

4383297

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

НА ДСМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ имени Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

Королёв Александр Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДУЛЯЦИОННОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ДЛЯ
ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ, ОСНОВАННЫХ
НА ЭФФЕКТЕ ДОППЛЕРА

Специальность 05.11.16 – Информационно-измерительные
системы (в промышленности)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1981

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

СОККИ КП СССР



ЧЛЕНСКИЙ
ВЗНОС 30
КОП

На правах рукописи

КОРОЛЕВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДУЛЯЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
И РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ВИБРАЦИИ, ОСНОВАННЫХ НА ЭФФЕКТЕ ДОПЛЕРА

05.11.16 - Информационно - измерительные системы
/в промышленности/

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1981

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1383297

Королев А. М. Исследование и

М В Т У
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена во Всесоюзном заочном машиностроительном институте (Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР), г. Москва.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор БОЛНЕР В.А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор ТЫЧИНСКИЙ В.П.

- кандидат физико-математических наук КАЛЕНДИН В.В.

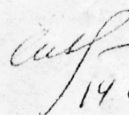
Ведущая организация - указана в решении специализированного совета.

Защита состоится "30" ноября 1981г. в 14 часов на заседании Специализированного Совета К.053.15.04 по присуждению ученой степени кандидата технических наук при МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2^я Бауманская 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "26" октября 1981г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета,
кандидат технических наук


190081 С.Р.ИВАНОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Одной из основных задач, стоящих перед отечественным машиностроением, является повышение качества выпускаемых машин и оборудования. Наиболее просто оценка работоспособности и надежности производится экспериментально путем испытаний опытных образцов и макетов на вибростендах и установках, имитирующих реальные воздействия, или по измерениям параметров механических колебаний объектов в реальных условиях эксплуатации. В этом случае виброметрия является эффективным средством контроля надежности и качества промышленных изделий.

Наибольшее распространение при измерении параметров механических колебаний получили контактные измерительные преобразователи, преобразующие деформацию или смещение чувствительного элемента в электрический сигнал или изменение параметра электрической цепи. Эти методы просты и надежны, однако они основаны на механическом контакте преобразователя с объектом измерения, имеют ограниченные функциональные возможности и, в ряде случаев, не удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к виброизмерительной аппаратуре.

Значительного расширения возможностей измерения можно добиться с помощью бесконтактных методов, основанных на использовании оптических квантовых генераторов /лазеров/. Работы в этом направлении ограничены разработкой позиционно чувствительных и одночастотных лазерных виброметров. Однако практика виброизмерений ставит новые, все более сложные задачи, решение которых требует существенного увеличения точности и расширения диапазона измерений. Поэтому задача дальнейшего совершенствования и развития методов и средств измерения параметров вибрации с помощью лазеров является весьма актуальной.

Целью работы является разработка новых модуляционных методов измерения параметров механических колебаний, позволяющих существенно расширить диапазон и увеличить точность измерения, теоретический анализ предельных возможностей и погрешностей предложенных методов измерения, а также разработка, на основании проведенных исследований, ряда приборов для бесконтактного измерения параметров механических колебаний.

Методы исследования базируются на теории Бесселевых функций, современных методах теории спектрального анализа, классичес-

гой и квантовой теориях электромагнитных колебаний. Анализ погрешностей измерения параметров механических колебаний осуществляется теоретически и экспериментально на основе статистических методов.

Научная новизна. Впервые предложен общий принцип математического описания и анализа модуляционных методов измерения параметров механических колебаний. Проведен анализ предложенного выражения и разработан ряд новых модуляционных методов измерения, основанных на преобразовании значения индекса частотной модуляции, позволяющих существенно расширить возможности измерения параметров механических колебаний. Сформулированы научно обоснованные рекомендации по использованию предложенных методов с целью создания бесконтактных измерительных средств повышенной точности.

Практическая ценность. Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты позволяют реализовать ряд новых методов измерения амплитуд механических колебаний и параметров угловых смещений объектов, имеющих повышенную точность и расширенный диапазон измерения.

Реализация результатов. Работа является составной частью комплекса исследований, проводимых в соответствии с постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике "О развитии научных исследований и технических разработок в области виброзащиты машин и оборудования, обеспечивающих повышение их качества, надежности и долговечности".

Результаты выполненных исследований положены в основу технического задания на промышленный образец лазерного вибрметра. В настоящее время на его основе предприятием НИИИИ изготавливается опытный образец прибора типа ВВО-231, предназначенного для бесконтактного измерения параметров вибрации.

Разработанные автором лазерные интерферометры используются на ИПЗ, а также при калибровке положения ротора имитатора безопорного гироскопа.

Апробация работы. Основные результаты выполненной работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной научно-технической конференции "Газовые лазеры в метрологии и измерительной технике" /Ленинград, декабрь 1976 г./; Межвузовской научно-технической конференции "Применение ОКГ в приборостроении, машиностроении и медицинской технике" /МВТУ им. Н.Э.Баумана, февраль, 1976 г./; Всесоюзных научно-технических семинарах "Вибрационная техника"

/МДНТП, май 1976 г., январь 1977 г., сентябрь 1977 г./; "Применение оптико-электронных приборов в контрольно-измерительной технике" /МДНТП, июль 1976 г./; "Методы и средства испытания изделий, метрологическое обеспечение испытаний" /МДНТП, май 1980 г./; "Методы и средства измерения виброакустических характеристик машин и оборудования" /НИИИИ, г. Москва, апрель 1979 г./; УП и УП научно-технических конференциях ВЗМИ /Москва, февраль 1978 г., апрель 1980 г./; научно-техническом семинаре отдела № 10 НИИИИ /Москва, май 1980 г./.

Лазерные измерительные приборы, разработанные при непосредственном участии автора и на основе методов, изложенных в диссертации, демонстрировались в 1977, 1978 и 1980 гг. на ВДНХ СССР и в 1979 г. на выставке в г. Праге.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 12 печатных работах и четырех отчетах НИР. Оригинальность выполненных исследований подтверждена двумя авторскими свидетельствами.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложена на 142 страницах машинописного текста, содержит 26 рисунков, 6 таблиц, список литературы 212 наименований. Приложение к работе содержит 5 страниц машинописного текста, 1 рисунок и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование выбора темы диссертации и кратко сформулированы основные научные положения, полученные в работе.

В первой главе проведен анализ фотоэлектрических, интерференционных и голографических методов измерения параметров механических колебаний, указаны их достоинства и недостатки. Установлено, что наиболее совершенными являются интерференционные методы измерения. Применение лазеров в интерференционных схемах позволяет повысить точность и производительность измерений, а также увеличить на 1-2 порядка диапазон измерений. Кроме того, интерференционные методы позволяют реализовать разнообразные средства измерения за счет сравнения измеряемого пара-

метра с длиной волны высокостабилизированного источника излучения - лазера.

Наиболее точными из известных интерференционных методов измерения являются модуляционные методы /методы модуляционной интерферометрии/, основанные на узкополосной фильтрации сигнала, получаемого с выхода фотоприемника, с последующей регистрацией нулей функции Бесселя или вычислением отношения амплитуды сигнала к его текущему значению. Однако до настоящего времени не существует единого подхода к описанию и анализу этих методов измерения. Кроме того, известные модуляционные методы имеют ограниченный диапазон измерений и, в ряде случаев, позволяют измерить только дискретные значения параметра.

Настоящая работа посвящена разработке научно-обоснованных рекомендаций для создания широкопредельных лазерных измерительных приборов повышенной точности, реализующих модуляционные методы измерения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработать и исследовать обобщенную математическую модель модуляционных методов измерения параметров механических колебаний.
2. Разработать и исследовать модуляционные методы измерения, основанные на преобразовании значения индекса частотной модуляции.
3. Осуществить синтез приборов для измерения параметров механических колебаний, реализующих модуляционные методы измерения.
4. Провести теоретический анализ и оценить погрешности измерения параметров механических колебаний с помощью разработанных приборов.
5. Выполнить экспериментальные исследования и оценить погрешности измерения с помощью приборов, основанных на использовании модуляционных методов.

Вторая глава посвящена теоретическому обоснованию и анализу разработанных модуляционных методов измерения параметров механических колебаний. С целью упрощения анализа предложена и теоретически обоснована обобщенная модель модуляционных методов измерения, основанная на представлении процесса измерения в виде одновременной частотной модуляции /ЧМ/ интерферирующих оптических лучей сигналами с различными амплитудами, частотами и фазами

с последующей узкополосной фильтрацией полученного электрического сигнала.

При этом выражение для переменной составляющей напряжения на выходе фотоприемника имеет вид

$$U(t) = U_0 \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_p(m_j) \cos[\Omega t + p\epsilon t + \theta - (-1)^p \frac{p\pi}{2}], \quad 11/$$

где

$$U_0 = 2\epsilon \sqrt{I_1 I_2} \exp\left(-\left(\frac{\chi_0}{\epsilon}\right)^2\right) \exp\left[-2\pi^2 \left(\frac{\epsilon}{\lambda}\right)^2 \rho^2\right]; \quad 12/$$

ϵ - коэффициент, характеризующий эффективность фотоприемника;

I_1, I_2 - интенсивность интерферирующих оптических сигналов;

χ_0 - смещение центров распределения амплитуд интерферирующих оптических сигналов относительно центра фотокатода;

ϵ - эффективный радиус сечения оптических лучей;

λ - длина волны используемого источника излучения;

ρ - угол между интерферирующими лучами;

$J_p(m_j)$ - функция Бесселя порядка p аргумента m_j ;

$m_j = \frac{4\pi A_2(t)}{\lambda}$ - индекс частотной модуляции,

$$A_2^2(t) = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1 A_2 \cos[(\omega_2 - \omega_1)t - \varphi]; \quad 13/$$

$A_1, A_2, \omega_1, \omega_2$ - амплитуды и круговые частоты модулирующих сигналов;

φ - разность фаз между частотами модулирующих сигналов;

Ω - несущая частота ЧМ сигнала;

$\theta = \delta_2 - \delta_1$ - оптическая разность фаз интерферирующих лучей;

$$\epsilon t = \omega t + \varphi(t), \quad \varphi(t) = (\omega_2 - \omega_1) \int_0^t \frac{A_2^2 - A_1 A_2 \cos[(\omega_2 - \omega_1)t - \varphi]}{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1 A_2 \cos[(\omega_2 - \omega_1)t - \varphi]} dt. \quad 14/$$

Возможны два варианта измерения: а/ использование в качестве несущей частоты оптического сигнала /гомодинный метод измерения/ с последующей фильтрацией сигнала, полученного с выхода фотоприемника, на частоте колебаний объекта измерения; б/ использование поднесущей Ω в радиотехническом диапазоне частот, реализуемое при сдвиге одного из интерферирующих лучей /гетеродинный метод измерения/ с последующей фильтрацией ЧМ сигнала, полученного с выхода фотоприемника, на частоте поднесущей.

При значениях индекса модуляции, равных корням функции Бесселя, амплитуда сигнала на выходе узкополосного фильтра обращается в нуль и амплитуда колебаний объекта вычисляется в соответствии

$$A_n = \frac{\lambda m}{4\pi} n.$$

/5/

В результате анализа выражения /1/ установлено, что оно является наиболее общим выражением, описывающим принцип модуляционных измерений амплитуд механических колебаний. Рассмотрены возможные варианты измерения амплитуд механических колебаний и показано, что широко известные методы модуляционных измерений являются частным случаем и описываются с помощью выражения /1/ при определенных соотношениях между несущими частотами и модулирующими сигналами.

Помимо описания известных методов, анализ выражения /1/ указывает на возможность реализации ряда модуляционных методов измерения, основанных на преобразовании значения индекса частотной модуляции. В случае равенства частот модулирующих сигналов $(\omega_1 = \omega_2)$ выражение для индекса ЧМ модуляции имеет вид

$$M_f = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos \varphi}. \quad /6/$$

Изменяя соотношения между амплитудами и фазами модулирующих сигналов, можно плавно изменить значение индекса частотной модуляции M_f , что позволяет, при совместном решении /5/ и /6/, определить амплитуду колебаний объекта в непрерывном и существенно более широком диапазоне, чем известные нулевые методы измерения.

Формулы для вычисления амплитуд механических колебаний, при различных соотношениях между параметрами модулирующих сигналов, приведены на рисунке I, там же указаны возможные диапазоны измерения амплитуд и соответствующие им изменения угла φ . На рисунке пунктирной линией обозначены известные модуляционные методы измерения, а сплошной - методы, разработанные автором. Здесь же S_n - амплитуда колебаний, соответствующая корню функции Бесселя с номером n , при $\omega_2 = 0$.

В диссертации подробно рассмотрены принципы построения приборов, предназначенных для измерения амплитуд механических колебаний и разработан ряд функциональных схем приборов, основанных на методе преобразования значения индекса частотной модуляции.

Рассмотрена возможность использования модуляционного метода при измерении параметров угловых колебаний объекта, при этом

впервые предложен метод измерения, основанный на круговом сканировании оптическим лучом поверхности объекта с последующим выделением, с помощью интерференционной схемы, доплеровской составляющей частоты ω_p , возникающей при отклонении объекта на угол α от нормали к падающему лучу. При этом

$$\omega_p = \frac{2\omega_c v \operatorname{tg} \alpha \cos(\omega_c t + \psi)}{c}, \quad /7/$$

где ω_c - соответственно угловая частота и скорость распространения используемого излучения;

ω_c - угловая частота сканирования оптического луча;

r - радиус окружности сканирования;

ψ - начальная фаза.

Выражение для переменной составляющей фототока имеет вид

$$\tilde{I}(t) = B \cos(\omega_c t + m'_f \sin \omega_c t + \varphi), \quad /8/$$

где B - коэффициент, зависящий от параметров измерительной аппаратуры и особенностей фотосмещения интерферирующих лучей;

$m'_f = \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda}$ - индекс частотной модуляции.

Исследована зависимость параметров переменной составляющей фототока, несущей информацию о величине углового смещения объекта от конструктивных особенностей аппаратуры и режимов измерения.

Приведены соответствующие таблицы и графики.

Подробно рассмотрены и теоретически обоснованы различные методы получения информации о параметрах угловых смещений объекта. Установлено, что наиболее точными являются модуляционные методы измерения, реализуемые при двухлучевом сканировании поверхности объекта.

Формулы для вычисления угловых смещений объекта при реализации модуляционных методов измерения, а также пределы изменения параметров приведены на рисунке I.

Разработаны принципы построения и ряд функциональных схем приборов, предназначенных для измерения параметров угловых смещений объекта.

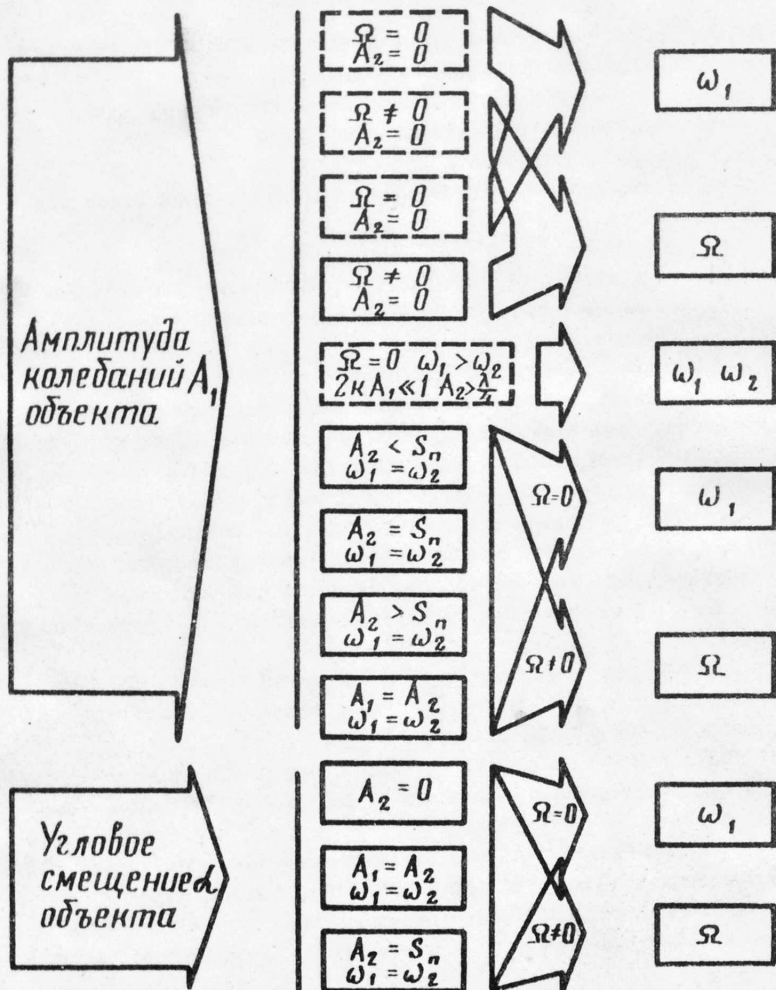
В заключительном разделе главы произведена оценка диапазонов и предельных возможностей разработанных методов измерения, приведены таблицы и графики, иллюстрирующие зависимость диапазона измерения от режима измерения и параметров измерительной системы.

Модуляционные методы измерения на

Измеряемый
параметр

Режим
измерения

Частота
фильтрации
сигнала



раметров механических колебаний

Вид регистрируемой информации Формула для вычисления параметра Пределы измерения параметра

Нули функций Бесселя $J_p(m_f)$
Амплитуда переменного напряжения

$$A_n = \frac{(m_f)_n \lambda}{4\pi}$$

$$0,193 \div 5 \text{ мкм} \\ \Delta A_1 \approx 0,16 \text{ мкм}$$

$$A_m = \frac{(m_f)_m \lambda}{4\pi}$$

$$0,121 \div 5 \text{ мкм} \\ \Delta A_1 \approx 0,16 \text{ мкм}$$

$$J_1(2\kappa A_1) = \frac{0,58 U_m}{U_0}$$

$$2 \cdot 10^{-3} \div 0,2 \text{ мВ}$$

$$J_0(2\kappa A_1) = \frac{U_m}{U_0}$$

$$2 \cdot 10^{-3} \div 0,12 \text{ мВ}$$

$$A_1 = \frac{U_m(\omega_1)}{2\kappa U_m(\omega_2)}$$

$$10^{-3} \div 10^{-3}$$

Нули функций Бесселя $J_p(m_f)$
Фаза между модулирующими сигналами φ

$$A_1 = A_2 \cos \varphi \sqrt{S_n^2 - A_2^2 \sin^2 \varphi}$$

$$(S_n + A_2) \div (S_n - A_2) \\ (\varphi = 0 \div \pi)$$

$$A_1 = 2 S_n \cos \varphi$$

$$2 S_n \div 10^{-3} S_n \\ (\varphi = 0 \div \frac{\pi}{2})$$

$$A_1 = A_2 \cos \varphi \sqrt{S_n^2 - A_2^2 \sin^2 \varphi}$$

$$(A_2 + S_n) \div (A_2 - S_n) \\ (\varphi = 0 \div \frac{\pi}{2})$$

$$A_1 = A_2 = \frac{S_n}{2 \sin \frac{\varphi}{2}}$$

$$10^{-3} S_n \div \frac{S_n}{2} \\ (\varphi = 0 \div \pi^2)$$

Нули функций Бесселя $J_p(m_f)$
Угол между скандирующими лучами β

$$\alpha = \arctg \frac{\lambda(m_f)_n}{4\pi z}$$

$$1,2'' \div 2'' \\ \Delta \alpha = 1,6''$$

$$\alpha = \arctg \frac{\lambda(m_f)_n}{8\pi z \sin \frac{\beta}{2}}$$

$$0,6'' \div 2'' \\ (\beta = 0 \div \pi)$$

$$\alpha = \arctg \frac{\lambda(m_f)_n \cos \beta}{2\pi}$$

$$10^{-3}'' \div 2,5'' \\ (\beta = \frac{\pi}{2} \div 0)$$

При этом установлено, что при реализации модуляционных методов измерения и использования системы фазовращатель-фазометр с разрешающей способностью 0,1 угловой минуты, диапазон измеряемых амплитуд находится в пределах $10^{-4} + 10^4$ мкм., а диапазон угловых смещений объекта в пределах от сотых долей угловой секунды до нескольких градусов.

Третья глава посвящена теоретическому анализу погрешностей приборов, реализующих модуляционные методы измерения. Среди основных факторов, оказывающих влияние на точность измерения параметров механических колебаний, необходимо указать следующие:

- изменение во времени режима работы источника излучения;
- изменение параметров трассы распространения оптического излучения;
- отклонение режимов работы электрооптического преобразователя от номинальных;
- наличие в спектре колебаний объекта составляющих высшего порядка;
- угловые колебания объекта измерения;
- акустические и микросейсмические колебания;
- фоновая засветка и шумы фотоприемника;
- нелинейность амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик аппаратуры;
- погрешности метода обработки выходного ЧИ сигнала.

В зависимости от особенностей влияния перечисленных факторов на погрешность измерения, все погрешности можно разбить на три основные группы: погрешности оптического звена, погрешности звена фотovoltaического преобразования и погрешности используемого метода обработки.

Произведен анализ отдельных составляющих погрешностей, оценено их влияние на результаты измерения и приведены формулы, позволяющие учесть влияние отдельных факторов при различных условиях измерения.

Напряжение на выходе фотоэлектрического преобразователя в случае измерения амплитуд механических колебаний имеет вид

$$U(t) = U_0 [1 + m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)] \sin \left[\omega t + \sum_n m_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \right], \quad /9/$$

где m_n, ω_n, φ_n — индекс модуляции, угловая частота и фаза гармонических составляющих сигнала;

m - индекс амплитудной модуляции сигнала.

Суммарное влияние погрешностей оптического звена и звена фотоэлектрического преобразования приводит к амплитудной модуляции ЧМ сигнала, наличием линейных и нелинейных искажений закона изменения ЧМ колебаний, наличием шума.

Погрешности измерения амплитуд механических колебаний, обусловленные используемым методом обработки ЧМ сигнала определяются как видом и величиной искажений ЧМ сигнала, поступающего в блок обработки, так структурой и особенностями функциональной схемы прибора.

В диссертации рассмотрены особенности искажений ЧМ сигнала, обусловленные несовершенством электронных узлов прибора, а также особенности прохождения искаженного ЧМ сигнала через узкополосный фильтр. Приведены формулы и построены графики, позволяющие оценить погрешность определения нулевых значений функции Бесселя в зависимости от величины и вида искажений ЧМ сигнала.

В конце главы получены формулы для определения погрешности измерения амплитуд механических колебаний при реализации некоторых режимов измерения.

Установлено, что суммарная погрешность определения амплитуд колебаний объекта с помощью методов, основанных на преобразовании значения индекса частотной модуляции, в наихудшем случае сочетания параметров, имеет значение порядка 2%, без учета погрешности, вносимой устройством, используемым для измерения разности фаз модулирующих сигналов. Существующие образцовые лазерные измерительные приборы имеют погрешность 4-6%.

В четвертой главе описан разработанный автором макетный образец экспериментальной установки, с помощью которой реализован модуляционный метод измерения амплитуд механических колебаний. Здесь же приведена функциональная схема и общий вид установки, подробно описана методика проведения эксперимента.

При экспериментальной проверке методов измерения, основанных на преобразовании значения индекса частотной модуляции были исследованы гетеродинный и гомодинный методы измерения, реализуемые при условии $A_2 = A_1$, $A_1 = S$. В результате обработки результатов экспериментальных исследований установлена возможность расширения диапазона измерения амплитуд механических колебаний. Подтверждена возможность измерения амплитуд механических колебаний с помощью нулевого метода в непрерывном диапазоне амплитуд за

счет плавного преобразования значения индекса частотной модуляции. Установлено, что основное влияние на погрешность измерения амплитуд механических колебаний оказывает погрешность измерения фаз между модулирующими сигналами. При использовании фазометра с разрешающей способностью $0,2^{\circ}$ в диапазоне амплитуд виброколебаний $0,06 \pm 1$ мкм. погрешность измерения не превышает 4%. При использовании фазометра с разрешающей способностью $0,01^{\circ}$ погрешность измерения может быть уменьшена до значения порядка 2%.

В заключительном разделе четвертой главы приведены результаты практической реализации теоретических и экспериментальных исследований по созданию лазерных измерительных приборов. Разработаны три лазерных интерферометра - ЛИ-01, ЛИ-02, ЛИ-03. Первые два интерферометра реализуют гетеродинный метод измерения и предназначены для измерения амплитуды, среднего значения виброскорости и частоты механических колебаний. Приборы имеют встроенный осциллографический индикатор для наблюдения аналоговой формы сигнала, пропорционального виброскорости колебаний объекта. В интерферометре ЛИ-02 по сравнению с ЛИ-01 изменена конструкция оптического измерительного блока, существенно увеличена частота сдвига излучения лазера, введены дополнительные режимы измерения виброскорости и амплитуды, что позволило расширить диапазон измеряемых амплитуд до значения $10^{-3} \div 10^4$ мкм. по сравнению с $10^{-3} \div 10^3$ мкм. в ЛИ-01. Частотный диапазон работы приборов $5 \div 10^4$ Гц. Погрешность измерения, в зависимости от режима измерения находится в пределах $1 \div 4\%$.

Лазерный интерферометр ЛИ-03 предназначен для измерения амплитуды, частоты и среднего значения виброскорости механических колебаний. В приборе реализован гомодинный метод измерения. Диапазон измеряемых амплитуд - $10^{-2} \div 10^4$ мкм при погрешности измерения около 3%.

Разработанные приборы предназначены для дистанционного измерения параметров механических колебаний в лабораторных условиях. Приборы могут быть использованы для прецизионных измерений, а также для градуировки и поверки виброизмерительных преобразователей.

В диссертации описан принцип измерения отдельных параметров, особенности конструкции, приведены функциональные схемы и фотографии разработанных приборов.

В приложении к диссертации приведены результаты анализа

полученного общего выражения, описывающего модуляционные методы измерения, с помощью преобразований Гильберта. Приведены таблицы теоретических и экспериментальных данных, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, рассмотрены вопросы экономической эффективности использования разработанных приборов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Предложен и теоретически обоснован новый принцип измерения параметров механических колебаний, основанный на представлении процесса измерения в виде одновременной ЧМ модуляции интерферирующих оптических лучей сигналами с различными амплитудами, частотами и фазами. Предложенный принцип описания является наиболее общим и кроме описания известных модуляционных методов позволяет обосновать ряд новых методов измерения, основанных на преобразовании значения индекса частотной модуляции.

2. Оценены достоинства и недостатки разработанных методов измерения по сравнению с аналогичными параметрами ранее известных методов.

3. Разработаны и теоретически обоснованы методы измерения амплитуд механических колебаний, основанные на преобразовании значения индекса частотной модуляции.

4. Разработаны и теоретически обоснованы методы измерения параметров угловых смещений объекта, реализуемые при круговом сканировании его поверхности оптическим лучом с последующим выделением доплеровской составляющей излучения.

5. Проведен анализ и оценено влияние различных факторов на величину погрешностей измерения параметров механических колебаний с помощью модуляционных методов.

6. Экспериментальная оценка погрешности измерения амплитуд механических колебаний с помощью модуляционных методов подтвердила возможность расширения диапазона и высокую точность измерения.

7. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны и изготовлены три опытных образца измерительных приборов, позволяющих полностью автоматизировать процесс измерения параметров механических колебаний.

8. Материалы диссертации использованы при проектировании лазерного измерительного прибора ВЕО-231 на предприятии НИИИИ. Разработанные автором приборы используются на 1^М ИПЗ, а также при калибровке положения ротора имитатора гироскопа.

Основное содержание диссертационной работы было доложено на 12 Всесоюзных и городских научно-технических семинарах и конференциях, отражено в четырех научно-исследовательских отчетах и опубликовано в следующих работах:

1. Боднер В.А., Застрогин Ю.Ф., Королев А.М., Беловитнев В.Р. Измерение вибрации лазерными интерферометрами. - В сб. Вибрационная техника. М.: МДНТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1976.

2. Застрогин Ю.Ф., Королев А.М. Лазерные доплеровские измерители скорости. Приборы и системы управления, 1977, № 3.

3. Боднер В.А., Застрогин Ю.Ф., Королев А.М. Оптоэлектронный метод измерения амплитуд малых перемещений. - В сб. Применение оптико-электронных приборов в контрольно-измерительной технике. М.: МДНТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1976.

4. Боднер В.А., Застрогин Ю.Ф., Королев А.М. Лазерный интерферометр для автоматического контроля малых амплитуд вибраций. - В сб. Вибрационная техника. М.: МДНТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1977.

5. Боднер В.А., Застрогин Ю.Ф., Королев А.М. Прибор для бесконтактного измерения малых амплитуд вибраций с извлечением выходного сигнала фотоприемника. - В сб. Вибрационная техника. М.: МДНТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1977.

6. Застрогин Ю.Ф., Королев А.М. Измерение параметров механических колебаний произвольной формы интерферометром с устройством калибровки пиковых значений амплитуд. Метрология, 1977, № 9.

7. Застрогин Ю.Ф., Королев А.М., Соколов А.А. О методах исследования ударных процессов для оценки удароустойчивости приборов. - В сб. Точное приборостроение. Научные труды ВЗМИ, М., 1978.

8. Королев А.М. Оптические методы измерения параметров механических колебаний. - В сб. Методы экспериментальной гравиметрии. М.: АН СССР, институт физики земли - Пензенский политехнический институт, 1979.

9. Королев А.М., Чупак В.С. Интерференционный метод измерения параметров угловых смещений объекта. - В сб. Методы и средства испытаний изделий. Метрологическое обеспечение испытаний. М.: МДНТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1980.

10. Королев А.М. Интерференционный метод измерения амплитуд механических колебаний, основанный на преобразовании значения индекса частотной модуляции. - В об. Методы и средства испытаний изделий. Метрологическое обеспечение испытаний. М.: МДНТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1980.

11. Королев А.М. Методы модуляционной интерферометрии при измерении амплитуд механических колебаний. Метрология, 1981, № 2.

12. Боднер В.А., Застрогин Д.Ф., Королев А.М., Пресняков Г.С. Система стабилизации двухчастотного режима работы источника когерентного излучения, используемого в гетеродинных интерферометрах. Метрология, 1981, № 1.

13. Авт. свидетельство № 765666. Устройство для измерения фазочастотных характеристик механических колебаний./ Застрогин Д.Ф., Королев А.М. Бюл. изобретений, 1980, № 35.

14. Авт. свидетельство № 712684. Способ измерения амплитуды механических колебаний./ Застрогин Д.Ф., Королев А.М. Бюл. изобретений, 1980, № 4.

Всего 7

К М Б Центра НОТ и УП Минлесхоза РСФСР

Зак. № 190 Тир. 110 экз. Л-88254 21.09.81 г