

На правах рукописи

Боровик Сергей Юрьевич

**КЛАСТЕРНЫЕ МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ
СТАТОРА И КООРДИНАТ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК
И ЛОПАСТЕЙ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

Специальность 05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (промышленность)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара - 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте проблем управления сложными системами РАН

Научный консультант: Доктор технических наук, профессор
СКОБЕЛЕВ Олег Петрович

Официальные оппоненты: **МЕЛЕНТЬЕВ Владимир Сергеевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный
технический университет», заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники

ЛИХТЦИНДЕР Борис Яковлевич
Заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и информатики»,
профессор кафедры мультисервисных сетей
и информационной безопасности

ЛОМТЕВ Евгений Александрович
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный
университет», профессор кафедры
информационно-измерительной техники

Ведущая организация: **ОАО «КУЗНЕЦОВ»**, г. Самара

Защита диссертации состоится 21 февраля 2012 в 10 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.217.03 ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Галактионовская, 141, корп. 6, ауд. 33.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.217.03; факс: (846) 278-44-00.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» (ул. Первомайская, 18)

Автореферат разослан _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.03, к.т.н.

Н.Г. Губанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Известно, что в современных авиационных газотурбинных двигателях (ГТД), в том числе и турбовинтовентиляторных (ТВВД), радиальные зазоры (РЗ) между статором винтовентилятора (ВВ), компрессора, турбины и торцами лопастей и лопаток оказывают существенное влияние на основные показатели их надежности и экономичности. Поэтому для разработчиков двигателей получение измерительной информации о РЗ в процессе их экспериментальных исследований приобретает особую значимость. Однако получение такой информации происходит в крайне тяжелых условиях работы датчиков в газоздушном тракте (температура до 1500°С, высокие скорости перемещения торцов лопаток, близкие к звуковым, загрязненность и др).

Среди существующих в настоящее время методов наиболее перспективными представляются методы, предусматривающие использование одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника. Первые компьютеризированные системы измерения РЗ с ОВТД, реализующие эти методы, были построены более двух десятилетий тому назад и использовались на российских двигателестроительных предприятиях при проведении стендовых испытаний компрессоров ГТД, в процессе которых были подтверждены их работоспособность, метрологическая состоятельность и надежность (суммарная наработка систем составляла сотни часов). При этом предполагалось, что при получении искомой информации изменения РЗ вызывают упругие и температурные деформации лопаточного колеса только в одном (радиальном) направлении, а изгибные и угловые деформации пера лопаток, а также осевые смещения колеса отсутствуют (работы Белкина В.М., Медянова Ю.И., Нестерова В.Н., Пинеса В.Н., Райкова Б.К., Секисова Ю.Н., Скобелева О.П., Улицкого Ю.К., Хритина А.А.)

Вместе с тем в реальных условиях торцы лопаток совершают сложное многомерное движение и смещение в радиальном направлении, от которого зависит РЗ, является лишь одной из координат, а для получения достоверных данных о РЗ с помощью ОВТД необходима информация об остальных координатных составляющих. Такую многомерную информацию обеспечивают методы, предусматривающие использование кластеров ОВТД, т.е. групп одинаковых датчиков, ЧЭ которых определенным образом ориентированы относительно торца лопатки, а число датчиков в составе кластера соответствует числу искомым координат смещений. В самом начале «нулевых» годов эти методы получили название «кластерных», причем кластерные методы измерения координат, разработанные на раннем этапе своего развития, не ограничивались лопатками, а распространялись на лопасти ВВ, включали другие элементы конструкций (ЭК) как лопаточных, так и поршневых силовых установок (работы Беленького Л.Б., Игначкова С.М., Ильинского С.А., Камаевой О.И., Райкова Б.К., Секисова Ю.Н., Скобелева О.П., Слепнева А.В., Тулуновой В.В.)

Следует отметить, что при решении задач измерений в ГТД, разработанные кластерные методы обеспечивали существенное повышение достоверности информации о РЗ и это, в свою очередь, позволяло получить данные о таких весьма значимых составляющих РЗ, как деформация статора (ДС) на рабочих режимах двигателя. Однако в процессе измерения координат принималось допущение об отсутствии деформаций и существующая потенциальная возможность их оценки оказалась нереализованной.

Кроме того, при анализе существующих методов и средств были выявлены ограничения их практическому использованию, которые связаны с конструктивными особенностями наиболее апробированных высокотемпературных ОВТД, а также с необходимостью выполнения установочных отверстий в статорной оболочке, сосредоточенных на сравнительно небольшой площади, причем число отверстий возрастает вдвое за счет дополнительных ОВТД в измерительных цепях (ИЦ), предназначенных для компенсации температурных воздействий¹. Применение существующих кластерных ОВТД (КОВТД), объединяющих в одном корпусе несколько датчиков, хотя и минимизирует число установочных отверстий, но ограничено сравнительно узким температурным диапазоном, а потому возможно лишь в ВВ.

Дополнительные ограничения связаны с электромагнитным взаимодействием ЧЭ датчиков в составе кластера, сосредоточенного на небольшом участке поверхности статора (сосредоточенный кластер - СК) или в КОВТД, при одновременном преобразовании их выходных параметров, трудностями получения синхросигналов для указанных преобразований в моменты прохождения замками лопаток (основаниями лопастей) геометрического центра (г.ц.) кластера.

Поэтому дальнейшее совершенствование существующих и разработка новых кластерных методов и средств, обеспечивающих построение систем измерения ДС и координат смещений торцов лопаток и лопастей (в том числе РЗ), свободных от указанных ограничений, является актуальной проблемой, решение которой имеет важное значение при экспериментальных исследованиях в процессе доводки ГТД, для диагностики, а в перспективе для использования в системах управления нового поколения ГТД с измеряемыми и регулируемыми РЗ.

Актуальность решаемой проблемы подтверждается также и тем, что проводимые в диссертации работы выполнялись по приоритетным направлениям фундаментальных исследований РАН, утвержденных постановлением Президиума РАН №7 от 13.01.1998 (п.2.3.8 «Фундаментальные проблемы и аппаратные средства управления сложными объектами и структурами», тема «Разработка кластерных методов измерения многомерных процессов и создание на их основе интеллектуальных систем для испытаний, диагностики энергосиловых установок и средств обеспечения их функционирования», гос. рег. № 01.2.00110151), в рамках основных направлений фундаментальных иссле-

¹ Сосредоточенность установочных отверстий на небольшой поверхности может оказать негативное влияние на прочность статорной оболочки.

дований РАН, утвержденных постановлением Президиума РАН №233 от 01.07.2003 (п.2.4.5 «Сложные технические системы и информационно-управляющие комплексы», тема «Интеллектуальные системы сбора и обработки измерительной информации о составляющих многокоординатных смещений элементов конструкций энергосиловых установок с моделированием поведения неизмеряемых составляющих смещений для информационно-управляющих комплексов», гос. рег. №0120.0403302), основных направлений фундаментальных исследований по Программе фундаментальных исследований РАН на период 2007-2011 годы (п.3.10 «Сложные технические системы и информационно-управляющие комплексы») и Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008-2012 гг. (п.24 «Теория сложных информационно-управляющих систем») (тема «Системы сбора и обработки многомерной информации о деформации статора и радиальных зазорах в энергосиловых лопаточных установках для информационно-управляющих комплексов», гос. рег. №0120.0710559), по грантам инициативных проектов РФФИ (№05-08-50185а «Методы получения информации о многокоординатных смещениях элементов конструкций лопаточных силовых установок» (2005-2007 гг.), №08-08-00422а «Разработка и исследование методов получения информации о координатах смещения торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе применения кластеров распределенных по статору высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков» (2008-2010 гг.) и №11-08-01032а «Анализ точности кластерных методов и средств получения информации о координатах смещений торцов лопаток, разработка методов уменьшения погрешностей и принципов построения систем, реализующих эти методы» (с 2011 г.)).

Цель диссертации – разработка и исследование новых и модернизированных кластерных методов и средств измерения ДС и координат смещений торцов лопаток и лопастей; разработка принципов построения и создание систем, реализующих указанные методы, обеспечивающих работоспособность, высокие метрологические показатели и предназначенных для экспериментальных исследований ГТД.

В соответствии с поставленной целью определены *основные задачи диссертации*:

- анализ объекта и конкретных задач измерения ДС и координат смещений торцов лопаток и лопастей; систематизация и классификация существующих кластерных методов и анализ особенностей их применения;
- разработка обобщенной концептуальной модели измерения ДС и смещений г.ц. статора, а на ее основе конкретных кластерных методов измерения указанных и дополнительных параметров – смещений оси винта и биений лопаточного колеса;
- разработка модернизированных методов измерения координат смещений торцов лопаток и лопастей, свободных от выявленных ограничений;

- исследование первичного преобразования смещений торцов лопаток и лопастей на основе моделей электромагнитного взаимодействия ЧЭ кластера ОВТД (КОВТД) между собой и с торцом лопатки (лопасти);
- исследование последующих преобразований индуктивностей ЧЭ в индивидуальных и групповых ИЦ (ИИЦ и ГИЦ) с помощью моделирования процессов в их эквивалентных схемах;
- разработка принципов построения систем измерения ДС и координат смещений торцов лопаток и лопастей на уровне обобщенной структурной схемы и алгоритмов функционирования систем;
- оценка точностных характеристик систем – инструментальных погрешностей (по результатам проведенных исследований первичных (в ЧЭ) и последующих преобразований (в ИЦ)), а также методических погрешностей;
- разработка и изготовление систем измерения ДС и координат смещений торцов лопаток и лопастей, экспериментальное исследование метрологических характеристик систем и проверка работоспособности систем в производственных и лабораторных условиях.

Методы исследования основаны на использовании теории множеств, теории измерений и погрешностей, теории электрических цепей, аппарата дифференциальных и интегральных вычислений, численного анализа и имитационного моделирования на ПЭВМ.

Научная новизна:

- Впервые разработаны методы, обеспечивающие измерение совокупности параметров – деформаций статора, радиальных зазоров, смещений геометрического центра статора в винтовентиляторах и компрессорах (турбинах), оси винта и биений лопаточного колеса, отличающиеся применением всего четырех кластерных одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) (винтовентилятор) или кластеров ОВТД (компрессор (турбина)), а также моделированием деформаций винта или лопаточного колеса с учетом текущих параметров режима, рабочей и внешней среды. Новизна разработанных методов подтверждается патентами на изобретение.
- Разработаны модернизированные кластерные методы измерения координат смещений торцов лопаток и лопастей, которые отличаются от существующих применением неполного кластера с моделированием неизмеряемых координат, использованием разновременного преобразования выходных параметров датчиков в составе сосредоточенного кластера ОВТД (кластерного датчика), распределенным по статору размещением ОВТД при смене функций датчиков с рабочих на компенсационные, что позволяет уменьшить число используемых датчиков и установочных отверстий в статоре, а также взаимное электромагнитное влияние чувствительных элементов в сосре-

доточенном кластере ОВТД (кластерном датчике). Новизна разработанных методов также подтверждается патентами на изобретения.

- Предложена, отличающаяся от существующей с одним чувствительным элементом, новая модель электромагнитного взаимодействия нескольких чувствительных элементов в составе кластера ОВТД (кластерного датчика) друг с другом и с лопаткой (лопастью), которая позволяет получить пространственно-временные зависимости индуктивностей чувствительных элементов с учетом топологии их размещения относительно объекта, геометрических и электрофизических параметров чувствительных элементов и объекта, а для фиксированного момента времени – семейства функций преобразования чувствительных элементов в виде зависимостей индуктивностей чувствительных элементов от координат смещений торцов лопаток (лопастей).

- Разработана новая универсальная модель преобразования индуктивностей чувствительных элементов во всех существующих вариантах групповых измерительных цепей (с идеализированными ключевыми элементами), обеспечивающая получение функций преобразования измерительной цепи в виде зависимости выходного напряжения от индуктивности чувствительного элемента, а также модель для исследования влияния остаточных параметров бесконтактных ключевых элементов.

- Новыми являются обобщенная структура и алгоритмы функционирования систем измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей, в том числе алгоритмы управления сбором, преобразованиями и вычислениями, ориентированные на использование сосредоточенных и распределенных кластеров ОВТД, а также алгоритмы вычисления деформаций статора, смещений геометрического центра статора и оси винта, биений лопаточного колеса оригинальность состава и последовательности операций в которых определяется новизной предложенных методов.

- Впервые расчетным путем получены семейства функций преобразования измерительного канала системы с распределенным кластером из двух ОВТД в виде зависимости выходного напряжения измерительной цепи (напряжения на входе аналого-цифрового преобразователя системы) от координат смещений торцов лопаток (лопастей), что позволило количественно оценить неизученные ранее инструментальные погрешности. Полученные результаты являются новыми, равно как и результаты исследований неизученных ранее методических погрешностей.

Практическая значимость и внедрение. Разработанные структуры и алгоритмы, реализующие новые и модернизированные кластерные методы измерения ДС и координат смещений торцов лопаток и лопастей, доведены до уровня законченных систем, прошедших проверку в лабораторных и производственных условиях. При соответствующей адаптации технических и программных средств под конкретный тип двигателя системы измерения могут быть использованы в процессе стендовых и летных испытаний авиационных, стендовых испытаний наземных ГТД различного типа, а также для

регулирования зазоров в газоздушном тракте в системах управления ГТД нового поколения.

Для проведения стендовых испытаний двигателя НК-93 с закапотированным двухрядным ВВ противоположного вращения через редуктор на Самарском научно-техническом комплексе им. Н.Д. Кузнецова использована система измерения ДС и РЗ в ВВ, в которой реализованы кластерные методы измерения ДС и метод измерения РЗ неполным кластером ОВТД с моделированием неизмеряемых координат. Полученные с ее помощью результаты позволили уточнить важные характеристики и параметры испытываемого двигателя.

В практику лабораторных исследований внедрены системы измерения ДС, радиальных и осевых смещений лопаток (лопастей), в которых предусмотрено применение СК ОВТД (КОВТД) и распределенных кластеров (РК) ОВТД. В технических и программных средствах разработанных систем предназначенных для экспериментальных исследований компрессоров, турбин и ВВ, учтены основные требования и условия, изложенные в технических заданиях ведущих предприятий двигателестроительной отрасли страны. Подтверждена работоспособность систем и проведены экспериментальные исследования их метрологических характеристик. Системы готовы к практическому применению в производственных условиях.

Отдельные результаты работы внедрены в учебный процесс в Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики в рамках курса «Программное обеспечение интеллектуальных систем экспериментальных исследований».

Апробация. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на II международной мультikonференции IASTED (International Multi-Conference on Automation, Control and Application, Novosibirsk, 2005); на пяти международных конференциях «Мехатроника, автоматизация управления», проводимых в рамках 2-6 мультikonференций по проблемам управления (2006, 2008, 2010 гг. – г. Санкт-Петербург; 2007, 2009 – пос. Дивноморское); на международной научно-технической конференции по информационным, измерительным и управляющим системам (г. Самара, 2005 г.); на девяти ежегодных международных конференциях по проблемам управления и моделирования в сложных системах (г. Самара, 2002-2011 гг.); на девяти научно-технических сессиях по проблемам газовых турбин (2002, 2006 г. – г. Москва, 2003, 2007 гг. – г. Санкт-Петербург, 2004, 2010 гг. – г. Уфа, 2005 г. – г. Самара, 2008 г. – г. Рыбинск, 2009 г. – г. Пермь); на XI Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (г. Самара, 2004 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано самостоятельно и в соавторстве 69 работ, в том числе 1 монография, 15 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 12 патентов на изобретения. Опубликованные материалы отражают основное содержание диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, восемь разделов и заключение, изложенные на 257 страницах, включая 118 рисунков и 33 таблицы; список литературы из 154 наименований и 4 приложения.

Основные положения, выносимые на защиту:

- кластерные методы измерения ДС ВВ, компрессора и турбины ГТД, смещений г.ц. статора и оси винта, биений лопаточного колеса;
- модернизированные кластерные методы измерения координат смещений торцов лопаток и лопастей
 - неполным кластером с использованием моделирования неизмеряемых координат,
 - с одновременным преобразованием выходных параметров ЧЭ в составе СК ОВТД (КОВТД),
 - с распределенным по статору размещением ЧЭ (РК ОВТД) при смене функций ЧЭ с рабочих на компенсационные;
- модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ в кластере между собой и лопаткой (лопастью), модели ИЦ, а также результаты исследований семейств функций преобразования (ФП) кластеров ЧЭ и ФП ИЦ;
- структура и алгоритмы функционирования систем измерения ДС и координат смещений торцов лопаток и лопастей, в т.ч. алгоритмы управления сбором, преобразованиями и вычислениями, а также алгоритмы вычисления ДС, смещений г.ц. статора и оси винта, биений лопаточного колеса;
- результаты исследования точностных характеристик систем (инструментальных и методических погрешностей);
- система измерения РЗ и ДС, предназначенная для стендовых испытаний ВВ двигателя НК-93 и системы измерения ДС, радиальных и осевых смещений лопаток (лопастей), предусматривающие применение СК ОВТД (КОВТД) и РК ОВТД.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, где дается анализ существующей проблемы, приводится краткий обзор работ в выбранном направлении, определяются цели и задачи, методы исследования, формулируется научная новизна, практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения о структуре и содержании диссертации.

В первом разделе дано краткое описание ГТД как объекта измерения. Отмечается, что в рабочем процессе смещение материальной точки, выбранной на торце лопатки (лопасти), имеет принципиально векторный характер и определяется несколькими координатами в принятой системе отсчета.

На рисунке 1 приведено упрощенное изображение лопатки (а) и лопасти (б), а также показана система отсчета ($OXYZ$), жестко связанная со статором. При этом положение контролируемой лопатки (лопасти) фиксировано в момент времени, когда материальная точка M расположена на координатной оси Y системы отсчета, начало которой определяется точкой O на поверхности неподвижного статора. Предполагается, что смещения точки M возможны во всех трех направлениях координатных осей системы отсчета: радиальном (вдоль оси Y), осевом (вдоль оси X), в направлении вращения лопаточного колеса или винта (вдоль оси Z). Кроме того, предполагается возможность углового смещения (φ) торца лопатки (лопасти) вокруг оси Y ².

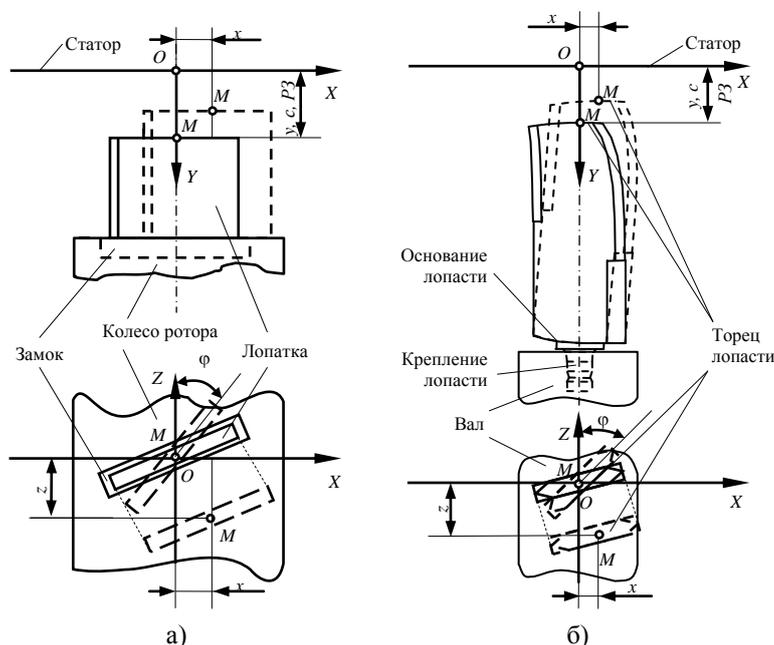


Рисунок 1 – Упрощенные изображения лопатки (а) и лопасти (б), смещения их торцов в системе отсчета $OXYZ$

радиальном (вдоль оси Y), осевом (вдоль оси X), в направлении вращения лопаточного колеса или винта (вдоль оси Z). Кроме того, предполагается возможность углового смещения (φ) торца лопатки (лопасти) вокруг оси Y ².

Рассматриваются существующие на сегодняшний день конструктивные разновидности ОВТД, а также КОВТД с различным числом ЧЭ и топологией их размещения.

Осуществлена наиболее полная систематизация существующих методов измерения координат смещения торцов лопаток (лопастей) на основе СК ОВТД или КОВТД, предусматривающих фиксацию кодов в моменты прохождения замками (основаниями) контролируемых лопаток (лопастей) г.ц. кластера ОВТД (КОВТД) в точке O . В качестве классификационных признаков выбраны количество ОВТД в СК (число ЧЭ в КОВТД), а также топология размещения ЧЭ датчиков. В терминах теории множеств даны описания возможных вариантов методов и получены количественные оценки их числа.

В процессе анализа существующих методов измерения координат смещений торцов лопаток и лопастей, предусматривающих использование СК ОВТД (КОВТД) выявлены ограничения их практическому применению, которые рассматривались ранее при описании актуальности темы.

² Теоретически не являются исключением угловые смещения вокруг осей X и Z .

Во втором разделе приводится описание кластерных методов измерения ДС ВВ, компрессора и турбины, которые обеспечивают, в том числе, измерение РЗ, координат смещений г.ц. статора, координат смещений оси винта в процессе экспериментальных исследований ГТД, а также биений лопаточного колеса компрессора и турбины. Изложению методов предшествует описание обобщенной концептуальной модели измерения ДС и РЗ.

На рисунке 2 представлены два элемента, один из которых (по отношению к другому) является наружным или внутренним. Как правило, наружный ЭК неподвижен (статор в ГТД), а внутренний находится в состоянии движения (вращение лопаточного колеса компрессора или турбины), но существуют также пары, в которых оба ЭК (наружный и внутренний) перемещаются относительно друг друга.

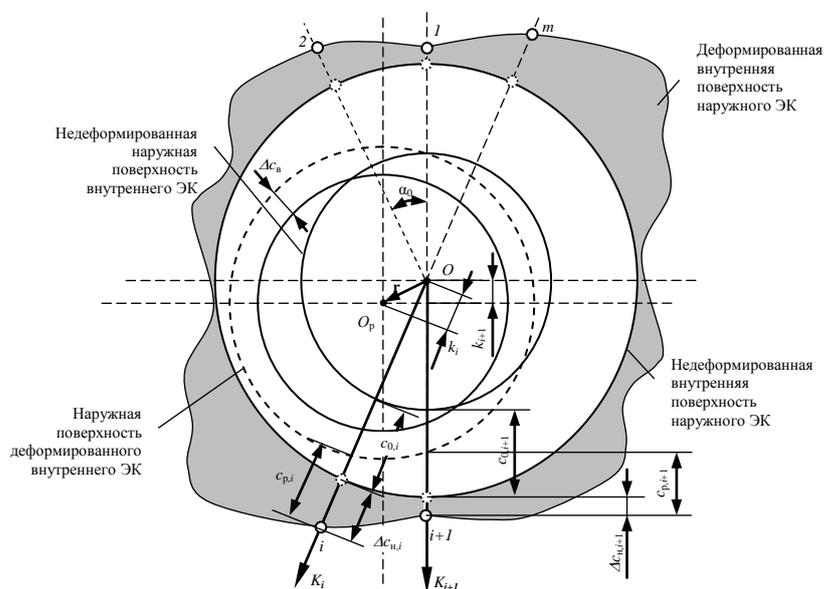


Рисунок 2 – Кластер датчиков размещен на наружном ЭК: деформации, РЗ и смещение г.ц.

Предполагается, что кластер ОВТД размещается на наружном ЭК. Контролируемая датчиками поверхность внутреннего ЭК может быть «непрерывной» (цилиндрическая поверхность диска или вала в опорных подшипниках) или «регулярно-прерывистой» (торцы лопаток и лопастей в ГТД³). ЧЭ датчиков (отрезки проводников) ориентируются в направлении образующих электропроводной поверхности внутреннего ЭК и их выходные параметры (индуктивности) зависят от РЗ между ЧЭ (внутренней поверхностью наружного ЭК) и наружной поверхностью внутреннего ЭК.

Предполагается также, что после сборки силовой установки внутренняя поверхность наружного ЭК и наружная поверхность внутреннего ЭК не деформированы, имеют форму окружностей, а их центры совпадают (точка O) (на рисунке 2 «регулярно-прерывистая» поверхность также представлена окружностью по наибольшему диаметру).

Пусть в рабочем режиме силовой установки внутренний ЭК совершает движение. При этом под действием различных физических параметров режима в совокупности с параметрами среды (рабочей и внешней) происходит деформация наружного и внут-

³ В рассматриваемой концептуальной модели в отношении лопаток и лопастей принимается допущение об отсутствии смещений в направлении вращения колеса и его оси, а также угловых смещений относительно оси лопатки (лопасти).

ренного ЭК (на рисунке 2 деформация наружного ЭК закрашена и ограничена сплошной линией, а деформация внутреннего ЭК показана пунктиром)⁴.

Для получения информации о деформации внутренней поверхности наружного ЭК необходимо установить m датчиков с угловым шагом α_0 для восстановления эпюры с заданной точностью. На рисунке 2 обозначены точки размещения ЧЭ датчиков $1, 2, \dots, i, i+1, \dots, m$. Там же показаны координатные оси K_i, K_{i+1} систем отсчета с началом в точке O . Системы отсчета необходимы для представления смещений г.ц. обоих ЭК (на рисунке 2 изображено смещение г.ц. внутреннего ЭК (\mathbf{r})), которые возможны в рабочем режиме и также вызваны изменениями параметров режима и рабочей среды.

С учетом принятых допущений РЗ между наружным и внутренним ЭК в точках i и $i+1$ можно записать:

$$(1) \quad \begin{aligned} \Delta c_i &= \Delta c_{н,i} - \Delta c_{в} - k_i; \\ \Delta c_{i+1} &= \Delta c_{н,i+1} - \Delta c_{в} - k_{i+1}. \end{aligned}$$

где $\Delta c_i = c_{p,i} - c_{0,i}$, $\Delta c_{i+1} = c_{p,i+1} - c_{0,i+1}$ - изменения РЗ в местах установки $i, i+1$ датчиков; $c_{0,i}, c_{0,i+1}$ - начальные значения РЗ в тех же точках; $\Delta c_{н,i}, \Delta c_{н,i+1}$ и $\Delta c_{в}$ - изменения РЗ из-за деформаций наружного и внутреннего ЭК соответственно; k_i, k_{i+1} - изменения координат, вызванные смещением г.ц. внутреннего ЭК.

Следует также отметить, что используя пары координатных осей K_1 и K_2 , проходящие через датчики, установленные в точках $1, 2$, как и любые другие пары координатных осей, можно получить уравнения, подобные (1). Характерная особенность этих уравнений состоит в том, что с помощью датчиков, преобразователей сигналов, устройств ввода данных в ПЭВМ и последующей их обработки могут быть получены данные лишь о левой части (1), т.е. данные об изменениях физических значений РЗ. При этом используются функции, обратные градуировочным характеристикам (ГХ), найденным экспериментально.

Если искомыми параметрами являются деформации наружного ЭК, то они могут быть найдены из уравнений (1), причем $\Delta c_i, \Delta c_{i+1}$ получаются в результате измерительного эксперимента, а деформация $\Delta c_{в}$ и изменения координат k_i и k_{i+1} - путем моделирования.

Процесс моделирования базируется на знаниях о силовой установке и осуществляется для текущих параметров режима и параметров рабочей среды объекта, причем сложность моделей зависит от требований к точности решаемых задач.

Если искомыми параметрами являются деформации внутреннего ЭК, то они также могут быть найдены с помощью выражения (1). Однако, в этом случае наряду с моде-

⁴При этом предполагается, что наружный ЭК деформируется не симметрично, а внутренний - осесимметрично. Такое предположение оправдано, так как внутренние ЭК (колесо, вал и т.д.), как правило, достаточно массивны, хорошо теплопроводны, не испытывают локальных упругих деформаций, а температурные деформации монотонно распределяются по их радиусу.

лированием вектора смещения \mathbf{r} и определением необходимых координат точки O , требуется моделирование деформаций наружного ЭК.

И, наконец, при решении задачи о смещении г.ц. на основе уравнений (1) необходимо моделирование деформаций внутреннего и наружного ЭК.

Обобщенная концептуальная модель измерения ДС и РЗ конкретизирована в двух методах. Первый метод предусматривает измерение ДС ВВ и РЗ, смещений г.ц. статора и оси вала винта, второй – измерение ДС компрессора или турбины и РЗ, смещений г.ц. статора, а также биений лопаточного колеса. При этом предполагается, что после сборки и монтажа двигателя на стенде происходит ДС и профиль, задуманный при проектировании в виде окружности, приобретает эллипсовидную форму со смещением г.ц. относительно центра вращения винта (лопаточного колеса). Для такой формы профиля достаточно четырех контролируемых точек с угловым шагом $\alpha_0=90$ град, расположенных на осях декартовой системы координат XOY (начало системы отсчета координат размещено в центре вращения контролируемого винта (лопаточного колеса)). Однако, в отличие от концептуальной модели, где в каждой точке контроля предполагается установка одного ОВТД, в рассматриваемых методах предусмотрено размещение КОВТД (кластера ОВТД), поскольку смещения торцов лопастей (лопаток), как правило, происходят по нескольким координатам и для достоверных измерений РЗ необходимо определение всех остальных координат (в дополнительных системах отсчета, начала которых расположены в каждой контрольной точке).

Методы предусматривают преобразование, обработку и фиксацию зазоров между статором и торцом выбранной лопасти (лопатки) в направлении малой и большой оси эллипса после сборки и монтажа двигателя на стенде, а также в рабочем режиме работы ГТД. Составляющие смещения г.ц. статора относительно оси вращения винта (лопаточного колеса) по осям координат после сборки и монтажа двигателя, а также в рабочем режиме определяются как половина разности значений зазоров, измеренных для одной и той же лопасти (лопатки) с помощью КОВТД (кластеров ОВТД), расположенных попарно и симметрично относительно начала системы отсчета и г.ц. профиля статора (точка O).

Для вычисления составляющих, связанных с деформациями ЭК винта (лопаточного колеса) используют модели их упругих и температурных деформаций, причем моделирование базируется на знаниях о поведении силовой установки в процессе эксперимента и осуществляется в реальном времени с учетом текущих параметров режима, рабочей и внешней среды (скорости вращения и температуры).

Результаты измерения РЗ, вычисления упругих и температурных деформаций ЭК винта (лопаточного колеса), а также смещений г.ц. статора в рабочем режиме и при холостой прокрутке, позволяют определить искомые ДС (изменение большой и малой полуосей эллипсовидного профиля статора).

Если в компрессоре или турбине обнаруживаются колебания РЗ, связанные с биениями лопаточного колеса, то при вычислениях искомым ДС используются усредненные значения РЗ по всем лопаткам контролируемого колеса. При этом амплитуду биений лопаточного колеса определяют как половину разности между максимальным и минимальным значениями РЗ, измеренных выбранным кластером датчиков.

Во третьем разделе рассматриваются три разновидности модернизированных кластерных методов измерения координат смещений торцов лопаток и лопастей.

Первая из них - методы измерения неполным кластером с моделированием неизмеряемых координат, которые позволяют уменьшить число ОВТД в СК (ЧЭ в КОВТД) и, как следствие, число установочных отверстий для ОВТД или диаметр отверстия для КОВТД.

Предполагается использовать СК ОВТД (КОВТД), в котором число датчиков (ЧЭ) меньше числа искомым координат. Тогда на множестве координат смещений торцов лопаток и лопастей (\mathbf{K}) можно выделить подмножества измеряемых (\mathbf{K}_M) и неизмеряемых (\mathbf{K}_N) координат:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K} &= \mathbf{K}_M \cup \mathbf{K}_N; \mathbf{K}_M \cap \mathbf{K}_N = \emptyset; \\
 (2) \quad \mathbf{K}_M &= \{k_{M,\xi_M} | \xi_M \in \mathbf{E}_M\}; \mathbf{E}_M \subseteq \mathbf{E}; \mathbf{E} = \{1, 2, \dots, \chi\}; |\mathbf{E}_M| = \chi_M; \\
 \mathbf{K}_N &= \{k_{N,\xi_N} | \xi_N \in \mathbf{E}_N\}; \mathbf{E}_N = \mathbf{E} \setminus \mathbf{E}_M.
 \end{aligned}$$

где χ – число возможных координат, а χ_M - количество измеряемых координат, равное числу ЧЭ ОВТД (КОВТД).

Измеряемые координаты (\mathbf{K}_M) преобразуются в естественные выходные сигналы датчиков (индуктивности), в напряжение и далее в цифровые коды. Учет влияния неизмеряемых координат (\mathbf{K}_N) осуществляется путем их моделирования для соответствующих параметров режима, рабочей и внешней среды. Параметры режима, рабочей и внешней среды преобразуются в цифровые коды и далее после обработки могут быть представлены в виде своих физических значений. При этом часть параметров рабочей и внешней среды ($\mathbf{P}_{e,D}$) являются мешающими факторами (МФ) по отношению к ОВТД (КОВТД).

На основе результатов преобразования сигналов ОВТД (КОВТД) в код ($C_1, C_2, \dots, C_{\chi_M}$), преобразований и вычислений МФ ($\mathbf{P}_{e,D}^*$) и моделирования подмножеств неизмеряемых координат (\mathbf{K}_N) производятся вычисления искомым координат ($k_{M,1}, k_{M,2}, \dots, k_{M,\chi_M}$). При этом решается система уравнений, каждое из которых представляет собой семейство ГХ, полученное экспериментально:

$$(3) \quad \begin{cases} C_1 = f_1(k_{M,1}, k_{M,2}, \dots, k_{M,\chi_M}, \mathbf{K}_N, \mathbf{P}_{e,D}^*); \\ C_2 = f_2(k_{M,1}, k_{M,2}, \dots, k_{M,\chi_M}, \mathbf{K}_N, \mathbf{P}_{e,D}^*); \\ \dots \\ C_{\chi_M} = f_{\chi_M}(k_{M,1}, k_{M,2}, \dots, k_{M,\chi_M}, \mathbf{K}_N, \mathbf{P}_{e,D}^*). \end{cases}$$

Число неизвестных (измеряемых) координат $(k_{M,1}, k_{M,2}, \dots, k_{M,\chi_M})$ равно числу уравнений (χ_M) и числу ОВТД в кластере (ЧЭ в КОВТД).

Пусть, например, в процессе экспериментальных исследований решается задача контроля опасных значений РЗ на различных режимах работы ВВ. Предполагается, что лопасти совершают сложное многокоординатное движение, включая принудительное угловое (координаты $x, y, z, \varphi, \chi = 4$), причем координата φ преобразуется с помощью штатного датчика угла поворота. МФ – температура (θ) воздуха. Предполагается также, что установочное отверстие в статоре ВВ, разрешенное для проведения экспериментов, ограничено по диаметру и позволяет использовать в КОВТД только один ЧЭ («вырожденный» КОВТД). Тогда, на основании (3), для вычисления искомым у-координат (РЗ) необходимо воспользоваться ГХ вида

$$C = f(x_N, y, z_N, \varphi^*, \theta^*),$$

где C - коды, полученные в канале «вырожденного» КОВТД, x_N, z_N - результаты моделирования неизмеряемых координат; φ^*, θ^* - текущие физические значения угловой координаты и температуры после соответствующих преобразований и вычислений.

Представляется очевидным, что точность методов будет определяться погрешностями моделирования и степенью их влияния на результаты измерения.

Вторая разновидность - методы измерения с одновременным преобразованием выходных параметров датчиков. Существенного снижения взаимного электромагнитного влияния ЧЭ в СК ОВТД (КОВТД) и уменьшения числа компенсационных датчиков в составе СК (ЧЭ в КОВТД), а, следовательно, и числа установочных отверстий (уменьшения диаметра компенсационного КОВТД) можно добиться при одновременных (поочередных, последовательных во времени) преобразованиях и фиксациях кодов. При этом предполагается, что изменения смещений торцов лопаток (лопастей) во времени и соответствующих координат (x, y, z, φ) имеют квазистатический, т.е. медленноменяющийся характер, а потому преобразования и фиксация кодов могут осуществляться с разрывом во времени на один или несколько периодов вращения лопаточного колеса (винта). Вместе с тем, периода вращения достаточно для выбора пары «рабочий-компенсационный датчик (ЧЭ)», в которой функции компенсационного выполняет один и тот же датчик (ЧЭ), а функции рабочего - поочередно датчики (ЧЭ), входящие в состав СК (КОВТД).

В качестве примера на рисунке 3 представлено размещение рабочих и компенсационных датчиков (ЧЭ) в составе СК из трех ОВТД (КОВТД с тремя ЧЭ) (тип размещения - «звезда») относительно торцов лопаток (лопастей) и их функционирование на различных этапах преобразований и фиксации кодов.

На этапе 1 преобразования и фиксации кодов (первом периоде вращения) функционирует пара ЧЭ₁-Р и ЧЭ-К, на этапе 2 (втором периоде вращения) – пара ЧЭ₂-Р и ЧЭ-К и, наконец, на этапе 3 - пара ЧЭ₃-Р и ЧЭ-К. Далее (на следующих этапах (периодах)) процесс повторяется⁵, причем поочередная реализация указанных пар осуществляется с помощью ключевых элементов коммутатора, используемых в ГИЦ, а фиксация кодов производится в моменты прохождения торцами лопаток (лопастей) г.ц. кластера ОВТД (КОВТД) в начале системы отсчета (точка *O*).

И, наконец, третья разновидность - методы измерения с распределенным по статору кластером датчиков (РК ОВТД), которые позволяют устранить сосредоточенность на малой площади множества ОВТД и соответствующих установочных отверстий, а также взаимное электромагнитное воздействие ЧЭ, т.е. наиболее значимые ограничения методов, в которых используется СК ОВТД.

Пусть, например, решается аналогичная рассмотренной выше задача получения информации об изменениях трех координат (рисунок 4) и в состав РК входят три высокотемпературных ОВТД. Предполагается, что первый датчик (ЧЭ₁) сохраняет свое положение⁶, второй датчик (ЧЭ₂) эквидистантно перемещается на угол $1.5\Delta\psi_{л}$ (этому углу соответствует новое положение виртуального г.ц. (в.г.ц.) - точка *O*'), а третий (ЧЭ₃) – на $\Delta\psi_{л}$ от второго (на тот же угол $\Delta\psi_{л}$ смещен в.г.ц. – точка *O''*). Преобразование и фиксация кодов производится в моменты прохождения замком контролируемой лопатки (*l*) последовательно точек *O*, *O'* и *O''* на этапах 1, 2, 3 соответственно. С помощью ключевых элементов коммутатора последовательно формируются пары рабочих и компенсационных датчиков: на этапе 1 - пара ЧЭ₁-Р и ЧЭ₂-К, на этапе 2 – пара ЧЭ₂-Р –

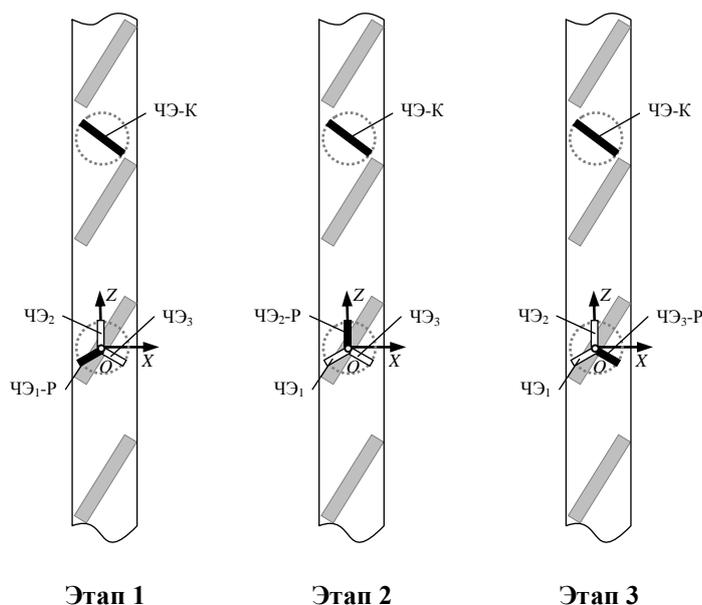


Рисунок 3 – Размещение рабочих и компенсационных датчиков (ЧЭ) относительно торцов лопаток (лопастей), их функционирование на различных этапах преобразований и фиксации кодов при одновременном опросе датчиков

⁵ Функционирующие ЧЭ выделены на схемах размещения жирными линиями.

⁶ Положение, которое занимает ЧЭ₁ в СК с топологией размещения типа «звезда» (рисунок 3).

ЧЭ₁-К, на этапе 3 – пара ЧЭ₃-Р – ЧЭ₁-К. При этом предполагается, что каждому из перечисленных этапов соответствует один период вращения лопаточного колеса, а значит количество периодов вращения, затрачиваемых на получение измерительной информации, равно числу искомых координат и ОВТД в составе РК, причем функции рабочего датчика закрепляются за каждым из них последовательно от периода к периоду вращения лопаточного колеса.

Очевидно, что указанное количество периодов вращения фактически определяет время получения информации о координатах смещения торцов лопаток и соответственно динамические возможности рассматриваемых методов. В то же время, учитывая, что при вращении лопаточного колеса в зоне чувствительности одного из пары ЧЭ через каждые $0.5\Delta\psi_{л}$ будет появляться замок лопатки и соответственно ее торец, получение информации возможно в течение меньшего числа периодов в сравнении с тем, как было показано ранее.

Действительно, применительно к рассматриваемому примеру, время получения информации о координатах смещений торцов лопаток можно сократить до двух периодов вращения лопаточного колеса. При этом на первом периоде вращения при прохождении замка лопатки под номером 1 г.ц. в точке O ЧЭ₁ выполняет рабочую функцию (ЧЭ₁-Р), а ЧЭ₂ – компенсационную (ЧЭ₂-К); при повороте колеса на угол $0.5\Delta\psi_{л}$ замок лопатки под номером $n_{л}$ -ой лопатки проходит в.г.ц. в точке O' и рабочим становится ЧЭ₂ (ЧЭ₂-Р), а компенсационным - ЧЭ₁ (ЧЭ₁-К). Следующий поворот колеса на угол $0.5\Delta\psi_{л}$ приводит к восстановлению первоначальных функций ЧЭ в ИЦ и т.д. Тогда для всех лопаток, кроме $n_{л}$ -ой, в пределах угла поворота колеса $1.5\Delta\psi_{л}$ завершается процесс получения информации, необходимой для определения координат смещения (каждый ЧЭ выполнил функцию рабочего при прохождении через г.ц. и в.г.ц. каждой лопатки). Для $n_{л}$ -ой лопатки процесс получения информации занимает $(2\pi - 1.5\Delta\psi_{л})$ угла поворота колеса. На втором периоде ЧЭ₃ всегда выполняет функцию рабочего (ЧЭ₃-Р) при компенсационном ЧЭ₁ (ЧЭ₁-К).

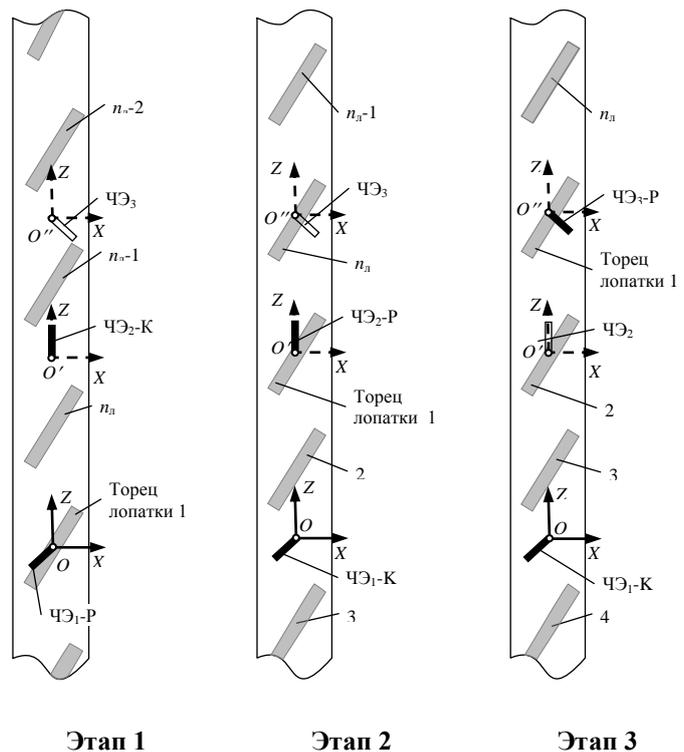


Рисунок 4 – Размещение ОВТД (ЧЭ) относительно торцов лопаток (лопастей) и функции ЧЭ на различных этапах преобразований и фиксации кодов в РК из трех ОВТД

Дальнейшее улучшение динамических возможностей метода и сокращение времени получения информации до одного периода вращения лопаточного колеса возможно за счет изменения расположения датчиков в составе РК и обеспечения особой коммутации при формировании пар «рабочий-компенсационный» ОВТД. В диссертации также рассмотрен метод измерения трех координат смещений торцов лопаток за один период вращения лопаточного колеса. Там же приводится описание варианта метода с РК ОВТД, позволяющего отказаться от использования датчика синхронизации и тем самым устранить связанные с ним ограничения.

В *четвертом разделе* исследуется первичное преобразование многокоординатных смещений торцов лопаток (лопастей) в ЧЭ СК и РК ОВТД (КОВТД). Разработана модель электромагнитного взаимодействия нескольких ЧЭ между собой и с лопаткой (лопастью), которая основана на использовании закона Био-Савара и метода конечных элементов (КЭ), и обеспечивает получение эквивалентных индуктивностей ЧЭ как функций времени в зависимости от геометрических и электрофизических параметров ЧЭ и лопатки (лопасти), их взаимного расположения, а для фиксированного времени позволяет получить семейства ФП как зависимостей индуктивности ЧЭ от координат смещений торцов лопаток (лопастей) в выбранной системе отсчета.

В модели лопатка (лопасть) имитируется пластиной прямоугольной формы из немагнитного электропроводного материала, а ЧЭ ОВТД (КОВТД) - прямолинейными проводниками прямоугольного сечения (сечение проводников может быть и иной формы, например в виде окружности). ЧЭ являются частью электрических контуров заданных размеров (с учетом длины тоководов), в которые включены источники напряжения E^7 . Разбиение на КЭ имитатора лопатки (лопасти), корпуса и ЧЭ производится с равномерным шагом по длине, ширине и высоте. Тоководы ЧЭ разбиты на КЭ равной длины, а поверхности, охватываемые контурами тоководов, следовательно – на КЭ равной площади. Далее производится замена геометрического представления эквивалентным электрическим, причем каждый линейный проводник заменяется электропроводной нитью, проходящей через центр симметрии проводника. При этом пространственное положение электрического эквивалента соответствует геометрическому положению объектов электромагнитного взаимодействия и, следовательно, КЭ, а омические сопротивления нитей - величинам сопротивлений проводников. Каждый проводник КЭ рассматривается как элемент тока (ЭТ). Соединение проводников в точке образует узел, а замкнутое соединение – контур. В окружающем пространстве каждый ЭТ создает магнитное поле, величина индукции (\vec{B}) которого определяется по закону Био-Савара. Индукция в произвольной точке пространства $\vec{B}(x, y, z)$ находится как векторная сумма элементарных индукций от всех токов модели. Это дает возможность определить величину потока индукции для элементарных площадок ($\Delta\vec{S}$), а также магнитный поток для

⁷ В случае одновременного питания во всех контурах, кроме одного, $E=0$.

любого из контуров модели ($\Phi = \vec{B}(x, y, z) \cdot \Delta\vec{S}$), потокосцепление ($\Psi = \Phi$) и электродвижущую силу (э.д.с.) для любого из контуров модели ($e = -d\Psi/dt$). Таким образом можно составить эквивалентную электрическую схему с сосредоточенными параметрами, в которой каждая нить тока заменяется эквивалентным омическим сопротивлением R , величина которого зависит от размеров КЭ и электропроводности материала. На основе эквивалентной электрической схемы и законов Кирхгофа может быть составлена система уравнений для контуров (дифференциальных уравнений с учетом э.д.с. индукции) и для узлов (алгебраических уравнений).

Реализованный в диссертации вариант модели содержит ряд серьезных упрощений и допущений. В частности, в нем не учитывается влияние корпуса датчика, предполагается, что ЧЭ и имитатор имеют малые толщины (при этом геометрические размеры ЧЭ и имитатора используются для расчета эквивалентных омических сопротивлений), а также не выделяются КЭ в ЧЭ датчиков. Однако даже в такой существенно упрощенной модели вычисление коэффициентов, связывающих реальные (заданные координатами в выбранной системе отсчета) расположения ЧЭ и имитатора (его КЭ), решение системы уравнений и определение токов, необходимых для расчета эквивалентных индуктивностей ЧЭ, потребовало разработки специализированного программного обеспечения (ПО). В созданном ПО результаты расчета выдаются в виде временных зависимостей эквивалентных индуктивностей ЧЭ, а также в виде семейств ФП, связывающих индуктивности ЧЭ с координатами смещений (x, y, z, φ) имитатора лопатки (лопасти). В расчетах ФП, значения индуктивностей ЧЭ выбираются в момент времени, соответствующий максимальному значению выходного напряжения ИЦ⁸.

Модель использовалась для получения семейств ФП СК ОВТД с двумя ЧЭ при одновременном и разновременном преобразованиях, КОВТД с двумя и тремя ЧЭ при разновременном преобразовании, а также РК ОВТД с двумя ЧЭ.

На рисунке 5 приведены семейства ФП ЧЭ двух вариантов одновременного преобразования: с одинаковым (рисунок 5, а) и с противоположным направлением токов в контурах (рисунок 5, б). На том же рисунке приведены семейства ФП для одного из ЧЭ (ЧЭ₁) в координатных осях $O\bar{L}Y^9$ (для обоих вариантов включения). Как видно из представленных графиков, при одновременном преобразовании координат в СК ОВТД наблюдается взаимное влияние ЧЭ, которое в наибольшей степени проявляется при смене направлений токов в контурах на противоположные, что приводит к немонотонной зависимости индуктивности ЧЭ от координаты x и сужению диапазонов изменений указанной координаты.

⁸ В ИЦ используется известный метод первой производной, согласно которому максимум напряжения на выходе цепи (максимум производной) соответствует изменениям индуктивности ЧЭ.

⁹ $\bar{L} = \frac{L-L_{min}}{L_{max}-L_{min}}$, где L – индуктивность ЧЭ, L_{max} и L_{min} – границы диапазона изменения индуктивности.

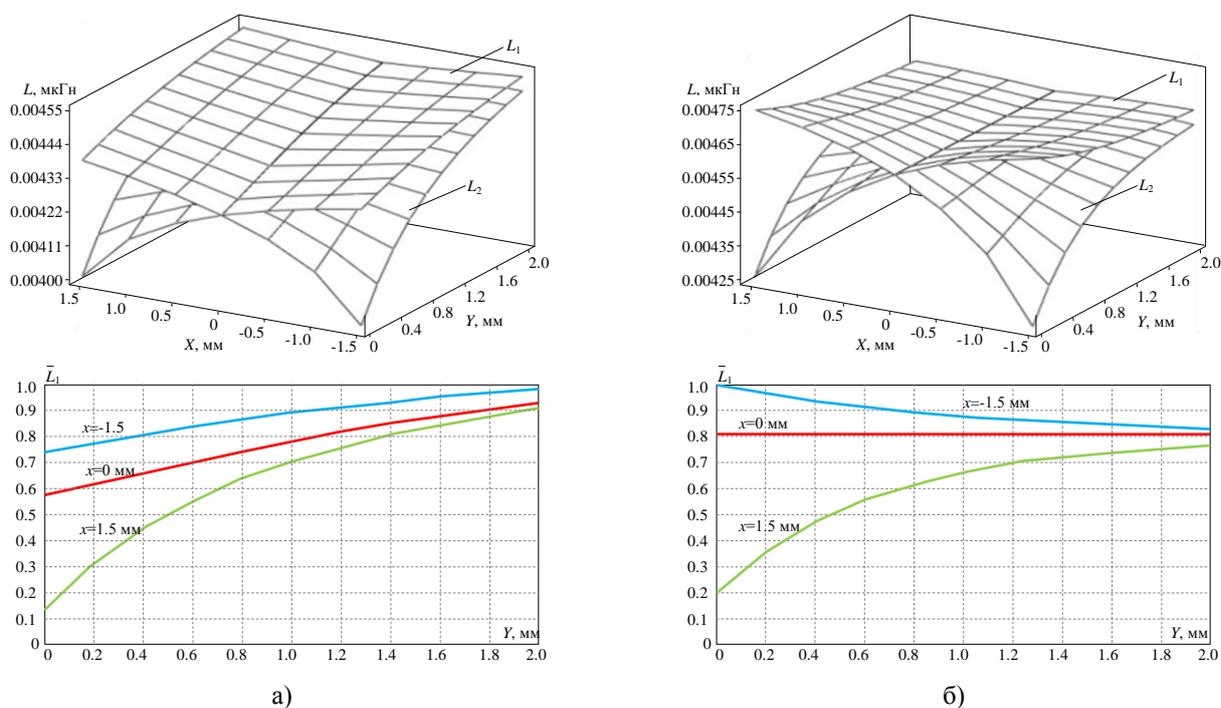


Рисунок 5 - Семейства ФП при одинаковом (а) и противоположном (б) направлении токов в контурах ЧЭ₁ и ЧЭ₂ при одновременном преобразовании

В диссертации также показано, что при использовании КОВТД с тремя ЧЭ (топология размещения «треугольник») и разновременном преобразовании сигналов ЧЭ, ФП всех ЧЭ монотонны только в сравнительно узких диапазонах изменения координат (x от 0 до 3 мм и φ от 30 до 45 град). Вместе с тем, в вычислительных экспериментах с РК из двух ОВТД установлено, что ФП для обоих ЧЭ монотонны во всем диапазоне изменения x , y -координат (± 2 мм по x -координате и 0..2 мм по y -координате) при достаточной чувствительности обоих ЧЭ к указанным координатам.

При исследовании адекватности разработанной модели максимальные значения разности расчетных и экспериментальных значений относительных индуктивностей ЧЭ не превысили 4%. При этом абсолютные значения расчетных индуктивностей на верхней границе и нижней границах диапазона отличаются от индуктивностей, найденных экспериментально, не более чем на 17%.

В *пятом разделе* приводится систематизированное описание ИИЦ и ГИЦ с кластерами ОВТД (КОВТД), а также рассматривается их функционирование с помощью временных диаграмм. Предлагается классификация ГИЦ, которая определяется видом кластера (сосредоточенный и распределенный) и числом ОВТД (ЧЭ в КОВТД).

Отмечается, что ГИЦ обеспечивают реализацию методов измерения координат смещений торцов лопаток (лопастей) при разновременных (поочередных) преобразованиях и фиксации кодов. От ИИЦ схемы ГИЦ отличаются наличием ключевых элементов на уровне датчиков, которые на каждом из этапов преобразования обеспечивают образование пар рабочих и компенсационного ЧЭ (ЧЭ-Р, ЧЭ К) в неравновесной мостовой схеме, плечами которой являются обмотки согласующего трансформатора (СТ) в

датчиках и образцовые резисторы R . Синхронное замыкание ключей в парах ЧЭ формирует также импульсное питание моста (амплитуда импульса соответствует напряжению источника питания E).

Как и ИИЦ, так и ГИЦ работают по методу первой производной, а потому в схемах используются дифференцирующие и запоминающие устройства (ДУ и ЗУ) с той разницей, что в ГИЦ - по одному на кластер ОВТД (КОВТД). На рисунке 6 представлен один из вариантов структурной схемы

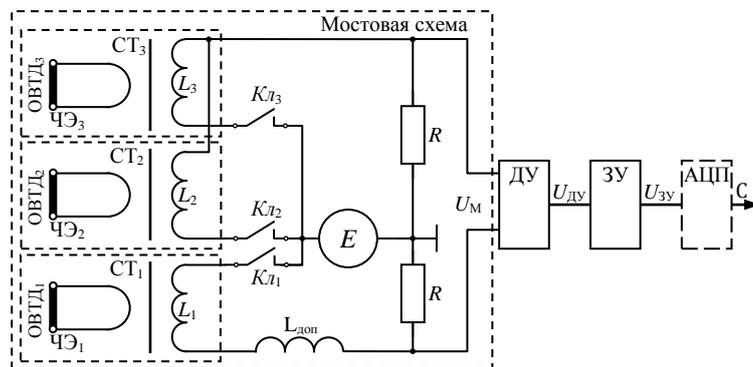


Рисунок 6 – ГИЦ для одновременного преобразования сигналов РК из трех ОВТД

преобразование сигналов с помощью РК из трех ОВТД (ОВТД₁, ОВТД₂, ОВТД₃). Для функционирования рассматриваемой ГИЦ необходимо наличие трех ключей ($K_{л1}$, $K_{л2}$, $K_{л3}$), которые обеспечивают образование пар рабочих и компенсационных датчиков в плечах мостовой схемы с обмотками СТ и резисторами (R). Синхронное замыкание ключей в парах датчиков формирует также импульсное питание моста ($U_{П}$). Дополнительная катушка с индуктивностью $L_{доп}$ позволяет получить на выходе моста и ДУ однопольный сигнал.

Для исследований ФП ГИЦ, представляющих собой зависимости выходного напряжения (или цифрового кода) от изменений индуктивности ЧЭ, разработаны модели, построенные на основе всего двух эквивалентных схем. Эквивалентные схемы отражают преобразование индуктивностей ЧЭ во всех без исключения вариантах ГИЦ, выявленных в процессе систематизации и классификации.

Первая схема в предположении идеальности ключей учитывает LRC -параметры ЧЭ, тоководов и СТ датчика, линий связи, а также RC -параметры ДУ и частоту единичного усиления (f_1) операционного усилителя (при соответствующем выборе S -параметров линий схема и модель на ее основе могут быть использованы для исследований ФП ИИЦ). Вторая эквивалентная схема учитывает неидеальность ключей (их остаточные RC -параметры). При этом предполагается, что линии связи отсутствуют, а датчики представлены эквивалентными индуктивностями вторичных обмоток СТ и их сопротивлениями.

Разработанные модели представляют собой системы дифференциальных уравнений высокого порядка, при решении которых (на одном из этапов) используются численные методы. Модели реализованы в специальном ПО вычислительных экспериментов, предназначенном для исследований ИЦ.

Разработана упрощенная (аналитическая) модель ГИЦ на основе первой эквивалентной схемы без емкостных параметров датчиков и линий, обеспечивающая получение

ние решения в виде обозримых формул, позволяющих проводить исследования ИЦ с приемлемой точностью. С помощью таких моделей для исходных данных по наиболее современным датчикам и последним разработкам электронной элементной базы получены изменения выходных напряжений ИЦ от времени, определены их максимальные значения и построены ФП ГИЦ. На рисунке 7 график 1 представляет собой изменение выходного напряжения ДУ при $f_T \rightarrow \infty$, а графики 2, 3, 4 получены при конечных значениях $f_T = 300$ МГц и характеризуются уменьшением $U_{ДУ,max}$ и его смещением вправо по оси времени. При этом значения $U_{ДУ}(t)$ на графиках 1, 2 рассчитывались в предположении, что рабочим в мостовой схеме является плечо, в котором отсутствует добавочная катушка индуктивности. График 3 показывает изменения $U_{ДУ}(t)$, когда рабочим является другое плечо (с добавочной катушкой), а график 4 (пунктирная линия) соответствует нулевым изменениям индуктивности ЧЭ ($\Delta L = 0$).

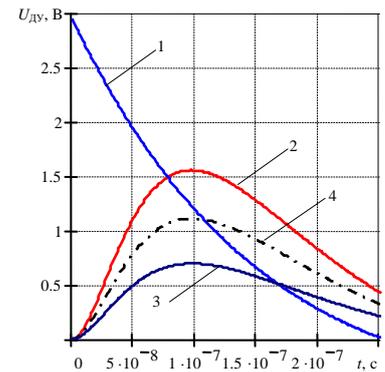


Рисунок 7 – Изменение выходного напряжения ДУ

Для той же схемы ГИЦ на рисунке 8 приведены ФП, которые представляют собой зависимость $U_{ДУ,max}$ от отношения $\Delta L/L$, где L – собственная индуктивность рабочего ЧЭ и токовода. График 1 получен в предположении, что роль рабочего выполняет датчик, включенный в плечо, где отсутствует добавочная катушка индуктивности, а график 2 – когда роль рабочего выполняет датчик, включенный в плечо с добавочной катушкой индуктивности.

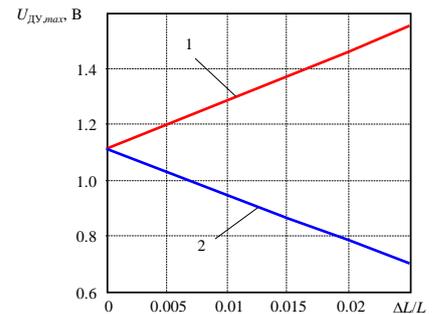


Рисунок 8 – Функции преобразования

В шестом разделе рассматриваются принципы построения систем измерения ДС, координат смещений торцов лопаток (лопастей), в том числе РЗ, смещений г.ц. статора и биений лопаточного колеса, реализующих кластерные методы измерения перечисленных параметров (на уровне обобщенной структурно-функциональной схемы и алгоритмов функционирования).

На рисунке 9 представлена обобщенная структурно-функциональная схема, отражающая возможное разнообразие системных вариантов, связанное с особенностями объекта измерения, с различием применяемых методов, датчиков и ИЦ.

Объект измерения – ВВ, компрессор, турбина в отдельности или в различных сочетаниях в полноразмерном ГТД - характеризуется множеством параметров, среди которых искомые ДС, координаты смещения торцов лопаток (лопастей), в том числе РЗ, а также параметры, характеризующие режим работы, рабочую и внешнюю среду.

Получение измерительной информации о ДС и РЗ осуществляется с помощью кластеров ОВТД (КОВТД) расположенных на статоре ВВ, компрессора или турбины. Изменения выходных сигналов датчиков (индуктивностей), соответствующих смещениям

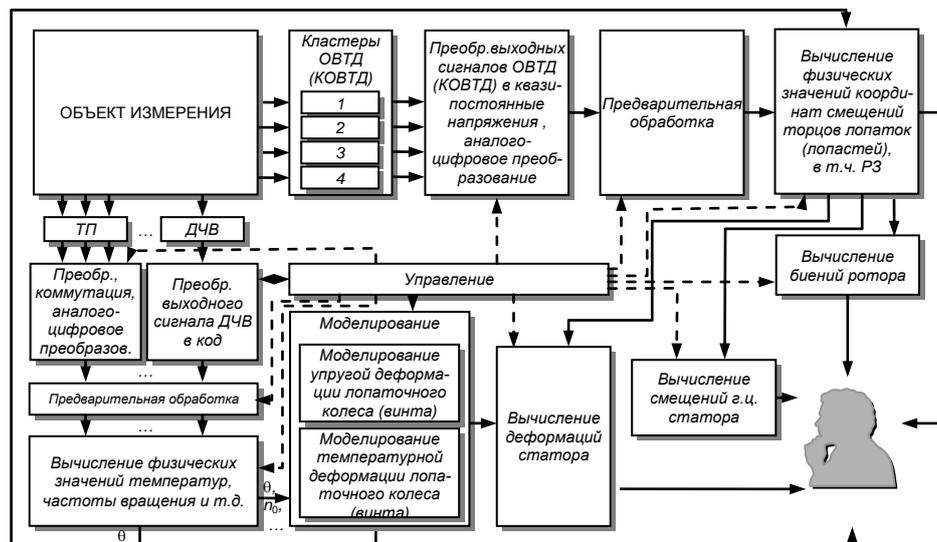


Рисунок 9– Обобщенная структурно-функциональная схема систем

торцов лопаток (лопастей), преобразуются в квазипостоянные напряжения в ИИЦ (ГИЦ), а затем осуществляется их аналого-цифровое преобразование. Полученные коды подвергаются предварительной цифровой обработке, включая фильтрацию и отбраковку отсчетов.

Для формирования сигналов управления используется информация о скорости вращения ротора (лопаточного колеса или винта), которая определяется с помощью индукционного датчика частоты вращения (ДЧВ) и магнитной «метки» на валу ротора. В моменты прохождения «метки» на выходе ДЧВ появляются импульсы напряжения, период которых (T_p) и характеризует скорость вращения ротора. Период T_p преобразуется в цифровой код, который используется для вычисления физических значений скорости вращения n_0 и моментов фиксации кодов в каналах ОВТД (КОВТД) по всем лопаткам (лопастям). Полученные значения кодов и семейства ГХ измерительных каналов обеспечивают вычисление координат смещений торцов лопаток (лопастей), в т.ч. РЗ.

Найденные значения скорости вращения используются для моделирования упругой деформации ЭК лопаточного колеса (лопастей винта). Моделирование их температурных деформаций производится на основе информации о температуре (θ), получаемой с помощью датчиков температуры и, в частности, термопар (ТП). С этой целью могут быть применены и встроенные в ОВТД ТП, горячие спаи которых размещены вблизи ЧЭ и предназначены для термокоррекции. Сигналы ТП преобразуются в цифровые коды и после соответствующей обработки и вычисления физических значений температур используются для моделирования. Термокоррекция результатов преобразования ОВТД (КОВТД) производится в ходе вычислений физических значений координат смещений торцов лопаток или лопастей, включая РЗ.

Если в ходе моделирования деформаций лопаточного колеса (винта) возникает необходимость в учете дополнительных параметров режима работы, внешней или

внутренней среды силовой установки (помимо скорости вращения колеса (винта) и температуры), то число датчиков и преобразователей их сигналов в составе системы может быть увеличено.

Результаты моделирования упругих и температурных деформаций совместно с результатами вычисления физических значений РЗ используются для вычисления ДС. Вычисленные физические значения РЗ служат также для определения смещений г.ц. статора, оси винта и биений лопаточного колеса.

Если в системе реализуются методы, ориентированные на применение «неполного» кластера ОВТД, то модели упругих и температурных деформаций используются также для определения неизмеряемых координат смещений. При этом состав моделей может быть расширен по сравнению с исходным.

Перечисленные процедуры детализируются в описаниях основных алгоритмов функционирования систем, в том числе алгоритмов управления сбором, преобразованиями и вычислениями, моделирования упругой и термической деформации лопаточного колеса (лопастей винта), а также алгоритмов вычисления ДС, смещений г.ц. и биений. При этом разработанные алгоритмы управления представлены в двух вариантах: первый ориентирован на стационарный режим работы двигателя, а все предусмотренные в нем операции выполняются последовательно в старт-стопном режиме без каких-либо серьезных ограничений по времени и повышенных требований к быстродействию технических средств, включая ПЭВМ, а также к объему ее памяти. Во втором варианте, ориентированном на нестационарные режимы работы двигателя, известный принцип «квазипараллельности» выполнения операций измерения периода вращения, преобразований сигналов датчиков и вычислений координат смещений распространяется на остальные вычислительные операции, в том числе на расчет ДС, смещений г.ц. и биений, причем длительность вычисления перечисленных параметров примерно равна периоду вращения лопаточного колеса (винта).

В разработанных алгоритмах моделирования изгибных деформаций лопастей, упругой вытяжки и температурных деформаций лопаток (лопастей) используются текущие значения параметров режима (угол разворота лопастей, скорость вращения), рабочей и внешней среды (температура), которые измеряются в реальном времени с помощью соответствующих датчиков (ДЧВ, ТП и штатного потенциометрического датчика (ПД) угла разворота), а алгоритмы вычисления ДС, смещений г.ц. и биений лопаточного колеса построены исключительно на основе расчетных соотношений, применяемых в методах измерения указанных параметров.

Седьмой раздел диссертации посвящен анализу точностных характеристик систем, реализующих разработанные методы измерения ДС и координат смещений торцов лопаток и лопастей. Точность систем определяется погрешностями, которые разделены на две группы – инструментальные и методические. Из погрешностей первой группы

исследованы систематическая составляющая основной погрешности измерительного канала системы (ИКС), температурные погрешности ЧЭ ОВТД, линий связи и ключевых элементов. Исследованы процессы рассеяния энергии в ИЦ, а также влияние ненулевых начальных условий и связанных с ними погрешностей.

Систематическая составляющая основной погрешности рассматривается как погрешность аппроксимации семейства ФП ИКС полиномиальными функциями нескольких переменных, причем семейства ФП ИКС получены путем сквозного моделирования ЧЭ и ИЦ в виде зависимости напряжения на выходе ИЦ от координат смещений торца лопаток или лопастей. На рисунке 10 представлено семейство ФП ИКС с РК из двух ОВТД для которого искомая составляющая погрешности не превышает 2.5% в диапазоне изменения x -координаты от -1 до 1 мм и y -координаты от 1 до 2 мм. При этом найденная погрешность практически полностью определяется нелинейностью ФП ЧЭ ОВТД.

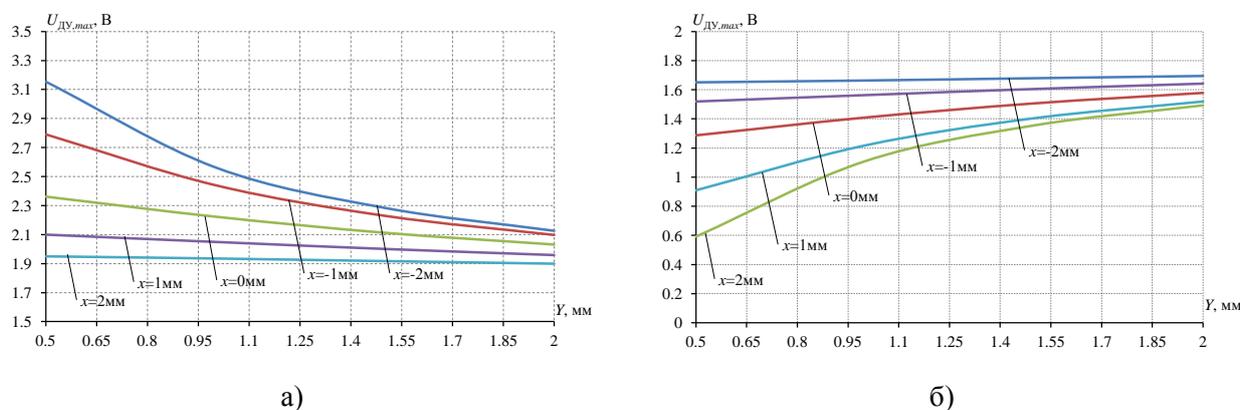


Рисунок 10 – Семейства ФП ИКС при $\theta=20^{\circ}\text{C}$: рабочий ОВТД включен в плечо моста без добавочной индуктивности(а) и рабочий ОВТД включен в плечо моста с добавочной индуктивностью(б)

На том же примере с помощью того же семейства ФП ИКС исследуется влияние изменений температуры в зоне размещения ЧЭ ОВТД в газозвоздушном тракте. Показано, что величина температурной погрешности существенно зависит от неидентичности LR -параметров ЧЭ, выполняющих рабочие и компенсационные функции в ИЦ, а неидентичность связана с технологией изготовления датчиков. Отличие LR -параметров всего на 2.5% приводит к погрешности почти в 10% при изменениях температуры от 20 до 650°C (в компрессоре) и существенно возрастает с расширением диапазона температуры до 1500°C (в турбине), что требует применения в системе специальных средств температурной коррекции.

Исследованы влияния температуры на параметры линии связи и остаточные параметры ключевых элементов в составе ИЦ, и показано, что температурные погрешности, связанные с линиями, не превышают сотых долей процента, а связанные с ключевыми элементами составляют около 0.1% при изменениях температуры на $25\text{-}30^{\circ}\text{C}$. При этом возможная несинхронность срабатывания ключей приводит к значительному и недо-

пустимому росту колебательности выходного сигнала ИЦ, которую удастся практически полностью устранить с помощью РС-цепочек в цепях управления ключей.

Исследованы процессы накопления и рассеяния энергии при возбуждении ИЦ прямоугольными импульсами питания. Применительно к лопаточному колесу со 120 лопатками даже на скорости вращения 25000 об/мин период повторения импульсов питания составляет не менее $10 \cdot 10^{-6}$ с и его достаточно для рассеяния энергии в ИЦ, сопровождаемого уменьшением напряжения на выходе до 0.007% от максимального значения. Таким ненулевым начальным условиям соответствует погрешность не более 0.07%. Показано также, что увеличение ненулевых начальных условий, вызванных уменьшением периода между двумя соседними импульсами питания, вызывает ускоренный рост соответствующей погрешности (более чем вдвое).

Из погрешностей второй группы (методических) исследованы погрешности, связанные со смещениями во времени синхросигнала и неравномерным шагом торцов лопаток, с изменением скорости вращения лопаточного колеса и изменяющимся во времени температурным воздействием газовой среды.

Смещение синхроимпульса всего на 0.001 град. приводит к погрешностям порядка одного процента в каналах с СК из двух ОВТД и вчетверо меньше в каналах РК с тем же числом ОВТД. Неравномерность шага лопаток ± 0.007 град. вызывает погрешность около 6% (СК ОВТД) и 1.5% (РК ОВТД).

Исследования погрешностей, связанных с изменением скорости вращения лопаточного колеса, проводится в предположении, что на втором периоде его вращения происходит ступенчатое увеличение (или уменьшение) угловой скорости, либо на том же периоде наблюдается линейный во времени рост (или уменьшение) угловой скорости (с постоянным ускорением). Показано, что в первом варианте погрешность для лопаток 1, 2, ..., n_d пропорционально возрастает и для последней лопатки (n_d) достигает максимального значения, равного разности первого и второго периода вращения лопаточного колеса. Во втором варианте погрешности увеличиваются от лопатки к лопатке по квадратичному закону и при равных изменениях скорости в конце второго периода со ступенчатым изменением, эти погрешности значительно меньше для начальных номеров лопаток и соизмеримы для конечных по сравнению с первым вариантом.

Для второго варианта (линейного изменения скорости) даны количественные оценки погрешностей при угловых ускорениях в диапазоне от 0 до ± 72 град/с² на различных скоростях вращения на первом периоде (3000, 6000, 9000 об/мин) для СК и РК из двух ОВТД. Показано, что погрешности достигают $\pm 13\%$ и $\pm 17\%$ (СК и РК ОВТД, соответственно) на минимальной скорости вращения и не превышают $\pm 1.4\%$ и $\pm 1.9\%$ на максимальной скорости.

В ходе анализа погрешностей, связанных с изменяющимися во времени температурными воздействиями на ЧЭ ОВТД и встроенную в датчик ТП, предназначенную для

термокоррекции, также предполагался линейный во времени характер воздействия. Анализ показал, что в при скоростях изменения температуры в газоздушном тракте до $0.2^{\circ}\text{C}/\text{с}$ максимальные значения погрешности не превышают 1.7%. Однако в режимах приемистости или сброса газа (скорость изменения температуры в газоздушном тракте порядка $0.5^{\circ}\text{C}/\text{с}$) погрешность достигает уровня 4.2%. Эта погрешность может быть уменьшена применением метода, предусматривающего использование дополнительной ТП в хвостовой части ОВТД и формулы, позволяющей вычислять текущие значения температуры ЧЭ по результатам измерений обеих ТП (в головной и хвостовой части ОВТД) и использовать эти данные в алгоритмах термокоррекции.

И, наконец, *восьмой раздел*, посвящен конкретным системам, результатам исследования метрологических характеристик, а также результатам применения систем в производственных и лабораторных условиях. Разработанные кластерные методы и принципы построения систем на их основе реализованы в системе измерения РЗ и ДС ВВ, а также в трех разновидностях систем измерения ДС, радиальных и осевых смещений торцов лопаток (лопастей).

Система измерения РЗ и ДС (СИ-ЛС-01) предназначена для предварительных стендовых и последующих бортовых испытаний (на летающей лаборатории) двигателя НК-93 с закапотированным двухрядным ВВ противоположного вращения через редуктор. При этом основная задача экспериментальных исследований связана с измерением РЗ и сигнализацией их опасных состояний, а также с оценкой ДС и смещений г.ц. Для получения информации о РЗ используется один из вариантов метода измерения неполным кластером с моделированием неизмеряемых координат.

В состав технических средств системы (рисунк 11) входят датчиковая аппаратура, многофункциональная плата ввода-вывода аналоговой и дискретной информации с сигнальным процессором (L-783) и ПЭВМ. Датчиковая аппаратура содержит устройства промышленного изготовления и нестандартные датчики с преобразователями их сигналов. В состав первой группы входят ДЧВ с формирователем сигналов (Ф), датчики температуры (ДТ) и штатный ПД угла поворота лопастей. Нестандартная аппаратура представлена четырьмя ОВТД (ОВТД₁...ОВТД₄), обеспечивающими преобразования смещений торцов лопастей, а также индивидуальными преобразователями их индуктивностей Пр₁...Пр₄ (ИИЦ). В ПО системы реализованы алгоритмы управления, моделирования неизмеряемых координат, вычисления искомой у-координаты (РЗ), алгоритмы вычислений ДС и смещений г.ц.

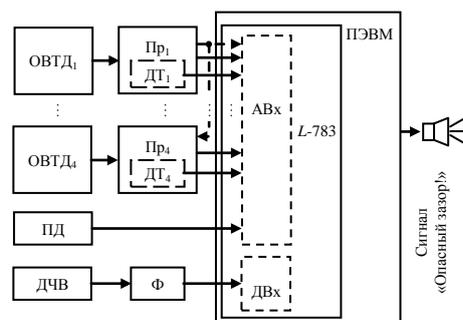


Рисунок 11 – Структура технических средств системы СИ-ЛС-01

Проведенные метрологические исследования показали, что систематическая составляющая основной погрешности в диапазоне изменений y -координаты до 4 мм не превышает 0.5%, а на участке 8-17 мм – 1%. При этом случайная составляющая основной погрешности составляла 0.06%. Исследовалась погрешность вычисления y -координаты с учетом погрешностей моделирования и показано, что искомая погрешность возрастает на верхних границах диапазонов изменений координат, но в диапазоне изменений x до 8 мм и y до 12 мм погрешности вычислений не превышают 3.4%.

Система СИ-ЛС-01 использовалась в процессе стендовых испытаний двигателя НК-93 на стенде ОАО «Самарский научно-технический комплекс им. Н.Д. Кузнецова». При этом общая наработка системы составляла более 50 часов и за указанное время снижений РЗ до минимально допустимого и, тем более, аварийного уровня не наблюдалось. В процессе имитации летных условий эксплуатации (при фронтальном обдуве двигателя потоком воздуха) были зафиксированы смещения г.ц. статора и деформации, свидетельствующие об эллипсоидном изменении его формы.

На рисунке 12 представлены графики зависимости скорости вращения винта (n_0), ДС (Δc_{pM} , Δc_{pB}) и смещений его г.ц. в рабочем режиме (x_p , y_p) от времени при постоянной координате $\varphi=22$ град (угол разворота лопастей).

При отсутствии обдува (интервал времени 1000...1300 с) наблюдаются «синфазные» ДС при изменении скорости вращения винта от 1200 до 1650

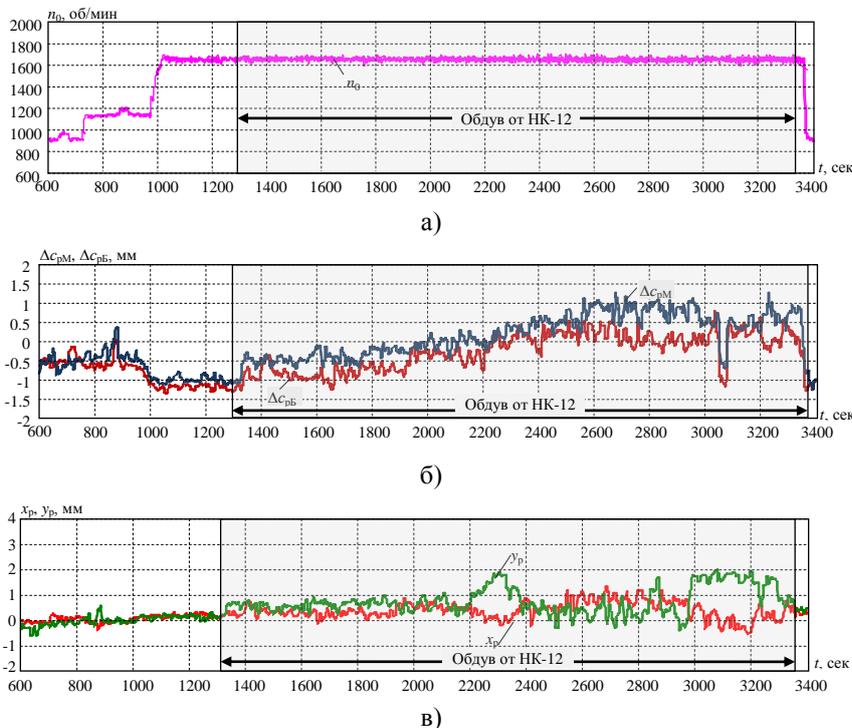


Рисунок 12 – Скорость вращения винта (а), деформации статора (б) и смещения его г.ц. (в)

об/мин (от исходных значений около 0.5 мм до примерно 1 мм) (рисунок 12, б). С появлением обдува ($t > 1300$ с) становится заметной «противофазность» изменения деформаций вдоль малой и большой полуосей (Δc_{pM} и Δc_{pB} соответственно), что свидетельствует об эллипсоидном изменении формы статора, причем эти изменения соизмеримы по величине. Например, в районе 1620, 2750 с статор превращается в эллипс, вытянутый вдоль большой полуоси (X) и, наоборот, в районе 1670, 3010 с - в эллипс, вытянутый вдоль малой полуоси (Y). Аналогично, при отсутствии обдува (интервал времени

от 600 до 1300 с) изменения скорости вращения винта от 900 до 1650 об/мин не оказывают существенного влияния на смещения г.ц. - x_p , y_p практически отсутствуют (рисунок 12, в). Начиная с 1300 с (в этот момент был включен фронтальный обдув от дополнительного турбовинтового двигателя НК-12) появляются смещения г.ц., которые достигают максимальных значений на участках 2000...2400 с и 3000...3300 с. После выключения обдува (начиная с 3350 с) г.ц. возвращается к своему начальному значению.

Отличительной особенностью разработанных разновидностей систем измерения радиальных и осевых смещений лопаток (лопастей), т.е. x , y -координат, является реализация в них методов, предусматривающих применение СК ОВТД (кластерного датчика) и РК ОВТД. В технических и программных средствах разработанных систем СИ-*LCE-02К(Т)*, СИ-*LCE-03К(Т)* и СИ-*LCE-04ВВ*, предназначенных для экспериментальных исследований компрессоров, турбин и ВВ (соответственно), учтены основные требования и условия, изложенные в технических заданиях ведущих предприятий двигателестроительной отрасли страны. Для проверки работоспособности и эффективности действующих макетов технических и программных средств перечисленных разновидностей систем в лабораторных условиях разработан и изготовлен имитатор объекта с вращающимся от электропривода лопаточным колесом и статором с закрепленными на нем датчиками, причем колесо и датчики могут перемещаться в осевом и радиальном направлениях соответственно под контролем механических индикаторов.

В составе технических средств системы СИ-*LCE-02К(Т)* входит датчиковая аппаратура (СК из двух ОВТД (ОВТД-К-3(Л))) в одной из контрольных точек и трех дополнительных ОВТД (того же типа) – в остальных контрольных точках с индивидуальными преобразователями (Пр), ДЧВ промышленного изготовления с формирователем (Ф), а также выносной модуль Е14-440 (фирмы LCard) ввода-вывода аналоговой и дискретной информации и ПЭВМ. Технические средства системы СИ-*LCE-03К(Т)* отличаются тем, что вместо СК ОВТД используется РК из двух ОВТД с одним преобразователем (рисунок 13), а в системе СИ-*LCE-04ВВ* (предназначенной для экспериментальных исследований ВВ) – вновь разработанный дифференциальный кластерный датчик (КОВТД-ВВ-15) с двумя рабочими ЧЭ и встроенными преобразователями. В ПО всех трех разновидностей систем (с учетом их особенностей) реализованы алгоритмы управления, вычисления искомых x , y -координат, ДС, смещений г.ц. и биений.

Проведенные метрологические исследования в измерительных каналах СК ОВТД (КОВТД) и РК ОВТД показали, что систематические и случайные составляющие основной погрешности не превышают 1%, а алгоритмические погрешности вычисления x , y -координат с учетом погрешностей входных данных – 5.5% во всем диапазоне изменений x и y и 1% в диапазоне, ограниченном повышенной чувствительностью.

В процессе лабораторных исследований имитатора объекта с помощью систем СИ-LCE-02К(Т) и СИ-LCE-03К(Т) по результатам анализа измеренных координат x и y были обнаружены осевые биения лопаточного колеса до 0.45 мм, неравномерность шага лопаток в их торцевой части, а также разброс РЗ (y -координаты) по лопаткам.

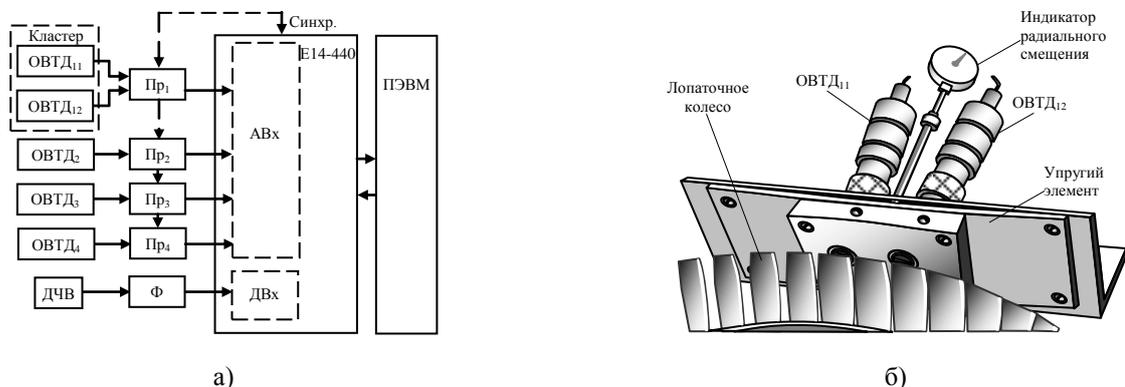


Рисунок 13 – Структура технических средств (а) системы СИ-LCE-03К(Т) и размещение РК из двух ОВТД на статоре (б)

На рисунке 14 представлены результаты измерений координаты x в СК из двух ОВТД в зависимости от номера лопатки (1). С помощью встроенных функций аппроксимации и сглаживания программы Microsoft Excel на том же графике построена «линия тренда» (2). Там же точками обозначены смещения обода x_0 , измеренные в статических состояниях лопаточного колеса. Сравнение «линии тренда» с x_0 –смещениями обода в статике подтверждает наличие биений с ожидаемой амплитудой около 0.45 мм.

Изменения координаты y (РЗ) от номера лопатки в том же СК из двух ОВТД представлены на рисунке 15. Из графика следует, что за полный оборот колеса координата y изменяется в незначительных пределах от лопатки к лопатке (это связано с пластической вытяжкой лопаток в процессе эксплуатации двигателя). Поскольку характеристики газотурбинного тракта оцениваются по средним значениям РЗ, то оно вычислено и составляет 0.544 мм, причем отклонения РЗ по лопаткам не превышают 0.15 мм.

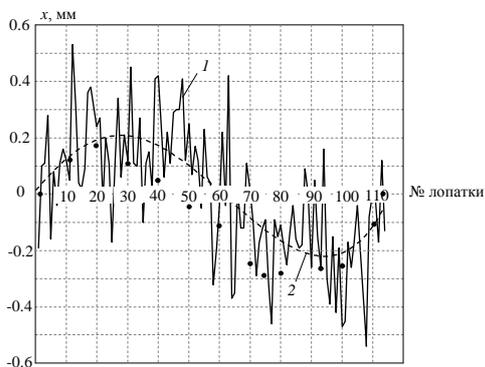


Рисунок 14– Зависимость координаты x от номера лопатки

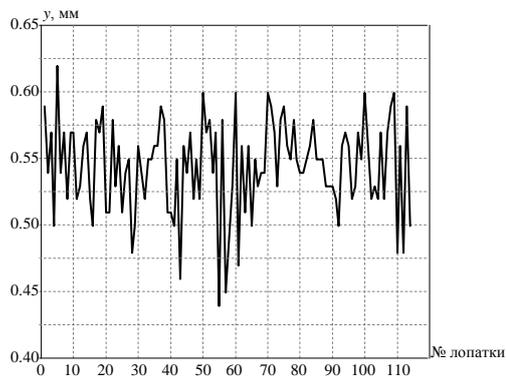


Рисунок 15 – Зависимость координаты y (РЗ) от номера лопатки

Таким образом, исследования в производственных условиях на реальном объекте и в лабораторных на имитаторе подтвердили работоспособность разработанных методов и средств, их метрологическую состоятельность и эффективность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная проблема разработки новых и совершенствования существующих кластерных методов и средств, обеспечивающих построение систем измерения ДС и координат смещения торцов лопаток и лопастей (включая РЗ). Их применение имеет важное значение при экспериментальных исследованиях в процессе доводки ГТД, для диагностики, и в перспективе для использования в системах управления нового поколения двигателей с измеряемыми и регулируемым РЗ.

На основе обобщенной концептуальной модели разработаны кластерные методы измерения ДС и смещений г.ц. статора в ВВ, компрессоре и турбине, смещения оси винта и биений лопаточного колеса. Разработаны модернизированные кластерные методы измерения координат (неполным кластером с моделированием неизмеряемых координат, с одновременным преобразованием выходных параметров ЧЭ в СК ОВТД (КОВТД), с распределенным по статору кластером ОВТД (РК ОВТД)). Разработаны модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ датчиков между собой и лопаткой (лопастью), модели ИЦ с датчиками, которые использованы для получения и исследования соответствующих ФП. Разработаны обобщенные структурная схема и алгоритмы функционирования систем, исследованы инструментальные и методические погрешности систем.

Разработана, изготовлена и использована в стендовых испытаниях ВВ система измерения РЗ и ДС; экспериментально исследованы метрологические характеристики, подтверждена работоспособность системы в производственных условиях и получены важные данные о поведении ВВ в процессе испытаний. Разработаны и изготовлены системы измерения ДС, радиальных и осевых смещений торцов лопаток (лопастей); проведены метрологические исследования и проверка работоспособности систем в лабораторных условиях на имитаторе объекта, которые показали готовность систем к применению в производственных условиях.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

Монографии

1. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок [Текст] / Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Беленький Л.Б., Боровик С.Ю. [и др.]; под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. – 188с.

Статьи в российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

2. Боровик, С.Ю. Система измерения смещений торцов лопаток с распределенным кластером одновитковых вихретоковых датчиков [Текст] / С.Ю. Боровик // Мехатроника, автоматизация, управление. -2011. -№4. - С.36-41.
3. Боровик, С.Ю. Структура и алгоритмы систем измерения смещений и деформаций элементов конструкций газотурбинных двигателей [Текст] / С.Ю. Боровик // Вестник Сам-ГТУ. Серия «Технические науки». -2010. -№2(26). -С.14-22.

4. Боровик С.Ю. Метод ускоренного получения информации о смещениях торцов лопаток в компрессорах и турбинах / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. -2011. -№7. - С.40-46.
5. Боровик, С.Ю. Уменьшение длительности получения информации о смещениях торцов лопаток [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. -2010. -№5. - С.53-59.
6. Боровик, С.Ю. Метод получения измерительной информации о многокоординатных смещениях торцов винтовентилятора с разновременным преобразованием сигналов кластерных датчиков. Часть 1. Обоснование метода и его описание [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.] // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». -2009. -№1(23). -С.89-94.
7. Боровик, С.Ю. Метод получения измерительной информации о многокоординатных смещениях торцов винтовентилятора с разновременным преобразованием сигналов кластерных датчиков. Часть 2. Реализуемость методов [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.] // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». -2009. -№2(24). -С.47-54.
8. Боровик, С.Ю. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Часть 1. Обоснование предлагаемых методов и их описание [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. -2009. -№4. - С.16-19.
9. Боровик, С.Ю. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Часть 2. Реализуемость методов [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. -2009. -№5. - С.21-30.
10. Боровик, С.Ю. Принципы построения систем сбора, преобразования и обработки информации для экспериментальных исследований винтовентиляторов [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Мехатроника, автоматизация, управление. -2008. -№3. - С.28-34.
11. Боровик, С.Ю. Модель кластерного одновиткового вихретокового датчика на основе метода конечных элементов [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.В. Маринина, Ю.Н. Секисов // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». -2007. -№1(19). -С.76-83.
12. Боровик, С.Ю. Обобщенное представление методов получения измерительной информации о координатах смещений торцов лопаток и лопастей [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Мехатроника, автоматизация, управление / Управление и информатика в авиакосмических системах / Информационно-измерительные и управляющие системы летательных аппаратов / Приложение к журналу. -2007. -№3. -С.19-24.
13. Боровик, С.Ю. Система измерения радиальных зазоров на закапотированной винтовентиляторной установке [Текст] / С.Ю. Боровик, С.М. Игначков, С.А. Ильинский [и др.] // Изв. вузов. Авиационная техника. -2004. -№3. -С.77-79.
14. Боровик, С.Ю. Система измерения радиальных смещений торцов лопастей винтовентилятора [Текст] / С.Ю. Боровик, Б.К. Райков, В.В. Тулупова // Мехатроника, автоматизация, управление. -2004. -№7. - С.35-40.
15. Боровик, С.Ю. Измерение и вычисление координатных составляющих многомерных перемещений торцов лопаток в процессе вращения ротора [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев [и др.] // Автометрия. -2001. -№2. - С.103-111.
16. Боровик, С.Ю. Метод и средства измерения радиальных зазоров в газотурбинных двигателях на нестационарных режимах [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев [и др.] // Автометрия. -1998. -№3. - С.108-113.

Патенты на изобретения

17. Патент 2390723 С1 РФ, МПК G01В 7/14 Способ измерения координатных составляющих смещений торцов лопаток ротора турбомашин [Текст] / Беленький Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К. [и др.] -№2008152867/28; Заявл. 30.12.2008; Опубл. 27.05.2010, бюл. №15.

18. Патент 2379626 С1 РФ, МПК G01B 7/14 Способ оценки деформации статора и параметров биения ротора газотурбинного двигателя [Текст] / Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., [и др.] -№2008124669/28; Заявл. 16.06.2008; Оpubл. 20.01.2010, бюл. №2.
19. Патент 2344368 РФ, МПК G01B 7/14 Способ оценки деформации статорной оболочки винтовентилятора авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н. [и др.]. -№2007124456/28; Заявл. 28.06.2007; Оpubл. 20.01.2009, бюл. №2.
20. Патент 2351905 РФ МПК G01L 5/13 Способ бесконтактного измерения силы тяги винта закапотированной винтовентиляторной силовой установки [Текст] / Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н. [и др.]. -№2007138820/28; Заявл. 18.10.2007; Оpubл. 10.04.2009, бюл. №10.
21. Патент 2320957 РФ, МПК G01B 7/14 Способ обнаружения крутильных и изгибных смещений торцов лопаток рабочего колеса осевого компрессора при исследованиях срывных явлений [Текст] / Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н. [и др.] - №2006123601/28; Заявл. 03.07.2006; Оpubл. 27.03.2008, бюл. №9.
22. Патент 2318185 РФ, МПК G01B 7/14. Способ измерения радиальных зазоров между торцами лопастей винта и внутренней поверхностью статорной оболочки закапотированной винтовентиляторной установки [Текст] / Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н. [и др.] -№2006123848/28; Заявл. 03.07.2006; Оpubл. 27.02.2008, бюл. №6.
23. Патент 2273831 РФ, МПК G01H 17/00 Способ обнаружения помпажа и оценки параметров помпажных колебаний в компрессорах газотурбинных установок [Текст] / Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н. [и др.]. -№2004126807/28; Заявл. 06.09.2004; Оpubл. 10.04.2006, бюл. №10
24. Патент 2272990 РФ, МПК G 01 B 7/14 Способ измерения многомерных перемещений и обнаружения колебаний торцов лопаток ротора турбомашины печ [Текст] / Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н. [и др.]. -№2002117185/28; Заявл. 27.06.2002; Оpubл. 27.03.2006, бюл. №9
25. Патент 2258902 РФ, МПК G 01 B 7/14 Способ измерения радиальных зазоров и обнаружения колебаний лопаток ротора турбомашины [Текст] / Белкин В.М., Боровик С.Ю., Мещеряков А.А. [и др.]. -№2002117100/28; Заявл. 27.06.2002; Оpubл. 20.08.2005, бюл. №23.
26. Патент 2231750 РФ, МКИ G01B 7/14, 7/30, П013 3/50 Способ измерения параметров движения торцов лопаток ротора турбомашины и устройство для его реализации [Текст] / Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н. -№2001128250/28; Заявл. 18.10.2001; Оpubл. 27.06.2004, бюл. №18.
27. Патент 2146038 РФ, МКИ G 01 B 7/14 Способ измерения параметров движения лопастей винтовентилятора [Текст] / Боровик С.Ю., Игонин С.Н., Райков Б.К. [и др.]. -№96121548/28; Заявл. 01.11.96; Оpubл. 27.02.2000, бюл. №6.
28. Патент 2138012 РФ, МКИ G 01 B 7/14 Способ измерения параметров движения лопаток турбомашины [Текст] / Боровик С.Ю., Игонин С.Н., Секисов Ю.Н. [и др.]. -№96121455/28; Заявл. 01.11.96; Оpubл. 20.09.99, бюл. №26.

Статьи, опубликованные других журналах в сборниках конференций

29. Боровик, С.Ю. Средства измерения и мониторинга радиальных зазоров в проточной части газотурбинного привода в процессе эксплуатации ГТУ [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов // Газотурбинные технологии. -2008. -№10. - С.24-28.
30. S. Borovik Measuring of power-plant structural units displacements in underdetermined conditions [Текст] / S. Borovik // Automation, control and applications: Proc. of the 2 IASTED international multi-conference, Novosibirsk, Russia, June 20-24, 2005. – ACTA Press, 2005 – pp.7-12.
31. Боровик, С.Ю. Аналитическая модель измерительной цепи одновиткового вихретокового датчика [Текст] / С.Ю. Боровик // Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ-2010):

материалы 7 научно-технической конференции. –С-Пб: ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»», 2010. -С.78-82.

32. Боровик, С.Ю. Экспериментальная проверка работоспособности кластерных методов измерения координат смещения торцов лопаток и деформаций статора в лабораторных условиях [Текст] / В.А. Белослудцев, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XII Международной конференции. –Самара: Изд.-во СамНЦ РАН, –2010. - С.316-322.
33. Боровик, С.Ю. Систематизация и классификация групповых измерительных цепей одновитковых вихретоковых датчиков [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XII Международной конференции. –Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. –2010. -С.328-335.
34. Боровик, С.Ю. Анализ основных характеристик групповых измерительных цепей одновитковых вихретоковых датчиков [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XII Международной конференции. –Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. –2010. -С.336-342.
35. Боровик, С.Ю. Методы и средства измерения радиальных зазоров, координат смещений торцов лопаток и лопастей, а также деформаций статорных оболочек. История, современное состояние и перспективы [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XI Международной конференции. –Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. – 2009. -С.332-334.
36. Боровик, С.Ю. Повышение достоверности измерительной информации в системах мониторинга зазоров в газотурбинных двигателях [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов // Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ-2009): материалы международной научно-технической конференции. – Таганрог: Изд. ТТИ ЮФУ. -2009. -С.308-310.
37. Боровик, С.Ю. Обобщенная концептуальная модель получения информации о радиальных зазорах между элементами конструкций силовых установок, их деформациях и координатах смещений [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды X Международной конференции. - Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2008. -С.282-289.
38. Боровик, С.Ю. Метод получения информации о деформациях статорной оболочки винтовентилятора, радиальных зазорах, смещениях ее геометрического центра и оси винта [Текст] / С.Ю. Боровик, Б.К. Райков Б.К., Ю.Н. Секисов [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды X Международной конференции. -Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2008. -С.290-297.
39. Боровик, С.Ю. Метод получения информации о деформациях статора, радиальных зазорах, смещениях его центра и биениях ротора [Текст] / С.Ю. Боровик, Б.К. Райков Б.К., Ю.Н. Секисов [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды X Международной конференции. -Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. - 2008.-С.298-304.
40. Боровик, С.Ю. Методы получения информации о радиальных смещениях торцов лопаток для задач активного регулирования зазоров в ГТД [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов // Мехатроника, автоматизация, управление: материалы 5 научно-технической конференции. - С-Пб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». -2008. -С.150-153.
41. Боровик, С.Ю. Метод оценки деформаций статорной оболочки винтовентилятора авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды IX Международной конференции. -Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2007. -С.234-237.
42. Боровик, С.Ю. Технические средства систем измерения перемещений подвижных элементов конструкций силовых установок с бесконтактным токосъемником / В.А. Белослудцев, С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды IX Международной конференции. -Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2007. -С.252-256.

43. Боровик, С.Ю. Методы получения информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды VIII Международной конференции. -Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2006. -С.232-239.
44. Боровик, С.Ю. Обобщенная структурная схема и алгоритмы функционирования систем сбора и обработки информации о координатах смещений и деформациях элементов конструкций силовых установок с моделированием неизмеряемых координат / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VIII Международной конференции. -Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2006. С.225-231.
45. Боровик, С.Ю. Об использовании тепловой модели одновиткового вихретокового датчика для коррекции температурных погрешностей/ С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VII Международной конференции. -Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2005. -С.175-180.
46. Боровик, С.Ю. Измерения многокоординатных смещений элементов конструкций силовых установок, базирующиеся на знаниях [Текст] / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2005): материалы Международной научно-технической конференции. –Самара: Изд.-во СамГТУ. -2005. -С167-169.
47. Боровик, С.Ю. Система измерения многомерных процессов для исследований и диагностики срывных и помпажных явлений в газотурбинном двигателе / С.Ю. Боровик, А.А. Инюцин, О.И. Камаева [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VI Международной конференции. -Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2004. -С.444-450.
48. Боровик, С.Ю. Система моделирования для отладки и проверки работоспособности измерения многомерных процессов в газотурбинном двигателе / С.Ю. Боровик, О.И. Камаева, В.В. Тулупова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VI Международной конференции. -Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2004. -С.451-456.
49. Боровик, С.Ю. Способ квазипараллельных измерений и вычислений координатных составляющих многомерных перемещений торцов лопаток [Текст] / С.Ю. Боровик, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды V международной конференции. –Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2003. -С.506-511.
50. Боровик, С.Ю. Метод измерения радиальных смещений лопастей винтовентилятора с использованием каналов физической и виртуальной коррекции [Текст] / С.Ю. Боровик, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды V Международной конференции. – Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2003. -С.512-520.
51. Боровик, С.Ю. Анализ точности вычисления радиальных смещений элементов конструкций силовой установки с использованием канала «виртуальной» коррекции / С.Ю. Боровик, В.В. Тулупова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды V Международной конференции. -Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2003. -С.521-527.
52. Боровик, С.Ю. Концептуальная модель измерения многомерных процессов в экспериментальных исследованиях и диагностике газотурбинных двигателей / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды IV международной конференции. – Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2002. –С.531-538.
53. Боровик, С.Ю. Способы измерения и обнаружения колебаний лопаток в экспериментальных исследованиях и диагностике срывных и помпажных явлений в компрессорах газотурбинных двигателей / С.Ю. Боровик, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды IV международной конференции. – Самара: Изд.-во СамНЦ РАН. -2002. –С.539-545.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д212.217.03
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 6 от 16 ноября 2011 г.)

Заказ №___ Тираж 100 экз.

Отпечатано