

ПРИЛЕПКО МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

**МЕТОД КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕМЕННОЙ СИЛЫ
С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Специальность 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологической службы (ФГУП «ВНИИМС»)

Научный руководитель: *Булыгин Фёдор Владиленович,*

доктор технических наук,

первый заместитель директора

ФГУП «ВНИИМС» по науке

Официальные

оппоненты:

Данилов Александр Александрович,

доктор технических наук, профессор,

и.о. директора ФБУ «Пензенский ЦСМ».

Минаев Владимир Леонидович,

кандидат технических наук,

начальник лаборатории ФГУП «ВНИИОФИ»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Московский технологический университет»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2017 г. в ____:____ на заседании диссертационного совета Д 308.001.01 в ФГУП «ВНИИМС» по адресу: 119361, г. Москва, ул. Озёрная, 46.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМС» и на сайте www.vniims.ru.

Телефон для справок +7 (495) 437 37 56

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

В.Г. Лысенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время техническое состояние машин, механизмов, узлов и отдельных деталей оценивают путём измерений их характеристик вибрации (виброускорения, виброскорости, виброперемещения). Однако в ряде случаев возникает необходимость непосредственного измерения переменных сил, возникающих между взаимодействующими элементами конструкций при работе механизмов, а не интерпретацию характеристик вибрации, для косвенного расчёта действующих переменных сил. Необходимость непосредственного измерения переменных сил возникает при построении инерционных систем ориентации космических и летательных аппаратов в аэрокосмической отрасли, измерении распределения динамических сил фундаментов гидроагрегатов и силовых установок, балансировке вращающихся узлов роторных агрегатов в энергетической отрасли, сборочных операциях в машиностроении, контроле динамических нагрузок элементов конструкций высотных зданий и сооружений в строительстве, определении параметров биологических тканей в биомеханике, контроле вредного воздействия на человека переменных сил и вибрации в охране труда.

Для решения задач установления пригодности использования средств измерений (СИ) в соответствии с их назначением, такие известные на сегодняшний день методы калибровки СИ переменных сил как квазистатическая калибровка, скачкообразное нагружение, метод нагрузочной массы не обеспечивают необходимой точности определения метрологических характеристик вследствие отсутствия возможности определения динамических характеристик СИ переменной силы. Уровень неопределённости калибровки может быть существенно снижен, если учитывать расхождения между метрологическими характеристиками, определёнными в лабораторных условиях и характеристиками, имеющими место при работе СИ в реальных условиях эксплуатации. Эти расхождения обусловлены тем, что в лабораторных условиях калибровку СИ переменной силы производят силами, закон изменения которых значительно отличается от такового при реальных условиях эксплуатации. Кроме того, отсутствует единообразие метрологической прослеживаемости к первичным эталонам.

По причине перечисленных факторов, существующие на сегодняшний день методики и средства измерений ограничивают возможность создания полноценной системы метрологического обеспечения в области измерений переменных сил, ввиду того, что они не учитывают динамические характеристики СИ (амплитудно- и фазочастотную характеристики), что может привести в

дальнейшем к получению недостоверной информации во время эксплуатации СИ. Для решения подобной системной проблемы необходимы дальнейшие исследования с целью нахождения новых подходов к определению действительных метрологических характеристик СИ переменной силы, позволяющие обойти ограничения существующих методов калибровки. В последние годы силоизмерительная техника получила значительное развитие как в точности, так и в функциональном отношении, обусловленное применением пьезоэлектрических актюаторов переменной силы, лазерных интерферометров, микропроцессоров, персональных компьютеров, различных сред программирования. Всё это даёт предпосылки к раскрытию новых возможностей точного измерения и анализа переменных сил.

Таким образом, *актуальной* является задача создания и научного обоснования метода, позволяющего производить определение метрологических характеристик СИ переменных сил в условиях, воспроизводящих условия реальной работы СИ, установленных на объекте измерений, при возбуждении гармоническими сигналами сложной формы, в т. ч. импульсными, во всём диапазоне рабочих частот, при широкой вариабельности статической нагрузки. Кроме того, для достижения теоретического предела точности измерений, в качестве опорных величин сравнения следует использовать физические константы, такие, как длина волны излучения лазерного интерферометра, модуль упругости материала эталонного преобразователя «сила-деформация».

Цель диссертационной работы

Целью настоящей диссертационной работы является разработка и научное обоснование исходного по точности метода калибровки преобразователей переменной силы с помощью лазерной интерферометрии, обеспечивающего определение метрологических характеристик во всём диапазоне рабочих частот СИ, при широкой вариабельности статической нагрузки и при различных законах изменения возбуждаемых сил, что соответствует условиям, воспроизводящим условия реальной эксплуатации средства измерений.

Объект исследований

Метод калибровки СИ переменной силы с помощью лазерной интерферометрии.

Предмет исследований

Методы определения метрологических характеристик СИ переменной силы. Разработкой и исследованием метрологического обеспечения в области измерений переменных сил в разное время занимались такие отечественные ученые, как Бараш В.Я., Соловейчик В.Р., Пресняков Г.С., зарубежные – Д.М.

Stefanescu, C. Schlegel, T. Bruns, Y. Fujii. Однако в проведённых до настоящего времени исследованиях не уделено достаточного внимания вопросам уменьшения неопределённости калибровки путём использования в качестве единиц сравнения физических констант. Настоящая диссертационная работа является дальнейшим теоретическим развитием и практическим воплощением идей, предложенных этими авторами.

Задачи работы

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи, которые определили содержание данной диссертационной работы:

1. Построение математической модели и определение основных составляющих бюджета неопределённости известного метода калибровки нагрузочной массой с целью определения его ограничений и путей повышения точности калибровки;

2. Разработка динамической модели преобразователя переменной силы, учитывающая кинематическое взаимодействие элементов его конструкции и нагрузочной массы при гармонических колебаниях;

3. Разработка исходного по точности метода калибровки СИ переменной силы с использованием в качестве эталона преобразователя «сила-деформация» на основе калиброванного упругого элемента и измерения его деформации при помощи лазерного интерферометра;

4. Создание и исследование экспериментальной установки для калибровки СИ переменной силы с использованием актюатора на основе обратного пьезоэффекта, эталонного преобразователя «сила-деформация» на основе калиброванного упругого элемента и лазерного интерферометра для измерения его деформации;

5. Расчёт бюджета неопределённости и анализ отдельных составляющих суммарной неопределённости калибровки СИ переменной силы предлагаемым методом.

Научная новизна работы

1. В результате применения математической модели и эквивалентной электрической схемы (схемы замещения) динамической модели процесса калибровки известным методом нагрузочной массой, установлен колебательный (резонансный) характер взаимодействия элементов системы «вибростол – калибруемый преобразователь – нагрузочная масса», обуславливающий возникновение дополнительной, частотнозависимой составляющей неопределённости, различной для разных типов преобразователей и различных нагрузочных масс.

2. Научно обосновано и экспериментально подтверждено, что использование безынерционного метода возбуждения переменных сил, эталонного

преобразователя «сила-деформация» на основе калиброванного упругого элемента и лазерного интерферометра для измерений его деформации позволило исключить составляющие бюджета неопределённости калибровки, принципиальные для метода нагрузочной массы и производить калибровку средств измерений переменной силы с исходной точностью в диапазоне сил от 0,1 Н до 1 кН в диапазоне частот от 1 Гц до 10 кГц с возможностью работы на силах, закон изменения которых отличен от синусоидального.

3. Доказано теоретически и подтверждено экспериментально, что использование безынерционного метода возбуждения переменных сил снижает уровень наведённой на интерферометр вибрации и улучшает отношение «сигнал-шум» его выходного сигнала на -3дБ.

4. Использование эталонного преобразователя «сила-деформация» на основе калиброванного упругого элемента мембранного типа обеспечивает определение метрологических характеристики с точностью, не ухудшающей точности измерений лазерным интерферометром.

5. Разработанный новый метод калибровки преобразователей переменной силы продемонстрировал возможность определения метрологических характеристик с исходной точностью, с привязкой к длине волны лазерного излучения и модулю упругости материала эталонного преобразователя «сила-деформация».

6. Регистрация с помощью лазерного интерферометра форм сигналов, отличных от синусоидального является перспективным направлением и может быть объектом дополнительных исследований.

Положения, выносимые на защиту

1. Рассмотрение системы «вибровозбудитель – преобразователь переменной силы – нагрузочная масса» не как одного жёсткого тела, а как трёх отдельных элементов колебательной системы, связанных параметрами «масса – упругость – демпфирование», позволяет произвести расчёт дополнительной составляющей неопределённости калибровки вследствие наличия градиента ускорения вдоль оси возбуждения колебаний.

2. Использование эталонного преобразователя «сила-деформация» на основе калиброванного упругого элемента, характеризующегося высокой стабильностью модуля упругости (физической константой) вместо пьезоэлектрического преобразователя позволяет уменьшить неопределённость калибровки по сравнению с известными методами на 20 %.

3. Использование лазерного интерферометра для измерений деформации эталонного преобразователя «сила-деформация», пропорциональной

приложенной силе, позволяет определять действующие переменные силы с исходной точностью, с привязкой к длине волны лазерного излучения.

4. Уменьшение уровня наведённой вибрации, достигнутое за счёт безынерционного возбуждения переменных сил при помощи пьезоактюатора, позволяет уменьшить отношение сигнал/шум на выходе интерферометра на -3 дБ, повысить точность измерений и расширить частотный диапазон калибровки от 1 Гц до 10 кГц.

Практическая значимость и использование результатов работы

1. Предложенный новый метод калибровки СИ переменной силы с использованием калиброванного упругого чувствительного элемента в качестве эталонного преобразователя «сила-деформация» и лазерного интерферометра для измерений этой деформации позволил уменьшить неопределённость калибровки на 20% по сравнению со методом нагрузочной массы.

2. Предложенный новый метод калибровки СИ переменной силы позволил повысить производительность процесса калибровки в 2 раза по сравнению со методом нагрузочной массы.

3. Использование безынерционного метода возбуждения переменных сил при помощи пьезоактюатора обеспечивает проведение калибровки на формах сигналов, отличных от синусоидального (полигармоническом, прямоугольном, серии импульсов), что позволяет расширить номенклатуру калибруемых СИ и определять их метрологические характеристики применительно к конкретным задачам (использование в импульсных системах ориентации космических аппаратов).

4. Предложенный новый метод калибровки позволяет модернизировать существующую технико-методологическую инфраструктуру метрологического обеспечения средств измерений переменной силы в направлении воспроизведения условий эксплуатации и установления пригодности использования СИ в соответствии с его назначением.

Личный вклад автора

Все экспериментальные и теоретические результаты, представленные в настоящей работе, получены автором лично. Автором лично разработан метод калибровки преобразователей переменной силы с использованием лазерного интерферометра. Метод защищён патентом РФ № 2613583 от 2017 г. Автор принимал непосредственное участие в разработке и изготовлении экспериментальной калибровочной установки, реализующей предложенный метод.

Достоверности результатов работы

Результаты исследований подтверждаются аттестованными методиками измерений, зарегистрированными в Федеральном информационном фонде, выполненными с использованием современного высокоточного поверенного оборудования. Математические модели построены с помощью широко применяемого метода математического анализа и на основе решений линейных дифференциальных уравнений. Полученные экспериментальные результаты согласуются с предварительно проведёнными теоретическими расчетами.

Апробация работы

1. Результаты научных исследований диссертационной работы докладывались на следующих российских и международных научно-практических конференциях и семинарах:

- Семинар «Метрология лазерных измерительных систем», г. Волгоград, 20 – 22 мая 1991 г.;
- International Progress in Precision Engineering Proceedings of the 8-th International Precision Engineering Seminar Compiègne, France, Elsevier, May, 1995;
- International Conference for the centenary of the beginning of application of electromagnetic waves for the transmission of information and the birth of the radioengineering, Moscow, 1995;
- Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, вторая научно-техническая конференция «Состояние и проблемы технических измерений», Москва, 29 – 30 ноября 1995 г.;
- Third International Symposium of Measurement Technology and Intelligent instrument (ISMTEI'96), Tokyo Institute of Technology, Hayama, Japan // Sep 30 – Oct 3, 1996;
- 11-я научно-техническая конференция «Фотометрия и её метрологическое обеспечение», Москва, 1998;
- Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ). 12-я научно-техническая конференция «Фотометрия и её метрологическое обеспечение», Москва, 1999;
- Научно-практическая конференция «Метрологическое обеспечение промышленности – 2017», г. Сочи, 2017;
- Научно-практическая конференция «Метрологическое обеспечение весоизмерительной техники «ВЕСЫ – 2017», г. Сочи, 2017;
- Научно-практическая конференция «Метрологическое обеспечение измерительных систем – 2017», г. Пенза, 2017;

– Международная научно-практическая конференция «Metrology, Standartization, Quality: Theory and Practice (MSQ – 2017), г. Омск;

– Научный семинар «Стандартизация и метрологическое обеспечение наукоемких технологий». ФГБОУ «Московский технологический университет», Москва, 11 октября 2017 г.

Основные положения работы отражены в 11 статьях, опубликованных в журналах «Измерительная техника», «Приборы», «Заводская лаборатория. Диагностика материалов», «Законодательная и прикладная метрология», являющимися реферируемыми изданиями, рекомендованными ВАК, получен патент РФ № 2613583, 2017.

2. Методы расчёта и расчётные данные бюджета неопределённости предложенного метода калибровки использовались при метрологическом обеспечении калибровочных работ СИ переменной силы в ФГУП «ВНИИМС», ФГУП «ВНИИФТРИ», ООО «Алгоритм-Акустика», ООО «Альфатех» (акты внедрения прилагаются).

3. Положения, представленные в диссертации, были использованы в научно-исследовательской работе «Разработка и исследование эталона в области переменных сил» ФГУП «ВНИИМС», а изготовленную в рамках указанного проекта экспериментальную калибровочную установку для СИ переменной силы предполагается использовать в качестве прототипа первичного специального эталона переменных сил.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы из 102 наименований, двух приложений. Общий объём диссертации составляет 108 страниц, включая список цитируемой литературы и два приложения. Диссертация содержит 37 рисунков, 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, раскрыты научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту, показана практическая ценность полученных результатов.

В **первой главе** рассматриваются и анализируются известные на сегодняшний день методы калибровки средств измерений переменной силы: квазистатический, ударное возбуждение, возбуждение скачкообразным изменением силы, метод нагрузочной массы. Проводится подробный анализ составляющих неопределённости калибровки преобразователей переменной силы методом нагрузочной массы.

Построена динамическая модель взаимодействия конструктивных элементов калибруемого преобразователя переменной силы с нагрузочной массой и источником возбуждения. Построена математическая модель преобразователя переменной силы с нагрузочной массой, совершающего гармонические колебания. Представлена эквивалентная электрическая схема динамической модели взаимодействия конструктивных элементов калибруемого преобразователя переменной силы с нагрузочной массой и источником возбуждения.

Динамическое взаимодействие конструктивных элементов преобразователя переменной силы, совершающего гармонические колебания можно представить в виде модели связанных между собой массы – упругости – демпфирования. На Рисунке 1 схематически изображена такая модель преобразователя с установленной нагрузочной массой.

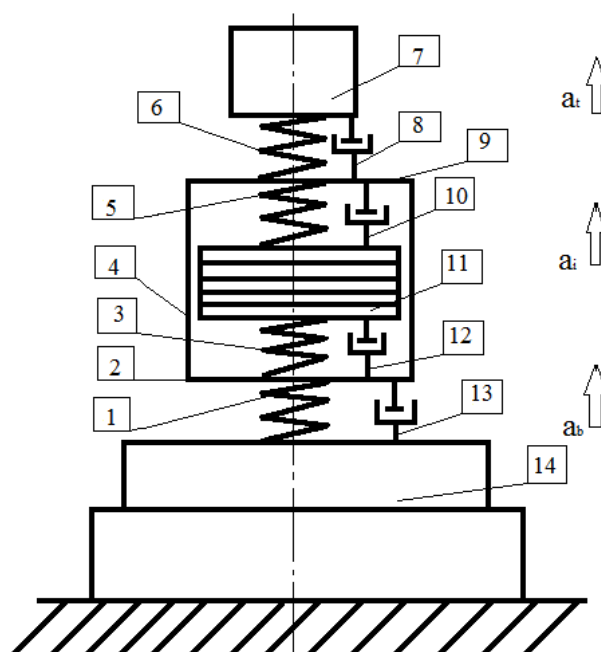


Рисунок 1 – Динамическая модель, образованная связанными между собой параметрами «масса – упругость – демпфирование» конструктивных элементов преобразователя переменной силы, совершающего гармонические колебания

1 – упругость соединения основания корпуса преобразователя переменной силы с вибростолом s_s ; 2 – основание корпуса преобразователя; 3 – упругость соединения чувствительного элемента преобразователя с основанием корпуса преобразователя s_b ; 4 – корпус преобразователя переменной силы; 5 – упругость соединения чувствительного элемента преобразователя с верхней крышкой преобразователя s_i ; 6 – упругость соединения нагрузочной массы с внутренней верхней массой преобразователя s_t ; 7 – нагрузочная масса m ; 8 – фактор

демпфирования упругого соединения нагрузочной массы с внутренней массой преобразователя d_t ; 9 – верхняя крышка преобразователя переменной силы; 10 – фактор демпфирования упругого соединения чувствительного элемента преобразователя с верхней крышкой преобразователя d_i ; 11 – масса чувствительного элемента преобразователя переменной силы m_i ; 12 – фактор демпфирования упругого соединения чувствительного элемента преобразователя с основанием корпуса преобразователя d_b ; 13 – фактор демпфирования упругого соединения основания корпуса преобразователя переменной силы с вибростолом d_s ; 14 – вибростол; a_t ; a_i ; a_b – векторы ускорения для нагрузочной, верхней и нижней масс соответственно.

Представленная на рисунке динамическая модель может быть описана системой линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$m_t \ddot{x}_t = -k_c(x_t - x_i) - b_c(\dot{x}_t - \dot{x}_i) \quad (1)$$

$$m_i \ddot{x}_i = k_c(x_t - x_i) + b_c(\dot{x}_t - \dot{x}_i) - k_f(x_i - x_b) - b_f(\dot{x}_i - \dot{x}_b) \quad (2)$$

$$m_b \ddot{x}_b = k_f(x_i - x_b) + b_f(\dot{x}_i - \dot{x}_b) + F \quad (3)$$

где \ddot{x}_t ; \ddot{x}_i ; \ddot{x}_b – ускорения нагрузочной, внутренней верхней, и внутренней нижней масс соответственно.

Коэффициент преобразования преобразователя переменной силы равен отношению измеренного выходного сигнала преобразователя к действующей на него силе, но с введением величины корректирующего фактора k_{grad} , учитывающего плавно изменяющийся вертикальный градиент ускорения вдоль корпуса преобразователя силы с прикрепленной к нему нагрузочной массой вследствие нежёсткости механических связей элементов системы «вибростол – преобразователь– нагрузочная масса»:

$$S_f = \frac{q_f}{(m_i + m_l) \cdot [(x_b - x_a)]f''(t)} \cdot k_{grad} \quad (4)$$

где S_f – коэффициент преобразования калибруемого СИ;

q_f – выходной сигнал (заряд) калибруемого СИ;

m_i – внутренняя масса чувствительного элемента калибруемого СИ;

m_l – нагрузочная масса;

x_b , x_t – начальная и конечная координаты вибропремещения;

k_{grad} – коэффициент, учитывающий градиент ускорения вдоль оси возбуждения.

Показанная на Рисунке 1 модель динамического взаимодействия элементов конструкции преобразователя переменной силы может быть представлена в виде

её замещающей эквивалентной электрической схемы (Рисунок 2), где массе соответствует электрическая ёмкость, упругости – индуктивность, демпфированию – сопротивление потерь.

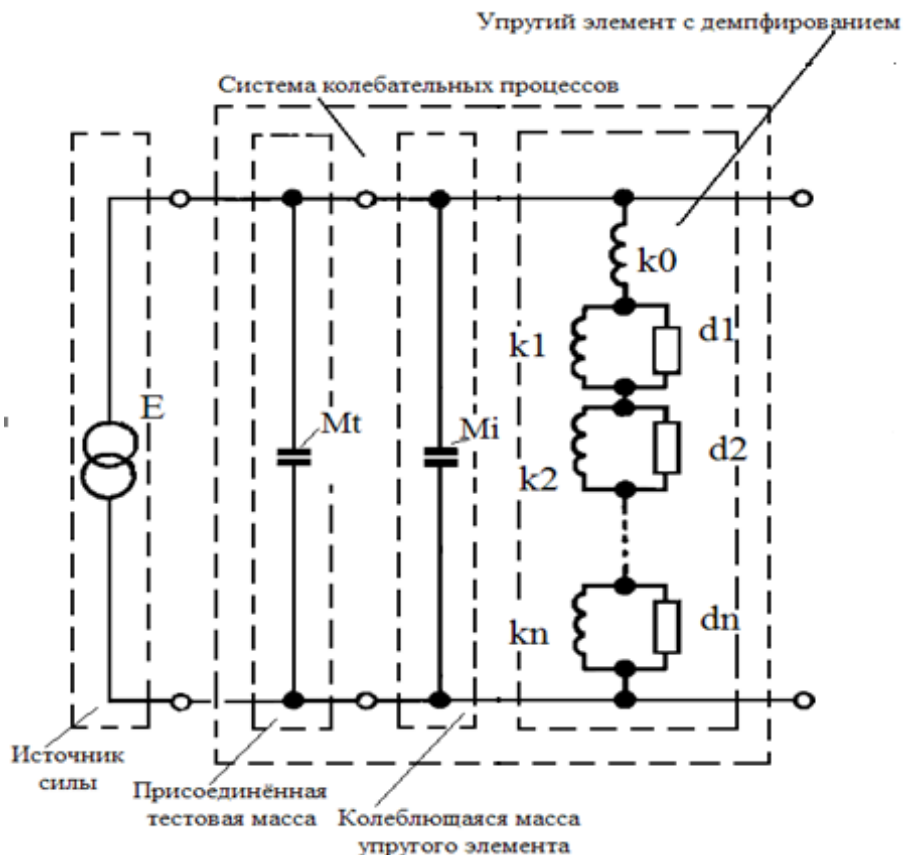


Рисунок 2 – Эквивалентная электрическая схема модели динамического взаимодействия элементов конструкции преобразователя переменной силы при калибровке методом нагрузочной массы

Как видно из уравнений (1 – 3), описывающих движение преобразователя переменной силы и замещающей эквивалентной электрической схемы (Рисунок 2), при гармоническом возбуждении, в систему «вибровозбудитель – преобразователь переменной силы – нагрузочная масса» входят такие параметры, как нагрузочная (присоединённая) масса m_t , внутренняя масса преобразователя m_i , факторы упругости соединения этих масс S_t, S_i, S_b, S_s , наличие которых обуславливает колебательный (резонансный) характер взаимодействия указанных элементов. Полученные результаты приводят к выводу о том, что, при калибровке преобразователей переменной силы методом нагрузочной массы необходимо рассматривать систему «вибровозбудитель – преобразователь переменной силы – нагрузочная масса» не как одно жёсткое тело, а как три отдельных элемента, взаимодействие между которыми описывается связанными параметрами «масса – упругость – демпфирование». Этот факт приводит к возникновению градиента ускорения вдоль оси возбуждения колебаний при внешнем возбуждении, что

является источником дополнительной частотнозависимой составляющей неопределённости калибровки.

В соответствии с математической моделью (4) процесса калибровки методом нагрузочной массы, основное уравнение измерений этим методом в общем виде можно представить как:

$$S_f = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q) u_{sign}^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m) u_{mass}^2 \cdot \sum_{i=1}^n (a) u_{acc}^2}}, \quad (5)$$

где

$\sum_{i=1}^n (q) u_{sign}^2$ – результат измерений выходного сигнала (заряда) калибруемого СИ;

$\sum_{i=1}^n (m) u_{mass}^2$ – результат измерений нагрузочной массы;

$\sum_{i=1}^n (a) u_{acc}^2$ – результат измерений ускорения.

Неопределённость измерений ускорения состоит из двух слагаемых: суммарной стандартной неопределённости измерений ускорения лазерным интерферометром и суммарной стандартной неопределённости воспроизведения ускорения электродинамическим вибростендом:

$$u_a = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{meas}^2 + \sum_{i=1}^n u_{rep}^2}. \quad (6)$$

Суммарную стандартную неопределённость калибровки методом нагрузочной массы можно представить в виде:

$$u_a = \sqrt{u_{cos}^2 + u_{quad}^2 + u_f^2 + u_{noise}^2 + u_{phase}^2 + u_{Ab}^2 + u_{drift}^2 + u_{ref}^2 + u_{trans}^2 + u_{rock}^2 + u_{rel}^2 + u_{mag}^2 + u_{grad}^2 + u_{sign}^2 + u_{mass}^2} \quad (7)$$

где u_{cos} – косинусная неопределённость; u_{quad} – неопределённость, вызванная ошибкой интерполяции квадратурных сигналов интерферометра; u_f – неопределённость, вызванная нестабильностью частоты лазерного излучения; u_{noise} – неопределённость, вызванная электронным шумом лазерного интерферометра; u_{phase} – неопределённость, вызванная фазовым шумом выходного сигнала интерферометра; u_{Ab} – неопределённость, вызванная сдвигом Аббе; u_{drift} – неопределённость дрейфа настройки интерферометра; u_{ref} – неопределённость изменений показателя преломления воздуха; u_{trans} – неопределённость, вызванной поперечной составляющей колебаний вибростола; u_{rock} – неопределённость, вызванная неравномерностью движения вибростола; u_{rel} – неопределённость,

вызванная относительным движением интерферометра; u_{mag} – неопределённость, вызванная влиянием магнитного поля вибростенда на выходной сигнал калибруемого преобразователя динамической силы; u_{grad} – неопределённость вследствие градиента ускорения вдоль оси колебаний калибруемого преобразователя; u_{sign} – неопределённость измерений выходного сигнала калибруемого СИ; u_{mass} – неопределённость измерений нагрузочной массы.

Во **второй главе** описывается математическая модель предлагаемого метода калибровки, представлена структурная схема метода относительно входного воздействия, определена интегральная передаточная функция.

Проведённые исследования показали, что определение частотных характеристик преобразователей переменных сил по спектру их импульсной реакции на различных формах возбуждающих сигналов имеют большую информативность по сравнению со методом нагрузочной массы, где возбуждение производится на одной частоте при синусоидальной форме сигнала. Для определения динамических характеристик СИ переменной силы, известен деформационный метод калибровки, заключающийся в возбуждении переменной силы в соединённых вместе (*back to back*) калибруемом и эталонном преобразователях силы от внешнего источника силы, например, от пьезоэлектрического актюатора и дальнейшего сравнения выходных сигналов от этих преобразователей. Однако при использовании в качестве эталонного преобразователя силы пьезоэлектрического преобразователя, относящегося к генераторному типу преобразователей, его выходная величина (заряд или напряжение), вызванная входным механическим воздействием, в области низких частот будет пропорциональна не действующей в измерительной цепи силе F , а её производной по времени dF/dT . Чтобы получить от такого типа преобразователя выходной сигнал, пропорциональный силе, необходимо интегрирование по времени. Ввиду того, что электронные интегрирующие устройства невозможно построить для граничной частоты, равной нулю, преобразователь генераторного типа малопригоден для измерений на низких частотах. По этой причине, для достижения низкого уровня неопределённости измерений в области низких частот, в качестве эталонного преобразователя следует использовать преобразователь не генераторного, а параметрического типа. В качестве такого эталонного преобразователя целесообразно использовать лазерный интерферометр перемещений, которым будет измеряться деформация эталонного преобразователя «сила – деформация», изготовленного на основе калиброванного упругого элемента, установленного в цепи прямого преобразования входной величины. В соответствии с законом Гука, в области упругих деформаций, деформация упругого элемента будет пропорциональна действующей на него силе.

Принцип реализации метода калибровки, использующего для измерения действующей силы измерение деформации калиброванного упругого элемента при помощи лазерного интерферометра показан на Рисунке 3.

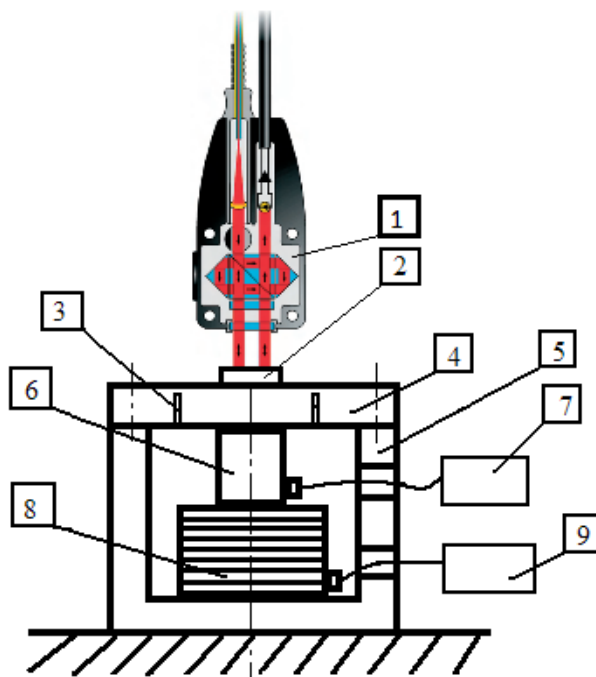


Рисунок 3 – Схематическое изображение метода калибровки преобразователей переменной силы с помощью лазерной интерферометрии

1 – лазерный интерферометр перемещений; 2 – зеркало или зеркальное покрытие; 3 – кольцевая проточка; 4 – калиброванный упругий элемент; 5 – корпус; 6 – калибруемый преобразователь переменной силы; 7 – усилитель заряда; 8 – пьезоактюатор; 9 – генератор.

Как видно из Рисунка 3, калиброванный упругий элемент, образованный крышкой корпуса (4) с выполненной в ней кольцевой проточкой (3) и зеркалом (2) является эталонным преобразователем «сила-деформация» и расположен в цепи прямого преобразования измеряемой величины. Основой этого линейного преобразования являются упругие свойства материала, из которого изготовлен упругий элемент, определяемые модулем упругости материала. Зависимость деформации упругого элемента ϵ от механического напряжения σ в области малых деформаций в диапазоне напряжений от 0 до 90 кг/см² приведена на Рисунке 4.

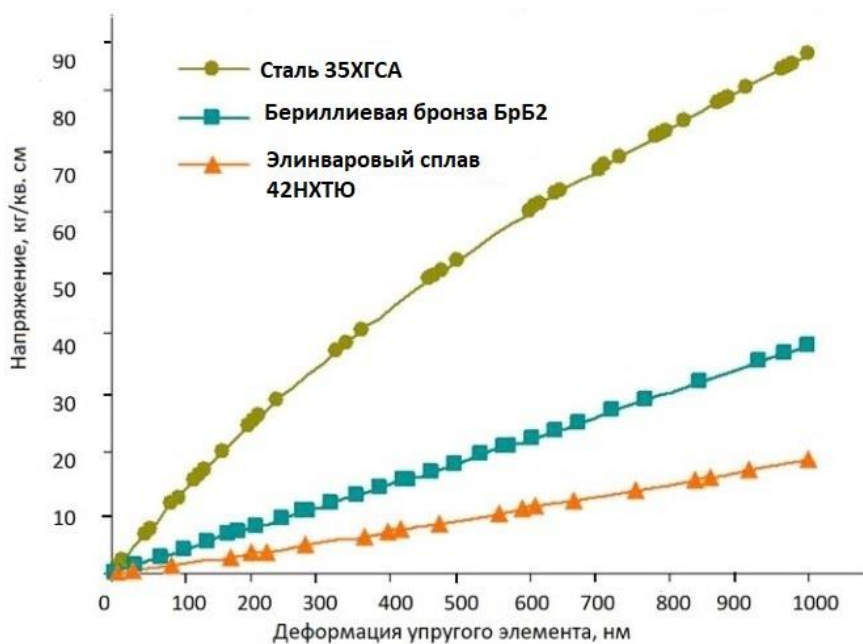


Рисунок 4 – Зависимость деформации упругого элемента ε от механического напряжения σ в области малых деформаций в диапазоне напряжений от 0 до 90 кг/см²

При малых деформациях, сила упругости пропорциональна деформации тела и направлена в сторону, противоположную направлению перемещения частиц тела при деформации:

$$F_x = F_{\text{упр}} = -kx, \quad (8)$$

где k – коэффициент упругости.

В соответствии с законом Гука, коэффициент упругости зависит от формы и размеров тела, а также от материала. Выражение (5) можно переписать в виде:

$$\sigma = \frac{F}{S} = -\frac{F_{\text{упр}}}{S}, \text{ или } \varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (9)$$

где $\varepsilon = x/l$ – относительная деформация;

$\sigma = F/S$ – напряжение;

S – площадь поперечного сечения деформированного тела.

Согласно закону Гука, относительная деформация ε пропорциональна напряжению σ .

Коэффициент E в формуле (9) называется модулем Юнга. Величина модуля Юнга зависит только от свойств материала и не зависит от размеров и формы тела.

Таким образом, в схеме, изображённой на Рисунке 3, калиброванный упругий элемент 4 является материальной мерой (средством измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит приписанные значения величин одного или более данных родов).

Структурную схему предлагаемого метода калибровки относительно входного воздействия можно представить в следующем виде:

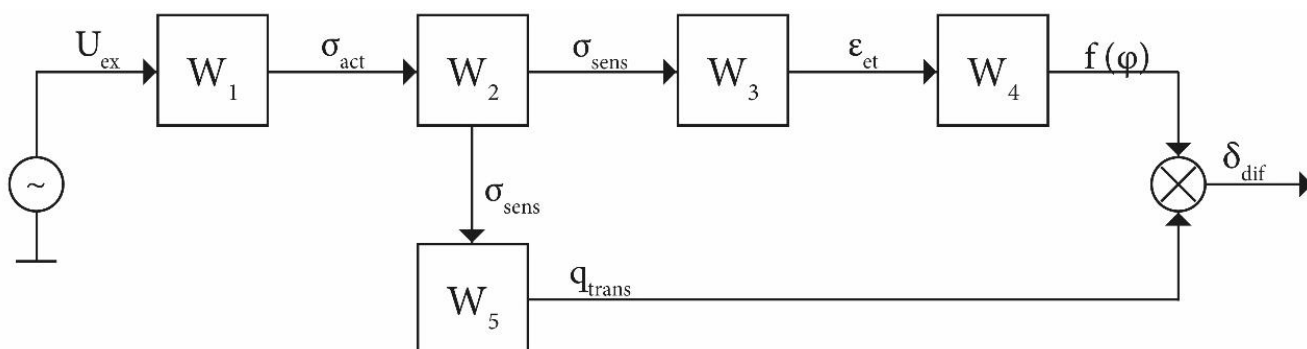


Рисунок 5 – Структурная схема деформационного метода калибровки относительно входного воздействия

Звено $W_1 = \frac{\sigma_{act}}{U}$ соответствует передаточной функции преобразования электрического напряжения возбуждения пьезоактюатора в его механическое напряжение;

$W_2 = \frac{\sigma_{sens}}{\sigma_{act}}$ – передаточная функция преобразования механического напряжения пьезоактюатора в механическое напряжение чувствительного элемента калибруемого преобразователя переменной силы;

$W_3 = \frac{\epsilon_{et}}{\sigma_{sens}}$ – передаточная функция преобразования механического напряжения калибруемого преобразователя переменной силы в деформацию эталонного преобразователя «сила – деформация»;

$W_4 = \frac{f_{\varphi}}{\epsilon_{et}}$ – передаточная функция преобразования деформации эталонного преобразователя «сила – деформация» в выходной сигнал лазерного интерферометра (передаточная функция интерферометра);

$W_5 = \frac{q_{trans}}{\sigma_{sens}}$ – передаточная функция преобразования механической напряжённости калибруемого преобразователя переменной силы в выходной заряд.

Интегральная передаточная функция структурной схемы деформационного метода калибровки имеет следующий вид:

$$W_{def} = W_1 \frac{W_4 + W_5}{W_2 + W_3} \quad (10)$$

Математическую модель процесса калибровки этим методом можно представить в следующем виде:

$$S_f = \frac{q_f}{-kx(E_{max} - E_{min}) \cdot d_{rev}} \cdot f(\varphi) \quad (11)$$

где S_f – коэффициент преобразования калибруемого СИ; q_f – выходной сигнал (заряд) калибруемого СИ; $-kx$ – упругость эталонного преобразователя «сила – перемещение»; E_{max} , E_{min} – максимальная и минимальная напряжённости электрического поля пьезоактюатора; d_{rev} – пьезомодуль материала пьезоактюатора; $f(\varphi)$ – передаточная функция лазерного интерферометра.

В третьей главе представлено основное уравнение измерений, показан бюджет неопределённости предлагаемого метода калибровки и анализ его отдельных составляющих.

В соответствии с рекомендацией КОOMET «Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределённости», составление бюджета неопределённости включает описание уравнения измерения вида $y = f(x)$ на основе модели измерений и составляющих неопределённости в виде таблицы.

Исходя из математической модели (7), основное уравнение измерений деформационным методом в общем виде можно представить как:

$$S_f = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q) u_{sign}^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (k) u_{conv}^2 + \sum_{i=1}^n (s) u_{strain}^2}} \quad (12)$$

где $\sum_{i=1}^n (q) u_{sign}^2$ – результат измерений выходного сигнала (заряда) калибруемого СИ;

$\sum_{i=1}^n (k) u_{conv}^2$ – неопределённость коэффициента преобразования силы в деформацию;

$\sum_{i=1}^n (s) u_{strain}^2$ – результат измерений деформации упругого элемента лазерным интерферометром.

Окончательно, можно записать выражение суммарной стандартной неопределённости калибровки деформационным методом в следующем виде:

$$u_f = \sqrt{u_{cos}^2 + u_{quad}^2 + u_f^2 + u_{noise}^2 + u_{phase}^2 + u_{Ab}^2 + u_{drift}^2 + u_{ref}^2 + u_{hist}^2 + u_{lin}^2 + u_{sign}^2} \quad (13)$$

Основными источниками неопределённости калибровки предлагаемым методом являются:

1. Косинусная неопределённость u_{cos}
2. Неопределённость, вызванная ошибкой интерполяции квадратурных сигналов интерферометра u_{quad}
3. Неопределённость, вызванная нестабильностью частоты лазерного излучения u_f

4. Неопределённость, вызванная электронным шумом лазерного интерферометра u_{noise} ;
5. Неопределённость, вызванная фазовым шумом выходного сигнала интерферометра u_{phase} ;
6. Неопределённость, вызванная сдвигом Аббе u_{ab}
7. Неопределённость дрейфа настройки интерферометра u_{drift} ;
8. Неопределённость изменений показателя преломления воздуха u_{ref} ;
9. Неопределённость гистерезиса амплитудной характеристики пьезоактюатора u_{hist} ,
10. Неопределённость нелинейности преобразования силы в деформацию u_{lin} ;
11. Неопределённость измерений выходного сигнала калибруемого СИ u_{sign} ,

1. Неопределённость, вызванная, вызванная неперпендикулярностью падения лазерного луча на измеряемую поверхность (косинусная неопределённость).

Лазерный луч интерферометра должен падать на поверхность измеряемого объекта под углом строго 90° с тем, чтобы отражённый луч попадал точно в центр фотоприёмника, при этом интенсивность отражённого сигнала будет максимальна, а неопределённость измерений минимальна. На Рисунке 6 показаны основные геометрические соотношения, определяющие косинусную неопределённость.

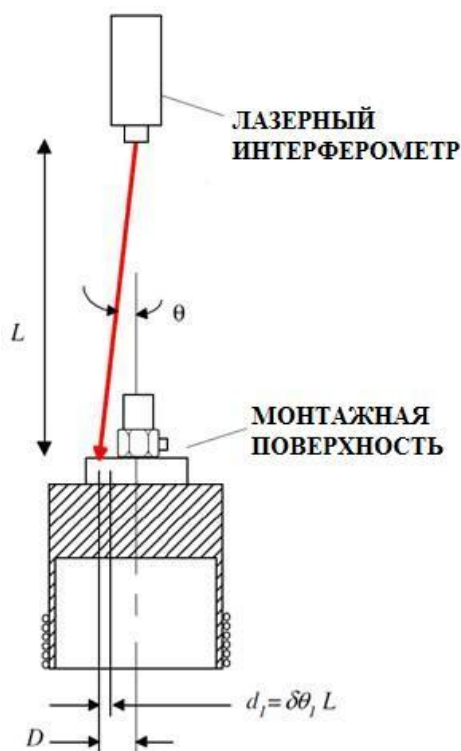


Рисунок 6 – Возникновение составляющей неопределённости, вызванной, неперпендикулярностью падения лазерного луча на измеряемую поверхность

$$a = a_L / \cos(\theta + \delta\theta_0 + \delta\theta_1) \quad (14)$$

В Таблице 1 приведены экспериментальные данные зависимости неопределённости измерений от неперпендикулярности падения лазерного луча на измеряемую поверхность.

Таблица 1

D , мм	L , мм	d , мм	d_1 , мм	Δ_{cos}
7,65	420	1,3	0,78	0,002
12,8	420	1,3	0,78	0,003

2. Неопределённость, вызванная ошибкой интерполяции квадратурных сигналов лазерного интерферометра.

Этот вид неопределённости возникает вследствие фазового сдвига между выходными квадратурными сигналами интерферометра и зависит от типа и конструкции интерферометра. Для двухходового интерферометра с плоским зеркалом RENISHAW RLE 10 она является периодической, с периодом 158 нм. Вклад этого вида составляющей неопределённости увеличивается с уменьшением уровня перемещения, т.е., с увеличением частоты и может быть уменьшен многократными измерениями в течение нескольких периодов (задаётся режимом программно-алгоритмической обработки).

В Таблице 2 приведены экспериментальные данные зависимости неопределённости измерений, вызванной ошибкой интерполяции в зависимости от частоты и размаха измеряемых перемещений для интерферометра RENISHAW RLE 10.

Таблица 2

Частота возбуждения, Гц	Размах перемещения, мкм	Число полос за период измерения	Неопределённость, вызванная ошибкой интерполяции
От 2 до 20	10	126419	0,0002
50	2	25122	0,0008
100	0,5	6280	0,003
200	0,1	1570	0,012
500	0,02	251	0,075
1000	0,005	62	0,03

3. Неопределённость, вызванная нестабильностью частоты лазерного излучения.

Кратковременная нестабильность частоты гелий-неонового лазера интерферометра RENISHAW RLE 10 составляет $\pm 0,05$ ppm/час, долговременная нестабильность $\pm 0,1$ ppm в течение первых трёх лет работы (паспортные данные).

4. Неопределённость, вызванная электронным шумом лазерного интерферометра.

Эквивалентный уровень электронного шума лазерного интерферометра RENISHAW RLE 10 составляет 0,1 нм (СКЗ) в полосе частот до 10 МГц. Этот шум меньше, чем шум из-за турбулентности воздуха и является случайной величиной (паспортные данные).

5. Неопределённость, вызванная фазовым шумом выходного сигнала интерферометра.

Вклад фазовой неопределённости содержит три составляющих:

– *Неопределённость арктангенса;*

Неопределённость амплитуды трансформируется в неопределённость фазы как арктангенс неопределённости по амплитуде.

– *Время задержки и джиттер;*

Фазовая неопределённость = [неопределённость задержки пакета данных] \times [частота возбуждения] \times [360°/время цикла данных] / [частота следования пакетов данных]. В Таблице 3 приведены данные о этой составляющей неопределённости в зависимости от частоты.

Таблица 3

Частота, Гц	Период, с	Джиттер, нс	Неопределённость, %
5	0,2	$2,8 \cdot 10^{-8}$	0,005
100	0,01		0,1
1000	0,001		1
5000	0,0002	$2 \cdot 10^{-9}$	0,35
15000	$6,67 \cdot 10^{-5}$		1,08

Из приведённых данных видно, что с увеличением частоты, этот вид составляющей неопределённости имеет тенденцию к значительному увеличению.

– *Случайная неопределённость;*

Относительная неопределённость рассчитывалась по формуле:

$$u_i = c_i \cdot p_i \cdot x_i, \quad (15)$$

Суммарная неопределённость определяется как:

$$u_c = \sqrt{\sum u_i^2}, \quad (16)$$

Расширенная неопределённость находится как:

$$U = ku_c, \text{ при } k = 2 \quad (17)$$

6. Неопределённость, вызванная сдвигом Аббе.

Этот вид неопределённости возникает при сдвиге опорного и рабочего пучков интерферометра. По принципу построения, оптическая схема лазерного интерферометра RENISHAW RLE 10 не имеет такого сдвига, следовательно, при настройке интерферометра вклад этой составляющей неопределённости может быть принят равным нулю.

7. Неопределённость, вызванная дрейфом настройки рабочей точки интерферометра, вызванного изменением условий окружающей среды.

Интерферометр RENISHAW RLE 10 имеет паспортное приведённое значение этой составляющей неопределённости 100 нм/°С.

8. Неопределённость, вызванная изменением показателя преломления воздуха.

Показатель преломления воздуха изменяется с температурой, давлением и влажностью приблизительно в следующих соотношениях:

- изменение температуры 0,96 ppm/°С;
- изменение давления – 0,27 ppm/мБар;
- изменение влажности 0,085 ppm/%

9. Неопределённость гистерезиса амплитудной характеристики пьезоактюатора.

Эта составляющая зависит от пьезоматериала и метода управления пьезоактюатором. Для пьезоактюатора PICA P-045.80P фирмы Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG со встроенным тензодатчиком для линеаризации характеристики, использовавшегося в эксперименте в режиме управления с обратной связью по заряду, величиной этой составляющей можно пренебречь, если учесть и тот факт, что в описываемой схеме перемещения пьезоактюатора составляют величину, не более 2 % от его полного хода.

10 Неопределённость нелинейности преобразования силы в деформацию.

Нелинейность преобразования силы в деформацию в области малых деформаций посредством упругого элемента из дисперсионно – твердеющего сплава имеет типовое значение 0,2...0,3%.

11 Неопределённость измерений выходного сигнала интерферометра и калибруемого преобразователя переменной силы.

Измерения выходного сигнала интерферометра производится в аналого-цифровом преобразователе системной платы PCI 4461 производства National Instruments (США) и имеют значения неопределённости измерений 0,14%. Измерения выходного сигнала калибруемого преобразователя силы производятся измерительным усилителем типа 2626 производства «Briel & Kjaer», Дания и имеют неопределённость измерений 1%.

В четвертой главе рассматривается принцип и схема практической реализации предлагаемого метода калибровки.

В основе реализации метода лежит принцип возбуждения переменной силы (переменной механической напряжённости, вызывающей пропорциональные деформации), одинаковой для скреплённых вместе эталонного и калибруемого преобразователей, как показано на Рисунке 7.

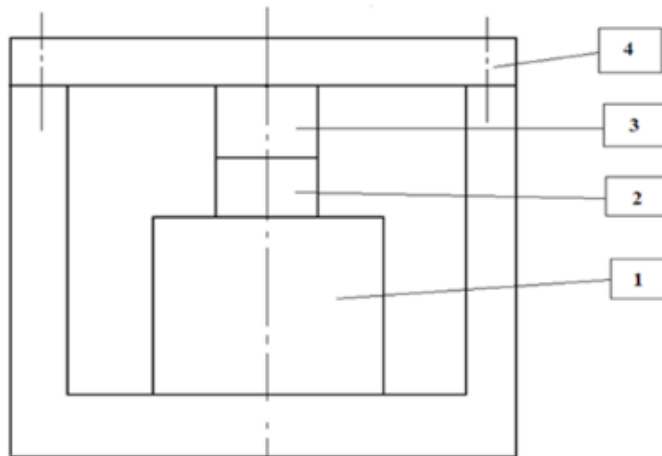


Рисунок 7 – Модель непосредственного возбуждения силы в эталонном и калибруемом преобразователях

1 – возбудитель силы; 2 – эталонный преобразователь силы; 3 – калибруемый преобразователь силы; 4 – корпус.

Однако в предлагаемой схеме, реализующей новый метод калибровки, используется непосредственное измерение деформации упругого чувствительного элемента, выполняющего функцию эталонного преобразователя «сила-деформация» с помощью лазерной интерферометрии. Наличие такой характеристики упругого элемента как модуль упругости, являющегося физической константой для данного материала и измерение деформации этого упругого элемента при помощи лазерного интерферометра, использующего в качестве опорной величины физическую константу – длину волны излучения гелий-неонового лазера позволило повысить точность измерений по сравнению с существующим методом на 20%.

Функциональная схема калибровочной установки, использующей этот принцип, изображена на Рисунке 8.

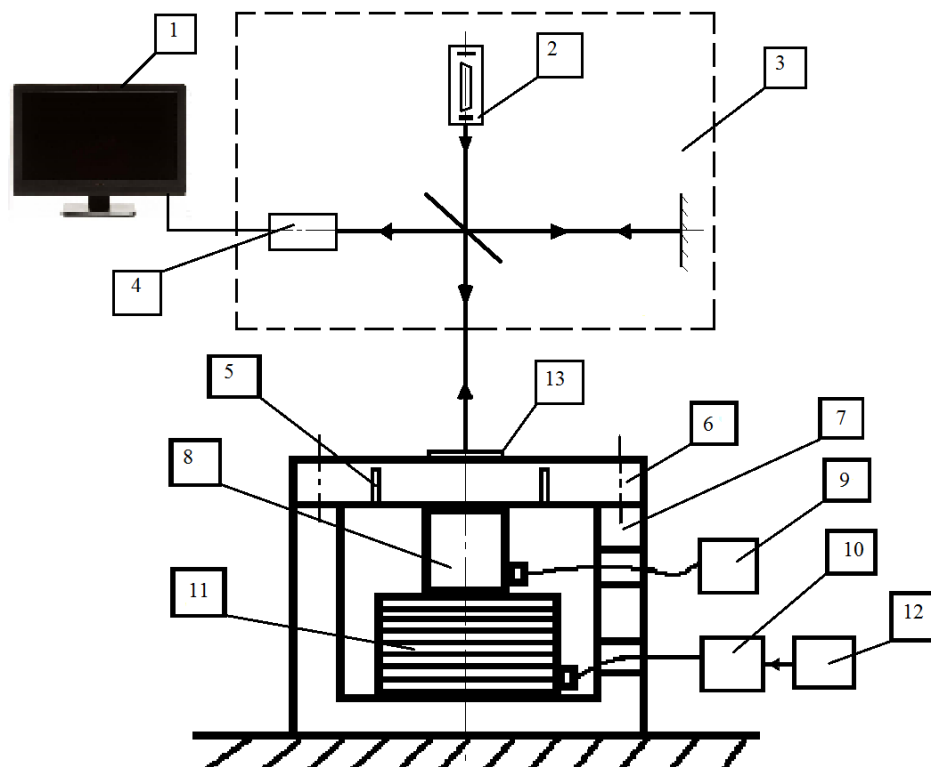


Рисунок 8 – Установка для калибровки преобразователей переменной силы с помощью лазерного интерферометра

1 – персональный компьютер; 2 – когерентный источник света (лазер); 3 – лазерный интерферометр; 4 – фотоприёмник и энкодер лазерного интерферометра; 5 – кольцевая проточка; 6 – калиброванный упругий элемент; 7 – корпус; 8 – калибруемый преобразователь переменной силы; 9 – измерительный усилитель; 10 – усилитель мощности; 11 – пьезоактюатор; 12 – задающий генератор; 13 – отражающее покрытие.

В настоящей главе показано, что предлагаемый метод за счёт использования в качестве эталонного преобразователя «сила-деформация» упругого калиброванного элемента с высокой стабильностью модуля упругости (физической константой для данного материала) и измерений деформаций этого элемента при помощи лазерного интерферометра, характеризующегося использованием другой физической константы – длины волны He – Ne лазера позволяет определять метрологические характеристики СИ переменной силы с неопределённостью 0,9 %. Кроме того, метод позволяет определять амплитудно-и фазочастотные характеристики преобразователей в диапазоне частот от 1 Гц до $10 \cdot 10^3$ Гц с минимальной методической неопределённостью измерений.

Метрологическая прослеживаемость предлагаемого метода обеспечивается привязкой к двум Государственным поверочным схемам:

1. ГОСТ 8.640 – 2014. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений силы.

2. ГОСТ Р 8.763 – 2011. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 50 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе поставлена и решена актуальная научно-техническая задача разработки и научного обоснования метода калибровки СИ переменной силы с использованием эталонного преобразователя «сила-деформация» на основе калиброванного упругого элемента и измерения его деформации при помощи лазерного интерферометра. В процессе выполнения диссертационной работы были получены следующие научные результаты:

1. Проведён анализ существующих методов калибровки преобразователей переменной силы. Показаны источники неопределённости калибровки известными методами. Построены математическая, динамическая модели и эквивалентная электрическая схема (схема замещения), показывающие наличие дополнительной частотнозависимой составляющей неопределённости калибровки. Предложены пути снижения неопределённости калибровки.

2. Предложен и научно обоснован новый метод калибровки преобразователей переменной силы с использованием калиброванного упругого элемента в качестве эталонного преобразователя «сила-деформация» и лазерного интерферометра для измерений этой деформации.

3. Составлен бюджет неопределённости нового метода калибровки СИ переменной силы. Обоснованы преимущества безынерционного воспроизведения силы с помощью пьезоактюатора и измерения деформации упругого элемента с помощью лазерного интерферометра по сравнению с методом нагрузочной массы.

4. Разработанная математическая модель калибровки упругого элемента, показала, что в соответствии с законом Гука, пропорциональная действующей силе деформация упругого элемента, измеренная лазерным интерферометром, позволяет использовать упругий элемент в качестве эталонного преобразователя «сила-деформация».

5. Показана схема аппаратной реализации нового метода калибровки СИ переменной силы.

6. Предложенный в работе новый метод калибровки СИ переменной силы с использованием физических констант (модуля упругости материала и длины волны лазерного излучения) дал прогнозируемо согласующиеся с экспериментом результаты.

7. Предложенный новый метод калибровки СИ переменной силы и созданная экспериментальная калибровочная установка позволяют производить калибровку СИ переменной силы в диапазоне сил от 0,1 Н до 1 кН с неопределённостью не более 0,9 % в диапазоне частот от 1 Гц до 10 кГц.

8. Использование разработанной калибровочной установки позволило сократить трудоёмкость процесса калибровки преобразователей переменной силы и уменьшить затраты времени более, чем в 2 раза, особенно при калибровке серии однотипных преобразователей.

9. Полученные результаты позволяют рассматривать новый метод калибровки СИ переменной силы и разработанную на его основе экспериментальную калибровочную установку как прототип первичного специального эталона переменных сил.

Таким образом, в настоящей работе дано научное обоснование и решена актуальная научно-техническая задача создания нового высокоточного метода калибровки СИ переменной силы, позволяющего производить их калибровку с исходной точностью с привязкой к длине волны лазерного интерферометра.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Лысенко В.Г., Прилепко М.Ю. Лазерный фотоэлектрический интерферометр с наклонным падением пучков // Тезисы доклада Всесоюзного научного семинара «Метрология лазерных измерительных систем». – Волгоград, 20 – 22 мая 1991 г.
2. Прилепко М.Ю. Применение когерентного оптического процессора при обработке интерферограмм // Законодательная и прикладная метрология. – 1993. № 2
3. Прилепко М.Ю., Фомин О.Н., Горшков В.А. Электромеханический модулятор оптического излучения // Оптико-механическая промышленность. – 1990. № 3.
4. Astashenkov A.I., Lyssenko V.G., Prilepko M.J. Metrological aspects of the automatization optics control // International Progress in Precision Engineering Proceedings of the 8-th International Precision Engineering Seminar Compiègne. – France, Elsevier / May, 1995.
5. Astashenkov A.I., Lyssenko V.G., Prilepko M.J. Interference quality control milling surface, using effect interaction // International Conference for the centenary of the beginning of application of electromagnetic waves for the transmission of information and the birth of the radioengineering. – Moscow, 1995.
6. Асташенков А.И., Лысенко В.Г., Прилепко М.Ю. Акустооптический метод контроля качества обработанных поверхностей // Комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации // Вторая научно-техническая конференция «Состояние и проблемы технических измерений»: тезисы докладов. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 29 – 30 ноября, 1995.
7. Лаврухин, А.А., Прилепко М.Ю. Современные методы контроля резьб труб нефтяного сортамента // Законодательная и прикладная метрология. – 2017. № 1.
8. Прилепко М.Ю. Калибровка и валидация преобразователей переменной силы // Измерительная техника. – 2017. № 7.
9. Lyssenko V., Prilepko M., Astashenkov A. Metrological Aspects of the Astronomy and Space Optics Measurement // Third International Symposium of Measurement Technology and Intelligent instrument (ISMТII'96), Tokyo Institute of Technology. – Hayama, Japan / Sep 30 – Oct 3, 1996.
10. Асташенков А.И., Лысенко В.Г., Прилепко М.Ю. Повышение точности координатных измерений геометрических параметров при интерференционном контроле // 11-я научно-техническая конференция «Фотометрия и её метрологическое обеспечение»: тезисы докладов. – Москва:

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, 1998;

11. Асташенков А.И., Лысенко В.Г., Прилепко М.Ю. Интерференционные и корреляционные методы измерения формы асферических поверхностей // 12-я научно-техническая конференция «Фотометрия и её метрологическое обеспечение»: тезисы докладов. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), 1999.

12. Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л., Прилепко М.Ю., Жилякова А.В. Сравнительные измерения мер толщины стального проката // Законодательная и прикладная метрология. – 2012. № 4.

13. Корнеев Д.В., Прилепко М.Ю. Метод динамической калибровки преобразователей переменной силы и устройства на его основе // Законодательная и прикладная метрология. – 2014. № 6.

14. Прилепко М.Ю. Использование метода лазерной интерферометрии при калибровке преобразователей переменной силы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. № 10.

15. Прилепко М.Ю. Анализ составляющих неопределённости калибровки преобразователей переменной силы // Приборы. – 2015. № 10.

16. Прилепко М.Ю. Метод динамической калибровки преобразователей переменной силы // Приборы. – 2015. № 4.

17. Прилепко М.Ю., Кононогов С.А., Бараш В.Я. Совершенствование методов калибровки преобразователей переменных сил // Законодательная и прикладная метрология. – 2015. № 1.

18. Прилепко М.Ю. Метрологические аспекты калибровки и поверки преобразователей переменной силы // Законодательная и прикладная метрология. – 2016. № 4.

19. Lyssenko V., Prilepko M. Application of Conferment Optical Processor to Quality Control of Machined Surfaces // Third International Symposium of Measurement Technology and Intelligent instrument (ISMТII'96), Tokyo Institute of Technology. – Hayama, Japan / Sep 30 – Oct 3, 1996;

20. Lyssenko V., Prilepko M. Automatic Measurement of Interferogramms on Two Coordinate Measuring Machine // Third International Symposium of Measurement Technology and Intelligent instrument (ISMТII'96), Tokyo Institute of Technology. – Hayama, Japan / Sep 30 – Oct 3, 1996.

21. Прилепко М.Ю. Метод калибровки преобразователей переменной силы // Патент РФ. – 2017. № 2613583.