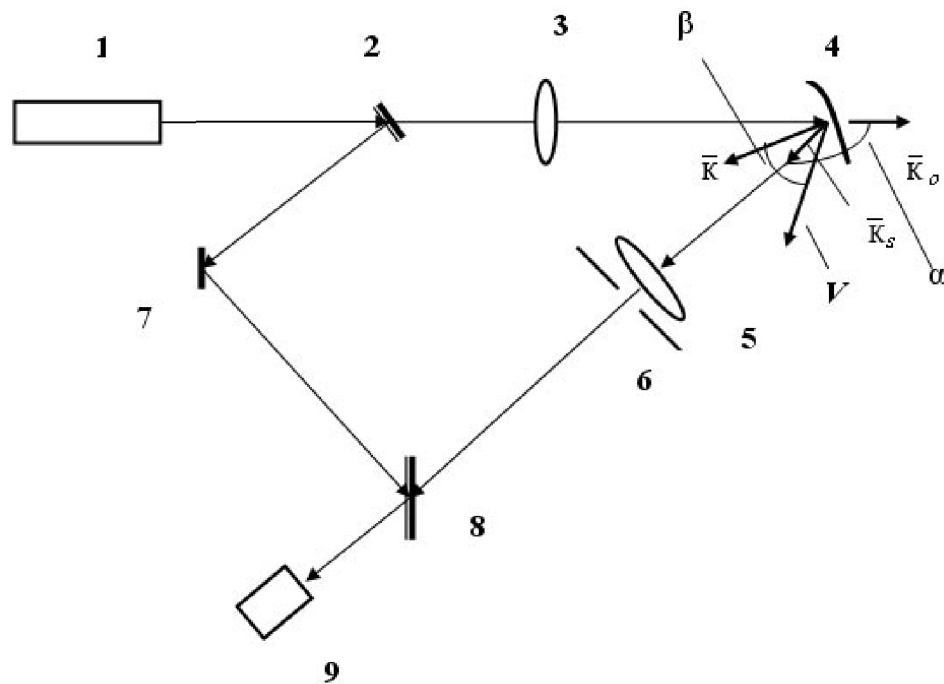


Рис. 4.1. Принципиальная схема доплеровского измерителя скорости движения: 1 – лазер; 2 – светоделитель; 3, 5 – линза; 4 – поверхность, движущаяся со скоростью $\vec{V}$; 6 – апертурная диафрагма; 7 – зеркало; 8 – полупрозрачное зеркало; 9 – фотоприемник

Излучение лазера 1 с частотой ν_0 и волновым вектором $\vec{K}_0$ фокусируется линзой 3 на диффузной поверхности 4, движущейся со скоростью $\vec{V}$, в пятно диаметром d . Рассеянный свет с частотой ν_s и волновым вектором $\vec{K}_s$ собирается линзой 5 с апертурной диафрагмой 6 и фокусируется на приемной площадке фотоприемника 9. Часть исходного лазерного излучения светоделителем 2 направляется на зеркало 7 и, отразившись от него с помощью полупрозрачного зеркала 8, смешивается со светом, рассеянным поверхностью 4.

Выражение для доплеровского смещения частоты $\Delta\nu$ в первом приближении может быть представлено как

$$\Delta\nu = \nu_0 - \nu_s = \frac{1}{2\pi}[(\bar{K}_s - \bar{K}_0)\bar{V}] = \frac{1}{2\pi}(\bar{K}\bar{V}), \quad (4.1)$$

где $\bar{K} = \bar{K}_s - \bar{K}_0$ - вектор чувствительности датчика.

Здесь величина смещения частоты $\Delta\nu$ выражается в Гц и связана с параметром ω_0 из выражения (1.15) соотношением $\Delta\nu = \omega_0/2\pi$.

В соответствии с формулой (4.1) величина доплеровского смещения частоты прямо зависит от величины проекции скорости движения точки поверхности на вектор чувствительности измерителя. С учетом того, что вектор чувствительности по модулю $|\bar{K}| = (4\pi/\lambda) \sin \alpha/2$, где λ - длина волны излучения лазера, выражение (4.1) можно представить в виде:

$$\Delta\nu = \frac{2V}{\lambda} \sin \frac{\alpha}{2} \cos \beta = \frac{2\nu_0 V}{c} \sin \frac{\alpha}{2} \cos \beta, \quad (4.2)$$

где c - скорость света, α - угол между волновыми векторами освещения и наблюдения исследуемой точки поверхности (угол рассеяния), β - угол между вектором чувствительности $\bar{K}$ датчика и вектором скорости $\bar{V}$ движения точки поверхности исследуемого объекта. Выходной ток $i(t)$ квадратичного фотоприемника измерителя удовлетворяет соотношению:

$$i(t) = e[E_0 \cos(2\pi\nu_0 t + \theta_0) + E_s \cos(2\pi\nu_s t + \theta_s)]^2, \quad (4.3)$$

где E_0 , θ_0 и E_s , θ_s - амплитуда и фаза опорного и рассеянного излучения, соответственно, e - постоянная фотоприемника.

Опуская в равенстве (4.3) переменные составляющие, содержащие оптические частоты, выходящие за пределы чувствительности фотоприемника, получим выражение для фототока:

$$i(t) = 2e\gamma E_0 E_s \cos(2\pi\Delta\nu + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l), \quad (4.4)$$

где γ - коэффициент, учитывающий общее уменьшение интенсивности взаимодействующих излучений за счет расходимости, не-

идеальной когерентности, децентровки оптики и оптических потерь, Δl – разность хода опорного и объектного излучения до плоскости детектирования.

Таким образом, в соответствии с (4.4) в выходном токе детектора присутствует переменная составляющая доплеровского смещения частоты $\Delta\nu = (\nu_0 - \nu_s)$, которая, как следует из (4.2), определяется скоростью V перемещения поверхности.

Необходимо отметить, что в реальной системе волновые вектора $\bar{K}_0$ и $\bar{K}_s$ распределены внутри некоторого телесного угла, определяемого диаметром луча лазера, размером апертурной диафрагмы 6 (см. рис.4.1), расстоянием от линзы 5 до рассеивающего центра. Поэтому после детектирования образуется спектр частот с центром в $\Delta\nu$. Огибающая этого центра будет иметь колоколообразную форму.

Практическая реализация оптической схемы, представленной на рис. 4.1 наталкивается на сложности, связанные с юстировкой оптических элементов. Для обеспечения нормальной работоспособности ЛДИС, собранной по этой схеме, необходимо чтобы после полупрозрачного зеркала 8 оси распространения опорного и рассеянного пучков были полностью пространственно совмещены. Выполнить это требование на реальной конструкции ЛДИС весьма сложно.

На рис. 4.2 представлена более простая для реализации оптическая схема ЛДИС, принципы работы которой идентичны вышеописанным. Данная схема применяется в большинстве ЛДИС, выпускаемых промышленностью.

За основу на рис.4.2 взята схема интерферометра Майкельсона. Излучение лазера 1 с помощью призмы - куба 2 делится на два пучка: опорный и измерительный. Опорный пучок направляется на неподвижное зеркало 5. Линза 3 фокусирует измерительный пучок на поверхность 4 движущегося объекта. Рассеянное поверхностью излучение собирается этой же линзой и с помощью призмы - куба 2 совмещается с опорным пучком, который отражается от зеркала 5. Линза 3 фокусирует отраженное излучение на приемную площадку фотоприемника 6.

В данной схеме ЛДИС угол α между направлениями освещения и наблюдения равен 180° . Таким образом, смещение частоты $\Delta\nu$, как следует из (4.2), определяется в виде:

$$\Delta\nu = \frac{2v_\theta}{c} V_s = \frac{2}{\lambda} V_s, \quad (4.5)$$

где $V_s = |\vec{V}| \cos \beta$ – проекция вектора скорости движения поверхности на направление вектора чувствительности $\vec{K}$. В схеме на рисунке 4.2. векторы $\vec{K}$, $\vec{K}_s$ и $\vec{K}_0$ лежат на одной прямой.

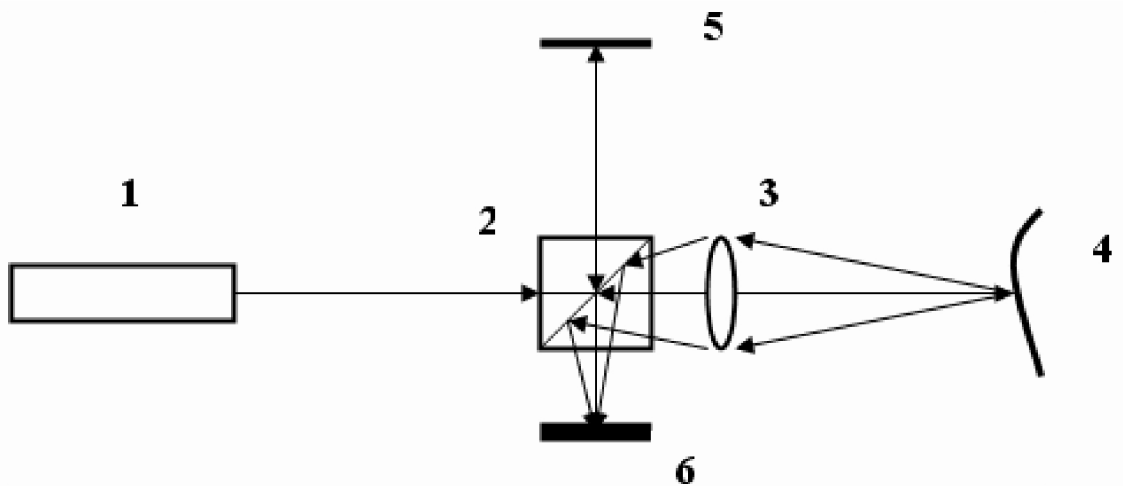


Рис. 4.2. Схема доплеровской измерительной системы на основе интерферометра Майкельсона: 1 – лазер; 2 – призма-куб; 3 – линза; 4 – движущаяся поверхность; 5 – неподвижное зеркало; 6 – фотоприемник

Лазерные доплеровские системы, применяющиеся для измерения скорости движения как потоков жидкости и газа, так и элементов конструкции получили название лазерных анемометров.

Лазерные доплеровские виброметры начали развиваться несколько позже анемометров. Наиболее полное освещение они получили в [5,6].

Если исследуемая поверхность совершает гармонические колебания вида $\bar{S} \sin \omega_0 t$, то ее вектор мгновенной скорости $\vec{V}(x, y)$ в момент времени t в исследуемой точке (x, y) поверхности определяется выражением:

$$\vec{V}(x, y) = \omega_0 \bar{S}(x, y) \cos \omega_0 t = \vec{V}_0(x, y) \cos \omega_0 t, \quad (4.6)$$

где $\vec{V}_0$ – вектор амплитуды скорости колебаний объекта (пиковая виброскорость).

Соответственно, доплеровское изменение частоты $\Delta\nu$ в этом случае для нашей схемы, как это следует из (4.5), будет изменяться со временем как:

$$\Delta\nu(t) = \frac{2\nu_0}{c} V_0 \cos \omega_0 t = \frac{2V_0}{\lambda} \cos \omega_0 t, \quad (4.7)$$

где $V_0 = |\bar{V}_0| \cos \beta$ - пиковая скорость колебаний в направлении вектора чувствительности лазерного виброметра.

Отсюда мгновенная частота $\nu(t)$ отраженного лазерного излучения:

$$\nu(t) = \nu_0 + \frac{2\nu_0 V_0}{c} \cos \omega_0 t. \quad (4.8)$$

Мгновенная фаза $\varphi(t)$ отраженного света в момент времени t в соответствии с (4.8):

$$\varphi(t) = \int_0^t 2\pi\nu(t) dt = 2\pi\nu_0 t + 2\pi \frac{2\nu_0 V_0}{c\omega_0} \sin \omega_0 t. \quad (4.9)$$

Для фототока, следуя (4.4), с учетом (4.9) и (4.6) можно записать:

$$i(t) = 2e\gamma \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} S_0 \cos \omega_0 t + \Delta\theta \right], \quad (4.10)$$

где $\Delta\theta$ – начальная разность фаз между опорным и рассеянным излучением в приемной плоскости фотоприемника, обусловленная разностью хода пучков, а $S_0 = |\bar{S}_0| \cos \beta$ - проекция вектора амплитуды колебаний на вектор чувствительности лазерного виброметра.

Электрический сигнал на выходе фотоприемника является периодической функцией, которую можно представить в виде:

$$\begin{aligned} i(t) = 2e\gamma\gamma_0 E_s \left[J_0 \left(\frac{4\pi S_0}{\lambda} \right) + 2 \cos(\Delta\theta) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left(\frac{4\pi S_0}{\lambda} \right) \cos 2n\omega_0 t - \right. \\ \left. - 2 \sin(\Delta\theta) \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1} \left(\frac{4\pi S_0}{\lambda} \right) \sin (2n+1)\omega_0 t \right] \end{aligned} \quad (4.11)$$

где J_n – функция Бесселя первого рода n -го порядка [9].

Из (4.11) следует, что выходной сигнал фотоприемника представляет собой частотно-модулированные колебания с нулевой несущей частотой и отклонением частоты пропорциональным $4\pi S_0 / \lambda$.

Спектр $I(\omega)$ этого сигнала, являющийся Фурье-преобразованием $\langle i(t) \rangle$, содержит основную частоту вибрации ω_0 и ее гармоники:

$$I(\omega) = 2e\gamma\gamma_0 E_s \left\{ J_0\left(\frac{4\pi S_0}{\lambda}\right) \delta(\omega) + \right. \\ \left. + 2\langle \cos\theta \rangle \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}\left(\frac{4\pi S_0}{\lambda}\right) \delta(\omega - 2n\omega_0) - \right. \\ \left. - 2\langle \sin\theta \rangle \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n+1}\left(\frac{4\pi S_0}{\lambda}\right) \delta[\omega - (2n+1)\omega_0] \right\} \quad (4.12)$$

где $\delta(\omega)$ - дельта-функция Дирака [9], которая определяется как:

$$\delta(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{при } \omega = 0 \\ 0, & \text{при } \omega \neq 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

Полученный в (4.12) спектр соответствует спектру частотно модулированной волны и составлен из равномерно расположенных пиков. Частота вибрации ω_0 определяется по расстоянию между двумя соседними пиками.

На рис. 4.3 приведен типичный спектр, зарегистрированный экспериментально в одной из первых работ [10] по исследованию гармонических колебаний объектов с использованием доплеровского вибродатчика.

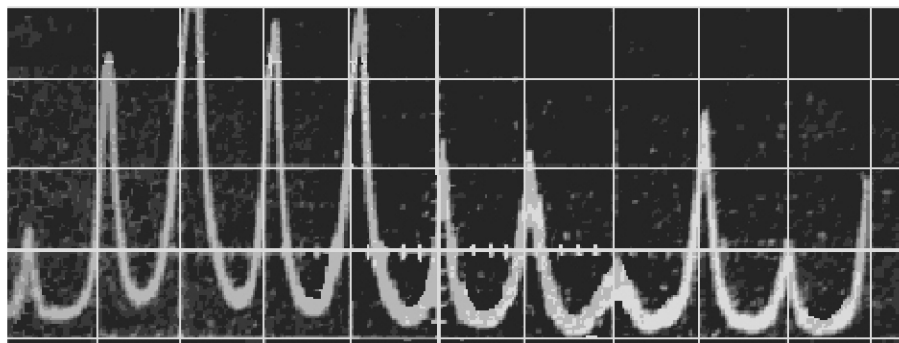


Рис. 4.3. Осциллограмма спектра колебаний, зарегистрированная доплеровским вибродатчиком

Расстояние между любыми двумя пиками на осциллограмме составляет 5 кГц и совпадает с частотой, на которой возбуждались колебания объекта (сравни с шагом сетки по горизонтали, также равным 5 кГц).

Для измерения не только частоты, но и амплитуды вибраций необходимо восстановление модулирующего сигнала. Это можно осуществить, если ввести постоянный сдвиг частоты излучения в опорном пучке на известную величину $\delta\nu$. Основная особенность таких гетеродинных систем состоит в том, что на выходе фотоэлектрического преобразователя появится частотно-модулированный сигнал с несущей частотой, отличной от нуля. Можно показать, что выходной сигнал фотодетектора в этом случае будет содержать составляющую, которая является частотно модулированным сигналом с несущей частотой равной величине сдвига $\delta\nu$:

$$i(t) = 2e\gamma E_0 E_s \cos(2\pi\delta\nu t + \frac{4\pi}{\lambda_0} S_0 \sin \omega_0 t + \Delta\theta), \quad (4.14)$$

где λ_0 – длина волны соответствующая основной (не сдвинутой) частоте ν_0 лазерной генерации.

Восстановление модулирующего сигнала теперь может быть произведено с помощью дискриминатора. Дискриминатор представляет собой электронное устройство, у которого напряжение электрического сигнала на выходе пропорционально разности частот, на которую настроен дискриминатор. В нашем случае на входы дискриминатора подается частота сдвига $\delta\nu$ и частота $\delta\nu + \Delta\nu(t)$, регистрируемая фотоприемником, которая изменяется со временем по синусоидальному закону в соответствии с (4.8). (Дискриминатор входит в состав любого теле- или радиоприемника). Амплитуда выходящего напряжения дискриминатора будет пропорциональна доплеровскому изменению частоты, вызванному вибрацией объекта. Максимальное выходное напряжение дискриминатора будет соответствовать максимальному различию $\Delta\nu_{\max}$ частот, поступающих на его вход. Это различие частот зависит от пиковой виброскорости как:

$$\Delta v_{max} = \frac{2V_0}{\lambda_0}. \quad (4.15)$$

Таким образом, на выходе дискриминатора получим сигнал пропорциональный виброскорости V_0 . Измерив амплитуду огибающей этого сигнала и зная характеристику дискриминатора, можно определить Δv_{max} . Затем по формуле (4.15) определяется пиковая скорость колебаний исследуемой точки объекта. Для того чтобы установить амплитуду колебаний, величину пиковой виброскорости необходимо разделить на частоту колебаний ω_0 . Значение частоты вибрации $\omega_0/2\pi$ (в Герцах) легко измерить с помощью анализатора спектра или частотомера.

Следует отметить, что большинство вибродатчиков, выпускаемых промышленностью, тарированы таким образом, что в качестве измеряемых величин, характеризующих параметры вибрации, представлены частота вибрации $\omega_0/2\pi$ и максимальная (пиковая) виброскорость V_0 .

Гетеродинирование может осуществляться как в оптическом, так и в радио (СВЧ) диапазоне. Гетеродинные измерительные системы со сдвигом частоты в СВЧ-диапазоне применяют в случаях, когда не требуется высокая чувствительность, т.е. при измерении боль

В случае оптического гетеродинирования двухчастотный режим генерации может осуществляться внешней или внутренней модуляцией излучения лазера. Внешняя модуляция излучения одночастотного стабилизированного лазера производится механическими, электрооптическими и акустооптическими модуляторами, устанавливаемыми вне резонатора лазера.

4.2. Лазерные виброметры с частотной модуляцией излучения

На рис. 4.4 представлена структурная схема сканирующего доплеровского виброметра Ometron 8330 фирмы Брюль и Кьер (<http://www.meter.com.ua>).

Устройство включает в себя лазер, поляризационный светоделитель 1, разделяющий лазерное излучение на пучок, который с по-

мощью оптической системы, состоящей из линзы и объектива, зондирует исследуемый объект, и опорный пучок, частота которого смещается с помощью оптического модулятора. Поляризационный светоделитель 1 работает как лучевой коммутатор. Его призма пропускает поляризованное излучение лазера в сторону объекта и модулятора. Четвертьволновые пластины служат для поворота вектора поляризации излучения. Призма 1 совмещает отраженные от объекта и модулятора световые пучки и направляет их в фотоприемную систему, не пропуская их обратно на источник излучения. В фотоприемной системе светоделитель 2 делит излучение на два канала: синусоидальный и косинусоидальный. Это разделение осуществляется с использованием четвертьволновой пластины, размещенной в одном из каналов. В свою очередь в каждом из этих каналов излучение с помощью поляризационных фильтров 3 и 4 разделяется на два пучка с ортогональной поляризацией. Фотоприемники 5 и 6 в косинусоидальном канале и 7 и 8 в синусоидальном канале регистрируют фототок. Использование двухканальной системы регистрации, организованной описанным способом, позволяет регистрировать не только виброскорость движения зондируемой поверхности, но и определять направление движения в каждый момент времени.

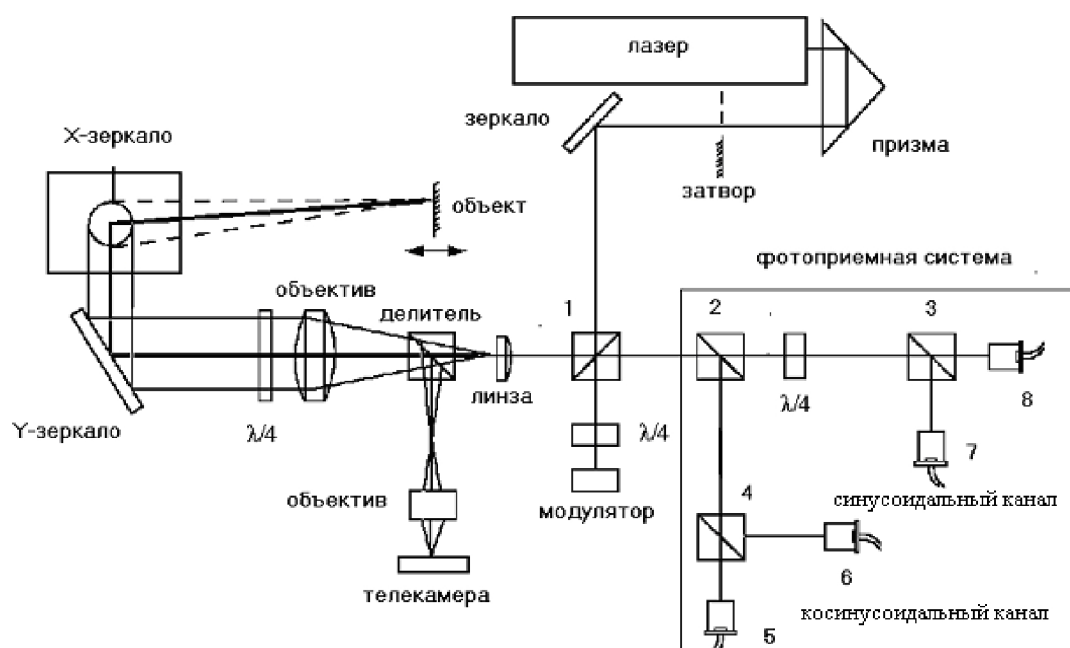


Рис. 4.4. Структурная схема гетеродинного виброметра Ometron 8330: 1, 3, 4 – поляризационный светоделитель; 2 – светоделитель; 5, 6, 7, 8 – фотоприемник

Телекамера с объективом, размещенная в сигнальном пучке виброметра, используется для наблюдения исследуемой поверхности. Она связана с системой управления виброметра. Виброметр позволяет пошагово измерять скорость перемещения всех точек поверхности в пределах области наблюдения, ограниченной углами $25 \times 25^\circ$. Сканирование поверхности осуществляется поворотом X и Y-зеркал, установленных в измерительном пучке. Число точек измерения 16×16 . Пространственное разрешение - 1 мм при расположении виброметра на расстоянии 20 м от объекта.

Виброметр может работать на расстояниях от 200 мм до 200 м до исследуемой поверхности. Виброметр предназначен для измерения пиковых скоростей в пределах до 100 мм/с на частотах вибрации до 200 кГц и в пределах от 100 мм/с до 2000 мм/с на частотах до 2 МГц. Номограмма, приведенная на рис. 4.5, показывает рабочий диапазон виброметра (внутри сплошной жирной линии).

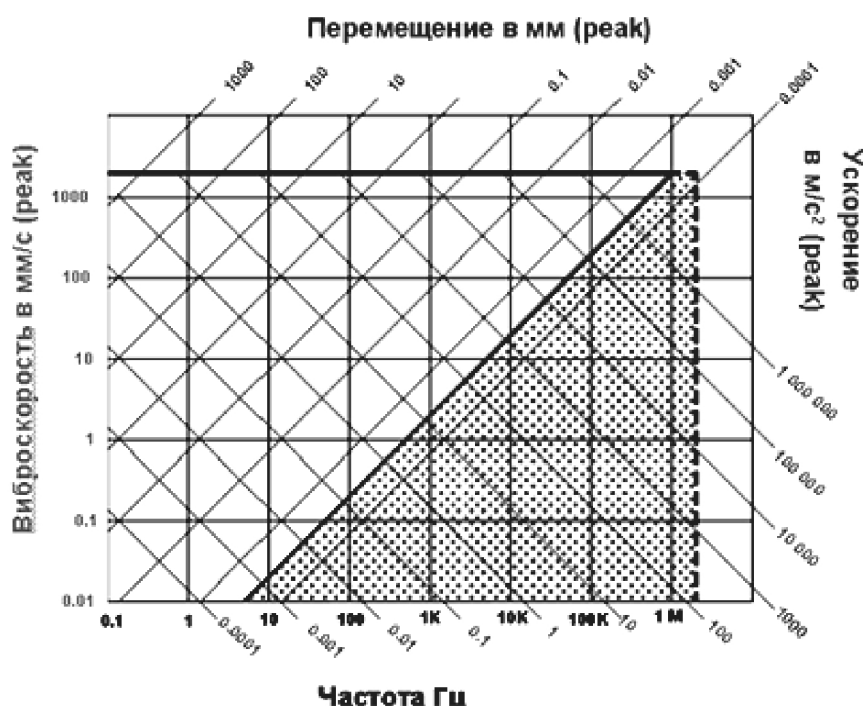


Рис. 4.5. Предельные значения параметров вибрации, регистрируемые виброметром Ometron 8330

В настоящее время промышленностью выпускается широкий спектр лазерных измерительных систем на основе эффекта Доплера. Среди производителей датчиков следует отметить такие зарубежные

фирмы, как «Брюль и Кьер», «Диза Электроник», «Политек». В России лазерные виброметры выпускает ООО «Лазерные системы», г. Новосибирск.

Лазерные виброметры компактны, мобильны и легки в эксплуатации. На рис. 4.6 показан общий вид лазерного виброметра Ometron 8330 фирмы Брюль и Кьер.

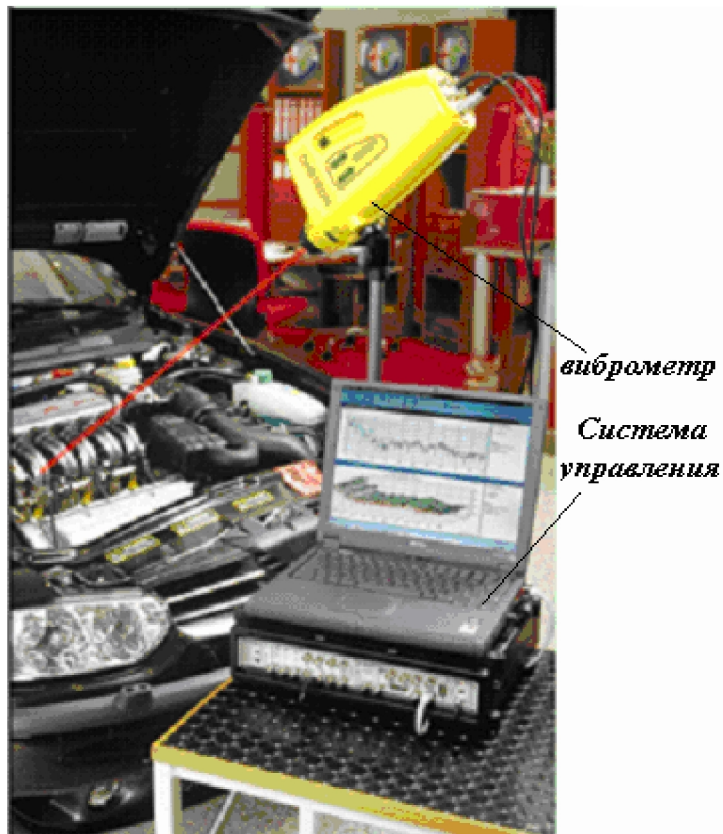


Рис. 4.6. Общий вид лазерного виброметра Ometron 83307

Контрольные вопросы

1. Можно ли зарегистрировать доплеровским измерителем скорость объекта, движущегося перпендикулярно направлению распространения измерительного луча?
2. Зачем при измерении скорости объектов, находящихся на значительном расстоянии от доплеровского датчика, на поверхность объекта наклеивают зеркальную пленку?
3. Можно ли в доплеровском виброметре для формирования измерительного и опорного пучков использовать излучение двух лазеров, генерирующих на одной частоте?

4. Можно ли в доплеровском виброметре с частотным сдвигом в опорном плече использовать излучение двух лазеров, генерирующих на различающихся частотах?
5. Зачем в лазерном доплеровском виброметре в опорном плече смещают частоту лазерного излучения на некоторую постоянную величину?
6. Можно ли использовать лазерный доплеровский виброметр для измерения частоты несинусоидальных колебаний?
7. Можно ли использовать лазерный доплеровский виброметр для регистрации амплитуды затухающих колебаний?

Задания и упражнения

1. Диск компрессора газотурбинного двигателя вращается со скоростью 8000 об/мин. Оцените максимальную величину смещения частоты излучения лазерного доплеровского измерителя скорости, если диаметр диска составляет 0,98 м. Как при этом должен располагаться измеритель относительно диска?
2. Виброметр позволяет измерять пиковые значения виброскорости равные 100 мм/с в диапазоне частот от 1 Гц до 10 кГц. Определите предельный уровень амплитуд колебаний регистрируемых этим виброметром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем некоторые итоги, чтобы оценить изученное и наметить пути дальнейшей работы.

Сейчас в любой отрасли науки, техники и производства невозможно обойтись без точных измерений. Все большее распространение получают автоматизированные лазерные измерительные системы, отличающиеся высокой точностью и информативностью, бесконтактностью, портативностью и удобством эксплуатации. Поэтому проблема развития, разработки и применения лазерных средств измерения была и будет актуальна.

Главная цель настоящего пособия – дать представление о классификации лазерных виброметров, проанализировать основы их теории, принципах построения и применения. Отличительная особенность учебного пособия (в силу ограниченности его объема) в том, что здесь рассмотрены лишь лазерные виброметры локального типа. Поэтому для получения общей картины состояния лазерных виброметров данное пособие должно изучаться совместно с ранее изданным учебным пособием [1].

Для получения полной картины о состоянии и перспективах развития лазерных виброметров данное пособие должно изучаться совместно с изданным в 2005 году учебным пособием [1], где представлены современные лазерные виброметры интегрального типа.

Освещая разделы дисциплин «Лазерные контрольно-измерительные системы» и «Лазерные информационные системы», учебное пособие насыщено терминами, понятиями и методиками из разных научно-технических областей: математики, физики, метрологии, радиотехники, микроэлектроники, вычислительной техники. Студенту следует четко представлять, что в данных дисциплинах все

эти термины, понятия и методики создают взаимосвязанное образование и должны рассматриваться как единое целое.

Авторы надеются, что студенты, освоив материалы данного учебного пособия и пособия [1], смогут, используя новейшую литературу, самостоятельно изучить интересующие их вопросы. Среди них особое внимание заслуживают вопросы, связанные с совместимостью лазерных виброметров с другими средствами бесконтактной диагностики (например, визуализаторами акустических полей и гидрогазовых течений), определением роли лазерных виброметров в методах численного моделирования колебательных процессов механических конструкций.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

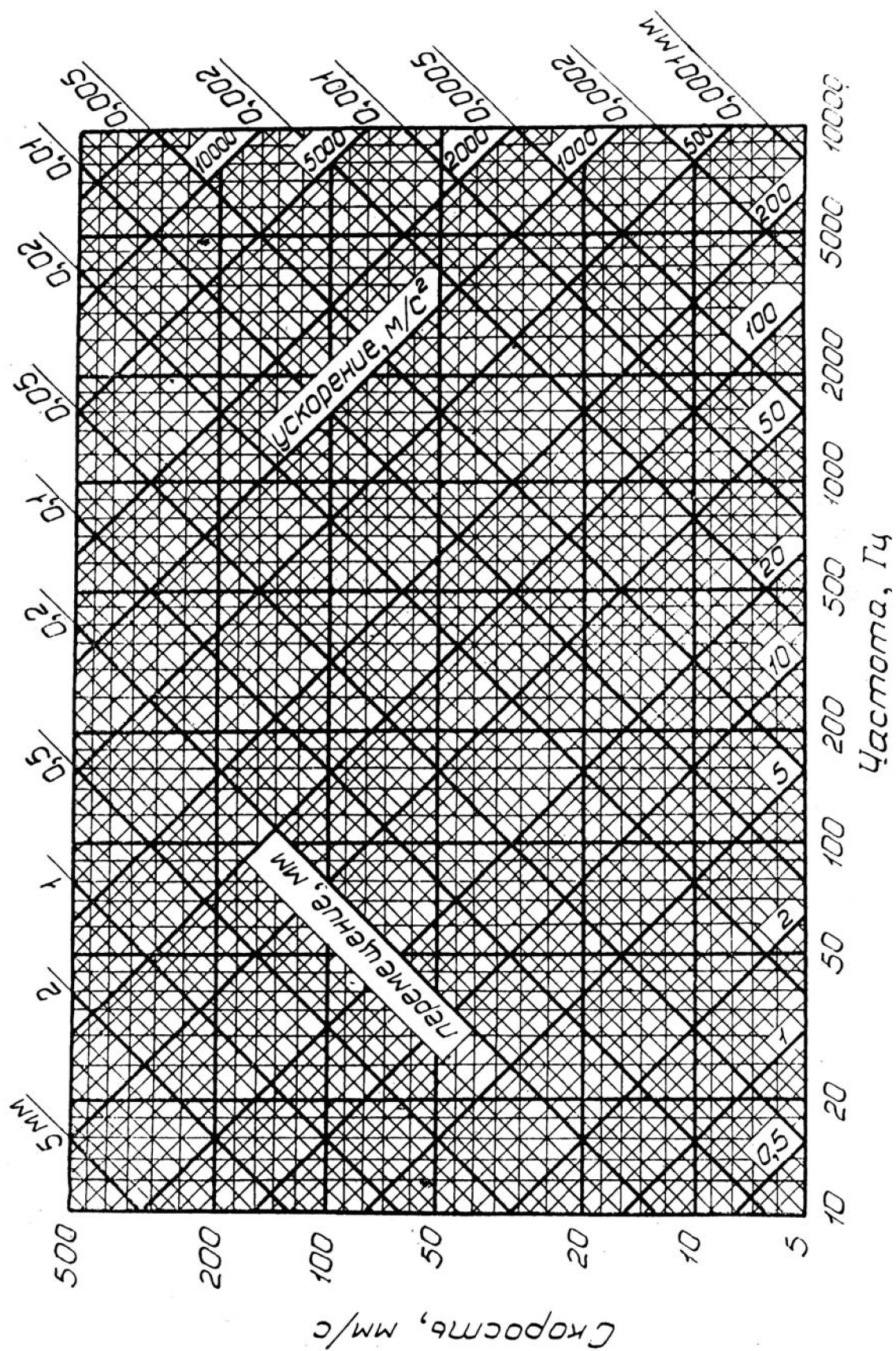


Рис. П.1.1. Номограмма для пересчета параметров гармонической вибрации

Термины и определения

Метрология	Наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности
Измерения	Нахождение значения физической величины опытным путём с помощью специальных технических средств
Мера	Средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера
Эталон	Средство измерения, обеспечивающее воспроизведение и/или хранение единицы физической величины с наивысшей точностью с целью передачи её размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений
Вибрация	Движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин
Виброметрия	Совокупность средств и методов измерения величин, характеризующих вибрацию
Гармонические колебания (вибрация)	Колебания (вибрация), при которых значения колеблющейся величины (характеризующей вибрацию), изменяются во времени по закону: $A \sin(\omega t + \varphi),$ где A, ω, φ - постоянные параметры; A - амплитуда; $\omega t + \varphi$ - фаза
Модуляция света	Изменение по заданному закону во времени амплитуды (интенсивности), частоты, фазы или поляризации колебаний излучения

Модулятор света	Устройства для управления параметрами световых потоков (амплитудой, частотой, фазой, поляризацией)
Несущее колебание	Колебание, предназначенное для передачи модулирующего сигнала, заключенной в нем информации
Демодуляция	Физический процесс, обратный модуляции
Детектирование (или демодуляция)	Преобразование модулированных колебаний для выделения низкочастотного сигнала; процесс обратный модуляции колебаний
Детектирование света	Нелинейное преобразование оптического излучения видимого и инфракрасного диапазонов частот (10^{15} - 10^{13} Гц) в электрический сигнал в виде импульсов или колебаний тока радиочастотного диапазона, несущий информацию о параметрах оптического излучения
Устройство прямого детектирования (гомодины)	Устройство детектирования, где на фотокатод приёмника поступают только полезный оптический сигнал и фоновое излучение.
Гетеродинирование	Сложение регистрируемого сигнала с опорным сигналом, амплитуда, частота и фаза которого известны.
Девияция частоты	Отклонение частоты моделирующего сигнала относительно несущей частоты
Дискриминатор	Электронное устройство, у которого напряжение электрического сигнала на выходе пропорционально разности частот сигналов, подаваемых на вход.

Подборка ряда государственных стандартов и нормативных документов
в области метрологии и измерений

1. Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений».
2. Стандарт ДИН ЕН ИСО 17025:2000. «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

Правила по межгосударственной стандартизации

1. ПМГ 29 – 99. «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения».
2. ПМГ 44 – 2001. «ГСИ. Порядок признания метода выполнения измерений».
3. ПМГ 07 – 2001. «ГСИ. Порядок признания результатов поверки средств измерений».

Государственные стандарты Российской Федерации

1. ГОСТ Р 8.000 – 2000. «ГСИ. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения».
2. ГОСТ Р 8.563 – 96. «ГСИ. Методики выполнения измерений».
3. ГОСТ Р 8.568 – 97. «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения».
4. ГОСТ ИСО 5347 – 0 – 96. «Вибрация. Методы калибровки акселерометров вибрации и удара. 4.0. Общие положения».
5. ГОСТ ИСО 5347 – 1 – 96. «Вибрация. Калибровка акселерометров вибрации и удара. 4.1. Первичная вибрационная калибровка методами лазерной интерферометрии».

Рекомендации по метрологии

1. МИ 2438 – 97. «ГСИ. Системы измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения».

Более доступными в настоящее время являются следующие нормативные документы

1. ГОСТ 24346 – 80. Вибрация. Термин и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1980. 3 – 31 с.
2. ГОСТ 24347 – 80. Вибрация. Обозначения и единицы величин. – М.: Госстандарт СССР, 1980. – 5 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение методов голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций: Учеб. пособие / Д.С. Еленевский, О.А. Журавлёв, Ю.Н. Шапошников и др.; Под ред. В.П. Шорина. - Самара: СГАУ, 2005. – 193 с.
2. Сидоренко М.К. Физические основы вибрации двигателей летательных аппаратов: Учеб. пособие / Под ред. А.И. Белоусова. – Куйбышев: КуАИ, 1985. – 68 с.
3. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Ключев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.; Под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
4. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. Т. 5. Измерения и испытания / Под ред. М.Д. Генкина. М.: Машиностроение, 1981. – 496 с.
5. Застрогин Ю.Ф., Застрогин О.Ю., Кулебякин А.З. Лазерные приборы вибрационного контроля и точного позиционирования. – М.: Машиностроение, 1995. – 320 с.
6. Фирстов В.Г., Застрогин Ю.Ф., Кулебякин А.З. Автоматизированные приборы диагностики и испытаний. – М.: Машиностроение, 1995. – 288 с.
7. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2 кн. Кн. 2 / Под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1978. – 439 с.
8. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Физ.-мат. лит., 2003. – 848с.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. - М.: Наука, 1980. - 976 с.
10. Ben-Yosef N., Ginio O., Weitz A. Measurement and analysis of mechanical vibrations by means of optical heterodyning techniques - // Jour. of physics E: Scient. Instruments. - 1974. V.7. P. 218.

Учебное издание

*Журавлев Олег Анатольевич
Шапошников Юрий Николаевич
Ивченко Алексей Викторович и др.*

**ЛАЗЕРНАЯ ВИБРОМЕТРИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Учебное пособие

Редакторская обработка Н. С. К у п р и я н о в а
Компьютерная верстка А. А. Н е ч и т а й л о
Доверстка Т. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 18.12.06. Формат 60х84 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная
Усл. печ. л. 4,65. Усл. кр.-отт. 4,53. Печ. л. 5,0.
Тираж 50 экз. Заказ ИП-3/2006.

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

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