

На правах рукописи

КИРИЧЕНКО АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

АКУСТО-ОПТИЧЕСКИЕ ДОПЛЕРОВСКИЕ МЕТОДЫ И
СРЕДСТВА КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ
ВИБРАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

05.22.14 — эксплуатация воздушного транспорта

01.02.06 — динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Аб 27.300

Работа выполнена в Киевском институте
инженеров гражданской авиации.

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Лозицкий Л.П.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Комаров А.А.

доктор физ.-мат. наук, профессор,

Матвеев В.В.

член-кор. АН Украины

доктор технических наук, профессор

Морозов Л.В.

Ведущая организация — институт проблем машиностроения АН Украины

Защита состоится «28» мая 1993 г., в 15 часов на заседании
специализированного совета Д 072.0401 при Киевском институте инже-
неров гражданской авиации по адресу: 252601 Киев, 58,
ГСП, Космонавта Комарова, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
института.

Автореферат разослан «17» апреля 1993г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Шепель А.Я.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Опыт эксплуатации авиационной техники показал, что система технического обслуживания с заранее обусловленными величинами наработки между планово-профилактическими работами является экономически неоптимальной. Это привело к внедрению в эксплуатацию авиационных ГТД более совершенной системы технического обслуживания - обслуживания по состоянию, которое основано на постоянном контроле состояния ГТД, и эффективного лишь при развитой системе обнаружения неисправностей. С позиции теории надежности диагностика состояния позволяет снизить интенсивность выключения ГТД в полете, правда, при этом возрастает интенсивность досрочного съема ГТД с эксплуатации. В свою очередь, снижение интенсивности досрочного съема ГТД с эксплуатации обеспечивается уменьшением инерционности процесса внедрения в эксплуатацию мероприятий, устраняющих причины отказов. На основании этих положений формулируются требования к методам и средствам диагностики состояния, обеспечивающие ее эффективность — инвариантность к причинам отказов. Отметим, что в условиях диагностики остаточного ресурса интенсивность выключения в полете и досрочного съема двигателей с эксплуатации достигают оптимальных величин, так как практически возможно снимать двигатели с эксплуатации перед полетом, в котором происходит исчерпание их ресурса. Применительно к диагностике вибрационных повреждений это означает возможность бесконтактных измерений параметров вибраций и напряженно-деформированного состояния критических элементов ГТД, а также критериальной оценки наличия вибрационных повреждений, в том числе и на вращающемся роторе во время работы ГТД, по результатам анализа изменения амплитудно-частотных характеристик в процессе исчерпания ресурса.

Современные требования, предъявляемые к экономичности и тяге ГТД, приводят к постоянному повышению температуры заторможенного потока газа перед турбиной и степени повышения давления в компрессоре — основных параметрах, характеризующих ГТД как тепловую машину. Это приводит к усложнению конструкции и технологии производства ГТД и, как следствие, делает проблему диагностики вибрационных повреждений и более актуальной, и более труднореализуемой.

Исследования в области вибрационных повреждений, которые обеспечили создание методов и средств диагностики ГТД, эффективно используемых двигателестроительными и эксплуатационными организациями проводились в Центральном институте авиационного моторостроения (Бир-

гер И.А., Шорр Б.Ф., Морозов А. А., Локиштанов Е.А., Егоров И.В., Карасев В.А. и др.), Институте проблем прочности АН Украины (Писаренко Г.С., Трощенко В.Т., Матвеев В.В., Грязнов Б.А., Зиньковский А.П., Токарь И.Г., Яковлев А.П. и др.), Киевском институте инженеров гражданской авиации (Лецицкий Л.П., Ветров А.Н. и др.), Институте проблем машиностроения АН Украины (Подгорный А.Н., Воробьев Ю.С., Шепель А.И., Корсунский М.Л. и др.), Харьковском политехническом институте (Богомолов С.И., Костенко Ю.Т. и др.), Самарский авиационный институт (Иванов В.П. и др.), Запорожском производственном объединении «Моторостроитель» (Омельченко В.В., Ройтман А.Б., Хуповка В.П., Быков И.Д., Лукьянов В.С., Зима Ю.П., Адаменко В.А., Березюк Б.А. и др.).

Комплексное решение проблемы диагностики вибрационных повреждений зависит на современном этапе развития, в первую очередь, от уровня научных разработок в области тепловых двигателей летательных аппаратов, динамики и прочности, лазерной и компьютерной техники, прикладной физики и математики и возможно только в результате их синтеза.

Главная цель диссертации заключается в разработке фундаментальных основ, методов и средств бесконтактных диагностических измерений, реализованных в диагностическом информационно-измерительном комплексе — акусто-оптическом доплеровском сканирующем компьютерном виброметре, который позволяет проводить лазерные бесконтактные измерения полей перемещений и деформаций больших площадей колеблющихся сложных пространственных конструкций на любых амплитудах, вплоть до разрушающих, а также осуществлять бесконтактную акусто-оптическую диагностику состояния рабочих колес ГТД непосредственно во время их вращения с использованием экспериментально установленных критериев вибрационных повреждений.

Научная новизна диссертации

Созданы фундаментальные основы, методы и средства для решения важной народнохозяйственной задачи — повышение безотказности авиационных ГТД на основе развития нового научного направления — акусто-оптической доплеровской компьютерной диагностики вибрационных повреждений.

Разработан и реализован в виде информационно-измерительного комплекса акусто-оптический доплеровский сканирующий компьютерный виброметр со сменным комплектом лазерных измерительных головок, аттестованных в органах Госстандарта, которые позволяют измерять как нормальные, так и тангенциальные компоненты вибраций.

Предложена методика использования современных композитных материалов с переменной плотностью армирования в конструкциях сканирующих и волоконно-оптических лазерных измерительных головок, что обеспечивает их эффективную виброзащиту при работе в сильных акустических и вибрационных полях.

Для задач бесконтактных лазерных измерений параметров вибраций адаптированы алгоритмы и компьютерные программы цифровой обработки сигналов. При измерении параметров колебаний сложных пространственных конструкций, не все участки поверхности которых доступны к наблюдению, развит подход использования их конечноэлементных математических моделей. Разработана методика использования информационно-измерительного комплекса для бесконтактных лазерных измерений параметров вибраций на любых амплитудах, вплоть до разрушающих.

На основе экстремальных свойств сплайн-функций получен ряд соотношений, связывающих дискретные поля перемещений, измеренные в результате лазерного эксперимента, с непрерывными полями деформаций. Непрерывные поля перемещений необходимой гладкости воссоздаются путем построения кубического обобщенного сплайна, получаемого как решение задачи Пуассона с краевыми условиями Дирихле. Разработана методика и программное обеспечение бесконтактных лазерных измерений полей деформаций колеблющихся сложных пространственных конструкций на любых амплитудах, вплоть до разрушающих.

Экспериментально выявлены на уникальных испытательных стендах критерии вибрационных повреждений рабочих колес ГТД — изменение величин расщепления спектра при колебаниях по взаимноортогональным собственным формам, изменение интенсивности частот, кратных основному тону колебаний, изменение окружной неравномерности напряжений лопаток рабочего колеса. Установлена взаимосвязь и взаимодополняемость критериев. Разработаны методическое и программное обеспечение информационно-измерительного комплекса, позволяющие использовать полученные критерии в задачах бесконтактной диагностики вибрационных повреждений рабочих колес непосредственно во время их вращения.

Экспериментально исследованы особенности колебаний рабочих лопаток из-за проявления эффекта Доплера при энергетическом обмене через поток между колеблющимися деталями статора и ротора ГТД. Показано, что имеют место возбуждения колебаний сразу по нескольким собственным формам, попадающим в полосу доплеровского смещения, и что возникают значительные выбросы динамических напряжений с малой частотой повторений. На основе исследованного механизма разработано методическое и программное обеспечение акустических измерений окружной неравномерности динамических напряжений лопаток рабочего колеса, реализованное

в информационно-измерительном комплексе акусто-оптического доплеровского сканирующего компьютерного виброметра применительно к диагностике состояния элементов вращающегося ротора.

Положения диссертации, выносимые на защиту

Фундаментальные основы бесконтактных диагностических измерений параметров вибраций ГТД на основе использования эффекта Доплера как в акустическом, так и в оптическом диапазоне волн.

Диагностический информационно-измерительный комплекс — акусто-оптический доплеровский сканирующий компьютерный виброметр;

- лазерная измерительная головка тангенциальных колебаний;

- методика армирования композитных материалов для сканирующих и волоконно-оптических лазерных измерительных головок;

- комплекс компьютерных программ цифровой обработки сигналов, адаптированный для акусто-оптических измерений параметров вибраций;

- методика использования конечноэлементных модели исследуемых конструкций для оценки параметров вибраций на участках, недоступных к наблюдению;

- методика бесконтактных лазерных измерений полей перемещений, в том числе радиальных зазоров между вращающимися лопатками ротора и статором;

- соотношения между дискретными полями перемещений и непрерывными полями деформаций, полученные на основе использования экстремальных свойств сплайн-функций;

- комплекс компьютерных программ и методика бесконтактных лазерных измерений полей деформаций колеблющихся конструкций;

- методика диагностики объемных остаточных напряжений на кромках компрессорных лопаток;

- комплекс компьютерных программ и методика измерения окружной неравномерности динамических напряжений лопаток вращающегося рабочего колеса.

Экспериментально установленные закономерности полигармонического возбуждения колебаний рабочих лопаток при энергетическом обмене через поток между статором и ротором ГТД.

Экспериментально выявленные диагностические критерии усталостного повреждения рабочих колес ГТД, их взаимосвязь и взаимодополняемость:

- изменение величин расслоения спектра при колебаниях по взаимно-ортогональным собственным формам;

- изменение интенсивности частот, кратных основному тону колебаний;

— изменение окружной неравномерности напряжений лопаток рабочего колеса.

Бесконтактная диагностика и прогнозирование вибрационных повреждений рабочих колес ГТД с использованием экспериментально полученных критериев и акусто-оптического доплеровского сканирующего компьютерного виброметра.

Совокупность результатов, относящихся к применению акусто-оптического доплеровского сканирующего компьютерного виброметра для измерения полей перемещений, радиальных зазоров и деформаций а также диагностики вибрационных повреждений при создании, доводке, производстве и эксплуатации ГТД.

Практическая ценность диссертации

Создан диагностический информационно-измерительный комплекс, в котором реализованы следующие возможности:

— бесконтактные измерения, не влияющие на вибрации исследуемого объекта;

— бесконтактные измерения на всей исследуемой поверхности объекта;

— бесконтактные измерения напряженно-деформированного состояния колеблющихся сложных пространственных конструкций;

— бесконтактные измерения зазоров между вращающимися и невращающимися деталями ГТД;

— диагностика вибрационных повреждений рабочих колес турбомашин непосредственно во время их вращения;

— автоматический анализ интерференционных картин;

— визуализация полей перемещений и деформаций больших участков вибрирующих конструкций;

— высокая чувствительность в широком диапазоне измерений на уровне эталонных средств в соответствии с национальным стандартом.

Являясь уникальным инструментом в измерении вибраций, акусто-оптический доплеровский сканирующий компьютерный виброметр может иметь следующие области применения:

— анализ форм колебаний и напряженно-деформированного состояния корпусов и элементов обвязки машин;

— анализ форм колебаний и напряженно-деформированного состояния лопаток, лопастей, рабочих колес, валов и роторов в целом, в том числе и во время вращения;

— оптимизация шумов и вибраций;

- неразрушающий контроль сложных пространственных конструкций, в том числе и из композиционных материалов;

- диагностика и прочностная доводка ГТД и их элементов, включая корпуса, обвязку, агрегаты, рабочие колеса, лопатки, упруго-демпферные опоры и т.д.;

- анализ вибраций и напряженно-деформированного состояния поверхностей материалов и элементов акусто-, пьезо- и микроэлектроники.

Таким образом, разработанные методы и средства выходят далеко за рамки диагностики авиационных ГТД и могут быть использованы в различных областях машиностроения, электроники, энергетики и транспорта.

Достоверность результатов

Обеспечивается использованием методов и средств измерений, удовлетворяющих требованиям международных и национальных стандартов крупнейших промышленных стран (в соответствии с актом Государственной метрологической аттестации лазерного доплеровского виброметра), соответствием теоретически ожидаемых и экспериментальных результатов и положительным опытом использования результатов диссертационной работы в практике авиационного моторостроения и эксплуатации.

Реализация работы

Результаты диссертации внедрены на ПО «Моторостроитель» в период с 1978 по 1992 годы в конструкцию, технологию серийного производства и эксплуатацию ряда авиационных ГТД и отражены в рационализаторских предложениях и пяти авторских свидетельствах на изобретения, а также в более чем ста технических отчетах лаборатории прочности и надежности ПО «Моторостроитель». Серийный выпуск лазерных измерительных головок освоен СП «Интерсистема».

Апробация работы

Диагностический информационно-измерительный комплекс с лазерной измерительной головкой демонстрировался на Пловдивской международной выставке-ярмарке (Болгария) в сентябре 1990 года.

Основные результаты диссертации докладывались на научно-технических советах Центрального института авиационного моторостроения, Киев-

ского института инженеров гражданской авиации, Запорожского ПО «Моторостроитель», Московского машиностроительного завода «Союз», на всесоюзных и международных научно-технических конференциях, коллоквиумах и семинарах: XIII всесоюзная конференция по вопросам рассеяния энергии при колебаниях механических систем (Киев, 1983); IV всесоюзный симпозиум «Малоцикловая усталость механика разрушения» (Москва, 1983); всесоюзная конференция «Методы и средства вибродиагностики конструкций машин и механизмов» (Каунас, 1983); III всесоюзное совещание «Координатно-чувствительные фотоприемники и оптоэлектронные устройства на их основе» (Барнаул, 1985); XIII и XV всесоюзные совещания по проблемам прочности двигателей (Москва, 1989, 1991); Всесоюзный семинар «Диагностическое применение лазеров и волоконной оптики в народном хозяйстве» (Волгоград, 1990); XII всесоюзная конференция «Проблемы прочности двигателей» (Куйбышев, 1990); международный семинар «Информатика в технологии приборостроения» (Ленинград, 1990); IV международная научно-техническая конференция «Проблемы комплексной автоматизации» (Киев, 1990); XIII всесоюзная конференция «Аэроупругость турбомашин» (Севастополь, 1991); всесоюзный научный семинар «Метрология лазерных измерительных систем» (Волгоград, 1991); всесоюзная научнотехническая конференция «Надежность машин, математическое и машинное моделирование задач динамики» (Кишинев, 1991); International Conference on Airworthiness and Certification of Aviation engines, ICAE-90 (Zagorsk, USSR, 1990); The third International Conference on Residual Stresses, ICRS-3 (Tokushima, Japan, 1991); The sixth International Conference on Mechanical Behavior of Materials, ICM-6 (Kyoto, Japan, 1991); International Conference on Computational Engineering Science, ICES-91 (Melbourne, Australia, 1991); The ninth European Conference on Fracture, ECF-9 (Varna, Bulgaria, 1992); International Symposium on nondestructive Testing & Stress-Strain Measurement (Tokyo, Japan, 1992); International Conference on Computational Engineering Science, ICES-92 (Hong Kong, UK, 1992).

Структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и включает 260 листов текста, рисунков, фотографий, и таблиц, подготовленных на компьютере с использованием редакционно-издательской системы «Xerox Ventura Publisher».

Глава 1. Диагностика вибрационных повреждений в проблеме совершенствования надежности авиационных ГТД

В процессе совершенствования и накопления опыта эксплуатации и производства авиационных ГТД наблюдается интенсивное снижение уровня отказов, а затем его относительная стабилизация. В основе этой зависимости лежит принцип обратной связи, в силу которого двигателестроительные организации по мере поступления информации об отказах разрабатывают и внедряют конструктивно-производственные мероприятия, позволяющие устранить причины этих отказов. В зависимости от степени опасности отказов интенсивность работ по устранению их причин ранжируется в следующей последовательности:

- нелокализованные отказы, то есть отказы, сопровождающиеся повреждениями за пределами корпуса двигателя;
- выключение в полете;
- все другие случаи проявления неисправностей, приводящие к досрочному съему двигателей или устраняемые в эксплуатации.

Рассматриваются математические модели процесса совершенствования надежности парка ГТД, основанные на положениях, что темп развития безотказности двигателей, исходя из принципа обратной связи, определяется:

- темпом проявления новых, ранее ни разу не проявившихся видов отказов;
- временем, затрачиваемым на исследование причин отказов и разработку, проверку, внедрение мероприятий;
- временем, необходимым для замены в эксплуатации двигателей на доработанные;
- эффективным вкладом средств на предыдущих этапах доводки двигателя.

Учет сложного характера инерционности процесса совершенствования надежности парка авиационных ГТД осуществлен введением запаздываний в правые части дифференциальных моделей. Численные эксперименты показали, что при обычных в практике авиадвигателестроения темпах роста уровней безотказности уменьшение на полгода запаздывания от проявления отказа до устранения его причин в парке должно приводить к повышению наработки на отказ на 5...10% в первые годы эксплуатации двигателей (до стабилизации уровня безотказности). Снижение инерционности процесса совершенствования надежности парка ГТД из-за более раннего обнаружения новых, ранее ни разу не проявившихся, причин отказов возможно посредством диагностики состояния, методы и средства которой инвариантны к

причине отказа. Применительно к вибрационным повреждениям это означает, что необходимо иметь возможность измерять непосредственно деформационно-напряженное состояние во время работы ГТД. Однако в ряде случаев высокий уровень напряжений еще не является основанием для съема двигателя с эксплуатации, необходимо провести оценку наличия вибрационных повреждений. Эксплуатация парка ГТД с использованием эффективных методов и средств диагностики наличия вибрационных повреждений позволяет резко повысить эффективность от замены эксплуатируемых двигателей на доработанные.

С позиции увеличения темпов роста безотказности парка ГТД сформулированы требования к диагностическому информационно-измерительному комплексу — акусто-оптическому доплеровскому компьютерному виброметру. Главным достоинством предлагаемых методов и средств диагностики вибрационных повреждений есть бесконтактный съем информации о параметрах колебаний с очень высокой точностью, благодаря использованию лазера и развитого математического и программного обеспечения для компьютерной обработки сигналов и последующей инженерной оценки результатов диагностики. Наиболее совершенным инструментом, пригодным для такой диагностики в настоящее время можно считать формирователь диаграмм вибрационных сигналов VPI 9000 фирмы OMETRON (Англия), позволяющий измерять поля перемещений больших участков колеблющихся конструкций, нормальные к исследуемой поверхности, а также измеритель деформаций SPATE 9000, принцип действия которого основан на термоэластичном эффекте, позволяющий измерять деформации с точностью 1.1 Н/мм^2 с пространственной разрешающей способностью $0,5 \text{ мм}^2$.

К сожалению, компьютерные измерительные комплексы фирмы OMETRON VPI 9000 и SPATE 9000 практически недоступны отечественным исследователям, не говоря уже об их использовании для диагностики состояния в эксплуатации. Объясняется это их значительной стоимостью. Так формирователь диаграмм вибрационных сигналов стоит 52,5 тыс. фунтов стерлингов, измеритель деформаций SPATE 9000 — 87,5 тыс. фунтов стерлингов, математическое обеспечение компьютера — более 80 тыс. фунтов стерлингов.

На основании вышеизложенного в диссертации сформулирована проблема создания диагностического информационно-измерительного комплекса, в котором наряду с лазерными измерительными головками нормальных вибраций, выполненными по схеме фирмы OMETRON, используются лазерные измерительные головки тангенциальных вибраций, в том числе и волоконно-оптические, а методическое, математическое и программное обеспечение компьютера позволяет только по результатам лазерного эксперимента получать непрерывные поля деформаций, а в случае наличия

вибрационных повреждений осуществлять диагностику состояния по экспериментально полученным критериям. Обосновывается перспективность использования в диагностическом информационно-измерительном комплексе наряду с лазерными, акустических доплеровских измерителей. Так как доплеровское смещение частот как в оптическом, так и в акустическом диапазоне волн зависит только от скорости движения объекта относительно приемника и не зависит от температуры, давления, качества поверхности, параметров окружающей среды, а также любых других мешающих факторов, достигается высокая помехозащищенность и, как следствие, достоверность диагностирования.

Иначе, ставится задача достижения более высокого уровня бесконтактных измерений — акусто-оптические измерения деформационного состояния и диагностики наличия вибрационных повреждений.

Глава 2. Лазерный доплеровский сканирующий компьютерный виброметр и его использование при создании, производстве и диагностике ГТД

Работы в направлении использования лазеров для диагностики вибрационных повреждений ограничены разработкой одно-двухчастотных лазерных интерферометров. Первые весьма сложны в реализации режима реального времени, последние, построенные по схеме Майкельсона, функционально направлены на измерение нормальных (к исследуемой поверхности) колебаний. Однако, практика измерения параметров вибраций ставит все более сложные задачи, решение которых требует учета составляющих вибраций, лежащих в плоскости поверхности исследуемого объекта — тангенциальных колебаний. К таким задачам прежде всего относится измерение напряженно-деформированного состояния колеблющихся диагностируемых конструкций. Теоретически любое возратно-поступательное движение объекта, представляемое наблюдателю как тангенциальное, будучи рассмотрено применительно к другой поверхности объекта, может проявиться как нормальное, что приводит к тривиальному выводу: следует измерять вибрацию на той поверхности объекта, по отношению к которой эта вибрация выступает как нормальная. Однако, в практических задачах диагностирования ГТД в большинстве случаев соответствующий азимут найти невозможно из-за экранирования зондирующего лазерного пучка из-за сложной пространственной конструкции объекта измерения. Для таких случаев наиболее приемлемым, если не единственным, является лазерная доплеровская виброметрия тангенциальных колебаний.

Лазерная доплеровская измерительная головка работает следующим образом. Два параллельных когерентных зондирующих пучка от лазера, сформированные оптической системой, фокусируются объективом на поверхности колеблющегося объекта. Рассеянное объектом излучение в обратном ходе коллимируется объективом, и пучок согласуется телескопической системой со входной апертурой фотоприемника. Принципиальная оптическая схема может включать дополнительный ряд элементов — диафрагмы, модуляторы, фазовые корректоры, светофильтры и проч., — предназначенные для оптимизации сигнала по параметрам информативности и точности. Сигнал фотоприемника усиливается широкополосным усилителем постоянного тока, фильтром верхних частот в нем подавляется аддитивная составляющая. Пользуясь представлением о гауссовском лазерном пучке, приводится аналитический вывод выражения, описывающего выходной сигнал фотоприемника. Совокупность сопутствующей амплитудной модуляции и скачка фазы дают так называемый фазовый шум выходного сигнала фотоприемника. Приведено детальное исследование природы фазового шума, так как его влияние на метрологические характеристики лазерного измерителя значительно. Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения лазерной доплеровской виброметрии как для нормальных, так и для тангенциальных измерений.

Органами Госстандарта лазерные измерительные головки тангенциальных колебаний аттестованы как нестандартизованное средство измерения вибраций в соответствии с национальным стандартом со следующими основными параметрами:

- верхняя граница частотного диапазона — не менее 10 кГц;
- динамический диапазон (виброперемещения) — 0,42 ... 75000 мкм;
- чувствительность не хуже 0,42 мкм;
- основная погрешность не более 6%.

Сменные объективы позволяют проводить измерения при расстоянии до измеряемой поверхности 50, 100, 200, 400 и 1000 мм.

Сменный комплект лазерных измерительных головок доплеровского вибromетра предназначен как для измерения нормальных, так и для измерения тангенциальных вибраций, которые в зависимости от области использования конструктивно выполнены как лабораторные, сканирующие и волоконно-оптические. Лабораторная головка предназначена для выполнения небольшого количества измерений на локализованных участках вибрирующих поверхностей, в том числе и для калибровки контактных вибродатчиков. Сканирующая головка предназначена для измерения вибраций больших участков колеблющихся поверхностей в автоматическом режиме в сильных акустических полях. Корпус головки выполнен из композиционных материалов и оптимизирован по критерию поглощения

энергии вынужденных колебаний, что позволяет минимизировать по времени циклограмму перемещения измерительной головки сканером в пространстве — перемещение в точку с заданными координатами, ожидание затухания вынужденных колебаний измерительной головки, непосредственное измерение тангенциальных вибраций, что позволяет существенно увеличить производительность измерений. Волоконно-оптическая лазерная доплеровская измерительная головка предназначена для использования в случае измерения параметров движения деталей внутри ГТД. В зависимости от конкретного использования (измерение полей перемещений, диагностика состояния, измерение радиальных зазоров между вращающимися и не вращающимися деталями) волоконно-оптические головки могут иметь различное конструктивное исполнение. Общим и весьма важным остается то, что для крепления световодов используются композитные материалы, причем, композит имеет переменную плотность армирования, что обеспечивает существенное повышение демпфирующей способности и эффективную работу волоконно-оптических измерительных головок в сильных акустических полях.

В качестве примеров использования диагностического информационно-измерительного комплекса с лазерными измерительными головками рассматриваются задачи измерения полей перемещений лопаток, валов, рабочих колес в процессе их резонансных колебаний, осевого демпфера упруго-демпферной опоры в процессе его статического нагружения, измерения радиальных зазоров между вращающимися и не вращающимися деталями.

Для экспериментального определения полей перемещений колеблющихся лопаток ГТД, исходя из приобретенного опыта использования сканирующей лазерной измерительной головки, выполняется до ста точек измерения под тремя азимутами, причем, каждое измерение повторяется от 10 до 100 раз и подвергается цифровой фильтрации. Сложность формы колебания определяет количество точек измерения. Количество измерений в каждой точке определяется параметрами исследуемых колебаний. Например, наличие негармонических или случайных составляющих требует использования цифрового фильтра, для эффективной работы которого существенно возрастают требования к количеству измерений в каждой точке. Приведены результаты измерения поля перемещений при многочастотном гармоническом возбуждении в результате сканирования лазерной измерительной головки по перу лопатки первой ступени компрессора ГТД ТВЗ-117 и цифровой обработки сигналов компьютером диагностического информационно-измерительного комплекса (56 точек измерения под тремя азимутами, 10 измерений для каждой точки, время измерения — примерно 24 минуты). Наиболее длительны процессы позиционирования лазерной из-

мерительной головки в пространстве, поэтому с возрастанием размеров лопатки возрастает и время измерительного эксперимента.

Приводятся статистические результаты измерения полей перемещений при колебаниях по собственным формам больших выборок серийных лопаток. Показано, что несмотря на существенное влияние реальной геометрии лопатки, изготовленной в соответствии с технологическими допусками, на величину собственных частот, поле перемещений более консервативно. В пределах точностей, разумных с точки зрения практического использования, можно считать, что для серийных лопаток, выполненных в пределах технологических допусков, поле перемещений не изменяется. В этом случае обосновывается возможность существенного сокращения количества точек измерения при лазерном эксперименте на серийных лопатках. Рассматривается технология использования лазерных доплеровских измерительных головок для контроля полей перемещений при серийном частотном контроле лопаток. Показано, что в ряде случаев это позволяет выявлять дефекты типа трещин, которые методами голографической интерферометрии из-за малых амплитуд колебаний обнаружить не представляется возможным. В случае лопаток, имеющих сложную конструкцию замка, бандажной полки или охлаждающие каналы, возникают трудности, связанные с тем, что не все участки доступны для наблюдения. Рассматривается применение МКЭ модели собственных колебаний лопаток для получения полей перемещений всей колеблющейся конструкции. В результате расчета собственных форм серийных лопаток с точно известной геометрией (лопатки измерены на контрольно-измерительной машине MAUSER, ФРГ) и сравнения теоретических результатов с результатами голографического эксперимента проведен отбор известных алгоритмов и программ, реализующих МКЭ для использования в математическом обеспечении акусто-оптического доплеровского сканирующего компьютерного виброметра. Применительно к лопаткам 5 ступени компрессора ГТД АИ-20, 1 ступени компрессора ГТД ТВ 3-117, 1 ступени турбины ГТД Д-36 достаточно хорошие результаты получены при использовании комплекса МКЭ программ ИПМаш АН Украины.

Применительно к валам ГТД приводятся примеры измерения полей перемещений при колебаниях по собственным формам, а также при имитации действия осевых растягивающих сил и крутящего момента в условиях исследовательского стенда.

Для измерения полей перемещений вращающихся рабочих колес достаточно осуществлять сканирование лазерной измерительной головки в радиальном направлении, однако, из-за особенностей юстировки измерения выполняются только для диска. Информация о колебаниях лопаток рабочего колеса может быть получена в случае привлечения МКЭ моделей или голографических интерферограмм колеблющихся рабочих колес.

Использование диагностического информационно-измерительного комплекса в задачах совершенствования конструкции и технологии производства ГТД рассматривается на примере экспериментальной доводки упругодемпферной опоры с осевым демпфером, которая снижает общий уровень вибраций ГТД, при этом не влияет на экономичность, так как не происходит увеличения зазоров в газозоудшном тракте между торцами вращающихся лопаток и притираемыми покрытиями корпусов компрессора и турбины. Приводятся результаты измерения этих зазоров на работающем двигателе. Показана целесообразность использования для этих целей наряду с лазерными емкостных датчиков в составе акусто-оптического доплеровского сканирующего компьютерного виброметра.

Глава 3. Бесконтактное измерение напряжений диагностируемых конструкций

В этой главе рассматривается вопрос использования лазерных доплеровских сканирующих измерительных головок для измерения динамических напряжений (деформаций) при колебаниях элементов ГТД со сложной геометрией поверхности на любых амплитудах, вплоть до разрушающих, а также статических напряжений (деформаций) при действии любых нагрузок, вплоть до разрушающих.

Известно, что деформационное состояние в точке выражается в виде тензора деформаций и определяется тремя линейными деформациями $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ и тремя относительными сдвигами $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ которые связаны известными соотношениями с перемещениями через производные по соответствующим координатам. Однако, из-за неустойчивости алгоритма численного дифференцирования перевести дискретные поля перемещений, измеренные в результате сканирования лазерной измерительной головки, в поля деформаций не представляется возможным. Предлагается по дискретной, может быть, неточной информации лазерного эксперимента восстановить непрерывные поля перемещений на всей области их определения, обладающие наперед заданной гладкостью.

Поля перемещений восстанавливаются путем построения кубического обобщенного сплайна, получаемого как решение задачи Пуассона с крайними условиями Дирихле. Рассмотрено решение задачи методом потенциалов. При этом приходится строить специальные процедуры для вычисления сингулярных интегралов, что снижает быстродействие алгоритма. Указанный выше сплайн доставляет минимум функционалу, представляющему собой интеграл от квадрата оператора Лапласа, который определен на достаточно широком классе функций, принимающих заданные значения на некоторой

выделенной конечномерной сетке. Исходя из этого, предлагается следующий путь решения задачи Пуассона, правая часть которой представляет функцию, линейную на элементарном треугольном разбиении (область определения имеет кусочно-линейную границу и разбита на треугольники в точках измерения). Вводится в общем случае хаотическая сетка таким образом, чтобы ранее указанные точки были ее узлами. Берется разностная аппроксимация оператора Лапласа со стандартным учетом граничных условий. Линейная функция двух переменных на элементарном разбиении определяется тройкой чисел. Функционал, экстремум которого достигается на искомом сплайне, представляет собой относительно конечного числа таких троек чисел положительно определенную квадратичную форму. Обращая оператор построенной разностной схемы, в правой части которой известная матрица умножается на вектор, составленный из неизвестных троек чисел, берется сужение полученной функции только на узлы, в которых заданы измеренные значения. Задавая эти значения, получаем моментные равенства неизвестных троек чисел, на которых построенный квадратичный функционал принимает наименьшее возможное значение. Приводится аналитическое решение задачи с минимальной энергией, что позволило получить значение неизвестного вектора, определяющего правую часть уравнения Лапласа. После чего легко восстанавливается искомая сеточная функция и вычисляются необходимые производные. Последние формулы выражены через интегралы от функций с сильной особенностью и, хотя эти интегралы существуют, их вычисление требует специальной техники. Поэтому рассматривается подход к решению задачи Дирихле методом конечных элементов. Подробно рассматривается основной алгоритм восстановления непрерывного поля с заданной гладкостью по дискретным измерениям. Для повышения достоверности предлагается осуществлять усреднение непрерывных полей, полученных для сеток разной геометрии с одинаковым количеством узлов.

Рассмотрена технология бесконтактного измерения поля деформаций с помощью лазерных сканирующих измерительных головок, которая включает в себя следующие основные элементы:

- исследуемая криволинейная поверхность разбивается на конечные элементы, которые выбираются в виде треугольников с вершинами в узлах хаотической сетки;

- определяются координаты узлов сетки в глобальной системе координат;

- восстанавливается непрерывная функция, описывающая геометрию недеформированной криволинейной поверхности с заданной гладкостью с использованием экстремальных свойств сплайн-функций в глобальной системе координат;

— измерительная лазерная головка перемещается сканером в пространстве по программно-заданной траектории и производит измерение в каждом узле трех компонент вектора виброперемещения;

— для каждого узла определяется вектор виброперемещения в глобальной системе координат;

— восстанавливается непрерывная функция, описывающая геометрию деформированной криволинейной поверхности с заданной гладкостью с использованием экстремальных свойств сплайн-функций в глобальной системе координат;

— дифференцируя разность непрерывных функций, описывающих геометрию деформированной и недеформированной поверхности, получают непрерывные поля шести компонент тензора деформаций в глобальной системе координат;

— для каждого узла определяется индивидуальная система координат, две оси которой лежат в плоскости, касательной к криволинейной поверхности, а третья совпадает с нормалью;

— для каждого узла в индивидуальной системе координат определяются шесть компонент тензора деформаций.

В качестве примера рассматриваются задачи бесконтактного измерения поля деформаций колеблющейся компрессорной лопатки, а также межпазового выступа диска компрессора при их статическом нагружении.

Одним из эффективных направлений повышения выносливости лопаток компрессора является использование технологических операций, создающих на кромках поля сжимающих остаточных напряжений. Однако, их величины, оптимальные для увеличения выносливости, приводят к потере устойчивости пера лопатки в процессе упрочнения. Рассматривается модернизация методики бесконтактных измерений деформаций применительно к задаче определения поля объемных остаточных напряжений в результате упрочнения кромок, сопровождающееся потерей устойчивости пера лопатки. Показано, что поле перемещений при колебаниях по высокочастотным собственным формам весьма сильно зависит от поля наведенных объемных остаточных напряжений. В этой связи предлагается диагностика серийных лопаток с использованием лазерных измерительных головок.

Глава 4. Некоторые диагностические критерии усталостного повреждения лопаток и дисков ГТД

Конструкции современных ГТД настолько сложны, что реализовать, по крайней мере, в настоящее время в эксплуатации измерение напряженно-деформированного состояния вращающихся рабочих колес не представля-

ется возможным. В настоящей главе рассматриваются некоторые критерии усталостного повреждения рабочих колес ГТД, полученные в результате экспериментальных исследований изменения амплитудно-частотных характеристик в процессе исчерпания ресурса от много- и малоциклового усталости лопаток и дисков.

Рассматриваются три критерия усталостного повреждения рабочих колес: изменение величины расслоения спектра при колебании рабочего колеса по взаимноортогональным собственным формам, изменение интенсивности частот, кратных основному тону колебаний, изменение окружной неравномерности напряжений лопаток рабочего колеса в сходственных точках.

Характерной особенностью рабочих колес ГТД является явление расслоения спектра собственных частот и искажение взаимноортогональных форм колебаний при нарушении поворотной симметрии колеса. Это явление исследовано в работах Иванова В.П., Матвеева В.В., Воробьева Ю.С. и др.

Считается, что величина расслоения спектра характеризует отличие реального рабочего колеса от идеального циклосимметричного. Следует отметить, что изготавливаемые рабочие колеса всегда имеют некоторую асимметрию, например, из-за того, что лопатки и диски изготавливаются с размерами, имеющими разброс в поле допусков, и отличаются друг от друга по геометрии, распределению масс, собственным частотам и так далее. Поэтому спектр собственных частот реального рабочего колеса всегда расслаивается при колебаниях по взаимноортогональным собственным формам. Однако при появлении трещины асимметрия рабочего колеса изменяется и, как следствие, изменяется величина расслоения спектра.

Сущность эффекта кратных частот заключается в том, что процесс накопления повреждений в материале сопровождается усилением интенсивности частот, кратных основному тону колебаний. Так спектр колебаний новой лопатки в начале усталостных испытаний не содержит частот, кратных основному тону колебаний, а спектр колебаний лопатки с усталостной трещиной содержит кратные частоты. Приводятся результаты экспериментов, которые доказывают, что генератором кратных частот является область материала в вершине трещины. Суть этих экспериментов заключается в удалении разрушившегося материала с последующим анализом спектра колеблющейся лопатки. Так спектр колебаний лопатки, прошедшей усталостные испытания, не содержит кратных частот, если усталостная трещина удалена электроэрозией, что является экспериментальным доказательством эффекта кратных частот. Показано, что существует корреляционная связь между исчерпанием ресурса и интенсивностями частот, кратных основному тону колебаний, в том числе и для замков лопаток турбин.

Окружная неравномерность напряжений лопаток рабочего колеса всегда имеет место. Однако обрыву пера лопатки, разрушению замка или межпа-

зового выступа диска всегда предшествуют процессы аномального колебания лопатки, то есть появляется лопатка, которая ведет себя не так, как остальные лопатки рабочего колеса, ее амплитуды колебаний (динамические напряжения) либо значительны, либо малы. Такое поведение лопатки объясняется изменением частотных характеристик рабочего колеса из-за появления усталостного повреждения.

Приводятся результаты комплексного исследования изменения величины расслоения спектра, интенсивности кратных частот и окружной неравномерности напряжений рабочих лопаток при различных вариантах растрескивания рабочего колеса в процессе роста усталостных трещин вплоть до разрушения:

- трещина на лопатке или нескольких лопатках;
- трещина на межпазовом выступе диска или нескольких межпазовых выступах;
- трещина на лопатке (лопатках) и межпазовом выступе диска (или нескольких межпазовых выступах) одновременно.

Основные результаты получены для рабочего колеса первой ступени компрессора низкого давления ГТД Д-36 и рабочего колеса турбины высокого давления ГТД АИ-25 ТЛ. Экспериментальные исследования амплитудно-частотных характеристик рабочих колес проводились в процессе многоцикловых испытаний лопаток на электродинамическом вибростенде и малоцикловых испытаниях дисков на электрогидравлическом стенде.

Электрогидравлический стенд позволяет в лабораторных условиях на неподвижном диске имитировать действие центробежных сил в зоне межпазового выступа. Для этого в каждый межпазовый выступ устанавливается имитатор лопатки, механически связанной с штоком гидроцилиндра, что позволяет осуществлять многоосное циклическое нагружение. Параметры нагружения выбираются из условия эквивалентности повреждаемости межпазового выступа в эксплуатации и на электрогидравлическом стенде. Рассматриваются теоретические вопросы управления температурным полем на диске в процессе испытаний на электрогидравлическом стенде. Предлагаются алгоритмы, позволяющие создать температурные поля, максимально приближенные к имеющим место при работе ГТД.

В процессе малоцикловых испытаний диск периодически снимается со стенда и осуществляется неразрушающий контроль состояния межпазовых выступов диска традиционными методами. Затем диск облопачивается лопатками, в том числе и прошедшими различные стадии многоцикловых усталостных испытаний. При этом используются концевки специальной конструкции, обеспечивающие жесткое защемление лопатки в межпазовом выступе диска. Рабочее колесо закрепляется в специальном приспособлении и возбуждаются резонансные колебания. Фиксируются амплитудно-частот-

ные характеристики рабочего колеса. При этом используются как контактные пьезоэлектрические датчики, так и бесконтактные сканирующие лазерные, что позволяет визуализировать формы колебаний участков поверхности рабочего колеса, не нарушая параметров симметрии.

Установлено, что в случае растрескивания лопаток вначале до появления усталостной трещины усиливается интенсивность частот, кратных основному тону колебаний, а затем начинает изменяться окружная неравномерность напряжений, и только при достаточно длинных трещинах изменяется величина расслоения спектра. При появлении трещин на межпазовом выступе диска изменение окружной неравномерности напряжений лопаток сопровождается резким уменьшением интенсивности частот, кратных основному тону колебаний. Величины расслоения спектра изменяются уже при небольших трещинах в межпазовом выступе и увеличиваются с ростом трещин. На начальном этапе растрескивания наблюдались случаи и уменьшения величин расслоения спектра, при этом появление трещины как бы восстанавливает симметрию рабочего колеса.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния натяга по бандажным полкам на окружной разброс динамических напряжений попарно бандажированных лопаток рабочего колеса турбины. На основании анализа измерения температурных полей лопаток турбины с принудительно перекрытыми охлаждаемыми каналами в системе полноразмерного ГТД в условиях испытательного стенда проведены эксперименты, позволяющие оценить изменения окружного разброса динамических напряжений лопаток в случае перекрытия охлаждаемых каналов посторонними частицами в эксплуатации.

Экспериментальные результаты получены без учета влияния поля центробежных сил. Проведены эксперименты, позволяющие качественно оценить усиление тенденции к расслоению спектров при появлении трещин на вращающемся рабочем колесе.

Экспериментально найденные закономерности изменения амплитудно-частотных характеристик рабочего колеса с трещинами позволяют осуществить диагностику состояния в случае реализации возможности измерения амплитудно-частотных характеристик рабочих колес непосредственно во время вращения ротора.

Глава 5. Доплеровское смещение частот в акустической диагностике вибрационных повреждений и колебаниях ГТД

Косеблюющиеся статорные детали газоздушного тракта являются источником неоднородности потока в ГТД, что приводит к насыщению спек-

тров пульсации потока интенсивными гармониками. Идентификация и анализ источников неоднородности представляют собой весьма трудную задачу. В настоящей главе на основе большого экспериментального материала рассматриваются особенности колебаний, вызванных тем, что при передаче колебательной энергии через поток частоты статорных деталей воспринимаются роторными с доплеровским смещением и наоборот.

Экспериментальные исследования проведены на турбовальном ГТД с редуктором, расположенным перед компрессором. Редуктор является источником возбуждения колебаний в широком спектре частот, в том числе вследствие неблагоприятных технологических факторов имеют место интенсивные редукторные вибрации с частотой, не кратной частоте вращения ротора. Энергия возбуждения колебаний передается вращающимся лопаткам через поток, омывающий корпус вибрирующего редуктора, при этом частоты колебаний редуктора воспринимаются лопатками с доплеровским смещением. Исследования динамических напряжений лопаток провели для двух режимов работы ГТД с различными частотами вращения ротора. На одном из режимов имели место явно выраженные резонансные колебания из-за кратности частоты вращения ротора собственной частоте лопаток рабочего колеса. Обработка экспериментальной информации заключалась в получении усредненных по времени спектров по группе тензодатчиков и по каждому из тензодатчиков в отдельности, а также сигнала во времени с каждого датчика, синхронизованного с физическими оборотами ротора. Установлено, что за один оборот ротора лопатка дважды подвергается воздействию комплекса возмущающих сил с частотами, попадающими в полосу доплеровского смещения. Резонансные колебания на соответствующих формах возбуждаются последовательно. Причем из-за того, что доплеровское смещение зависит от геометрии лопатки, может иметь место одновременное возбуждение колебаний по двум и более собственным формам. Лопатка колеблется, затухая, сразу по всем формам, попадающим в полосу доплеровского смещения, при этом в определенные моменты времени, строго фиксированные в соответствии с угловым положением ротора относительно источника колебательной энергии, возникают резонансные колебания по соответствующей собственной форме.

Суперпозиция всех форм колебаний, попадающих в полосу доплеровского смещения, приводит к резкому всплеску напряжений, повторяющихся с очень низкой частотой (порядка 1...2 Гц). Этот факт может объяснить случаи обрыва лопаток из-за усталости на больших наработках. Отмечается, что собственные частоты лопаток в рабочем колесе всегда имеют некоторый статистический разброс.

Исследования, проведенные на полноразмерных ГТД в условиях испытательного стенда с имитацией различных дефектов редуктора, показали

наличие сильной корреляционной связи между интенсивностью редукторных вибраций с частотой, не кратной частоте вращения ротора, и уровнем динамических напряжений лопаток компрессора, что легло в основу создания аппаратуры для диагностики лопаток.

На основе проведенных исследований предложена акустическая доплеровская диагностика окружного разброса напряжений лопаток в сходственных точках вращающегося рабочего колеса. Сущность подхода заключается в том, что неподвижный акустический датчик, расположенный асимметрично относительно оси вращения ротора, воспринимает частоты гармонически колеблющихся лопаток с доплеровским смещением. В общем случае при вращении ротора сигнал, фиксируемый акустическим датчиком, содержит как полезные составляющие, частоты которых изменяются в соответствии с эффектом Доплера, так и целый ряд помех. Считается, что все неинформационные составляющие сигнала можно разбить на следующие группы:

- периодические дискретные составляющие, синхронизированные с частотой вращения ротора;
- периодические составляющие, несинхронизированные с частотой вращения ротора;
- непериодический шум.

Если сигнал, фиксируемый акустическим датчиком, подвергнуть усреднению во времени, синхронизированному с частотой вращения ротора, то при достаточно большом числе усреднений непериодический шум и периодические составляющие, несинхронизированные с частотой вращения ротора, будут стремиться к нулю. Если затем, используя алгоритмы быстрого преобразования Фурье, осуществить переход в частотную область, то удастся легко удалить периодические дискретные составляющие, синхронизированные с частотой вращения ротора. Последующий переход во временную область с помощью алгоритма обратного быстрого преобразования Фурье позволяет получить информацию об окружной неравномерности напряжений лопаток вращающегося рабочего колеса.

Приводятся примеры измерения окружной неравномерности напряжений лопаток рабочего колеса в случае их гармонических колебаний, а также в случае их возбуждения стационарными источниками с частотой, изменяющейся в соответствии с эффектом Доплера.

В заключение рассматриваются вопросы реализации акустической доплеровской компьютерной диагностики вращающихся рабочих колес с использованием экспериментально установленных критериев вибрационных повреждений, а также синтеза акустического и лазерного подходов и их реализации в акусто-оптическом доплеровском сканирующем компьютерном виброметре.

Заключение

1. Исходя из требования единства методов и средств диагностики вибрационных повреждений в эксплуатации, при создании, доводке и производстве ГТД, в результате синтеза научных разработок в области тепловых двигателей летательных аппаратов, динамики и прочности, компьютерной и лазерной техники, прикладной математики и физики, а также в результате анализа и обобщения опыта экспериментальных исследований, выполненных с целью устранения причин отказов ГТД в эксплуатации на ПО «Моторостроитель» в период с 1978 по 1989 годы созданы фундаментальные основы для решения важной народнохозяйственной задачи - повышения безотказности авиационных ГТД на основе развития нового научного направления - акусто-оптической доплеровской компьютерной диагностики вибрационных повреждений ГТД.

2. Создан диагностический информационно-измерительный комплекс — акусто-оптический доплеровский сканирующий компьютерный виброметр, а именно :

- комплект лазерных измерительных головок для измерения нормальных и тангенциальных вибраций, которые аттестованы в органах Госстандарта как нестандартизованное средство измерений;

- методика армирования композитных материалов с переменной плотностью, предназначенных для использования в лазерных измерительных головках с целью обеспечения их эффективной виброзащиты при работе в сильных акустических и вибрационных полях;

- математическое обеспечение диагностического комплекса, включающее в себя адаптированные для целей акусто-оптических измерений методы алгоритмы и компьютерные программы цифровой обработки сигналов, а в случае, если не все участки конструкции доступны к наблюдению, развит подход использования их МКЭ моделей;

- методическое и программное обеспечение диагностического комплекса, обеспечивающее проведение измерений полей перемещений и деформаций больших участков колеблющихся конструкций на любых амплитудах, вплоть до разрушающих;

- зависимости между дискретными полями перемещений и непрерывными полями деформаций, полученные на основе экстремальных свойств сплайн-функций, которые положены в основу создания методического и программного обеспечения лазерных компьютерных измерений полей деформаций при динамическом и статическом нагружении любой интенсивности, вплоть до разрушающей;

— специализированные цифровые фильтры, позволяющие выделять из сигнала, фиксируемого акустическим датчиком, расположенным асимметрично относительно оси вращения ротора в газовоздушном тракте или же в ближнем акустическом поле ГТД, информацию об окружной неравномерности напряжений лопаток вращающегося рабочего колеса.

3. Экспериментально исследованы особенности колебаний лопаток, вызванных тем, что при передаче энергии через поток газа частоты статорных деталей воспринимаются роторными с доплеровским смещением и наоборот. Показано, что при этом имеет место суперпозиция всех форм колебаний, попадающих в полосу доплеровского смещения, что приводит к значительным напряжениям, которые следуют, однако, с малой частотой, что объясняет случаи усталостного разрушения лопаток на больших наработках ГТД.

4. Экспериментально получены критерии вибрационных повреждений рабочих колес: изменение величины расслоения спектра при колебаниях по взаимноортогональным собственным формам, генерации частот, кратных резонансной, а так же изменение окружной неравномерности напряжений лопаток рабочего колеса. Установлено, что в случае растрескивания лопаток в начале до появления усталостной трещины усиливается интенсивность частот, кратных основному тону колебаний, а затем начинает изменяться окружная неравномерность напряжений, и только при достаточно длинных трещинах изменяется величина расслоения спектра. При появлении трещины на межпазовом выступе диска изменение окружной неравномерности напряжений лопаток сопровождается резким уменьшением интенсивности частот, кратных основному тону колебаний. Величина расслоения спектра изменяется уже при небольших трещинах и увеличивается с ростом трещины. Установлено, что по критерию окружного разброса напряжений лопаток рабочего колеса возможно диагностирование дефектов системы охлаждения и изменения натяга по бандажным полкам турбинных лопаток. Экспериментально полученные критерии вибрационных повреждений и акусто-оптический, доплеровский сканирующий компьютерный виброметр применены для диагностики вибрационных повреждений вращающихся рабочих колес.

5. Получена совокупность результатов, относящихся к практическому применению акусто-оптического доплеровского сканирующего компьютерного виброметра, а именно:

— лазерные измерения полей перемещений и деформаций колеблющихся компрессорных и турбинных лопаток, рабочих колес, валов, корпусных деталей и обвязки ГТД;

— лазерные измерения полей объемных остаточных напряжений, введенных в процессе технологической операции упрочнения кромок, сопровождающейся потерей устойчивости профиля пера лопатки;

— лазерные измерения перемещений в доводке осевого упругого элемента упругодемпферной опоры ГТД;

— акустические доплеровские измерения окружной неравномерности напряжений лопаток вращающихся рабочих колес;

— лазерные доплеровские измерения величин расслоения спектра при колебаниях рабочих колес по взаимноортогональным собственным формам;

— лазерные доплеровские измерения интенсивности частот, кратных резонансной;

— лазерные измерения радиальных зазоров между вращающимися и невращающимися деталями ГТД.

6. В конструкцию, технологию серийного производства и эксплуатацию внедрены мероприятия, повышающие безотказность парка ГТД:

— диагностика состояния лопаток компрессора ГТД АИ-20 (разовая проверка в эксплуатации и постоянный контроль при сдаточных испытаниях на заводе изготовителе);

— диагностика состояния лопаток турбины высокого давления ГТД Д-36;

— диагностика состояния лопаток турбины ГТД АИ-9В;

— технология попарного бандажирования рабочих лопаток турбины высокого давления ГТД АИ-25 ТЛ;

— конструкция упругодемпферной опоры с осевым демпфером (на трех модификациях малоразмерного ГТД);

— рекомендации по изменению величин начальных радиальных зазоров между торцами лопаток и притираемыми покрытиями с целью сохранения высоких параметров экономичности в процессе выработки ресурса мало-размерным ГТД в эксплуатации;

— технология лазерных измерений объемных остаточных напряжений, наведенных на кромках компрессорных лопаток ГТД ТВ-3-117 с целью повышения их живучести.

7. В настоящее время проводятся работы по акустической доплеровской диагностике вибрационных повреждений непосредственно во время вращения роторов ГТД Д-18Т, Д-36, ТВ-3-117.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Кириченко А.И., Локшанов Е.А., Ройтман А.Б., Чернышов С. А. Модели для оценки влияния запаздывания в цепи обратной связи «отказ-устранение его причины» на темп роста надежности авиационных двигателей // Техническая справка ЦИАМ № 9218.— 1980.— 29 с.

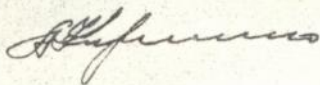
2. Капустян В.Е., Кириченко А.И. Синтез систем совершенствования надежности авиационных ГТД // Статья депонирована в ВИНТИ от 19 августа 1981г. № 4119-81 ДЕП.— 16 с.
3. Кириченко А.И., Карасев В.А., Ройтман А.Б. Метод обнаружения вибродиагностического сигнала при неполной информации о сигнале // Виброметрия, МДНТП им. Ф.Э.Дзержинского.— 1982.— с.70-72.
4. Кириченко А.И., Омельченко В.В. Исследование закономерностей накопления повреждений в материалах деталей ГТД методом анализа спектра колебаний // Малоцикловая усталость — механика разрушения, живучесть и материалоемкость конструкций. Тез. докл. IV Всесоюз. симпоз.— Москва, 1983.— с.27.
5. Кириченко А.И., Карасев В.А., Ройтман А.Б. Обнаружение вибродиагностических сигналов методом когерентного суммирования при неполной информации о частоте сигнала // Методы и средства вибродиагностики конструкций машин и механизмов. Тез. докл. Всесоюз. конф.— Каунас, ЦНИИинформ, 1983.— с. 27.
6. Кириченко А.И., Омельченко В.В. Исследование рассеяния энергии на дефектах материала лопаток ГТД методом спектрального анализа колебаний звукового диапазона // XIII Всесоюзная конф. по вопросам рассеяния энергии при колебаниях механических систем. Тез. докл.— Киев, 1983.— с. 27-28.
7. Кириченко А.И., Омельченко В.В. Неразрушающий контроль усталостных трещин лопаток ГТД методом анализа спектра вибраций // Повышение надежности авиационной техники средствами неразрушающего контроля. Труды IV отрасл. науч.-тех. конф.— Москва, ВИАМ, 1983.— с.380-382.
8. Кириченко А.И., Омельченко В.В. Установка для диагностики усталостных трещин в рабочих колесах ГТД // Новые технологические процессы и надежность ГТД.— М. ЦИАМ, 1983.— № 1.— с.18-21.
9. Кириченко А.И., Локштанов Е.А., Ройтман А.Б., Чернышов С. А. Влияние запаздывания в цепи обратной связи на темп совершенствования надежности авиационных ГТД // Вопросы экономики создания, производства и эксплуатации ГТД. Труды ЦИАМ № 1039, вып.2.— 1983.— с. 73-79.
10. Иванов С.В., Кириченко А.И., Черный В.В., Гуляев Ю.А. Оптический контроль радиального зазора газовой турбины // Координатно-чувствительные фотоприемники и опто-электронные устройства на их основе. Тез. докл. III Всесоюз. совещ.— Барнаул, 1985 — .
11. Заруцкий М.А., Кириченко А.И., Омельченко В.В. Авторское свидетельство 1267858 (СССР). Голографический способ контроля технического состояния объектов.— ДСП, 1985.

12. Детистов С.И., Кириченко А.И. Теоретическое и экспериментальное исследование собственных частот оболочечных колебаний вала газотурбинного двигателя // Пробл. машиностроения.—1985.—вып.24.—с.39-41
13. Егоров А.И., Капустян В.Е., Кириченко А.И. Оптимальное импульсное управление линейными системами с запаздыванием фазовых координат // Адаптивные системы автоматического управления.— 1986.— Вып.14.— с. 3-11.
14. Кириченко А.И., Левитин В.В., Макциковская Е.А. Рентгенодифрактометрическое определение внутренних напряжений в упрочненных деталях ГТД // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий. Тез. докл. III Всесоюз. науч.-технич. конф.—Запорожье,1986.—с. .
15. Кириченко А.И., Любчик Л.М. Синтез дискретных нестационарных регуляторов температурных полей // Техническая кибернетика и ее приложения. Вестник Харьковского политех.инст., № 240/7.—1987.—с. 6-8
16. Кириченко А.И., Харченко О.Ю. Управление неустойчивым состоянием дискретного линейного объекта с несимметричными ограничениями на управление // Техническая кибернетика и ее приложения.Вестник Харьковского политех.инст., № 258 /8.—1988.—с.7-10.
17. Березюк Б.А., Карпенко Н.П., Кириченко А.И. Авторское свидетельство на изобретение 1311334 (СССР). Упруго-демпферная опора.— ДСП,1987.
18. Кириченко А.И., Демиденко И.М. Диагностика состояния охлаждающих каналов лопаток газовых турбин ГТД при помощи термокрасок // Испытания авиационных ГТД.—№ 18,1991.— с. 65-72.
19. Детистов С.И., Кириченко А.И. Статистический анализ собственных частот лопаток газотурбинного двигателя //Проблемы машиностроения.— 1989.—вып.32.— с.25-27.
20. Губский В.И., Кириченко А.И., Черный В.В. Применение лазерной техники в экспериментальных исследовательских работах при доводке газотурбинных двигателей // Испытания авиационных ГТД.—№ 18, 1991.— с.72-77.
21. Аполлонин С.Л., Кириченко А.И., Воробьев Ю.С., Гошкодера В.П. Использование сглаживающих сплайнов при обработке голографических интерферограмм // Динамика и прочность машин.— вып.49,1989.— с.-59-64.
22. Аполлонин С.Л., Кириченко А.И. Применение сглаживающих сплайнов для количественной оценки распределения деформаций вдоль кромок колеблющихся лопаток газотурбинного двигателя по результатам голо-

- графического эксперимента // XIII Всесоюзн. сов. по проблемам прочности двигателей. Тез. докл.— Москва, 1989, с.10-11.
23. Кириченко А.И., Чмутин В.М., Черный В.В. Агрегатирование лазерного виброметра для целей неразрушающего контроля авиадвигателей // Конструкционная прочность двигателей. Тез. докл. XII Всесоюз. науч.-тех. конф.— Куйбышев, 1990. — с.74-75.
 24. Кириченко А.И., Сытин В.В., Черный В.В. Математическая модель лазерного световодного доплеровского датчика скорости вращения // Диагностическое применение лазеров и волоконной оптики в народном хозяйстве. Тез. докл. конф.-Волгоград, 1990.— с.75.
 25. Кириченко А.И., Сытин В.В., Черный В.В. Обработка информации лазерного доплеровского датчика скорости вращения // Диагностическое применение лазеров и волоконной оптики в народном хозяйстве. Тез. докл. конф.-Волгоград, 1990.— с. 76.
 26. Кириченко А.И. Автоматизация лазерных динамических измерений напряженного состояния лопаток газотурбинного двигателя // Труды IV международной научно-технической конф. «Проблемы комплексной автоматизации» т.3, Киев, 1990.— с. 79-83.
 27. Кириченко А.И., Мищенко С.Н., Шкурко С.И. Исследование влияния малоциклового усталости на расслоение спектров собственных частот рабочих колес // Конструкционная прочность двигателей. Тез. докл. XII Всесоюз. науч.-технич. конф.-Куйбышев, 1990.— с.73-74.
 28. Кириченко А.И., Костенко В.О. Идентификация законов распределения динамических и стохастических процессов в реальном времени // Труды международного семинара «Информатика в технологии приборостроения», Москва, 1990.— с. 73-75.
 29. Костенко В.О., Кириченко А.И. Совершенствование структуры экспертной системы диагностики на основе анализа информационности потока сигнала // Труды международного семинара «Информатика в технологии приборостроения», Москва, 1990.— с.23-25.
 30. Капустян В.Е., Кириченко А.И. Автоматизация измерения напряжений на основе экстремальных свойств сплайн-функций // Труды всесоюзного семинара по автоматизации инженерного труда «Компьютер и жизнь», Харьков.— 1990.— с. 75-76.
 31. Зотов Н.М., Кириченко А.И., Курамин Е.И., Курчин В.В., Певнев В.И., Ренкевичнос Б.С., Слышкин В.В., Черный В.В., Чмутин А.М., Шувалов Г.Д. Лазерный доплеровский виброметр. Промышленный образец 05.1267.0 0.00.00 // Диагностическое применение лазеров и волоконной оптики в народном хозяйстве. Тез. докл. науч. конф. — Волгоград, 1990.— с.79-80.

32. Анищенков В.М., Богуслаев В.А., Кириченко А.И., Лукьянов В.С. и др. Авторское свидетельство 1658528 (СССР). Способ обработки деталей поверхностным пластическим деформированием.—ДСП,1990.
33. Омельченко В.В., Кириченко А.И. Некоторые диагностические критерии усталостного повреждения рабочих колес турбомашин // Механическая усталость металлов.Тез.докл. XI междунар. коллоқ.— Киев,1991.— с.98-99.
34. Кириченко А.И. Авторское свидетельство 1686923(СССР). Способ диагностики усталостных трещин на вращающемся рабочем колесе турбомашин.— ДСП,1991.
35. Кириченко А.И. Экспериментальные исследования колебаний вращающихся лопаток, возбуждаемых стационарными источниками // Обеспечение надежности авиационных двигателей в эксплуатации. Труды КИИГА, 1991.— с. 95-102.
36. Кириченко А.И., Шепель А.И. Диагностика состояния охлаждаемых лопаток методом лазерной доплеровской компьютерной виброметрии // Надежность машин, математическое и машинное моделирование задач динамики. Моделирование - 91.Тез.докл.Всесоюз.конф.— Кишинев, 1991.— с.96.
37. Кириченко А.И., Банас Ф.П., Голдовская Г.В. Авторское свидетельство 1625080 (СССР). Направляющая лопатка турбомашин из металлического композиционного материала.— ДСП, 1991.
38. Банас Ф.П., Кириченко А.И., Шепель А.И. Использование МКЭ для конструирования вентиляторных лопаток из металлического композиционного материала // Аэроупругость турбомашин.Тез.докл.XIII Всесоюз.конф.— Труды ЦИАМ, № 1294,1991.— с.45.
39. Кириченко А.И., Чмутин А.М. Диагностика авиадвигателей с использованием лазерного доплеровского виброметра-тангенциальных колебаний // Проблемы машиностроения.— 1992.— вып.7.— с.22-26.
40. Воробьев Ю.С., Кириченко А.И., Мищенко С.Н. Влияние трещин на спектр собственных частот дисков газотурбинных двигателей // XXIV научное совещание по проблемам прочности двигателей.Тез.докл.— Москва,1992.— с.14-15.
41. Воробьев Ю.С., Кириченко А.И., Шепель А.И. Управление спектром собственных частот компрессорной лопатки за счет малого изменения геометрии пера // Проблемы машиностроения. — вып.37.— 1992.— с.3-10.
42. Adamenko V.A., Kirichenko A.I. Blades Stressed Condition Diagnosis of Gas-Turbine Engines with Long Service Life // International Conference on Airworthiness and Certification Engines Proceedings, 1990, pp 224-228.

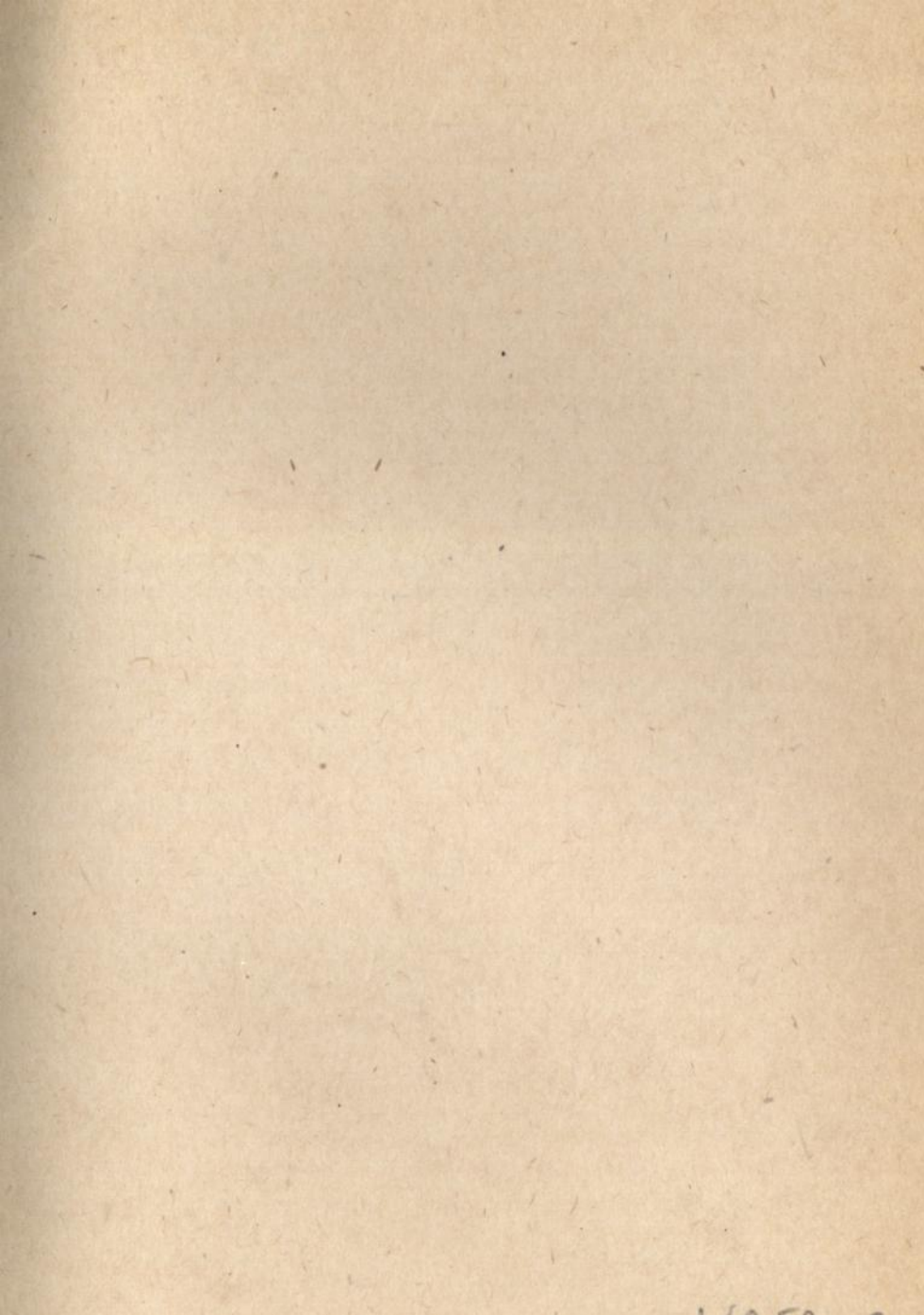
43. Kirichenko A.I., Romanenko L.G., Shepel A.I. FEM Application to Vibration Parameter Measurement of Contractions by Laser Doppler Scanning Vibration Meter // Sixth International Conference on Mathematical Methods in Engineering Proceedings, Plzen, Czechoslovakia, 1991, pp 205-208.
44. Kirichenko A.I. Laser Computer Procedures' Measurement of the Vibrating Structural Components' Deformations // 6th International Conference on Mechanical Behaviour of Materials (ICM-6) Proceedings. Tokyo, Japan, 1991 (post deadline), pp 1-6.
45. Kirichenko A.I. The Numerical Methods in Non-Contact Measurements of Deformations // International Conference on Computational Engineering Science (ICES91) Proceedings, Melbourne, Australia, 1991, pp 745-748.
46. Levitin V., Kirichenko A. Residual stresses in gas-turbine engines blades and disks // The Third International Conference on Residual Stresses (ICRS 3) Abstracts, Tokushima, Japan, 1991, v.2, pp 277. Levitin V., Kirichenko A. Residual stresses in gas-turbine engines blades and disks // Science and technology RESIDUAL STRESSES - III, v.2, Elsevier Applied Science, London & New York, pp 1507-1513.
47. Kirichenko A.I., Kapustyan V.E., Shepel A.I. Laser Measurements of Dynamic Stresses by External Properties of Spline-Functions // International Symposium on Non-Destructive Testing & Stress-Strain Measurement, & FENDT'92 Proceedings, Tokyo, Japan, 1992, pp 121-127.
48. Boguslajev V.A., Kirichenko A.I., Shepel A.I., Banas F.P., Shirokonos Ju.A. Nondestructive Testing Measurements of volumetric residual Stresses at Compressor Blade Edges // International Symposium on Non-destructive Testing & Stress-Strain Measurement, & FENDT'92 Proceedings, Tokyo, Japan, 1992, pp 37-41.
49. Kirichenko A.I., Shepel A.I. Fatigue fracture of cyclosymmetric systems // Ninth European Conference on Fracture (ECF9) Proceedings, Varna, Bulgaria, printed and bound by Engineering Materials Advisory Services LTD, United Kingdom, 1992, pp 1281-1284.
50. Kirichenko A.I., Shepel A.I. FEM and Laser Measurement of Strass-Strain State of Complex 3-D Contractions // International Conference on Computational Engineering Science (ICES-92) Proceedings, Hong Kong, printed and bound by WH Wolfe Associates, Alpharetta, Georgia, USA, 1992, pp 491.
51. Kirichenko A.I., Kapustyan V.E. Laser Measurements of Dynamic Stresses by External Properties of Spline-Functions // International Conference on Computational Engineering Science (ICES-92) Proceedings, Hong-Kong, printed and bound by WH Wolfe Associates, Alpharetta, Georgia, USA, 1992, pp 508.



Подписано в печать 06.04.93. Формат 60x84/16. Бумага типограф.
Офсетная печать. Усл.печ.л. I,86. Уч.изд.л. 2,0. Тираж 100 экз.
Заказ № 78-1 . Цена . Изд. № 311/ш.

Издательство КИИГА.

252050. Киев-50, проспект Космонавта Комарова, I.



AB 27.306

AB 27.306