

На правах рукописи

ЛИМАНОВА Наталия Игоревна

**ДАТЧИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН,
ИНВАРИАНТНЫЕ К ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИМ ФАКТОРАМ**

Специальность 05.13.05 — Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Самара — 2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Самарский государственный аэрокосмический университет" имени академика С.П.Королева

Научный консультант: Засл. деятель науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
Конюхов Николай Евгеньевич

Официальные оппоненты: Лауреат государственной премии СССР,
доктор технических наук, профессор
Домрачев Вилен Григорьевич,

Засл. деятель науки и техники РФ,
академик Метрологической академии РФ,
доктор технических наук, профессор
Куликовский Константин Лонгинович,

доктор технических наук, профессор
Стеблев Юрий Иванович

Ведущее предприятие: Федеральное государственное унитарное предприятие
"НИИ физических измерений", г. Пенза

Защита диссертации состоится " " 2007 г. в часов на
заседании диссертационного совета Д 212.215.05 при ГОУ ВПО "Самарский го-
сударственный аэрокосмический университет" по адресу: 443086, г. Самара,
Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Са-
марского государственного аэрокосмического университета

Автореферат разослан " " 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного
Совета, доктор техн. наук, профессор

Калентьев А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Автоматизация процессов измерения, управления и контроля в различных областях науки и техники требует широкого применения датчиков механических величин (ДМВ) различной физической природы. В реальных условиях эксплуатации на ДМВ оказывают существенное влияние внешние и внутренние дестабилизирующие факторы (ДФ), приводящие к существенному изменению номинальных выходных характеристик преобразователей и к возникновению погрешностей измерений.

Повышение точности и стабильности датчиков во многом достигается благодаря развитию структурно-алгоритмических методов коррекции погрешностей. Применение встроенных микропроцессорных вычислительных средств и персональных компьютеров (ПК) в составе АСУ позволяет использовать достаточно сложные и эффективные алгоритмы обработки сигналов и существенно увеличить точность датчиков.

В теорию и практику повышения точности и стабильности датчиков на основе структурно-алгоритмических методов большой вклад внесли Т.М. Алиев, Э.М. Бромберг, Л.И. Волгин, Э.И. Гитис, В.Г. Домрачев, М.А. Земельман, Н.Е. Конюхов, К.Л. Куликовский, В.Н. Нестеров, П.В. Новицкий, П.П. Орнатский, С.П. Персин, Б.Н. Петров, В.В. Сазонов, Ю.А. Скрипник, Ю.М. Туз, К.Б. Клаасен, Т. Роман, Н. Hart, Н. Juttemann, Н. Kollner, I. Lira, W. Lotze, A. Morris, I. Morse, J. Piotrowski, E. Schrufer, F. Tse, P. Taubert и ряд других авторов. Анализ представленных в их трудах методов коррекции погрешностей показал, что практической областью использования методов образцовых мер, итерационных и тестовых является измерение электрических величин, преимущественно тех, для которых создание точных обратных преобразователей, а также аддитивных и мультипликативных тестов контролируемых параметров не вызывает трудностей. Методы инвариантных преобразований, использующие мостовые схемы включения датчиков, позволяют скорректировать только погрешности чувствительных элементов (ЧЭ) и мостовой схемы.

С точки зрения коррекции погрешностей всего измерительного тракта от ЧЭ до микропроцессора наиболее перспективными являются тестовые методы, т.к. они не требуют отключения контролируемого параметра от входа преобразователя. Однако, при существующем подходе, когда функция преобразования датчика описывается полиномом n -ой степени, либо используется кусочно-линейная аппроксимация, для реализации тестового алгоритма необходимо формирование в устройствах тестов двух типов: аддитивных и мультипликативных. Получение точного и стабильного значения аддитивного теста в ДМВ обычно не вызывает затруднений, а создание мультипликативного теста не всегда осуществимо в связи с конструктивно-технологическими трудностями умножения на постоянный коэффициент для механических величин, таких как перемещение, его производные и т.д. Необходимость использования обязательно тестов двух типов в известных тестовых алгоритмах сужает их область использования.

На практике в процессе проведения тестовых измерений часто используется кусочно-линейная аппроксимация выходной характеристики датчика. Согласно

условиям формирования тестового алгоритма все тесты и измеряемая величина должны одновременно находиться на линейном участке аппроксимации. Только в этом случае могут быть определены реальные текущие значения коэффициентов линейной зависимости. При нелинейной функции преобразования датчика величины линейных участков аппроксимации могут иметь весьма малые значения. Разности дополнительных тестовых измерений также оказываются весьма малыми, в общем случае соизмеримыми с величиной случайной погрешности. Поэтому тестовые алгоритмы, основанные на кусочно-линейном представлении выходной характеристики датчика, реализующиеся путем нахождения отношения разностей близких между собой чисел, характеризуются значительным (в десятки раз) увеличением случайной составляющей погрешности по сравнению с однократным преобразованием.

В датчиках с использованием упругого ЧЭ, преобразующего силу, момент, давление и т.д. в регистрируемое перемещение, внешние ДФ действуют в том числе и на ЧЭ. В таких случаях точное измерение перемещения ЧЭ не позволяет устранить влияние ДФ на результат измерения, так как дестабилизирующее воздействие интегрировано вместе с измеряемым параметром в перемещение. Для повышения точности и стабильности таких датчиков требуется разработать комбинированные методы, включающие тестовые измерения и преобразования, связанные с обработкой вспомогательных измерений ДФ.

В преобразователях, использующих тестовые измерения, существенный вклад в общую погрешность дает методическая составляющая, возникающая в случае отличия ФП датчика от используемой математической модели, положенной в основу тестового алгоритма.

Перечисленные недостатки без их устранения существенно ограничивают возможности тестовых методов. Поэтому развитие теоретических основ тестовых измерений в области контроля механических величин и создание ДМВ, инвариантных к ДФ, на их основе представляет собой *важную научную проблему*. Разработка преобразователей, обладающих высокой точностью и стабильностью в жестких условиях эксплуатации, в широком диапазоне изменения измеряемого параметра и в течение длительных промежутков времени, является *актуальной* как для автономных приборов различного принципа действия и назначения, так и для информационно-измерительных и управляющих систем в целом.

Целью диссертационной работы является развитие теории тестовых измерений и создание на ее основе ДМВ, инвариантных к воздействию ДФ, обладающих повышенной точностью, стабильностью и увеличенным диапазоном измеряемых величин.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи**:

1. Анализ математических моделей погрешностей, обусловленных влиянием ДФ на датчики, и существующих методов их коррекции.
2. Разработка тестовых алгоритмов повышения точности и стабильности ДМВ на основе дробно-рациональных, степенных и трансцендентных функций (ДРСТФ), использующихся в качестве аппроксимирующих моделей выходных характеристик датчиков.
3. Исследование возможностей использования тестов одного типа: аддитив-

ных, мультипликативных или функциональных в датчиках, функции преобразования которых описываются математическими моделями заданного вида.

4. Создание базы данных типовых ФП ДМВ и соответствующих им алгоритмов реализации тестовых методов.

5. Разработка методов бесконтактной установки датчиков на заданном расстоянии от объекта и контроля этого расстояния в автоматическом режиме на протяжении всего цикла измерений.

6. Разработка конструкций и схем ДМВ, инвариантных к ДФ, на основе современной элементной базы и микроконтроллеров и их практическое использование как в виде автономных приборов, так и в составе АСУ. Экспериментальные и теоретические исследования полученных методов и датчиков.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались методы дифференциального и интегрального исчисления, аппараты линейной алгебры, численных методов, теория инвариантности, теория вероятностей и теория погрешностей. При проведении численных расчетов на компьютере использовались высокоуровневые методы программирования.

Научная новизна работы заключается в развитии теории тестовых измерений применительно к ДМВ, обеспечение их инвариантности к ДФ для повышения точности, стабильности и расширения диапазона измеряемых величин.

1. Разработаны алгоритмы реализации тестовых методов повышения точности и стабильности ДМВ на основе обобщенных математических моделей, использующих ДРСТФ

2. Показана возможность использования тестов одного типа: аддитивных, мультипликативных или функциональных для ДМВ, функции преобразования которых описываются математическими моделями заданного вида.

3. Впервые предложен способ использования функциональных тестов в ДМВ, позволяющий повысить точность и стабильность датчиков в широком диапазоне изменения измеряемого параметра.

4. Разработан метод измерений, при котором ЧЭ датчиков расположены на заданном расстоянии от объекта контроля, обеспечивающий работу на линейном участке ФП. Метод реализуется на основе анализа второй производной постоянной составляющей сигнала преобразователя и хорошо согласуется с тестовым.

5. Предложен способ бесконтактной установки ЧЭ датчиков на заданном расстоянии от поверхностей исследуемых объектов в автоматическом режиме на протяжении всего цикла измерений. Гарантированная установка в заданную точку позволяет свести к минимуму методическую погрешность, возникающую при несовпадении ФП датчика с используемой математической моделью.

6. Предложен способ температурной коррекции выходной характеристики преобразователей, основанный на тестовых измерениях и впервые реализуемом бесконтактном измерении температуры ЧЭ по его проводимости вихретоковым методом. Способ позволяет поддерживать заданные точность и стабильность в условиях повышенных температур.

7. Разработаны новые структурные схемы и алгоритмы функционирования ДМВ, позволившие повысить их устойчивость к ДФ и расширить диапазон измерений.

Практическая ценность работы.

Предложена совокупность конструктивных, схемотехнических и алгоритмических решений, обеспечивающих создание ДМВ, устойчивых к дестабилизирующим воздействиям, обладающих расширенным диапазоном изменения измеряемого параметра.

Создана база данных аппроксимирующих функций и соответствующих им алгоритмов реализации тестового метода для типовых ФП ДМВ. Разработан измерительно-вычислительный комплекс, аппаратное и программное обеспечение которого позволяет по экспериментально полученным характеристикам преобразователей определять соответствующий им тестовый алгоритм. Это существенно сокращает сроки проектирования, уменьшает затраты на экспериментальные исследования ДМВ.

Созданы преобразователи перемещений, вибраций, положения и давления, реализующие разработанные методы и теоретические положения, позволяющие повысить устойчивость ДМВ к ДФ, среди которых

- волоконно-оптические датчики перемещений, рабочий диапазон которых расширен в 5 раз по сравнению с аналогичными преобразователями. Датчики обеспечивают результат, инвариантный к загрязнению контролируемой поверхности, к изменениям мощности источника излучения и к внешним засветкам;

- электромагнитные датчики перемещений, рабочий диапазон которых увеличен в 3 раза по сравнению с аналогами. Результат измерений датчиков инвариантен к воздействию внешних электромагнитных полей;

- волоконно-оптические датчики вибраций, обладающие возможностью бесконтактной установки ЧЭ на заданном расстоянии от исследуемых объектов и контроля этого расстояния в автоматическом режиме на протяжении всего времени измерений. Датчики позволяют устанавливать рабочий зазор с точностью 0,01 мм непосредственно в процессе измерения вибраций;

- термокомпенсированный датчик давления на основе использования конструктивно совмещенных волоконно-оптических и вихретокового каналов измерения, принцип действия которого основан на совместном применении методов вспомогательных измерений и тестовых. Датчик позволяет фиксировать погрешность измерений на уровне 1% в условиях высоких температур (до 300 °С и выше).

На защиту выносятся:

1. Алгоритмы реализации тестовых методов на основе ДРСТФ и тестов одного вида: аддитивных или мультипликативных, позволяющие повысить устойчивость датчиков к ДФ в области измерения механических величин.

2. Способ контроля перемещений с повышенной точностью и стабильностью на основе использования в ДМВ функциональных тестов, позволяющий сохранить стабильный уровень погрешности измерений датчиков в условиях ДФ в широком диапазоне изменения измеряемого параметра.

3. Метод измерений, при котором ЧЭ датчиков расположены на заданном расстоянии от объекта контроля, обеспечивающий работу на линейном участке ФП. Метод реализуется на основе анализа второй производной постоянной составляющей сигнала преобразователя и хорошо согласуется с тестовым.

4. Способ бесконтактной установки ЧЭ датчиков на заданном расстоянии от

исследуемых объектов и контроля этого расстояния в автоматическом режиме на протяжении всего цикла измерений. Способ позволяет повысить достоверность измерений без проведения дополнительных калибровок.

5. Способ температурной коррекции характеристик преобразователей, основанный на бесконтактном измерении температуры ЧЭ по его проводимости.

6. Конструкции, структурные схемы и алгоритмы функционирования ДМВ, устойчивых к ДФ, для контроля перемещений, вибраций, положения и давления с широкой областью практических применений.

Реализация результатов работы. На основе полученных в диссертационной работе теоретических результатов разработаны и внедрены в производство и в учебный процесс технических специальностей вуза ДМВ, устойчивые к ДФ, основанные на бесконтактном оптическом, электромагнитном и вихре-токовом взаимодействии с контролируемым объектом и предназначенные для контроля перемещений, вибраций, положения объектов, а также для измерения давлений жидкостей и газов. Отличительной особенностью разработанных датчиков является присутствие в них одного или нескольких корректирующих каналов с аналогичной или отличающейся от основного измерительного канала физической природой. Созданные аппаратные средства внедрены в системе автоматического контроля и управления установкой правки насосных штанг и в установке для опрессовки труб в ЗАО НИПЦ "НефтеГазСервис" (г. Самара), в стендах "Испытания кузова на изгибную и крутильную жесткость", "Испытания капота, крыши багажника на долговечность" на предприятии АО "АВТО-ВАЗ" (г. Тольятти), в составе системы позиционирования лазерного микроскопа в НПО "Волна" (г. Москва) и в учебный процесс Тольяттинского государственного университета (г. Тольятти).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на первом Всесоюзном совещании-семинаре "Датчики и преобразователи информационно-управляющих систем" (Москва, 1987), Всесоюзной научно-технической конференции "Оптические, радиоволновые и тепловые методы и средства неразрушающего контроля качества промышленной продукции" (Саратов, 1991), постоянно действующем научно-техническом семинаре "Современные методы и приборы неразрушающего контроля" (Москва, 1992), Международной научно-технической конференции "Новые информационные технологии и системы" (Пенза, 1994), 1-ой Поволжской научно-технической конференции "Научно-исследовательские разработки и высокие технологии двойного применения" (Самара, 1995), VII, VIII Всероссийских научно-технических конференциях с участием зарубежных специалистов "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления" (Гурзуф, 1995, 1996), Всероссийской научно-технической конференции "Электроника и информатика" (Москва, 1995), Международной научно-технической конференции "Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе" (Самара, 1997), Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Генерального конструктора аэрокосмической техники акад. Н.Д. Кузнецова (Самара, 2001, 2006), Международном юбилейном симпозиуме "Актуальные проблемы науки и образования" (Пенза, 2003), VII, VIII, XI и XII научно-технических конференциях с участием зарубежных специалистов "Дат-

чики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления" (Гурзуф, 1993, 1995, 1996, Судак, 2002, 2004), Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций" (Самара, 2005, 2006), Международной научно-технической конференции "Датчики и системы - 2005" (Пенза, 2005).

Реализация результатов работы. По теме диссертации опубликовано 63 печатных работы, в том числе 1 монография, 1 учебное пособие, 10 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 20 статей в сборниках трудов. Получено 14 авторских свидетельств СССР и патентов РФ на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Основное содержание работы изложено на 297 страницах текста, содержит 63 рисунка и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, дана общая характеристика работы, ее научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены математические модели погрешностей датчиков, функционирующих в условиях дестабилизирующих факторов, и методы их коррекции. Сформулирован подход к разработке алгоритмов тестовых преобразований на основе дробно-рациональных, степенных и трансцендентных функций.

В соответствии с современными метрологическими представлениями, нашедшими отражение в работах Земельмана М.А., изменились понятия о систематических и случайных погрешностях измерений. Наличие "неисключенного остатка" систематической погрешности после введения в результат измерения поправки говорит о том, что при технических измерениях данная составляющая общей погрешности представляет собой "вырожденную" случайную величину. В то же время, случайная погрешность отдельного экземпляра средств измерений включает в себя, помимо погрешности, стохастически изменяющейся во времени, также случайную величину — погрешность, во времени не изменяющуюся, но варьирующуюся от измерения к измерению. Поэтому погрешность датчика в зависимости от ее частотного спектра, который находится в непосредственной взаимосвязи с частотным спектром ДФ, действующих на преобразователь, а также для оценки эффективности применения различных методов коррекции к ДМВ, целесообразно разделить на две составляющие: 1) коррелированную составляющую $\bar{\Delta}(t)$, объединяющую систематические, прогрессирующие и относительно медленно изменяющиеся случайные погрешности и 2) некоррелированную составляющую $\dot{\Delta}(t)$, включающую все некоррелированные случайные погрешности.

Методы уменьшения некоррелированной составляющей погрешности измерений основаны на статистической обработке результатов многократных и многоканальных измерений контролируемой величины, использовании цифровой

фильтрации, которые в настоящее время являются в достаточной степени исследованными.

Проведен анализ наиболее эффективных методов уменьшения коррелированной составляющей погрешности измерений: обратного преобразования, вспомогательных измерений, методов образцовых мер, итерационных, тестовых, а также методов, использующих мостовые схемы включения датчиков. Показано, что кроме тестовых и методов образцовых мер исключить погрешности всего измерительного тракта не позволяет ни один из вышеперечисленных методов. Недостатком метода образцовых мер является необходимость периодического отключения измеряемой величины от входа преобразователя и подключения образцовых мер, а также большое число образцовых мер при существенной нелинейности функции преобразования датчика. Тестовые методы коррекции погрешностей датчиков, разработанные Куликовским К.Л. и Бромбергом Э.М., являются наиболее перспективными, так как позволяют учесть погрешности всего измерительного тракта и не требуют подключения образцовых мер. Однако известные тестовые алгоритмы основаны на описании функций преобразования датчиков целой рациональной функцией (полиномом n -ой степени) или на использовании кусочно-линейной аппроксимации выходных характеристик преобразователей и требуют для своей реализации в преобразователях наличия обязательно тестов двух типов: аддитивных и мультипликативных. Данное обстоятельство не является критичным в области измерения электрических величин, где используется аппарат тестовых методов. Так, умножение такой измеряемой величины как напряжение на постоянный коэффициент, а также получение суммы измеряемого напряжения с опорным не представляет технической сложности. При контроле механических величин в отдельно взятом датчике удастся сформировать тест только одного типа, что в значительной степени снижает универсальность тестовых методов коррекции.

Проведенное исследование показало, что использование тестовых алгоритмов, основанных на кусочно-линейной аппроксимации, применительно к датчикам с нелинейными функциями преобразования характеризуется существенным (в десятки раз) увеличением случайной составляющей погрешности даже при работе в узком диапазоне изменения измеряемого параметра, ограниченно допустимой погрешностью аппроксимации. На рис. 1 а) изображены график нелинейной функции преобразования датчика и отрезок аппроксимирующей ее прямой линии. На рис. 1 б) приведены типовые зависимости случайной η и нелинейной δ_n составляющих погрешностей датчиков, реализующих тестовые алгоритмы, от величины теста θ , пронормированной относительно диапазона измерения преобразователя. Из графиков видно, что рабочий диапазон преобразователя ограничен с одной стороны допустимой величиной случайной погрешности, а с другой — погрешностью от нелинейности, возникающей за пределами аппроксимирующего отрезка.

Действительно, увеличение случайной составляющей погрешности обусловлено необходимостью вычисления отношений разностей близких между собой чисел при реализации тестовых алгоритмов. Величины дополнительных преобразований, на основе которых вычисляются текущие значения параметров математической модели преобразователя, определяются значениями используемых

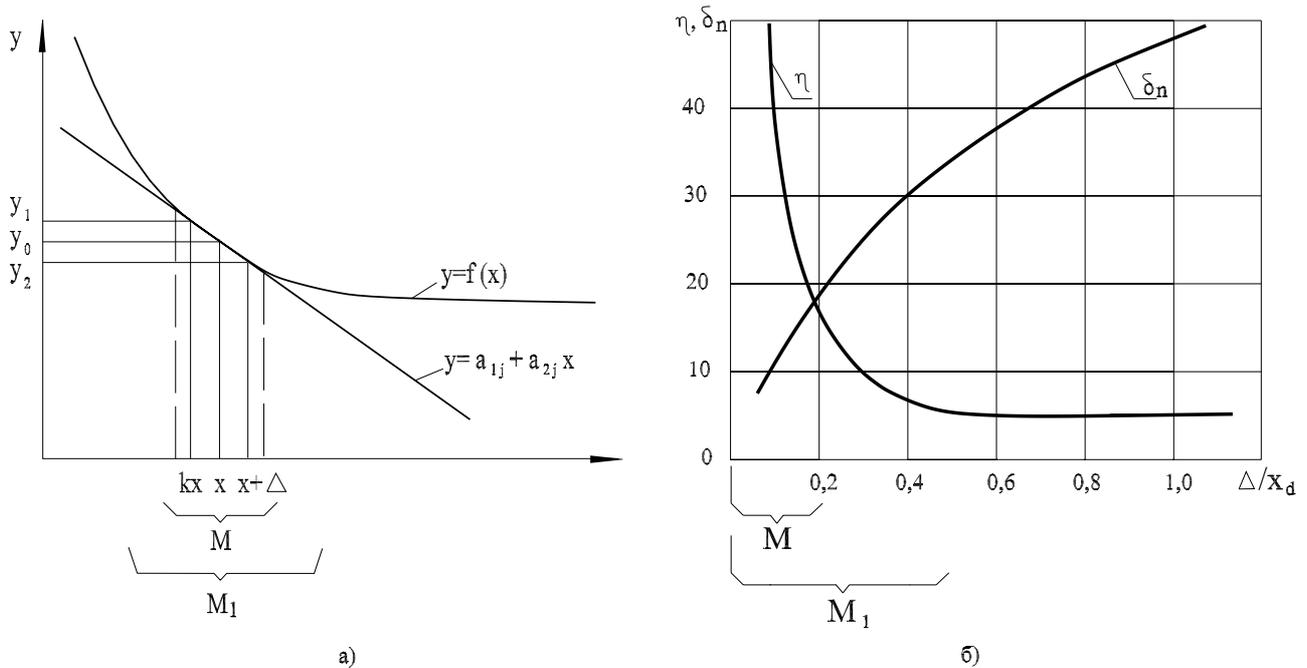


Рис. 1. Кусочно-линейная аппроксимация нелинейных характеристик датчиков (а), типовые зависимости относительных случайной η и нелинейной δ_n составляющих погрешностей датчиков от относительной величины теста Δ/X_{\max} (б)

тестов, которые, в свою очередь, зависят от длины аппроксимирующего характеристическую преобразователя линейного отрезка. При попытке выйти за пределы диапазона M (см. рис. 1) с целью уменьшения случайной погрешности путем увеличения величин тестов наблюдается резкий рост составляющей погрешности от нелинейности функции преобразования датчиков. Таким образом, на основе тестовых преобразований и кусочно-линейного описания характеристик не удастся добиться высокой точности и стабильности датчиков в широком диапазоне изменения измеряемого параметра.

Таким образом, использование известных тестовых алгоритмов наряду с компенсацией коррелированной составляющей погрешности измерения приводит к существенному увеличению некоррелированной составляющей (случайной погрешности), которая может возрасти в 20-30 раз по сравнению с однократным преобразованием.

В качестве одного из путей решения данных проблем намечен подход к созданию тестовых алгоритмов повышения точности и стабильности ДМВ на основе обобщенных математических моделей, использующих ДРСТФ, позволяющий разрабатывать датчики, устойчивые к ДФ в широком диапазоне изменения измеряемого параметра. Для разработки инвариантных к ДФ ДМВ на основе ДРСТФ преобразований в работе намечено провести следующие исследования и разработки.

— Изучить вопрос возможности использования в различных тестовых алгоритмах на основе ДРСТФ тестов только одного типа: аддитивных или мультипликативных. Обоснование осуществимости тестовых алгоритмов на основе

тестов одного типа позволит существенно расширить область применения тестовых методов, а использование описания нелинейных характеристик датчиков с помощью ДРСТФ позволит в несколько раз увеличить диапазон изменения измеряемого параметра (отрезок М1 на рис. 1).

— Для преобразователей, в которых не удастся повысить точность измерений на основе тестов одного типа, следует исследовать возможность формирования функциональных тестов и способов измерений на их основе.

— Необходимо провести анализ характеристик различных ДМВ и создать базу данных типовых функций преобразования датчиков и соответствующих им тестовых алгоритмов.

— С целью уменьшения методической составляющей погрешности измерения, возникающей в случае отличия ФП датчика от используемой математической модели, положенной в основу тестового алгоритма, следует разработать способы бесконтактной установки ЧЭ датчиков на заданном расстоянии от объекта, соответствующем минимальному значению методической погрешности. Разработанные способы должны согласовываться с тестовыми методами.

— Для ДМВ, обладающих выраженными линейными участками функций преобразования, необходимо разработать методы установки ЧЭ датчиков на заданном расстоянии от объекта контроля, обеспечивающие работу на линейном участке ФП.

— Датчики, основанные на преобразовании измеряемых усилий, давлений, моментов в регистрируемое перемещение, требуют для компенсации внешних воздействий разработки комбинированных методов.

Для снижения влияния ДФ на преобразователи, основываясь на проведенных исследованиях, необходимо реализовать предложенные методы в структурах, конструкциях и электрических схемах обработки сигналов чувствительных элементов датчиков с применением современной элементной базы и микроконтроллеров.

Во второй главе показаны подходы к разработке инвариантных к ДФ ДМВ на основе тестовых измерений и тестов одного типа.

Сигнал с датчика, работающего в условиях воздействия ДФ, в общем случае можно представить выражением

$$y = F(x, a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)), \quad (1)$$

где F — обобщенная функция преобразования устройства, x — информативный контролируемый параметр, $a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)$ — параметры функции преобразования датчика, являющиеся случайными функциями времени, изменяющимися под действием условий окружающей среды, параметров источников питания и т.д., а также в результате старения элементной базы преобразователей. Для параметров $a_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) выполняется соотношение $a_i^- \leq a_i(t) \leq a_i^+$ ($i = 1, 2, \dots, n$), где a_i^- , a_i^+ — известные константы.

Тестовые методы повышения точности измерений дают возможность на основе дополнительных преобразований определять текущие значения параметров $a_i(t)$, которые затем подставляются в выражение (1). Дополнительные преобразования представляют собой либо n дополнительных тактов измерений, либо реализуются на базе $(n + 1)$ -канального устройства. По найденной реальной

функции преобразования датчика вычисляется значение измеряемой величины x . Таким образом, устраняется зависимость результата измерения от ДФ, действующих на датчик. Однако все известные тестовые алгоритмы требуют формирования в устройствах обязательно тестов двух типов: аддитивных и мультипликативных, что ограничивает область их практического использования измерениями электрических величин.

Одна из задач, решенных в работе, состояла в том, чтобы получить алгоритмы реализации тестового метода на основе использования тестов одного типа, преимущественно аддитивных, формирование которых в ДМВ не вызывает трудностей.

В соответствии с существующей теорией тестовых измерений считается, что ФП любого датчика можно описать целой рациональной функцией (полиномом n -ой степени) или использовать кусочно-линейную аппроксимацию. Данный подход, во-первых, не согласуется с многообразием существующих ДМВ. Во-вторых, он требует формирования в преобразователях тестов обязательно двух типов: аддитивных и мультипликативных, что является сложным или вообще нереализуемым при измерениях механических величин. В-третьих, при малых значениях величин участков аппроксимации возрастает в десятки раз случайная составляющая погрешности измерений.

В работе впервые получено выражение обобщенного алгоритма реализации тестового метода для дробно-рациональных функций вида

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x^{1-i}, \quad a_1, a_2, \dots, a_n \neq 0, \quad (2)$$

где $n \geq 0$ — целое, x — измеряемая величина, определенная всюду на множестве действительных чисел, a_1, a_2, \dots, a_n — коэффициенты преобразования, учитывающие воздействие на датчик ДФ, а также уход параметров преобразователя с течением времени. Полученное выражение представляет собой зависимость $y = F(x)$, в которой в качестве коэффициентов фигурируют результаты дополнительных тестовых измерений y_1, y_2, \dots, y_n и обобщенные тесты $A_1(x), A_2(x), \dots, A_n(x)$ измеряемого параметра:

$$y = \prod_{1 \leq g < b \leq n} \left[\frac{A_b(x) A_g(x)}{A_g(x) - A_b(x)} \right] \sum_{j=1}^n (-1)^{j+1} y_j \left(\prod_{\substack{1 \leq g < b \leq n \\ g \neq j, b \neq j}} \left[\frac{1}{A_b(x)} - \frac{1}{A_g(x)} \right] \right)^* \\ * [A_1(x) A_2(x) \dots A_{j-1}(x) A_{j+1}(x) \dots A_n(x)]^{-1} + \dots \\ \dots + \prod_{1 \leq g < b \leq n} \left[\frac{A_b(x) A_g(x)}{A_g(x) - A_b(x)} \right] x^{1-i} \sum_{j=1}^n (-1)^{j+i} y_j * \left(\prod_{\substack{1 \leq g < b \leq n \\ g \neq j, b \neq j}} \left[\frac{1}{A_b(x)} - \frac{1}{A_g(x)} \right] \right) + \dots \\ \dots + \prod_{1 \leq g < b \leq n} \left[\frac{A_b(x) A_g(x)}{A_g(x) - A_b(x)} \right] x^{1-n} \sum_{j=1}^n (-1)^{j+n} y_j \left(\prod_{\substack{1 \leq g < b \leq n \\ g \neq j, b \neq j}} \left[\frac{1}{A_b(x)} - \frac{1}{A_g(x)} \right] \right) \quad (3)$$

Здесь $A_b(x)$, $A_g(x)$ — тесты измеряемой величины x , где $1 \leq g < b \leq n$. Результат измерения x , полученный из (3), не зависит от величин коэффициентов a_1, a_2, \dots, a_n математической модели функции преобразования датчика и от их изменения со временем и под действием дестабилизирующих факторов, так что удается исключить систематические, прогрессирующие и относительно медленно изменяющиеся случайные погрешности из результата измерения.

Если вместо обобщенных тестов подставить в (3) значения мультипликативных тестов $A_i(x) = K_i x$, то выражение вырождается в тождество. Данный факт говорит о том, что повысить точность измерений ДМВ на основе одних мультипликативных тестов и описания ФП датчиков выражением (2) нельзя. При подстановке в (3) аддитивных тестов $A_i(x) = x + \Delta_i$, измеряемая величина x не сокращается в каждом члене правой части уравнения, как это было в случае использования мультипликативных тестов. Таким образом, для датчиков, функции преобразования которых можно описать математической моделью, использующей дробно-рациональные функции, точность измерения можно повысить, используя одни аддитивные тесты, что имеет большое практическое значение для ДМВ.

В процессе разработки преобразователей, использующих тестовые методы измерений, ограничиваются n -ым членом зависимости, аппроксимирующей выходную характеристику датчика. Попытка повышения точности за счет увеличения n приводит к существенному усложнению тестового алгоритма, увеличению количества тестов, требующихся для его практической реализации, и, следовательно, к увеличению составляющей погрешности, связанной с точностью формирования тестов, а также к возрастанию в несколько раз случайной погрешности по сравнению с однотактным измерением. В то же время, функции преобразования ряда известных ДМВ со значительно меньшей погрешностью аппроксимации в широком диапазоне изменения измеряемого параметра можно представить другими математическими моделями. Выходная характеристика дифференциального трансформаторного преобразователя перемещений изменяется по закону арктангенса, ФП синусно-косинусных вращающихся трансформаторов описываются тригонометрическими функциями, логарифмических усилителей — логарифмической функцией, выходные характеристики преобразователей абсолютных виброперемещений, виброскоростей — степенными зависимостями, а типовые ФП электромагнитных и емкостных датчиков перемещений — дробно-рациональными функциями.

На основе описания ФП ДМВ ДРСТФ получены простые алгоритмы реализации тестового метода, некоторые из которых приведены в таблице 1. По сравнению с алгоритмами на основе целых рациональных функций они отличаются уменьшением тактов или каналов измерений и количества формируемых в датчике тестов. Повышение точности измерений датчиков на основе тестовых измерений и ДРСТФ осуществлялось за счет снижения случайной погрешности. Положительным моментом при использовании указанных функций является также снижение разрядности АЦП и уменьшение времени измерения при тех же уровнях случайной и динамической погрешностей, что и при использовании сложных математических моделей.

В таблице приведены также результаты проведенных исследований, опреде-

**Таблица 1. Аналитические выражения тестовых алгоритмов
на основе аппроксимирующих ДРСТФ**

Вид функции преобразования датчика	Аддит. тесты	Мультип. тесты	Тестовый алгоритм
Дробно-рациональные функции 1. $y = a_1 + \frac{a_2}{x}; \quad a_2 \neq 0$	+	-	$x = \frac{2y_1 - y_2 - y_3}{y_2 - y_3} \Delta;$
Степенные функции 2. $y = ax^n; \quad a \neq 0; \quad n \geq 0$ 3. $y = a_2x^n + a_1; \quad a_1, a_2 \neq 0; \quad n \geq 0$ 4. $y = ax^k; \quad k = m/n; \quad n \neq \pm 1$ 5. $y = a_2x^k + a_1; \quad k = m/n; \quad a_1, a_2 \neq 0; \quad n \neq \pm 1$	+	-	$y = \frac{y_1 x^n}{(x + \Delta)^n};$ $y = y_1 + \frac{(y_1 - y_2)(x^n - (x + \Delta)^n)}{(x + \Delta)^n - (x - \Delta)^n};$ $y = \frac{y_1 x^m (x + \Delta)^n}{x^n (x + \Delta)^m};$ $y = y_1 + \frac{(y_1 - y_2)(x^m (x + \Delta)^n - x^n (x + \Delta)^m (x - \Delta)^n - x^n (x + \Delta)^m (x - \Delta)^n)}{(x + \Delta)^m (x + \Delta)^n};$
Тригонометрические функции 6. $y = a_2 \cos x + a_1;$ 7. $y = a_2 \sin x + a_1;$ 8. $y = a_2 \operatorname{tg} x + a_1;$ 9. $y = a_2 \operatorname{ctg} x + a_1;$	+	-	$x = \arctg \left(\frac{y_1 - y_3}{y_2 + y_3 - 2y_1} \operatorname{tg} \frac{\Delta}{2} \right);$ $x = \arctg \left(\frac{2y_1 - y_2 - y_3}{y_2 - y_3} \operatorname{ctg} \frac{\Delta}{2} \right);$ $x = \arctg \left(\frac{4y_2 - 2y_1 - y_3}{y_3 - y_2} \operatorname{tg} \Delta \right);$ $x = \arctg \left(\frac{y_3 - y_2}{y_2 - 2y_1 + y_3} \operatorname{tg} \Delta \right);$
Показательная функция 10. $y = a_2 b^x + a_1;$ $b > 0; \quad b \neq 1$	+	+	$x = \frac{1}{(K - 1) \ln b} * \ln \frac{(y_3 - y_1) b^\Delta - y_3 + y_2}{y_2 - y_1};$
Логарифмическая функция 11. $y = a_1 \log_a x;$ $a > 0; \quad a \neq 1$	-	+	$x = a^{\frac{y_1 \log_a K}{y_2 - y_1}};$
Гиперболические функции 12. $y = a_2 \operatorname{sh} x + a_1;$ 13. $y = a_2 \operatorname{ch} x + a_1;$ 14. $y = a_2 \operatorname{th} x + a_1;$ 15. $y = a_2 \operatorname{cth} x + a_1;$	+	-	$x = \operatorname{Arcth} \left(\frac{y_2 + y_3 - 2y_1}{y_2 - y_3} \operatorname{cth} \frac{\Delta}{2} \right);$ $x = \operatorname{Arcth} \left(\frac{y_2 - y_3}{y_2 + y_3 - 2y_1} \operatorname{th} \frac{\Delta}{2} \right);$ $x = \operatorname{Arth} \left(\frac{y_3 - 3y_2 + 2y_1}{y_3 - y_2} \operatorname{cth} \Delta \right);$ $x = \operatorname{Arth} \left(\frac{y_3 - y_2}{y_2 - 2y_1 + y_3} \operatorname{th} \Delta \right).$

ляющие возможность (+) или невозможность (–) использования аддитивных или мультипликативных тестов по-отдельности для повышения точности и стабильности ДМВ. Как видно из таблицы 1, повысить точность и стабильность ДМВ, характеристики которых могут быть описаны дробно-рациональными, степенными, тригонометрическими и гиперболическими функциями, удастся с помощью одних аддитивных тестов, мультипликативные тесты не приводят к созданию тестовых алгоритмов. Для ДМВ с логарифмической функцией преобразования наблюдается обратная ситуация: только мультипликативные тесты позволяют повысить точность измерений, а аддитивные не дают положительного результата. Разработать тестовый алгоритм на основе использования показательной функции для описания характеристик преобразователей удастся только в результате совместного применения аддитивных и мультипликативных тестов. В связи с тем, что в ДМВ технически сложно сформировать одновременно и аддитивные, и мультипликативные тесты, для датчиков с показательной функцией преобразования наиболее удачным техническим решением, позволяющим повысить устойчивость к ДФ, является использование функциональных тестов.

Значение функционального теста сложным образом зависит от измеряемой величины $A_i(x) = F_i(x)$. Вид функциональной зависимости определяется способом формирования тестов в конкретном преобразователе. Анализ преобразователей, использующих тестовые измерения, выявил отсутствие устройств, использующих функциональные тесты, в то время как их применение в ДМВ дает возможность реализовывать тестовые алгоритмы повышения точности в тех случаях, когда их невозможно получить на основе аддитивных либо мультипликативных тестов.

Разработаны алгоритмы реализации тестового метода, использующие функциональные тесты на основе описания характеристик преобразователей показательной, целой рациональной и линейной функциями. Известные тестовые алгоритмы, базирующиеся на данных трех типах зависимостей, требуют для своей реализации формирования в устройствах обязательно двух типов тестов: аддитивных и мультипликативных. Данное условие является конструктивно сложно реализуемым в области контроля механических величин. При использовании функциональных тестов это ограничение снимается.

Проведенные в работе исследования показали возможность применения в каждом из разработанных алгоритмов тестов только одного типа и позволили определить, какой из трех типов тестов может быть использован в том или ином случае.

Разработанные теоретические положения и полученные алгоритмы реализации тестового метода измерений дают возможность повысить устойчивость к ДФ ДМВ с целыми рациональными, линейными, дробно-рациональными, степенными и трансцендентными функциями преобразования на основе использования в них тестов одного вида: аддитивных, мультипликативных или функциональных. Таким образом, область применения тестовых методов существенно расширена.

В третьей главе разработан и обоснован математический аппарат эффективной аппроксимации экспериментальных характеристик измерительных каналов ДМВ целыми рациональными и ДРСТФ. Описана созданная база данных

функций, аппроксимирующих характеристики преобразователей, и соответствующих им тестовых алгоритмов.

При проектировании ДМВ на основе тестовых измерений возникает задача адекватного математического описания характеристик их измерительных каналов. Это связано с многообразием существующих средств измерения механических величин. При переходе от теоретического описания ФП к практической реализации тестового алгоритма в том или ином датчике удачный выбор аппроксимирующей его характеристики функции, обеспечивающей заданную точность при малом количестве членов зависимости, приводит к существенному упрощению тестового алгоритма, уменьшению тактов или каналов измерения и количества формируемых в датчике тестов.

Решению поставленной задачи в значительной степени способствовал разработанный измерительно-вычислительный комплекс (ИВК). К функциям, непосредственно выполняемым ИВК, относятся: 1) формирование напряжений и токов заданной формы и частоты для питания ДМВ; 2) сбор информации с датчиков; 3) обработка измерительной информации; 4) проверка качества аппроксимации.

ИВК может работать в двух режимах: 1) проведения эксперимента и непосредственной обработки измерительной информации, 2) обработки информации, полученной ранее, из файла с диска или с внешнего носителя. Наличие двух режимов расширяет возможности ИВК, позволяет решать задачи аппроксимативного анализа характеристик преобразователей как при непосредственном контакте датчика с аппаратурой ИВК, так и путем обработки данных, полученных на других аппаратных средствах и на любом удалении от ИВК.

В связи с большим разнообразием исследуемых датчиков, одной из главных целей, преследовавшихся при разработке комплекса, было добиться его универсальности. ДМВ различной физической природы запитываются как постоянным напряжением в диапазоне от 3,3 до 27 В, так и импульсным, и переменным токами различной амплитуды и частоты. Поэтому та часть ИВК, которая отвечает за формирование напряжений питания преобразователей, содержит два ОЗУ, два ЦАП, усилитель, преобразователь напряжения в ток и два реле. Часть комплекса, непосредственно задействованная в обработке измерительной информации, состоит из коммутатора, фазового детектора, фильтра, второго усилителя и АЦП. Вычислительное устройство, в качестве которого используется персональный компьютер, и микроконтроллер управляют как формированием напряжений питания датчиков, так и выполняют обработку измерительной информации. Усилители являются также программно управляемыми.

Программное обеспечение ИВК позволило установить для экспериментально полученных данных вид аппроксимирующих зависимостей из числа целых рациональных и ДРСТФ. С помощью ИВК была решена задача выбора на экспериментально полученной характеристике датчика рабочей области тестового метода, в которой размещаются измеряемая величина и ее комбинации с тестами. В качестве критерия оптимальной аппроксимации использовался минимум интегральной среднеквадратичной ошибки в заданном диапазоне изменения переменной x и параметров ФП a_i . Величина рабочей области для конкретного датчика выбиралась максимально возможной, исходя из допустимых значений

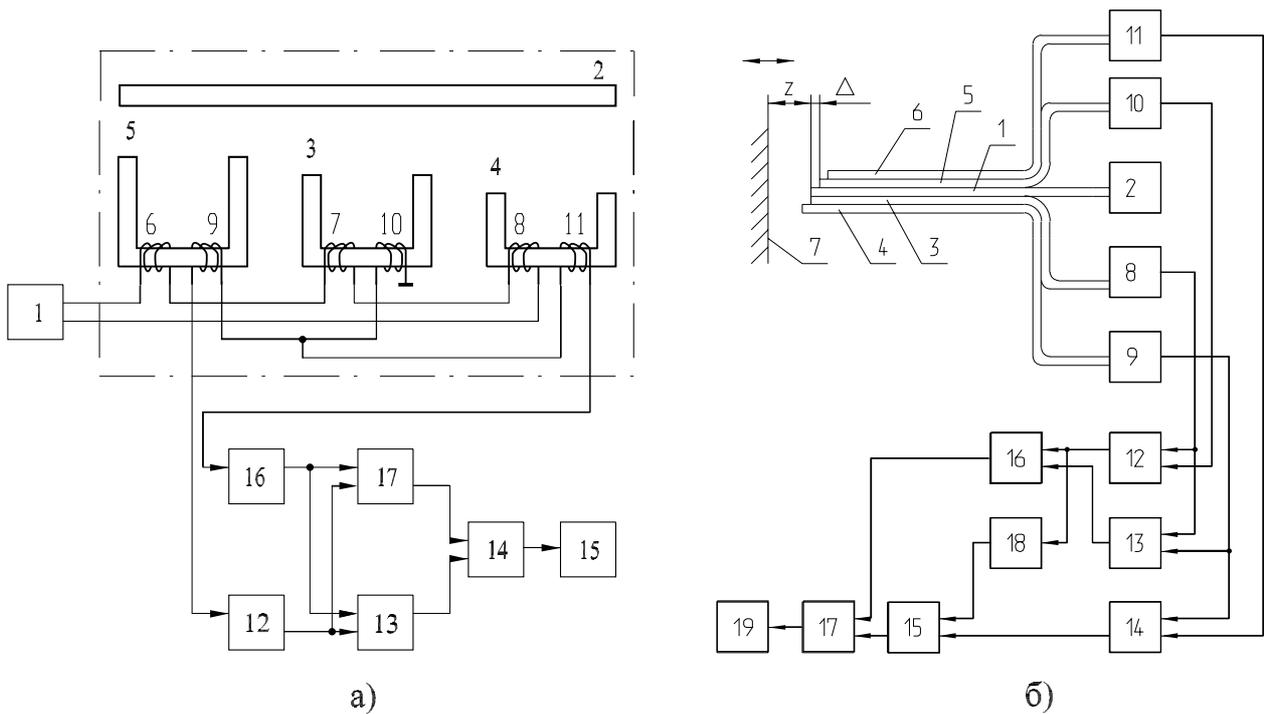


Рис. 2. Конструкции и структурные схемы датчиков перемещений на основе тестовых измерений, одного типа тестов и нелинейных функций в качестве математических моделей ФП датчиков: а) электромагнитных, б) волоконно-оптических

погрешности аппроксимации и степени увеличения случайной погрешности измерений.

Анализ характеристик десятков ДМВ показал, что описание ФП датчиков нелинейными моделями и проектирование преобразователей на их основе позволяет существенно, в 5 - 10 раз расширить рабочий диапазон ДМВ при том же уровне допустимой погрешности аппроксимации, что и для линейной модели.

На основе проведенных с помощью ИВК исследований создана база данных функций, аппроксимирующих характеристики преобразователей, и соответствующих им тестовых алгоритмов для типовых ФП ДМВ. База данных включает в себя более 30 различных функций и алгоритмов. Разработанное программное обеспечение позволяет по экспериментально полученным характеристикам преобразователей определять соответствующий тестовый алгоритм и рабочую область тестового метода, что существенно сокращает сроки проектирования ДМВ.

Четвертая глава посвящена новым ДМВ на основе тестовых измерений и одного типа тестов. Такие датчики, работая в жестких эксплуатационных условиях, обеспечивают результат, инвариантный ко всем внешним и внутренним ДФ, которые могут изменяться в широких пределах непредсказуемым образом. Предложенные в диссертационной работе подходы к построению ДМВ, инвариантных к ДФ, реализованы в преобразователях различной физической природы с целью продемонстрировать универсальность разработанных методов и алгоритмов.

На рис. 2 приведены конструкции и структурные схемы электромагнитного

(а) и волоконно-оптического (б) датчиков перемещений, реализованных на основе использования аддитивных тестов и описания их ФП дробно-рациональными и степенными функциями. В электромагнитном датчике выполняется алгоритм 1 тестовых измерений из табл. 1, в волоконно-оптическом — следующий алгоритм реализации тестового метода:

$$z = \frac{y_2 - 2y_1 + y_3}{3y_1 - y_2 - 3y_3 + y_4} \Delta. \quad (4)$$

Здесь y_1, y_2, y_3 и y_4 — сигналы с фотоприемников 8 — 11 (рис. 2, б) основного и дополнительных каналов для тестовых измерений, z — измеряемое перемещение. Тесты вводятся на уровне ЧЭ датчиков следующим образом. В электромагнитном датчике дополнительные магнитопроводы 4 и 5 сдвинуты (либо соответственно конструктивно укорочены и удлинены) относительно основного магнитопровода 3 на некоторое фиксированное расстояние Δ , не изменяющееся в процессе измерений, которое участвует в формировании аддитивного теста измеряемого перемещения. Основываясь на результатах основного и дополнительных тестовых измерений в блоках электроники 12 — 17 определяется значение измеряемого перемещения, учитывающее текущие параметры a_i математической модели и не зависящее от них. Аналогичный подход реализован в волоконно-оптическом датчике перемещений. Здесь аддитивные тесты формируются путем фиксированного сдвига дополнительных приемных жгутов волокон относительно основного жгута в направлении к исследуемой поверхности или от нее. Обработка полученных сигналов с фотоприемников 9 — 11 с отстройкой от текущих параметров математической модели осуществляется в блоках электроники 12 — 19.

В отличие от известных аналогов диапазон измеряемых линейных перемещений разработанных ДМВ расширен в 5 раз, погрешность измерения перемещений для электромагнитного датчика не превышает допустимого значения при воздействии внешних электромагнитных полей с индукцией до 90 мТ. Результат измерения волоконно-оптического преобразователя, как видно из формулы (4), инвариантен к изменениям мощности источника излучения и коэффициента отражения контролируемой поверхности.

В работе показано, что получение алгоритма реализации тестового метода на основе показательной зависимости требует либо формирования в устройствах тестов двух типов: аддитивных и мультипликативных, либо применения функциональных тестов. Рис. 3 иллюстрирует способ контроля перемещений с повышенной точностью и стабильностью на основе описания ФП датчика показательной функцией и использования функциональных тестов. На рис. 3 а) приведена структурная схема волоконно-оптического датчика перемещений, на базе которого реализован разработанный способ, на рис. 3 б) схематически отображен путь луча света через пластину. Проводятся три такта измерения, в каждом из которых свет пропускают через комбинации прозрачных и полупрозрачных пластин 9 и 10, размещенных между торцом волоконно-оптического жгута и объектом контроля. Сигнал с выхода фотоприемника в каждом из трех тактов будет равен:

$$y_1 = q_0 + q_1 P_f K_{dn} \exp[-2L\psi_1], \quad (5)$$

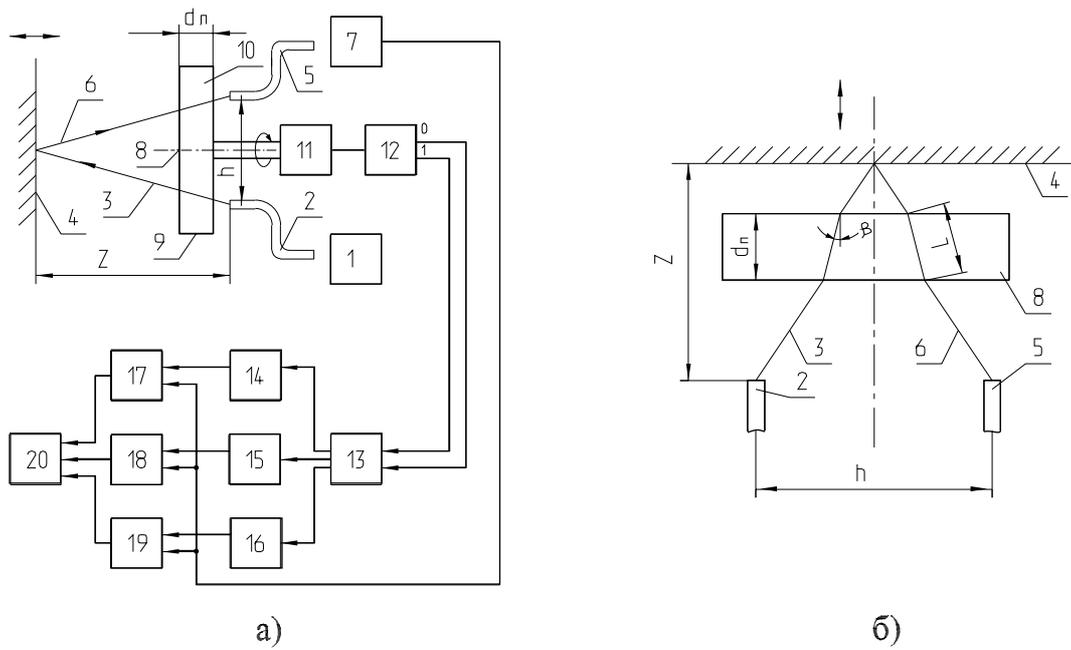


Рис. 3. Волоконно-оптический датчик перемещений на основе функциональных тестов: а) структурная схема, б) геометрическая интерпретация прохождения света через комбинированную пластину

$$y_2 = q_0 + q_1 P_f K_{dn} \exp[-(L\psi_1 + L\psi_2)], \quad (6)$$

$$y_3 = q_0 + q_1 P_f K_{dn} \exp[-2L\psi_2]. \quad (7)$$

Здесь q_0 , q_1 — коэффициенты преобразования, отражающие воздействие ДФ на датчик, P_f — мощность света на выходе излучающего жгута волоконных световодов 2, K_{dn} — коэффициент, учитывающий диаграмму направленности жгута 2, отражение света от поверхности 4 и т.д. L — длина пути луча света в пластине, ψ_1 , ψ_2 — коэффициенты поглощения света в материалах прозрачной и полупрозрачной пластин, соответственно. Используя (5), (6) и (7), находят величину

$$L = (\ln[(y_3 - y_2)/(y_2 - y_1)]/(\psi_1 - \psi_2)). \quad (8)$$

Измеряемое расстояние z , исходя из геометрических соображений (см. рис. 3, б), можно представить следующей формулой

$$z = d_n + \frac{1}{n_n} \left(\frac{h}{2\sqrt{L^2 - d_n^2}} - 1 \right) \sqrt{L^2(1 - n_n^2) + n_n d_n^2}, \quad (9)$$

где L находится в соответствии с выражением (8), n_n — коэффициент преломления света на границе воздух - пластина, d_n — толщина пластины, h — расстояние между центрами торцов жгутов волоконных световодов 2 и 5. Величина L зависит сложным образом от измеряемого расстояния z (9) и является функциональным тестом z . Результат измерения z , как видно из выражений (8) и (9), не зависит от величин q_0 , q_1 , P_f , K_{dn} . Вычисления по формулам (5) — (9) осуществляются в блоках 13 — 20 (см. рис. 3, а). По сравнению с известными датчиками рассмотренный новый способ измерений позволяет исключить влияние на результат измерений коэффициента отражения контролируемой поверхности,

мощности источника излучения, внешних засветок и параметров фотоприемника. Диапазон изменения измеряемого параметра расширен в 5 раз по сравнению с однотактными волоконно-оптическими датчиками перемещений и составляет 10 мм.

В работе предложены меры, способствующие повышению эффективности тестового метода. Они сочетают в себе реализацию тестовых измерений и мероприятия, направленные на гарантированную установку ЧЭ датчиков на заданном расстоянии от объекта контроля, соответствующем определенным точкам их ФП. Все эти меры направлены на уменьшение методической погрешности, возникающей в результате несоответствия характеристики датчика виду математической модели, положенной в основу работы тестового алгоритма.

Предложен новый метод измерений, при котором ЧЭ датчиков расположены на заданном расстоянии от объекта контроля. Метод обеспечивает работу преобразователя на линейном участке его ФП. Он реализуется на основе анализа второй производной постоянной составляющей сигнала преобразователя, полученной методом конечных разностей. Пусть $U_1 = f(x)$ — величина напряжения, снимаемого с ЧЭ преобразователя в некоторой, расположенной на его характеристике и произвольно взятой точке x , $U_2 = f(x + \Delta)$, $U_3 = f(x - \Delta)$ — величины напряжений, снимаемых с ЧЭ преобразователя в точках $x + \Delta$ и $x - \Delta$ ($\Delta \neq 0$), расположенных в окрестности точки x . Суть метода заключается в том, что в устройствах, его реализующих, определяют значение сигнала $S = U_2 + U_3 - 2U_1$, величина которого пропорциональна значению второй производной функции $U = f(x)$, описывающей характеристику датчика. Сравнение с нулем значения S дает возможность определить, на каком участке характеристики находится ЧЭ датчика. Если $S > 0$, он расположен на вогнутом участке характеристики, в случае $S < 0$ — на выпуклом. ЧЭ преобразователя перемещают в нужном направлении до попадания в точку перегиба функции преобразования при выполнении равенства $S = 0$. В разработанных ДМВ величины U_1 , U_2 и U_3 формировались в дополнительных каналах измерения датчика или путем организации нескольких циклов измерения. Метод позволяет в автоматическом режиме удерживать ЧЭ датчика на заданном расстоянии от объекта контроля, которое соответствует линейному участку его функции преобразования на протяжении всего цикла измерений. Разработанный метод хорошо согласуется с тестовым и позволяет свести к минимуму методическую погрешность тестового алгоритма.

Предложен новый способ бесконтактной установки ЧЭ датчиков на заданном расстоянии от поверхностей исследуемых объектов в автоматическом режиме на протяжении всего цикла измерений. В разработанных ДМВ данный способ используется в сочетании с дифференциально-тестовым методом. Гарантированная установка ЧЭ датчика в рабочую точку при идентичности и симметричности характеристик каналов измерения позволяет устранить нелинейность и смещение ФП датчиков. Применение тестового метода в ДМВ после установки ЧЭ датчика в рабочую точку дает возможность добиться инвариантности результатов измерений к ДФ.

Приведен пример реализации способа бесконтактной установки на базе волоконно-оптического измерителя вибраций (ВОИВ), который содержит два

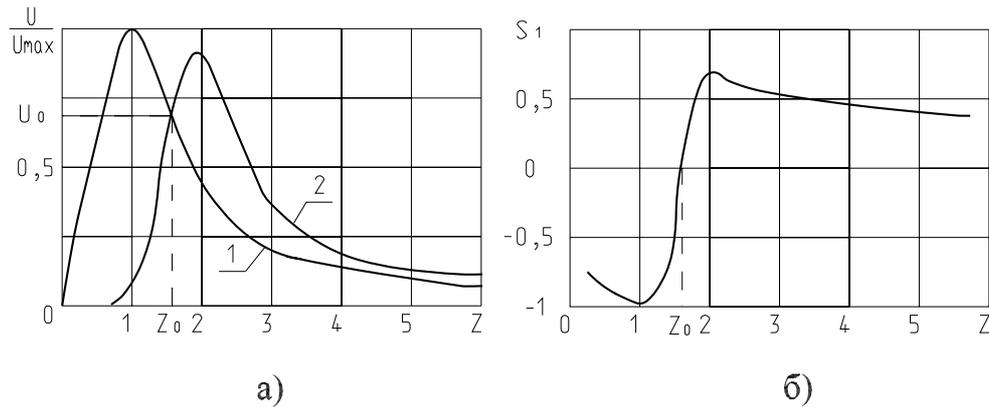


Рис. 4. Графики зависимостей выходных сигналов с двух измерительных каналов (а) и сигнала $S_1 = U_2 - U_1$ (б) от величины измеряемого параметра z

канала измерения, неравноудаленных от контролируемой поверхности. Характеристики каналов $U_1 = f_1(z)$ и $U_2 = f_2(z)$, которые в общем случае могут быть неидентичными, представлены на рис. 4 а). U_1, U_2 — сигналы с выходов двух измерительных каналов, z — величина расстояния до контролируемого объекта, относительно которого устанавливается датчик. Согласно способу бесконтактной установки в датчике формируют сигнал $S_1 = U_2 - U_1$ и сравнивают значение данного сигнала с нулем. Зависимость $S_1 = f(z)$ приведена на рис. 4 б). Как видно из рисунка, при $z < z_0$ величина $S_1 < 0$, а при $z > z_0$ величина $S_1 > 0$, где z_0 — абсцисса точки пересечения зависимостей $U_1 = f_1(z)$ и $U_2 = f_2(z)$. Измерение контролируемого параметра проводят при установочном зазоре $z = z_0$. Для этого при $S_1 < 0$ зазор между комбинированным датчиком и контролируемым объектом увеличивают, а при $S_1 > 0$ — уменьшают до получения $S_1 = 0$. Можно выполнять установку и контроль рабочего расстояния при вибрирующей поверхности. В этом случае добиваются выполнения соотношения $S_{1av} = 0$, где S_{1av} — постоянная составляющая сигнала S_1 . При медленных перемещениях датчика относительно неподвижной поверхности осреднения выполнять не требуется. Таким образом, при условии равенства нулю разностного сигнала происходит бесконтактная установка преобразователя в точку пересечения характеристик его измерительных каналов.

Наличие выработанных четких закономерностей, хорошо реализующихся на аппаратном уровне, позволяет устанавливать датчик в требуемую точку в автоматическом режиме непосредственно в процессе измерений, а в случае возникновения отклонений от рабочего расстояния — приводить преобразователь в исходное положение относительно контролируемого объекта. Найдены условия обеспечения работоспособности способа. Это одновременное выполнение следующих требований: $a_2 \neq b_2$; $a_2 \neq 0$; $b_2 \neq 0$. Здесь a_2, b_2 — параметры линейных моделей, аппроксимирующих ФП измерительных каналов в окрест-

ности точки их пересечения. Для достижения минимальной погрешности позиционирования параметры a_2 и b_2 должны иметь разные знаки и как можно большие значения. После установки в рабочую точку в устройствах реализуются тестовые алгоритмы, позволяющие устранить влияние ДФ, вносящих мультипликативную погрешность в результат измерений.

В ВОИВ, на базе которого был реализован способ бесконтактной установки ЧЭ датчиков на заданном расстоянии от поверхностей исследуемых объектов, дополнительно формировался сигнал $S_2 = U_1 + U_2$. В установившемся режиме поддерживалось равенство $S_{2av} = const$, то есть поддерживалась постоянная чувствительность к вибрации. За счет выполнения условий $S_{1av} = 0$ и $S_{2av} = const$ обеспечивалось измерение вибрации при постоянном зазоре и стабилизировалась чувствительность ВОИВ к вибрации. В процессе измерения вибраций из сигнала S_1 выделялась переменная составляющую $S_{1\sim}$, по величине которой определяли амплитуду колебаний контролируемой поверхности.

В результате применения способа бесконтактной установки в сочетании с тестовым методом в ВОИВ, в отличие от известных аналогов, удалось устанавливать и контролировать рабочее расстояние между ЧЭ и исследуемым объектом непосредственно в процессе измерения вибраций и вне зависимости от изменений мощности источника излучения, коэффициента отражения поверхности контролируемого объекта, а также от небольших перекосов торца жгута волоконных световодов. Чувствительность к вибрации поддерживалась постоянной в рабочей точке. ВОИВ позволяет с точностью 0,01 мм контролировать рабочий зазор.

Способ работоспособен и в случае использования двух датчиков различной физической природы. Преобразователи должны быть выполнены в едином конструктиве и иметь соответствующие характеристики.

Большой класс ДМВ составляют датчики, преобразующие силу, момент, давление и т.д. в регистрируемое перемещение посредством упругого ЧЭ, на который также действуют внешние ДФ. В таких случаях точное измерение перемещения ЧЭ не позволяет устранить влияние ДФ на результат измерения. Особенно сильно свойства и характеристики ЧЭ изменяются под действием температуры. Именно для таких датчиков разработаны комбинированные методы, основанные на тестовых и вспомогательных измерениях.

Предложен способ температурной коррекции выходной характеристики преобразователей, основанный на тестовых измерениях и впервые реализуемом бесконтактном измерении температуры ЧЭ по его проводимости вихретоковым методом. Термокомпенсированный датчик давления (ТДД) с волоконно-оптическими и вихретоковым каналами измерения изображен на рис. 5.

ТДД содержит гибкий ЧЭ в виде мембраны 1, закрепленный по контуру внутри обоймы 2 корпуса датчика. В обойме 2 помещены приемно-передающий волоконный жгут 3, состоящий из излучающего и двух приемных жгутов волоконных световодов, соединенных, соответственно, с источником излучения и двумя фотоприемниками. Соосно с приемно-передающим жгутом установлен вихретоковый преобразователь (ВТП) 4 в каркасе 5, содержащий первичную 6 и вторичную 7 обмотки, подключенные, соответственно, к генератору синусоидального тока и преобразователю параметров ВТП.

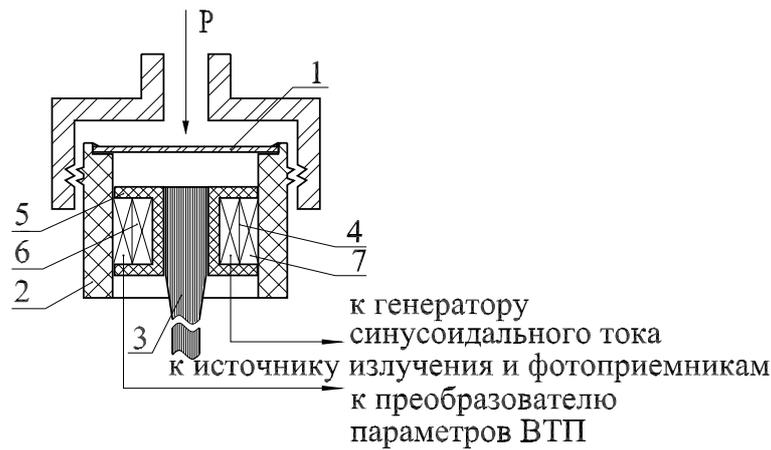


Рис. 5. Термокомпенсированный датчик давления

В нормальных условиях величины сигналов с фотоприемников пропорциональны прогибу мембраны датчика, который вызывается измеряемым давлением. Прогиб мембраны, в свою очередь, зависит от измеряемого давления p . При повышении температуры за счет изменения модуля упругости E_t материала мембраны возникает неучтенный дополнительный прогиб ЧЭ. Искомое давление определяется по следующей формуле

$$p = \frac{16h^3 E_0 (1 + B_E \Delta t) z}{3R^4 (1 - \mu^2)}, \quad (10)$$

где h , R — толщина и радиус ЧЭ ТДД, E_0 — модуль упругости материала ЧЭ при нормальной температуре t_0 , B_E — температурный коэффициент модуля упругости материала ЧЭ, Δt — разность температур, $t - t_0$, μ — коэффициент Пуассона. Для ЧЭ, выполненных из мягкой стали и бронзы, при нагреве на каждые 100°C значение погрешности при определении давления p увеличивается на 1,25 %. Зависимость температуры нагретого металла от его удельной электрической проводимости σ_t выражается известной формулой: $t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_t} - 1 \right)$, α — линейный температурный коэффициент сопротивления, σ_0 — проводимость металла при 0°C . Измерив величину проводимости σ_t при температуре t , можно вычислить температуру нагретого ЧЭ. Для бесконтактного определения температуры мембраны ТДД по ее проводимости был использован малогабаритный ВТП, выходной сигнал которого зависит от обобщенного параметра $\beta = R_{ext} \sqrt{\omega \sigma_t \mu_0}$, который в свою очередь зависит от σ_t . Здесь R_{ext} — радиус наружной обмотки ВТП, ω — круговая частота тока возбуждения ВТП, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Значение t , подставленное в формулу (10), позволяет скорректировать измеряемое давление с учетом температуры среды, контактирующей с мембраной ТДД.

Предлагаемый ТДД позволяет повысить точность измерений по сравнению с известными аналогами за счет исключения погрешностей, возникающих при изменении температуры среды, давление которой измеряется. Он дает возможность определять не только давление, но и температуру контактирующих с мембраной датчика газа, жидкости или насыщенных паров топлив и, тем самым, расширить функциональные возможности ТДД.

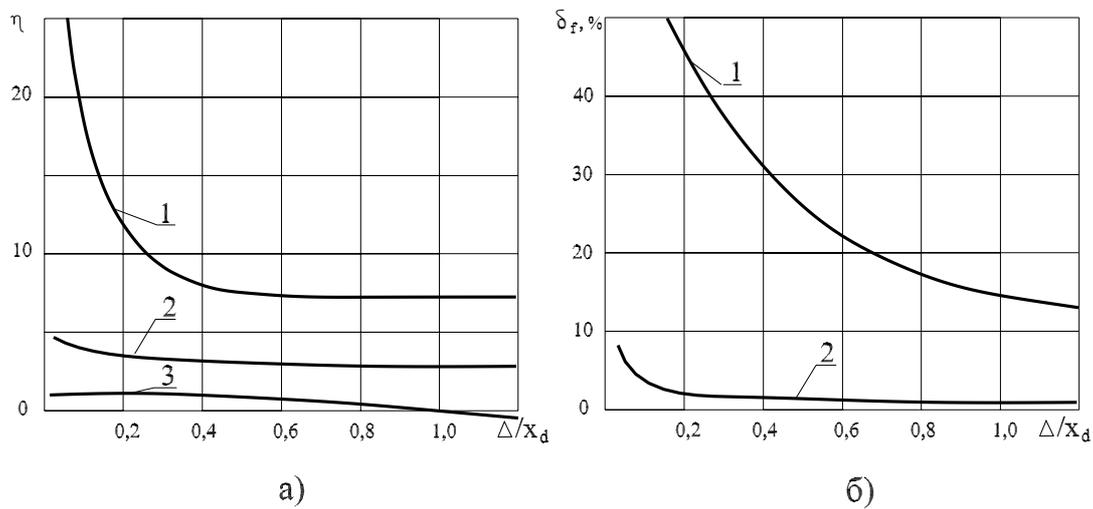


Рис. 6. Типовые зависимости а) некоррелированных составляющих η погрешностей тестовых алгоритмов при использовании кусочно-линейной (1), степенной (2) и дробно-рациональной (3) аппроксимирующих функций; б) погрешностей формирования тестов δ_f для алгоритмов на основе двух типов тестов (1), одного типа тестов (2)

В данном разделе рассматриваются также преобразователи перемещений, вибраций, положения и давления, реализующие разработанные методы и теоретические положения. Они основаны на описании характеристик ДМВ ДРСТФ, используют тесты только одного вида: аддитивные или функциональные и корректирующие каналы измерения с такой же или с отличной от основного канала физической природой. Ряд датчиков с совмещенными каналами измерения обладают возможностями контроля вида своих характеристик. Результаты измерений разработанных ДМВ не зависят от параметров функций преобразования датчиков. Диапазон измерений ДМВ в результате использования в них алгоритмов реализации тестового метода, основанных на описании нелинейных ФП ДРСТФ в 5- 10 раз расширен по сравнению с датчиками на основе кусочно-линейной аппроксимации.

В пятой главе рассмотрены конструктивно-технологические особенности разработанных ДМВ на основе тестовых измерений. Приводится анализ эффективности разработанных способов измерений и реализующих их датчиков. Получены аналитические выражения для оценки погрешностей тестовых ДМВ на основе описания их ФП ДРСТФ.

Тестовые методы повышения точности и стабильности дают возможность существенно уменьшить коррелированную составляющую погрешности измерений. Однако, некоррелированная (случайная) составляющая погрешности при реализации тестовых алгоритмов в датчиках не подавляется, а усиливается, в некоторых случаях весьма значительно. Как видно из рис. 1 б), в алгоритмах, основанных на кусочно-линейном описании ФП датчиков, случайная составляющая η погрешности измерений возрастает более чем в 20 раз по сравнению с аналогичной погрешностью, возникающей при однократном (не тестовом) измерении и малых величинах тестов (до 0,2 от диапазона изменения измеряемой

величины). Найдены аналитические выражения, описывающие зависимость величины η от величин тестов для тестовых алгоритмов, основанных на ДРСТФ представлении характеристик преобразователей. Ниже приведено выражение для η , полученное при дробно-рациональном описании ФП датчиков:

$$\eta_{dr} = (x^2 - \Delta^2) \sqrt{1 + \frac{(x + \Delta)^2}{4x^2} + \frac{(x - \Delta)^2}{4x^2}}. \quad (11)$$

Данная формула позволяет для любой точки диапазона измерения определить степень увеличения случайной погрешности для различных величин аддитивных тестов Δ для тестового алгоритма 1 табл. 1. Аналогичные формулы были получены для всех разработанных алгоритмов реализации тестового метода. Графики типовых зависимостей отношений случайных составляющих η погрешностей тестовых измерений к аналогичной составляющей погрешности одноконтурного измерения при кусочно-линейном (кривая 1), степенном (2) и дробно-рациональном (3) описании ФП датчиков приведены на рис. 6 а). Из графиков видно, что случайная составляющая погрешности при аппроксимации ФП датчика степенной функцией возрастает не более чем в 3 раза, при дробно-рациональной — в 1,1 - 1,5 раза. Для других рассматриваемых в работе функций значение η не превышает 2 по всему диапазону Δ/x_d . Здесь x_d — диапазон изменения измеряемой величины. Таким образом, можно говорить о существенном снижении случайной погрешности тестовых измерений при ДРСТФ подходе по сравнению с кусочно-линейной аппроксимацией.

Другой важной составляющей погрешности является погрешность формирования тестов Δ_f .

Расчетные формулы для Δ_f были получены непосредственно из выражений алгоритмов реализации тестового метода следующим образом:

$$\Delta_f = \frac{\partial x}{\partial \Delta} \Delta_\Delta + \frac{\partial x}{\partial K} \Delta_K; \quad \Delta_f = \frac{dx}{dF} \Delta_F.$$

Здесь Δ_Δ , Δ_K и Δ_F — абсолютные погрешности, обусловленные отличием действительных значений аддитивного, мультипликативного и функционального тестов от соответствующих номинальных значений. Были проанализированы полученные выражения для относительных погрешностей δ_f для известных тестовых алгоритмов на основе двух типов тестов и для полученных на основе одного типа тестов. На рис. 6 б) приведены графики типовых зависимостей относительных погрешностей формирования тестов от величины аддитивного теста, Δ/x_d для алгоритмов на основе аддитивных и мультипликативных тестов и для алгоритмов, использующих только аддитивные тесты. Как видно из приведенных графиков, погрешность формирования тестов для алгоритмов на основе одного типа тестов существенно снижена.

Величины тестов непосредственно связаны с интервалами аппроксимации. Поэтому в работе определялось необходимое количество интервалов аппроксимации и средняя длина аппроксимирующего участка для широко распространенного случая кусочно-линейного описания ФП ДМВ, а также для используемого в работе кусочно-нелинейного на основе ДРСТФ.

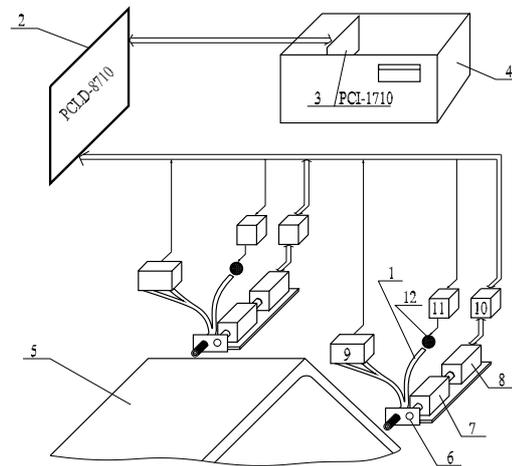


Рис. 7. Фрагмент АСУ стенда "Испытания кузова на изгибную и крутильную жесткость"

Расчеты показали, что необходимое количество интервалов аппроксимации для случая кусочно-линейного описания ФП ДМВ в диапазоне измерений от 10 мкм до 2 мм для существенно нелинейной функции составит не менее 29 участков при погрешности от нелинейности 1 %, а при погрешности 3 % — не менее 16 линейных участков. Средняя длина линейного участка составляет 0,1 мм. Величины используемых тестов должны укладываться в полученное для участка аппроксимации значение. Столь малые значения тестов при реализации тестовых алгоритмов приводят к усилению в десятки раз быстропеременных случайных погрешностей. При описании ДРСТФ ФП ДМВ средняя длина аппроксимирующего участка увеличивается в 5 — 10 раз в зависимости от значения допустимой погрешности аппроксимации.

Были рассчитаны также составляющие погрешности, связанные с отличием реальной ФП ДМВ от номинальной, динамические погрешности, определяемые характером изменения измеряемой величины между тактами измерений и инерционностью ЧЭ ДМВ. Значения, полученные в результате расчетов соответствуют величинам аналогичных погрешностей известных аналогов.

Таким образом, в ДМВ на основе тестовых измерений, ДРСТФ и одного типа тестов существенно уменьшены погрешности формирования тестов и в десятки раз снижена некоррелированная (случайная) погрешность измерений по сравнению с известными аналогами. На основании достигнутых результатов был сделан вывод о высокой эффективности разработанных алгоритмов реализации тестовых методов. Полученные расчетные значения подтверждены экспериментальными исследованиями, проведенными на ИВК для десятков ДМВ.

В шестой главе рассмотрены примеры практического применения инвариантных к ДФ ДМВ. Приводятся результаты испытаний разработанных ДМВ в условиях ДФ.

Волоконно-оптический измеритель вибрации (ВОИВ) нашли практическое применение как в виде автономных приборов, так и в составе АСУ. ВОИВ 9802 используются в стенде "Испытания кузова на изгибную и крутильную жесткость". Одним из параметров, контролируемым в процессе испытаний, являлась

вибрация элементов кузова, для диагностики которой в разных точках кузова были установлены датчики ВОИВ. Фрагмент АСУ стенда с ВОИВ, терминальной панелью 2, платой 3 сбора данных, управляющим ПК 4 и фрагментом кузова 5 приведен на рис. 7. Каждый ВОИВ установлен на элементе подачи 6, жестко связанном с преобразователем 7 вращения электродвигателя 8 в поступательное движение. В качестве такого преобразователя может использоваться, например, червячная передача, а в качестве двигателя — шаговый электродвигатель. Выходной сигнал ВОИВ через устройство согласования 9, преобразующее напряжения с выходов фотоприемников (установлены на плате устройства согласования), соединенных со жгутами приемных световодов, до уровня входного сигнала АЦП, подается на комбинированную терминальную панель 2, а с нее — на плату сбора данных.

Размещаемые в зоне контроля ЧЭ ВОИВ имеют малые габариты, массу, хорошую гибкость, на них не действуют электрические и магнитные помехи. В ВОИВ предусмотрена возможность автоматической установки рабочего расстояния между торцом волоконно-оптического жгута и поверхностью контролируемого объекта непосредственно в процессе измерений, вне зависимости от изменений мощности источника излучения, отражающих свойств поверхности и внешних засветок, а также поддержания на постоянном уровне чувствительности к вибрации при заданном установочном зазоре. Ослаблено действие на ВОИВ таких ДФ, как запыленность среды между торцом волоконно-оптического жгута и объектом контроля, наличие внешних засветок, загрязнение поверхности вибрирующего элемента и изменения мощности источника излучения.

Двухканальный волоконно-оптический датчик положения (ВОДП 9103) использовался в системе позиционирования лазерного микроскопа ЛСМ. В ВОДП формирование разностного сигнала с двух каналов измерения производилось путем вычитания самих токов фотодиодов; поверхность контролируемого объекта освещалась модулированным светом с помощью полупроводникового лазера; длительность импульса лазера выбиралась кратной $1/50\text{Гц}=20\text{мс}$. Включение фотодиодов навстречу друг другу позволило произвести вычитание токов фотодиодов до их преобразования в напряжение. Освещение контролируемой поверхности модулированным светом дало возможность отказаться от измерения постоянной составляющей сигналов фотодиодов, поэтому влияние изменения напряжения смещения преобразователя тока фотодиода в напряжение, изменение напряжения смещения усилителей разностного сигнала устранено. Выбор длительности импульса лазера кратной $1/50\text{Гц}=20\text{мс}$ позволил полностью подавить наводку, действующую с частотой 50 Гц и проникающую как в виде пульсаций света от ламп накаливания, так и в виде электромагнитной помехи.

Электромагнитные ЭДП 01 и волоконно-оптический ВОДП 0504 датчики перемещений использовались в АСУ стенда "Испытания капота, крыши багажника на долговечность". Применение тестовых алгоритмов на основе ДРСТФ и одного типа тестов позволили существенно, в 10 раз уменьшить случайную погрешность измерений. В процессе проведения испытаний была зарегистрирована индукция электромагнитного поля на уровне 80 мТ. При этом погрешность измерений ЭДП осталась прежней (1 %).

Термокомпенсированный датчик давления ТДД 01В (рис. 5) нашел примене-

ние в АСУ установкой правки штанг (УПШ), которая предназначена для правки растяжением новых и бывших в эксплуатации насосных штанг. ТДД 01В использовался для измерения давления в гидромагистрале. Он установлен на насосной станции для подачи сигнала на промышленный компьютер, входящий в состав АСУ УПШ с целью определения усилия вытяжки штанги. Сигналы с двух датчиков — давления и перемещения обрабатываются в компьютере и дают информацию о давлении в гидромагистрале и удлинении штанги в процессе правки, на их основе строится диаграмма растяжения штанги. По результатам обработки диаграммы производится сортировка и дефектация штанг.

Датчик ТДД 01В рассчитан на измерение давления в диапазоне (0 - 250) атм. В результате введения в конструкцию ТДД корректирующего канала для бесконтактного измерения температуры мембраны и контактирующей с ней среды в устройстве реализуется температурная коррекция в диапазоне до 300 °С. Значение погрешности ТДД в указанном температурном диапазоне остается на прежнем уровне (0,5 %).

Результаты испытаний разработанных ДМВ показали следующее. Стабильный уровень погрешности 1-2 % во всем диапазоне измерений волоконно-оптических датчиков сохранялся даже при уменьшении мощности источника излучения на 50 % относительно номинального значения (путем управления током через светодиод), изменениях коэффициента отражения контролируемых объектов от 0,3 до 1 и при наличии внешних источников излучения. Неизменный уровень погрешности (1 %) показали ЭДП в процессе испытаний в электромагнитном поле с индукцией до 100 мТ. При увеличении температуры рабочей среды до 400 °С значение погрешности ТДД оставалось на уровне в 1 %. Кроме того, неоспоримым достоинством разработанных датчиков является их низкая себестоимость.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

1. Анализ математических моделей погрешностей, обусловленных влиянием ДФ на датчики, показал, что наиболее перспективными методами коррекции коррелированных составляющих погрешностей измерений датчиков являются тестовые. Выявлены ограничения тестовых методов в области измерения механических величин: увеличение некоррелированной составляющей погрешности в 20-30 раз по сравнению с однотактным (не тестовым) измерением и необходимость использования обязательно тестов двух типов: аддитивных и мультипликативных. Намечен подход к созданию тестовых алгоритмов повышения точности и стабильности ДМВ на основе обобщенных математических моделей, использующих ДРСТФ.

2. Разработаны новые алгоритмы реализации тестовых методов на основе обобщенных математических моделей, использующих ДРСТФ. Показана возможность использования тестов одного типа: аддитивных, мультипликативных или функциональных для ДМВ, ФП которых описываются математическими моделями заданного вида. Разработанные алгоритмы по сравнению с известными обеспечивают снижение в 10 — 15 раз некоррелированной составляющей погрешности тестовых измерений и уменьшение погрешности формирования тестов на 25 % в среднем по диапазону. Возможность использования только одного

типа тестов снимает конструктивные ограничения в реализации тестовых методов.

3. Впервые предложен способ измерений на основе использования в ДМВ функциональных тестов, позволяющий повысить точность и стабильность датчиков в жестких условиях эксплуатации. Способ обеспечивает стабильный уровень погрешности во всем диапазоне изменения измеряемого параметра в течение длительного времени. Данный уровень сохраняется в условиях воздействия ДФ.

4. Создана база данных, содержащая типовые ФП ДМВ и соответствующие им тестовые алгоритмы. Разработан измерительно-вычислительный комплекс, аппаратное и программное обеспечение которого позволяет по экспериментально полученным характеристикам преобразователей определять соответствующий тестовый алгоритм. Это существенно сокращает сроки проектирования, уменьшает затраты на экспериментальные исследования датчиков.

5. Разработан метод измерений, при котором ЧЭ датчиков расположены на заданном расстоянии от объекта контроля, обеспечивающий работу на линейном участке ФП. Метод реализуется на основе анализа второй производной постоянной составляющей сигнала преобразователя и хорошо согласуется с тестовым. Метод дает уменьшение методической составляющей погрешности тестового метода, возникающей в случае отличия ФП ДМВ от используемой математической модели, до 0,5 %. Установка ЧЭ датчика осуществляется в автоматическом режиме непосредственно в процессе измерений.

6. Предложен способ бесконтактной установки ЧЭ датчиков на заданном расстоянии от поверхностей исследуемых объектов в автоматическом режиме на протяжении всего цикла измерений. Гарантированная установка в заданную точку позволяет свести к минимуму методическую погрешность. Погрешность установки составляет 0,1 % и не изменяется в течение всего времени контроля.

7. Предложен способ температурной коррекции выходной характеристики преобразователей, основанный на тестовых измерениях и впервые реализуемом бесконтактном контроле температуры ЧЭ по его проводимости вихретоковым методом. Способ позволяет поддерживать заданные точность и стабильность в условиях повышенных температур.

8. На основе использования тестов одного типа и ДРСТФ в качестве математических моделей выходных характеристик преобразователей разработана совокупность конструктивных, схмотехнических и алгоритмических решений, обеспечивающих создание ДМВ, устойчивых к дестабилизирующим воздействиям и к их изменению со временем, обладающих расширенным диапазоном изменения измеряемого параметра.

Созданы преобразователи перемещений, вибраций, положения и давления, реализующие разработанные методы и теоретические положения, позволяющие повысить устойчивость ДМВ к ДФ, среди них:

— волоконно-оптические датчики перемещений, рабочий диапазон которых в 5 раз расширен по сравнению с аналогичными преобразователями. Датчики обеспечивают результат, инвариантный к загрязнению контролируемой поверхности, к изменениям мощности источника излучения и к внешним засветкам;

— электромагнитные датчики перемещений, рабочий диапазон которых уве-

личен в 3 раза по сравнению с аналогами. Результат измерений датчиков инвариантен к воздействию внешних электромагнитных полей;

— волоконно-оптические датчики вибраций, обладающие возможностью бесконтактной установки ЧЭ на заданном расстоянии от исследуемых объектов и контроля этого расстояния в автоматическом режиме на протяжении всего времени измерений. Датчики позволяют устанавливать рабочий зазор с точностью 0,01 мм непосредственно в процессе измерения вибраций;

— термокомпенсированный датчик давления на основе использования конструктивно совмещенных волоконно-оптических и вихретокового каналов измерения. Использование двух волоконно-оптических каналов обеспечивает инвариантность результата измерений к вариациям мощности источника излучения и к изменениям отражающих свойств упругой мембраны. Вихретоковый канал дает возможность компенсировать температурное воздействие. Датчик позволяет фиксировать погрешность измерений на уровне 1 % в условиях повышенных до 400 °С температур;

9. Большинство из предлагаемых ДМВ изготовлено в виде экспериментальных образцов и испытано на стендах. Проведенные испытания показали преимущества разработанных датчиков перед используемыми аналогами по ряду их эксплуатационных, метрологических и стоимостных показателей.

Некоторые датчики и реализованные в них алгоритмы и методы внедрены в испытательных стендах, на производстве, в ряде инженерных фирм. Отдельные результаты работы использованы в учебном процессе в техническом вузе.

Таким образом, достигнута поставленная цель и решены задачи, связанные с совершенствованием обширного класса датчиков механических величин на основе развития теории тестовых измерений.

Список публикаций по теме диссертации включает 63 наименования. Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

Книги:

1. Лиманова Н.И. Инвариантные к дестабилизирующим факторам датчики и их моделирование средствами информационных технологий. - М.: НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ, 2005. - 140 с.

2. Лиманова Н.И. Магнитооптические преобразователи перемещений. Учеб. пособие. - Самара: СГАУ, 2003. - 120 с.

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

3. Лиманова Н.И. Инвариантный к воздействию дестабилизирующих факторов волоконно-оптический датчик // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2000.- № 5. - С. 55 - 57.

4. Лиманова Н.И. Тестовый метод повышения точности измерений датчиков с нелинейными дробно-рациональными функциями преобразования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2000. - № 10. - С. 28 - 31.

5. Лиманова Н.И. Многоканальный волоконно-оптический датчик, инвариантный к воздействию дестабилизирующих факторов, для измерения вибраций элементов конструкций ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Серия: Проблемы и перспективы развития двигателе-

строения. Сб. науч. тр., вып. 4, часть 1. - Самара: СГАУ, 2000. - С. 142 - 146.

6. Лиманова Н.И. Проектирование датчиков со структурной избыточностью на основе новых информационных технологий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.- 2003. - N 2 - С. 39-42.

7. Лиманова Н.И., Ионе С.Д. Распределенная автоматизированная система на основе многоканальных волоконно-оптических датчиков для контроля рабочих процессов ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Труды международ. науч.-технич. конф. "Проблемы и перспективы развития двигателестроения", ч. 1. - Самара: СГАУ, 2003. - С. 160 - 165.

8. Лиманова Н.И., Гречишников В.М., Лиманов И.А. Цифровые датчики со структурной избыточностью для контроля перемещений в двигателестроении // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Труды международ. науч.-технич. конф. "Проблемы и перспективы развития двигателестроения", ч. 1. - Самара: СГАУ, 2003. - С. 238 - 243.

9. Лиманова Н.И. Оптоэлектронные датчики с совмещенными каналами измерения, инвариантные к дестабилизирующим факторам // Авиакосмическое приборостроение. - 2005. - N 6. - С. 12 - 16.

10. Лиманова Н.И. Метод контроля параметров вибрации и его практическое использование в автоматизированных системах // Датчики и системы. - 2006. - N 4. - С. 26 - 29.

11. Лиманова Н.И. Помехоустойчивый бесконтактный оптоэлектронный датчик положения для автоматизированных систем контроля уровня вибраций // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, вып. 2(10), ч. 2. - Самара: СГАУ, 2006. - С. 62 - 65.

12. Лиманова Н.И. Термостабильный датчик давления для контроля рабочих процессов ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, вып. 2(10), ч. 2. - Самара: СГАУ, 2006. - С. 55 - 58.

Статьи в материалах зарубежных конференций:

13. Limanova N. Multichannel Fiber Optic Sensors for Precision Measurements of Vibration and Linear Position // Fiber Optic and Laser Sensors XIV. SPIE Proceedings, 7-9 August 1996, Denver, Colorado, v. 2839, pp. 342 - 349.

Патенты и авторские свидетельства:

14. А.с. 1392365 СССР, МКИ G 08 C 9/04. Электромагнитный преобразователь перемещений / Колюхов Н.Е., Лиманова Н.И., Гречишников В.М. и др.- Оpubл. 30.04.88. Бюл. изобр. N 16.

15. А.с. 1446460 СССР, МКИ G 01 B 7/30. Измеритель угловых перемещений / Лиманова Н.И.- Оpubл. 23.12.88. Бюл. изобр. N 47.

16. А.с. 1585693 СССР, МКИ G 01 H 11/00. Электромагнитное измерительное устройство / Лиманова Н.И., Шишкин А.Р., Буров В.Н. - Оpubл. 15.08.90. Бюл. изобр. N 30.

17. А.с. 1561119 СССР, МКИ H01 H 36/00. Бесконтактный переключатель / Дмитриев Ю.С., Лиманова Н.И. - Оpubл. 30.04.90. Бюл. N 16.

18. А.с. 1702511 СССР, МКИ H 03 B 1/00, G01 N 27/00. Генератор синусоидальных сигналов / Шишкин А.Р., Буров В.Н., Лиманова Н.И. - Оpubл. 30.12.91. Бюл. изобр. N 48.

19. А.с. 1779918 СССР, МКИ G 01 В 21/00. Устройство для измерения расстояний до объекта / Лиманова Н.И.- Оpubл. 07.12.92. Бюл. изобр. N 45.

20. А.с. 1779919 СССР, МКИ G 01 В 21/00. Способ измерения расстояний до объекта и устройство для его осуществления / Конюхов Н.Е., Лиманова Н.И., Шишкин А.Р., Гречишников В.М. - Оpubл. 07.12.92. Бюл. изобр. N 45.

21. А.с. 1742620 СССР, МКИ G 01 В 21/00. Преобразователь перемещений / Лиманова Н.И.- Оpubл. 23.06.92. Бюл. изобр. N 23.

22. А.с. 1798632 СССР, МКИ G 01 Н 17/00. Способ измерения вибраций и устройство для его осуществления / Конюхов Н.Е., Лиманова Н.И., Шишкин А.Р. и др. - Оpubл. 28.02.93. Бюл. N 8.

23. А.с. 1805291 СССР, МКИ G 01 В 21/00. Преобразователь перемещений / Лиманова Н.И., Конюхов Н.Е. - Оpubл. 30.03.93. Бюл. изобр. N 12.

24. Патент РФ N 2115896 на изобр., МПК6 G01 К 7/16. Преобразователь температуры / Лиманова Н.И., Козырев Ю.Г. - Оpubл. 20.07.98. Бюл. изобр. N 20.

25. Патент РФ N 2267085 на изобр., МПК7 G01 В 11/16, G02 В 26/06. Волоконно-оптический датчик / Ионе С.Д., Лиманова Н.И. - Оpubл. 27.12.2005. Бюл. изобр. N 36.

26. Патент РФ N 2287791 на изобр., МПК G01L 9/00. Термокомпенсированный датчик давления / Лиманова Н.И., Шишкин П.А., Лышов В.А. - Оpubл. 20.11.2006. Бюл. изобр. N 32.

27. Решение ФИПС о выдаче патента на изобр. по заявке N 2005114796/28 (016954) от 23.06.2006. Волоконно-оптический датчик / Лиманова Н.И., Ионе С.Д., Строгов М.В.

Статьи в сборниках трудов:

28. Денисов В.А., Лиманова Н.И. Диагностическая система для оперативного контроля механических факторов коммутации электрических микромашин // Специальные электрические машины: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КПТИ, 1983. - С.118 - 124.

29. Лиманова Н.И., Голубева Т.В. Электромагнитное устройство с повышенной температурной стабильностью. Рукопись деп. 05.09.84 в ВИНТИ, N 6077 - 84.

30. Лиманова Н.И., Пиганов М.Н., Капцов А. В. Физико-математическая модель электромагнитной и механической систем электромагнитного устройства // Оптоэлектронные и электромагнитные датчики механических величин. Сб. науч. тр. Куйбышев: КуАИ, 1988. - С. 56 - 59.

31. Лиманова Н.И. Способы бесконтактного измерения перемещений и параметров вибраций с помощью волоконно-оптических датчиков со структурной избыточностью // Современные методы и приборы неразрушающего контроля: Матер. семин. - М.: ЦРДЗ, 1992, С. 11 - 17.

32. Конюхов Н.Е., Лиманова Н.И. Датчики перемещений с совмещенными каналами измерения различной физической природы // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр., вып. 12. - Пенза: ППИ, 1992. - С.77-83.

33. Лиманова Н.И. Оригинальный волоконно-оптический датчик для контроля вибраций конструкций ГТД // Доклады Международн. науч.-техн. конф.,

посвященной памяти Генерального конструктора аэрокосмич. техники акад. Н.Д.Кузнецова, ч. 2. - Самара: Сам. науч. центр РАН, 2001. - С.63-69.

34. Лиманова Н.И., Гречишников В.М., Лиманов И.А. Обобщенная энергетическая характеристика оптоэлектронных датчиков ДЛА, построенных на основе ВОЛС // Доклады Межд. науч.-техн. конф., посвященной памяти Генерального конструктора аэрокосмич. техники акад. Н.Д.Кузнецова, ч. 2. - Самара: Сам. науч. центр РАН, 2001. - С.133-138.

35. Лиманова Н.И. Устойчивые к воздействию дестабилизирующих факторов датчики на основе функциональных тестов с многоступенчатой обработкой сигнала // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XIУ Всерос. науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. - М.: МГИЭМ, 2002. - С.91-92.

36. Лиманова Н.И., Конюхов Н.Е. Распределенная автоматизированная система на основе многоканальных волоконно-оптических датчиков. // Актуальные проблемы науки и образования: Труды Международн. юбилейн. симп-ма, т. 2. - Пенза: Информ.-издат. центр ПГУ, 2003. - С.301-304.

37. Лиманова Н.И. Дифференциальные уравнения и параметры магнитной линии // Актуальные проблемы радиоэлектроники: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. - Самара: Изд-во "НТЦ", 2003. - С.74-75.

38. Лиманова Н.И. Повышение точности измерений датчиков на основе обобщенных математических моделей, использующих трансцендентные функции // Профессиональное образование в научно-педагогических исследованиях: Сб. науч. ст. - Тольятти: ТГУ, 2003. С.249-253.

39. Лиманова Н.И. Математическое моделирование датчиков со структурной избыточностью // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XU Всерос. науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. - М.: МГИЭМ, 2003. - С.52-54.

40. Лиманова Н.И. Двухканальный волоконно-оптический датчик положения с модулированным излучением // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XUI Всерос. науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. - М.: МГИЭМ, 2004. - С.151-153.

41. Лиманова Н.И., Ионе С.Д. Варианты аппаратной реализации современных автоматизированных систем // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XUII Всерос. науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. - М.: МГИЭМ, 2004. - С. 277-278.

42. Лиманова Н.И. Многофункциональный датчик для экстремальных условий работы // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. - Самара: СГАУ, 2005. С. 144 - 146.

43. Конюхов Н.Е., Лиманова Н.И. Датчики механических величин, инвариантные к дестабилизирующим факторам // Датчики и системы - 2005. Материалы Международ. НТК. - Пенза: ФНПЦ ФГУП "НИИФИ", 2005. - С. 42-43.

Тезисы докладов на Всесоюзных и Международных конференциях:

44. Лиманова Н.И., Лиманов И. А., Макаров А. В. и др. Термостабилизированный вихретоковый преобразователь // Электромагнитные методы контроля качества материалов и изделий: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф, ч. 1. - Омск: ОПИ, 1983. - С. 90-91.

45. Лиманова Н.И. Устройство для контроля перемещений с повышенной точностью и чувствительностью // Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических систем: Тез. докл. Всесоюз. совещ. молодых ученых и спец-ов.- М., 1987. - С. 109.

46. Колюхов Н.Е., Лиманова Н.И. Волоконно-оптические датчики перемещений со структурной избыточностью // Оптические, радиоволновые и тепловые методы и средства неразрушающего контроля качества промышленной продукции: Тез. докл. Всесоюз. науч.-технич. конф. - Саратов, 1991. - С. 5 - 6.

47. Лиманова Н.И. Волоконно-оптические датчики перемещений со структурной избыточностью // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Тез. докл. IV науч.-технич. совещания ученых и специалистов с участием представителей зарубежных стран. - Гурзуф, 1992. - С.16.

48. Лиманова Н.И. Способы повышения точности измерений волоконно-оптических датчиков перемещений // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Тез. докл. Междун. науч.-технич. конф., ч.2. - М.: МГИЭМ, 1993. С.215 - 216.

49. Лиманова Н.И. Амплитудные, время-импульсные, фазовые волоконно-оптические датчики перемещений со структурной избыточностью // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: Тез. докл. Международ. науч.-технич. конф. - Курск: КПИ, 1993. - С. 50.

50. Лиманова Н.И., Колюхов Н.Е. Волоконно-оптические датчики перемещений со структурной избыточностью // Новые информационные технологии и системы: Матер. докл. Международ. науч.-технич. конф. - Пенза: ПГТУ, 1994. - С. 119.

51. Лиманова Н.И., Колюхов Н.Е. Использование многоканальных волоконно-оптических датчиков для контроля параметров вибраций в элементах конструкций газотурбинных двигателей // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе: Тез. докл. Международ. науч.-технич. конф., вып. 1, ч. 1. - Самара: СГАУ, 1997.- С. 121.

52. Лиманова Н.И., Строгов М.В., Ионе С.Д. Автоматизированная система для исследования механизмов деформации и разрушения различных металлов и сплавов // Физика прочности и пластичности материалов: Сб. тез. XV Международ. конф. - Тольятти: ТГУ, 2003. - С. 3-63.

53. Н.И.Лиманова, М.В.Строгов, А.А.Павлинов Современные аппаратные средства систем автоматического управления // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. - Самара: СГАУ, 2005, С. 146 - 147.

54. Лиманова Н.И. Метод бесконтактного определения температур поверхностей // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Материалы докладов МНТК 21 - 23 июня 2006 г., ч. 2. - Самара: СГАУ. - С. 117.

55. Лиманова Н.И. Волоконно-оптический датчик положения с модулированным излучением, инвариантный к дестабилизирующим факторам // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Материалы докладов МНТК 21 - 23 июня 2006 г., ч. 2. Самара: СГАУ. - С. 118.