



**БОЛГАРСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**  
**ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ**

---

**ВЛАДОВ Михаил**

**АДАПТИВНАЯ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание образовательной и ученой степени „Доктор”

5. Технические науки, Шифр 5.5 Транспорт, навигация и авиация,  
02.21.07 Автоматизированные системы для обработки и управления информации

Научный консультант: доцент **Георги Сотиров**, д.т.н.

**София 2012**

Диссертационный труд обсужден на разовом расширенном Научном семинаре ИКСИ – БАН, 05.11.2010 г. на основании Приказа № 66А/14.10.2010 Директора ИКСИ-БАН.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 171 наименований и содержит 206 страниц основного текста, 110 рисунков, 29 таблиц.

Нумерирование глав, параграфов, фигур, таблиц и формул автореферата соответствует диссертации.

Автор диссертации Михаил Владов является сотрудником предприятия «COMELPRO» S.R.L”, г. Кишинев, Молдова.

Защита диссертационного труда производится ..... в ..... в Заседательном зале – ИКИТ – БАН, 1113 г. София, ул. „Акад. Г. Бончев”, блок 1.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Института космических исследований и технологий – БАН, ул. „Акад. Г. Бончев”, блок 1.

Автор: Михаил Владов

Тема: „Адаптивная телеметрическая система контроля двигателей летательных аппаратов”

Тираж 10

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность работы

Работа посвящена важной и актуальной научной проблеме создания адаптивных телеметрических систем контроля двигателей летательных аппаратов.

Создание современных высокоэффективных летательных аппаратов требует разработки новых образцов телеметрического оборудования, необходимого для оценки соответствия тактико-технических характеристик изделия требованиям технического задания, непрерывного контроля параметров летательных аппаратов за все время выполнения миссии, а основным средством получения информации о процессах, происходящих на изделии и вне его во время испытаний и эксплуатации, являются телеметрические системы.

По некоторым опубликованным данным, около 90% расходов на получение и обработку измерительной информации в радиотелеметрических системах тратится на избыточную информацию, поэтому решение проблемы разработки новых методов и средств адаптивных телеизмерительных систем особенно актуально при нахождении разумного компромисса в получении максимума информации о поведении испытуемой системы и минимуме массо - габаритных и энергетических затрат телеметрической аппаратуры.

Этот сложный комплекс вопросов экспериментального и теоретического плана, в первую очередь, включает:

а) определение фактического поведения контролируемых параметров при известных эксплуатационных нагрузках (например, структурные и деформационные изменения металла, температурные и вибрационные характеристики отдельных узлов);

б) выбор критериев, характеризующих поведение адаптивной телеизмерительной системы, для разработки адаптивного алгоритма самообучения и изменения структуры телеметрической системы;

в) проведение испытаний в условиях, близких к эксплуатационным;

г) создание испытательного оборудования, воспроизводящего заданные условия эксплуатации адаптивных телеметрических систем;

**Актуальность темы** заключается в разработке теоретических основ новых методов и средств адаптивных телеметрических систем контроля и испытаний турбореактивных двигателей, космических и летательных аппаратов различного назначения, учитывающих структуру объекта контроля, а также причинно-следственные и логические связи между подсистемами объекта контроля и априорные знания об объектах контроля для решения практических задач адаптации телеметрических систем применяя методы сжатия передаваемых данных и изменения скорости передачи данных и программы телеизмерений в

зависимости от помеховой обстановки в канале связи используя при этом методы самообучения.

**Область исследований** связана с адаптивными телеметрическими системами и охватывает проблемы самообучающихся систем с целью получения максимальной информации об исследуемом объекте при минимальных массогабаритных и энергетических показателях телеметрической системы.

**Целью работы** является разработка научных основ и методов адаптации телеметрических систем контроля и испытаний турбореактивных двигателей, космических и летательных аппаратов различного назначения; разработка методов самообучения телеметрической системы; экспериментальные исследования и техническая реализация семейства адаптивных телеизмерительных систем контроля и испытаний турбореактивных двигателей, космических и летательных аппаратов различного назначения.

**Для достижения цели в работе были поставлены и решены следующие основные задачи:**

1. Выбор эффективных методов самообучения телеметрической системы в зависимости от условий возмущающих воздействий;

2. Выбор эффективного метода сжатия данных телеметрической системы контроля и испытаний;

3. Построение математических моделей сигналов от датчиков различных величин системы телеметрии ЛА для моделирования потока измерительной информации ЛА при построении адаптивной телеметрической системы со сжатием данных.

4. Разработка методики вычисления уровня механического напряжения в материале лопаток авиационных двигателей ( $\sigma$ );

6. Разработка методики вычисления коррекции дополнительной погрешности от амплитудно-частотной характеристики измерительного тракта, температуры, вибрации и частоты вращения телеметрической системы;

7. Разработка структурно – функционального подхода построения архитектуры адаптивной телеметрической системы контроля двигателей ЛА;

8. Разработка принципов и методов формирования и автоматического ведения электронного формуляра в телеметрической аппаратуре;

9. Разработка имитатора сигналов датчиков механического напряжения и температуры, для испытаний телеметрических систем при вращении до 50000 об/мин, с относительной погрешностью воспроизведения частоты и амплитуды напряжения переменного тока, соответствующего значениям механического напряжения и температуры не более 0,2 - 0,3 %;

10. Разработка, изготовление и метрологическая аттестация стенда вращения, предназначенного для испытания семейства СКИ «Агат» и прочих изделий в части механических воздействий при вращении до 50000 об/мин.

11. Разработка методики поверки адаптивной телеметрической системы СКИ «Агат»;

12. Разработка и создание производства семейства адаптивных телеметрических систем контроля и испытаний турбореактивных двигателей, космических и летательных аппаратов различного назначения.

**Основная концепция** решения задачи адаптации телеметрических систем контроля двигателей ЛА заключается в самообучении телеметрической системы, в зависимости от условий возмущающих воздействий, на основе накопления базы данных об основной и дополнительной погрешности измерений, возникающей дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения и изменения характеристик входных сигналов заключающихся в значительном сокращении избыточной измерительной информации – сжатие данных.

**Методы исследований** основаны на использовании теории вероятностей, теории информации, теории управления, дискретной математики, теории познания, математических и статистических методов, метода сравнений и аналогий, метода обобщений, метода натурального моделирования и метода экспертных оценок.

**Научная новизна исследования** заключается в создании принципиально новых средств измерений и испытаний, методики испытаний и получении качественно новых результатов, позволяющих реализовать цифровые адаптивные телеметрические системы контроля и испытаний турбореактивных двигателей, космических и летательных аппаратов различного назначения и **содержится в следующих конкретных результатах:**

1. Разработан эффективный метод адаптации телеметрической системы контроля и испытаний;

2. Разработан эффективный метод самообучения телеметрической системы в зависимости от условий возмущающих воздействий;

3. Разработаны математические модели сигналов от датчиков различных величин системы телеметрии ЛА для моделирования потока измерительной информации ЛА при построении адаптивной телеметрической системы со сжатием данных;

4. Разработана и практически апробирована, во всех поставляемых СКИ «Агат», методика вычисления уровня механического напряжения в материале лопаток авиационных двигателей ( $\sigma$ );

5. Разработана и практически апробирована, во всех поставляемых СКИ «Агат», методика вычисления коррекции дополнительной погрешности от амплитудно-частотной характеристики измерительного тракта, температуры, вибрации и частоты вращения телеметрической системы;

6. Разработаны принципы и методы формирования и автоматического ведения электронного формуляра и внедрены в адаптивной телеметрической аппаратуре СКИ «Агат»;

7. Разработана и практически апробирована, во всех поставляемых СКИ «Агат», методика поверки адаптивной телеметрической системы СКИ «Агат»;

8. Разработан и реализован структурно – функциональный подход к построению архитектуры адаптивной телеметрической системы контроля двигателей ЛА;

9. Созданы новые направления работ связанные с использованием СКИ «Агат» для:

- бесконтактного измерения температуры вращающихся элементов газотурбинных двигателей. Это разработка перископического пирометра для измерения температуры рабочих лопаток турбины авиационных двигателей (типа АЛ-31Ф), с последующей обработкой информации о температуре лопаток специализированным программным комплексом и созданием карты теплового состояния лопаток для их анализа и определения дефектов лопаток;

- бесконтактного измерения радиального зазора лопаток компрессора, турбины авиационных двигателей. Это разработка 12-ти канальной системы контрольно измерительной СКИ «Агат-РЗ»;

- измерения и индикации действующих амплитуд изгибных напряжений на валу несущего винта вертолета в процессе всего срока службы до списания вертолета. Это разработка двухканальной системы контрольно измерительной СКИ «Агат-ИАН»;

### **Практическая значимость исследования**

Исследования и рекомендации, высказанные в диссертационной работе, а также разработанные и серийно выпускаемые на протяжении более 8 лет адаптивные телеметрические системы контроля и испытаний авиационных двигателей, используются для проведения стендовых и летных испытаний авиационных двигателей различного назначения, практически на всех авиастроительных предприятиях России и Украины.

На сегодняшний день компанией «COMELPRO» S.R.L. серийно выпускаются 8 типов семейства адаптивных телеметрических систем «АГАТ»: «АГАТ-1.1», «АГАТ-Л», «АГАТ-500С», «АГАТ-АНТ», « АГАТ-222», «АГАТ-117», «АГАТ-Л48», «АГАТ-500» и два типа адаптивных телеметрических систем «АГАТ» для космических аппаратов и летательных объектов различного назначения.

Впервые, в практике летных испытаний разрабатываемых и модернизируемых авиационных двигателей моторостроительных предприятий Российской Федерации, в ЛИИ им. М.М Громова было проведено 6 полетов на летающей лаборатории СУ-27 № 3711 с двигателем АЛ-31Ф, в передней опоре которого установлена аппаратура «АГАТ-Л» с накопительным устройством. На рис. 1 показан двигатель АЛ-31Ф с установленной в центре аппаратурой «АГАТ-Л»;



Аппаратура СКИ  
«АГАТ-Л»

Рис. 1. Двигатель АЛ-31Ф с установленной в центре аппаратурой «АГАТ-Л»

Система контрольно-измерительная СКИ «АГАТ-АНТ» обеспечила оперативное и с высоким качеством проведение летных испытаний двигателя АИ -222-25 на самолете ЯК-130 по оценке эффективности функционирования опытной системы противопомпажной защиты. С мая по ноябрь 2009 года проведено более 50 полетов, общая наработка СКИ «АГАТ-АНТ» с учетом стендовых и летных испытаний составила более 50 часов. По результатам первых полетов была выявлена причина наличия ложных срабатываний системы противопомпажной защиты, произведена корректировка программного обеспечения блоков управления и защиты двигателя ЭСУ -222 и продолжены испытательные полеты.

### **Внедрение в промышленности**

Основные положения и результаты диссертационной работы были практически апробированы и нашли широкое применение в стендовых и летных испытаниях авиационных двигателей в следующих предприятиях, конструкторских бюро и отраслевых институтах:

1. «COMELPRO» SRL, Молдова, г. Кишинев;
2. ФГУП ММП «Салют», Россия, г. Москва;
3. ОАО «Сатурн», Лыткаринский механический завод, Россия, Промзона Тураево, г. Лыткарино, Московской области;
4. ОАО «Климов», Россия, г. Санкт-Петербург;
5. ГНЦ РФ ЦИАМ им. «П. И. Баранова», Россия, г. Москва;
6. ОАО НПП «Аэросила», Россия, г. Ступино, Московской обл.;
7. ОАО «НПП «Мотор», Россия, г. Уфа, Башкирия;
8. КБ им А.С. Яковлева, Россия, г. Москва.

## **Апробация результатов исследования**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10-ти международных конференциях в Молдове, Болгарии, Германии, России и Украины, семинарах и симпозиумах, в том числе: на расширенном научном семинаре Института Космических Исследований Болгарской Академии наук, г. София, республика Болгария, ноябрь 2010г; на расширенном научно техническом совете Генерального конструктора ФГУП «НПЦ Газотурбостроения «Салют», Россия, г. Москва, 9 марта 2011г; на расширенном научно техническом совете ОАО НПП «Аэросила», Россия, г. Ступино, Московской обл, 14 марта 2011г; 2-я международная конференции г. Кишинев, май ISTEI 2008г; Международная научно-практическая конференция г. Москва, НПО «Сатурн», май 2008г; Международная научно-техническая конференция АО СП завод «Топаз» г. Кишинев, октябрь 2008г; конференция в Германии UNIVERSITAT SIEGEN Institut fur Digitale Kommunikationssysteme Wissenschaftliches Kommunikations-und Sicherheitskolloquium, март 2009г; 10-я международной научно-практической конференции „Современные информационные и электронные технологии” 18-22 мая 2009г. Украина, г. Одесса; Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества» 28 сентября- 3 октября 2009, г. Самара; 6-я международной конференции «Microelectronics and Computer Science» Chisinau, Moldova, October 1-3, 2009; пятая научной конференции с международным участием „Космос, экология, нанотехнологии, безопасность” SENS 2009, София, 2-4 ноября 2009г; шестая научная конференция с международным участием „Космос, экология, нанотехнологии, безопасность” SENS 2010, София, 2-4 ноября 2010г; III международная научно-техническая конференция "АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА". ЦИАМ 30.11.10 - 3.12.2010, Москва, ЦИАМ.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 31 научных работ и 1 патент, 7 авторских статей в рецензируемых журналах: “Moldavian Journal of the Physical Sciences”, 2009г. и 2010г, 3 статьи в сборнике „Космос, экология, нанотехнологии, безопасность” SENS 2010, София, Болгария, 3 статьи в сборнике „Современные информационные и электронные технологии” 2009г. Украина, г. Одесса.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 171 наименований и содержит 206 страниц основного текста, 110 рисунков, 29 таблиц.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### **Глава 1. Анализ методов и тенденции развития телеметрических систем контроля двигателей летательных аппаратов.**

В первой главе диссертации проведен анализ существующих решений по направлениям проводимой работы в ведущих странах - производителях телеметрических систем: США, Великобритания, Германия, Япония и Россия.

Огромный вклад в исследования, разработку и практическое использование аппаратуры для телеметрирования различных узлов и систем двигателей летательных аппаратов, конструкций промышленных и военных систем и объектов, проведены такими учеными, как Ф. Чаки, К. J. Astrom, В. Wittenmark, Andry van der Hoek, Richard N. Taylor, X. Харт, Линеверг Ф. Саридис Дж, Вебер Д. Р., Spanos P.D. Mushung L.J., Ольховский Ю.Б., Новоселов О.Н., Журавин Л.Г., Иванов В.М., Семенов Е.И., Деревицкий Д.П., Фрадков А.Л., Срагович В.Г., Фомин В.Н., Якубович В.А. Долинов С.Н., Карабанов И.А, Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. Мановцев А.П, . Тюкин И. Ю., Терехов В. А., Ефимов Д. В., Свириденко В.А, Авдеев Б, Калашников И. Д. и многими другими. Наиболее известные специалисты – Ф. Чаки, X. Харт, Мановцев А.П., Семенов Е.И.

В соответствии с проведенным анализом существующих технических решений по реализации телеметрических систем для контроля двигателей летательных аппаратов сделаны следующие основные выводы:

1) Существует достаточно широкий список фирм и производимой ими аппаратуры, позволяющих создавать телеметрические системы вращающегося оборудования с широким спектром технических характеристик. Наиболее известные из них: «ROTADATA Limited», England; Wireless Data Corporation (США); Tateyama Electronics Corp (Япония); Accumetrics Associates (США); Manner и «DATATEL» (Германия).

2) Как правило, телеметрическая система состоит из: телеметрического блока устанавливаемого на вращающемся оборудовании; блока формирования сигналов (ROTADATA Limited) устанавливаемого на неподвижной части системы; наземной телеметрической станции в виде отдельного блока (ROTADATA Limited) или стойки (DATATEL); персонального компьютера для автоматизированного рабочего места оператора. Такие телеметрические системы достаточно дорогие, так например система телеметрии фирмы ROTADATA Limited с числом каналов более 72 стоит более 300 тыс. фунтов стерлингов.

В разделе 1.2 рассмотрены тенденции развития адаптивных телеметрических систем, отмечено, что по функциональному признаку адаптивные телеметрические системы могут быть разделены на системы со сжатием данных, системы с самообучением, системы с перестраиваемой структурой. В свою очередь системы со сжатием данных делятся на системы обеспечивающие возможность восстановления исходного сигнала и на системы, не имеющие такой возможности. Так, например, при исследовании вибрации,

какого либо устройства, могут передаваться амплитуда и частота вибрации, по которым полностью восстановить сигнал нельзя, однако может быть достигнуто сокращение числа отсчетов, по сравнению с числом отсчетов, необходимых для восстановления колебательного процесса с заданной точностью.

Системы с восстановлением исходного сигнала также могут быть разделены на две группы: системы с уменьшением координат сообщения, системы с уменьшением объема каждой координаты. Системы с уменьшением координат сообщения могут быть разделены на следующие три группы: системы с адаптивной коммутацией, системы с адаптивной дискретизацией, системы с автоматически регулируемой частотой равномерной дискретизации.

Адаптивные телеметрические системы открывают дополнительные возможности для улучшения метрологических характеристик и повышения помехоустойчивости этих систем и в частности:

- использование адаптивной временной дискретизации (экстраполяция нулевого порядка) для всех измерительных сообщений, в зависимости от общей информативности входного ансамбля измерительных сообщений, позволяет менять длину телеметрического кадра, т.е. реализуется канал связи с переменной пропускной способностью («АССПИ»);

- использование адаптивной коммутации измерительных каналов, при этом анализатор погрешностей на каждом такте адаптивной коммутации определяет номер измерительного канала, в котором погрешность наибольшая, преобразованный в АЦП отсчет этого сообщения вместе с кодом номера канала (адресом) передаются в синхронный канал связи ("Эфа-3" и "ПАС-1"). Адаптивные телеметрические системы со сжатием данных и с восстановлением исходного сигнала («АССПИ» г. Запорожье - Украина, "Эфа-3" и "ПАС-1" г. Санкт- Петербург - Россия) выпускались в 80 – 90 -х годах 20 века для специальных применений в ракетной и космической технике и в настоящее время развития не получили.

## **Выводы к главе 1**

В соответствии с проведенным анализом существующих технических решений по реализации телеметрических систем для контроля двигателей летательных аппаратов можно сделать следующие основные выводы:

1.1. Существует достаточно широкий список фирм и производимой ими аппаратуры, позволяющих создавать телеметрические системы вращающегося оборудования с широким спектром технических характеристик. Наиболее известные из них:

- «ROTADATA Limited», England;
- Wireless Data Corporation (США);
- Tateyama Electronics Corp (Япония);
- Accumetrics Associates (США);
- Manner (Германия);
- «DATATEL» (Германия).

1.2. Как правило, телеметрическая система состоит из:

- телеметрического блока устанавливаемого на вращающемся оборудовании;
- блока формирования сигналов (ROTADATA Limited) устанавливаемого на неподвижной части системы;
- наземной телеметрической станции в виде отдельного блока (ROTADATA Limited) или стойки (DATATEL);
- персонального компьютера для автоматизированного рабочего места оператора.

В качестве ПК для АРМ могут быть использованы промышленные компьютеры различного исполнения, в т.ч.:

- портативные переносные рабочие станции;
- промышленные компьютеры типа «ноутбук»;
- стационарные промышленные компьютеры требуемой конфигурации.

Такие телеметрические системы достаточно дорогие, так например система телеметрии фирмы ROTADATA Limited с числом каналов более 72 стоит более 300 тыс. фунтов стерлингов.

1.3. Для реализации канала передачи данных существуют следующие основные варианты:

- передача аналоговой информации от датчиков с помощью радиопередатчиков;
- передача цифровых данных с помощью радиопередатчиков;
- передача цифровых данных с помощью оптической системы;
- передача цифровых данных индуктивным способом.

1.4. Питание вращающейся части телеметрического оборудования, осуществляется с помощью встроенного источника питания или индуктивной систем питания.

1.5. Адаптивные телеметрические системы открывают дополнительные возможности для улучшения метрологических характеристик и повышения помехоустойчивости этих систем и в частности:

- использование адаптивной временной дискретизации (экстраполяция нулевого порядка) для всех измерительных сообщений, в зависимости от общей информативности входного ансамбля измерительных сообщений, позволяет менять длину телеметрического кадра, т.е. реализуется канал связи с переменной пропускной способностью («АССПИ»);
- использование адаптивной коммутации измерительных каналов, при этом анализатор погрешностей на каждом такте адаптивной коммутации определяет номер измерительного канала, в котором погрешность наибольшая, преобразованный в АЦП отсчет этого сообщения вместе с кодом номера канала (адресом) передаются в синхронный канал связи ("Эфа- 3" и "ПАС-1"). Адаптивные телеметрические системы со сжатием данных и с восстановлением исходного сигнала («АССПИ» г. Запорожье - Украина, "Эфа- 3" и "ПАС-1" г. Санкт-Петербург - Россия) выпускались в 80 - 90-х годах 20 века для специальных применений в ракетной и космической технике и в настоящее время развития не получили.

1.6. В настоящий момент, несмотря на интенсивность работ в области телеметрических систем и значительность полученных результатов основные проблемы адаптивных телеметрических систем не решены. Формальная процедура формирования системы признаков адаптации телеизмерительной системы отсутствует, не построена общая теория самообучения и многие задачи по адаптации и изменению архитектуры системы с трудом поддаются формализации или не формализуются вообще.

1.7. Систем контрольно измерительных с самообучением для авиационных двигателей, основное назначение которых – уменьшение дополнительной погрешности, вносимой изменениями внешних условий работы аппаратуры, в результате информационного поиска не обнаружено. В таком же состоянии находятся и системы с перестраиваемой архитектурой.

## **Глава 2. Разработка теоретических основ адаптивной телеметрической системы контроля двигателей ЛА**

Показано что, по сути, обучение является аппроксимационной задачей нахождения многомерной поверхности, обеспечивающей наилучшее совпадение с набором тренировочных данных. Методика обучения основывается на процедуре строгой интерполяции, и заключается в том, что для данного набора тренировочных шаблонов, необходимо найти такие значения параметров  $\mu_j, w_j$ , и векторов  $c_j, j=1, \dots, N$ , чтобы функция удовлетворяла интерполяционному условию:

- приведенная суммарная погрешность ( $\delta_{\text{сум.}}$ ) от всех рассматриваемых факторов должна быть меньше заданного значения погрешности (например  $\delta_{\text{зад.}} = 1\%$ ).

$$\delta_{\text{сум.}} < \delta_{\text{зад.}} \quad (2.1)$$

Для проведения самообучения создается база первичных данных параметров измерительных каналов и характеристик подключаемых датчиков. Настройка базы данных осуществляется оператором с учетом технических характеристик каналов сбора измерительной информации: коэффициентов усиления сигналов от датчиков в каждом канале; коэффициентов смещения уровня сигнала в каждом канале, а также, с учетом реальных характеристик датчиков, установленных на контролируемый двигатель: номинальной и реальной чувствительности датчика; номинального и реального сопротивления датчика.

Алгоритм самообучения состоит из следующих операций:

1. Снимаются экспериментальные кривые зависимости приведенной погрешности амплитудной характеристики  $\delta_{\text{ах}}$  тензометрических каналов измерения динамической деформации на предприятии изготовителе или непосредственно пользователем в диапазоне входных напряжений на одной или нескольких частотах в полосе пропускания измерительного канала, например на частоте 1 и 7 кГц и в нормальных климатических условиях (НКУ), т.е при температуре  $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ , относительной влажности  $(60 \pm 15)\%$ , атмосферном давлении 96 ...104 кПа (от 650 до 800 мм рт. ст.). Для снятия амплитудных характеристик используются до 20 контрольных точек на каждой из частот. На рис.

2.1 показана амплитудная характеристика 6-ти измерительных каналов, приведенная к измеренному  $U_{изм.вх.}$  входному напряжению. На рис. 2.2 показаны экспериментальные кривые зависимости приведенной погрешности амплитудной характеристики 6 тензометрических каналов снятые на частоте сигнала 1 кГц и при температуре +25°C.

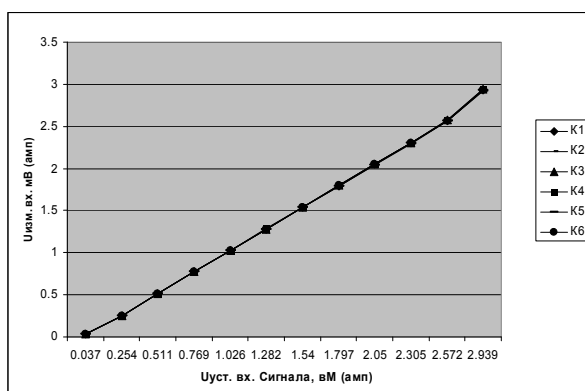


Рис. 2.1. Амплитудная характеристика 6-ти измерительных каналов K1-K6

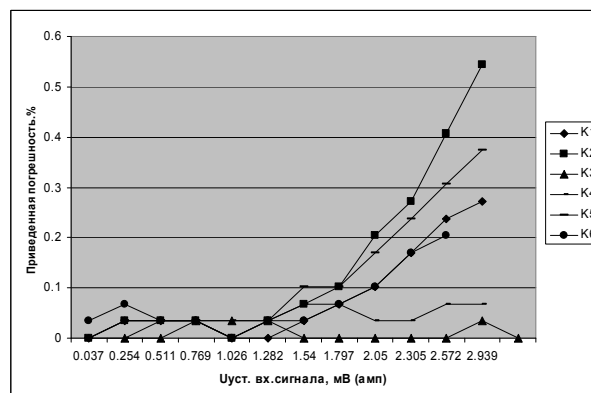


Рис. 2.2. Зависимость приведенной погрешности АХ в НКУ

2. Полученные кривые аппроксимируются с помощью аппроксимирующей функции, в виде многочлена:

$$\varphi(X) = a_0 + a_1 X + \dots + a_n X^n \quad (2.3)$$

и коэффициенты аппроксимации в табличном виде записываются во внешнюю память.

3. Снимаются экспериментальные кривые зависимости приведенной погрешности амплитудно-частотной характеристики 6-ти тензометрических каналов измерения динамической деформации в следующей последовательности:

3.1. Создается база данных корректирующих коэффициентов усиления  $\xi(f_i)$  АЧХ в полосе частот измерительных каналов (например для СКИ «Агат-500» от 20 Гц и до 40 кГц, с шагом в 10 Гц от 20 и до 100 Гц, с шагом 100 Гц от 100 Гц и до 40 кГц) в нормальных климатических условиях (НКУ), т.е. при температуре  $(25 \pm 10)$  °С, относительной влажности  $(60 \pm 15)$  %, атмосферном давлении 96-104 кПа (от 650 до 800 мм рт. ст.) для этого производятся следующие операции:

- первоначально в базу данных для корректирующих коэффициентов усиления  $\xi(f_i)$  АЧХ устанавливаем, паспортные (расчетные) коэффициенты усиления  $K_u$  для всех каналов, например  $K_u = 500$  для СКИ «Агат-500»;

- на входы каналов подаем сигналы от прецизионного генератора с амплитудой  $A_{вх}$  из диапазона входных напряжений тензорезисторов от 0,0375 мВ до 2,941 мВ, например устанавливаем амплитуду  $A_{вх}$  генератора равной 1 мВ;

- записываем поток измерительной информации от всех измерительных каналов в течение 3-4 сек;

- вычисляем приведенные к входу текущие значения напряжения  $U_{изм}(f_i)$  для всех частот в полосе пропускания измерительных каналов;

- далее вычисляем массив значений  $U_{изм.вых.}$  по формуле (2.3):

$$U_{изм.вых} = \frac{(\Psi_x - \Psi_{мин}) \times (|U_{мин}| + |U_{макс}|)}{\Psi_{макс} - \Psi_{мин}} - |U_{мин}| \quad (2.4)$$

Где: -  $\Psi_{мин}$ ,  $\Psi_{макс}$  - минимальные и максимальные значения кодов АЦП для калибровочного канала;

-  $\Psi_x$  – текущее значение кода АЦП сигнала измерительного канала;

-  $U_{мин}$ ,  $U_{макс}$  - минимальное и максимальное напряжения калибровочного канала;

- с помощью спектрального анализатора, реализованного на базе стандартного пакета Матлаб, определяем из текущих значений  $U_{изм.вых.}$  приведенные ко входу амплитуды  $A_{изм}(f_i)$  входного сигнала на частотах указанных выше;

- определяем коэффициенты коррекции АЧХ измерительных каналов  $\xi(f_i)$  :

$$\xi(f_i) = \frac{A_{изм}(f_i)}{A_{вх}(f_i)} \quad (2.5)$$

- корректируем коэффициенты усиления  $K_u$  нов. в базе данных по формуле(5):

$$K_{унов} = K_u \cdot \xi(f_i) \quad (2.6)$$

На рис. 2.3 показаны в виде графика коэффициенты усиления, для 24 тензометрических каналов «СКИ « Агат-500», полученные после определения коэффициентов коррекции;

3.2. Снимаются экспериментальные кривые  $\delta_{ачх}$  зависимости приведенной погрешности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) тензометрических каналов в рабочем диапазоне температур. На рис.2.4 показаны экспериментальные кривые приведенной погрешности АЧХ для 5 из 24 измерительных каналов в рабочем диапазоне температур (от минус 40 до +80)°С. Можно отметить, что в температурном диапазоне от минус 10 °С и до 35 °С кривые приведенной погрешности по АЧХ для всех 24 каналов имеют одинаковый характер и хорошую повторяемость, в начале диапазона (40 Гц) погрешность порядка 21 – 22 % резко убывающая до 1 % на частоте 200 Гц. Далее в полосе частот 200 Гц – 4 кГц погрешность меньше 1 % с монотонным возрастанием до 27 % на частоте 20 кГц. Это объясняется амплитудной характеристикой фильтра

Баттерворта 5-го порядка реализованного на микросхеме MAX7420.

На рис. 2.4 в диапазоне температур: (от минус 40 до минус 15) °С и (от +40 до +80) °С показаны кривые погрешностей каналов К2, К3 и К5 имеющие отклонения, и достаточно существенные, от стандартных кривых каналов К1, К4 и др. Этот факт можно объяснить изменением характеристик микросхем, конденсаторов и других компонентов от температуры, а также взаимным влиянием каналов друг на друга в этих условиях.

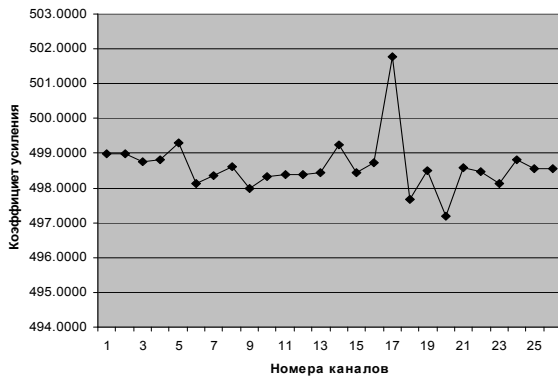


Рис. 2.3. Коэффициенты усиления каналов после определения коэффициентов коррекции

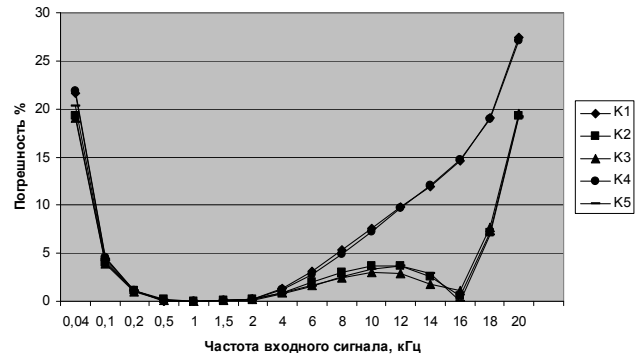


Рис. 2.4. Приведенная погрешность измерения АЧХ, для разных температур эксплуатации без коррекции

4. Кривые зависимости приведенной погрешности АЧХ аппроксимируются, и коэффициенты аппроксимации записываются в другие регистры внешней памяти. В результате измерений создается матрица параметров, характеризующая состояние измерительных каналов в контрольных точках для всего рабочего диапазона температур.

Для этого:

4.1. Коэффициенты коррекции, используемые в режиме постсеансной обработки в рабочем диапазоне температур эксплуатации, определяются по формуле:

$$K_{TKi} = K(T_{i\_min}) + \frac{\{K(T_{i\_max}) - K(T_{i\_min})\} \times \{T_x - T_{i\_min}\}}{\Delta T}, \quad (2.7)$$

Где: -  $K(T_{i\_min})$  и  $K(T_{i\_max})$  - коэффициенты коррекции для максимальной и минимальной температур диапазона  $\Delta T$ ;  $T_x$ - текущая температура в диапазоне  $\Delta T$ ;

$T_{i\_min}$  – минимальная температура диапазона  $\Delta T$ ;  $\Delta T$ - температурный «шаг» измерения коэффициентов коррекции в базе данных.

4.2. Корректируем коэффициенты усиления  $K_i$  в базе данных, снятые согласно п. 3.2 по формуле :

$$K_{и\ нов.} = K_{и} \times K_{Ткi} \quad (2.8)$$

4.3. Кривые зависимостей приведенной погрешности АЧХ с учетом корректирующих коэффициентов приведенных выше, для измерительных каналов К1, К3, К6, К17 и К21, показаны на рис. 2.5 Максимальная приведенная погрешность по АЧХ для 24 измерительных каналов СКИ «Агат-500» составляет 0,531 % в канале К21.

5. Снимаются экспериментальные кривые  $\delta_{вр}$  зависимости приведенной погрешности измерения амплитуды напряжения переменного тока, соответствующего значениям механического напряжения по двум, случайным образом, выбранным каналам и соответствующего одному или нескольким значениям из диапазона входного сигнала

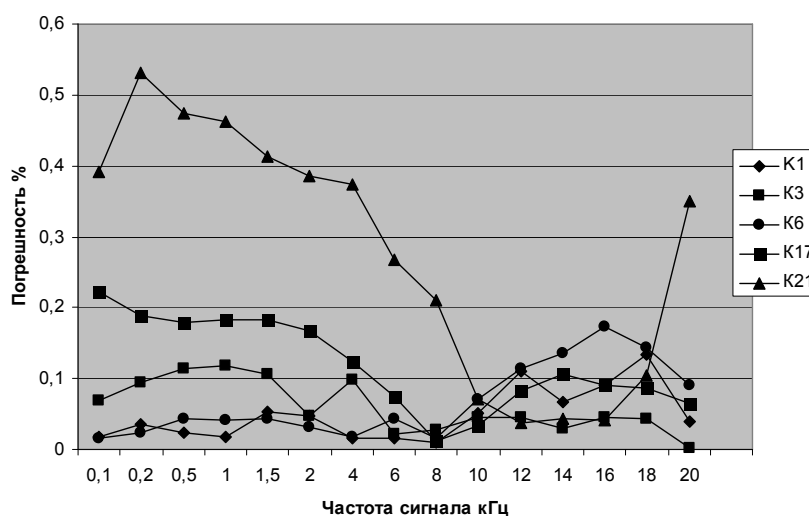


Рис. 2.5. Приведенная погрешность измерения АЧХ после коррекции, измерительные каналы К1, К3, К6, К17 и К21

(0,0375мВ - 2,941мВ), например  $U_{вх} = 1,028$  мВ(амп.), механического напряжения лопаток турбины тензометрических каналов в диапазоне частот вращения валов двигателя (от 0 до 44000 об/мин) для определения дополнительной погрешности измерения динамической деформации лопаток турбин за счет влияния линейного и центробежного ускорений. На рис. 2.6 показаны кривые зависимости приведенной погрешности измерения амплитуды напряжения переменного тока. Измерения проводились для 12 каналов, случайным образом выбранных, из 24 каналов. Максимальное значение погрешности составило  $\pm 0,17$  % в диапазоне частот (от 0 до 44000) об/мин, причем резонансная частота лежала в диапазоне частот вращения от 20000 до 30000 об/мин.



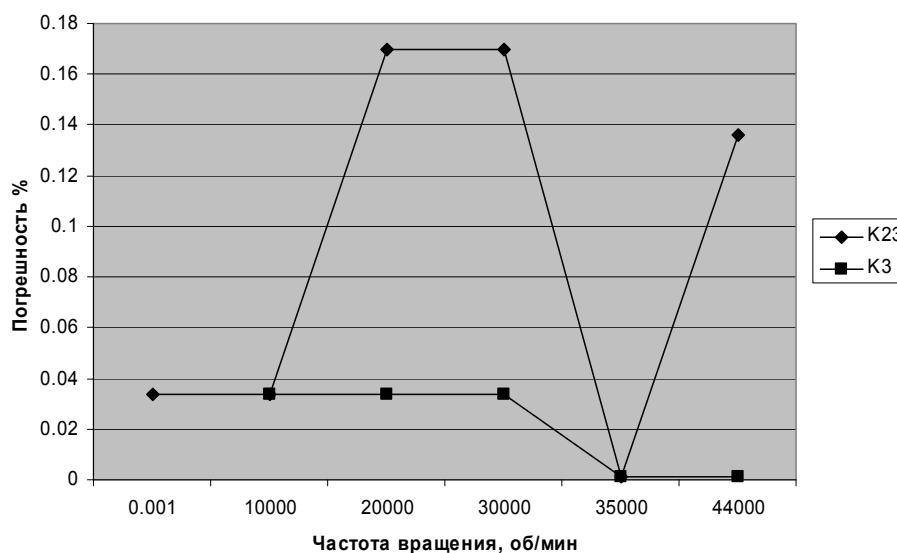


Рис. 2.6. Зависимость приведенной погрешности измерения амплитуды напряжения от частоты вращения ротора турбины

6. Снимаются экспериментальные кривые  $\delta_{\text{вибро.зависимости}}$  приведенной погрешности измерения амплитуды напряжения переменного тока соответствующего значениям механического напряжения из – за влияния вибраций с ускорением до 20 g в диапазоне частот (от 20 до 2000) Гц. Измерения проводились для 12 каналов, случайным образом выбранных, из 24 каналов. Максимальное значение погрешности составило  $\pm 0,1 \%$ .

7. Снимаются экспериментальные кривые  $\delta_{\text{пит.зависимости}}$  приведенной погрешности измерения амплитуды напряжения переменного тока соответствующего значениям механического напряжения при изменении напряжения питания СКИ «Агат»  $U_{\text{пит}} = 27 \text{ В}$  на  $\pm 10 \%$ . Измерения проводились для 24 каналов в нормальных климатических условиях. Максимальное значение погрешности составило не более  $\pm 0,05 \%$ .

8. Снимаются экспериментальные кривые  $\delta_{\text{непр.раб.}}$  зависимости приведенной погрешности измерения амплитуды напряжения переменного тока соответствующего значениям механического напряжения за время непрерывной работы в течение трех часов и температуре внутри СКИ «Агат»  $60^\circ\text{C}$ . Измерения проводились для 24 каналов. Максимальное значение погрешности составило не более  $\pm 0,08 \%$ .

9. Эксперименты по определению кривых  $\delta_{\text{звук.дав.}}$  зависимости приведенной погрешности измерения амплитуды напряжения переменного тока соответствующего значениям механического напряжения из-за уровня звукового давления в диапазоне частот от 50 Гц и до 10 кГц с максимальным уровнем до 160 дБ проводились в 2005 году на предприятии ФГУП ММП «Салют». Проведенные испытания КИС «Агат-1.1» в нормальных климатических условиях с помощью имитатора сигналов датчиков механического напряжения показали, что максимальное значение погрешности составило не более  $\pm 0,12 \%$ .

10. Определяется приведенная суммарная погрешность от всех рассматриваемых выше факторов по известной из литературы формуле - среднеквадратическому значению погрешности, и для случая, когда

составляющие погрешности статистически независимы, суммарная погрешность определяется как:

$$\delta_{\text{сум.}} = (\delta^2_{\text{ах}} + \delta^2_{\text{ачх}} + \delta^2_{\text{вр}} + \delta^2_{\text{вибро}} + \delta^2_{\text{пит}} + \delta^2_{\text{непр.раб}} + \delta^2_{\text{звук.дав}})^{1/2} \quad (2.9)$$

Суммарная погрешность от факторов ( $\delta^2_{\text{вр.}} + \delta^2_{\text{вибро.}} + \delta^2_{\text{пит.}} + \delta^2_{\text{непр.раб.}} + \delta^2_{\text{звук.дав.}}$ )<sup>1/2</sup> составляет 0,25%, причем погрешностями  $\delta_{\text{пит.}}$  при изменении напряжения питания СКИ «Агат»  $U_{\text{пит}} = 27\text{В}$  на  $\pm 10\%$  и  $\delta_{\text{непр.раб}}$  в течение трех часов можно пренебречь, так как они меняют величину погрешности во втором знаке после запятой.

В нашем случае, для СКИ «Агат-500» максимальная суммарная погрешность  $\delta_{\text{сум.}} = 0,8\%$ , для канала К21, что меньше требуемого по техническому заданию ( $\delta_{\text{сум.}} = 1,5 - 2,0\%$  для разных СКИ «Агат») почти в два раза.

Кроме этого определяются экспериментальные кривые  $\delta_{\text{бизм}}$  приведенной погрешности измерения частоты переменного тока соответствующего значениям частоты вращения ротора турбины. Эта оценка, позволяет определить, с какой точностью производится «привязка» приведенной погрешности измерений к оборотам двигателя турбины. Неоднократные проверки зависимости приведенной погрешности частоты переменного тока соответствующего значениям частоты вращения ротора турбины во всем диапазоне частот входного сигнала (от 0,050 до 8,333) кГц показывал максимальное значение погрешности не более  $\pm 0,025\%$ .

Это можно объяснить цифровой системой реализации подсчета импульсов с датчика ДЧВ – 2500, то подтверждает высокую точность «привязки» измерений к частоте вращения ротора турбины двигателя.

Из вышеизложенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Основную роль в приведенной погрешности измерения составляет  $\delta_{\text{ачх}}$  - погрешность за счет неравномерности АЧХ в рабочем диапазоне температур: от минус 20 до +80 °С, где и производится аппроксимация погрешности измерения по формулам, приведенным выше. Эта коррекция позволила довести максимальную приведенную погрешность измерения  $\delta_{\text{ачх}}$  до уровня 0,531% в канале К21.

2. Максимальная приведенная погрешность измерения за счет неравномерности АХ -  $\delta_{\text{ах}}$  каналов из группы каналов К1 - К24 для двух каналов К2 и К21 составила 0,544 %, а для остальных каналов не более 0,15%.

3. Суммарная погрешность от факторов ( $\delta^2_{\text{вр}} + \delta^2_{\text{вибро.}} + \delta^2_{\text{пит.}} + \delta^2_{\text{непр.раб.}} + \delta^2_{\text{звук.дав.}}$ )<sup>1/2</sup> составляет не более 0,25%, причем погрешностями  $\delta_{\text{пит}}$  при изменении напряжения питания СКИ «Агат»  $U_{\text{пит.}} = 27\text{В}$  на  $\pm 10\%$  и  $\delta_{\text{непр.раб.}}$  непрерывной работы в течение 3-х часов можно пренебречь, так как они меняют величину погрешности во втором знаке после запятой.

Для построения математических моделей входных сигналов с датчиков давления, вибрации, ускорения и температуры, устанавливаемых на ЛА рассматривались 250 телеметрируемых сигналов ЛА, которые были разбиты на 6 групп по активности сигналов. Графики телеметрируемых сигналов ЛА сняты

специалистами предприятия «Comelpro» SRL с двигателями ЛА различного назначения в конце 20-го столетия.

Анализ показал, что доля сигналов первой и второй групп (всего 150 сигналов) в общей нагрузке системы составляет 5,5 %. Очевидно, что сигналы этих групп нецелесообразно подвергать процедуре сжатия. На передающей стороне может быть использована только предварительная фильтрация. Доля сигналов третьей группы также невелика – 13,5 %. Эту группу сигналов целесообразно разделить на две части. В одну из них надо отобрать те, эффект от сжатия которых максимален, а остальные сигналы передавать с помощью равномерной временной дискретизации (РВД).

Анализ сигналов 3-6 групп показывает, что для описания можно использовать модели двух типов: первый тип представляет сумму детерминированного процесса (медленноменяющаяся постоянная составляющая) и высокочастотного колебания, близкого к гармоническому с низкочастотной огибающей; второй тип - стационарный случайный процесс.

Модель сигналов первого типа достаточно проста - сумма детерминированной составляющей и гармонического колебания. Детерминированная составляющая описывается полиномом степени 1 или 2. Примером построения математической модели сигнала 3-й группы на начальном участке может служить функция:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & , & 0 \leq t < 1.3 \\ Ax^2 + Bx + C + D \exp(\alpha t) \sin(\omega_0 t) & , & 1.3 \leq t < 2.18 \\ Ex^2 + Fx + G + H \sin(\omega_0 t) & , & 2.18 \leq t < 2.35 \\ I \sin(\omega_0 t) & , & t \geq 2.35 \end{cases} \quad (2.11)$$

Где: A = 39,8; B = 107,4; C = 40,9; D = 35000; E = 8120; F = 37208; G = 42610,5; H = 1; I = 1;  $\alpha = -4.5$  1/с;  $\omega_0 = 175$  1/с.

Частота гармонического колебания определяется по среднему значению частоты представленной реализации. Огибающая в зависимости от вида сигнала описывается либо как детерминированная составляющая, например, либо как низкочастотный случайный процесс. Математическая модель сигналов от датчиков различных величин системы телеметрии ЛА использовалась для моделирования потока измерительной информации ЛА и в системах контрольно измерительных (СКИ) «Агат» с целью сокращения избыточности измерительной информации, т.е. для построения адаптивной телеметрической системы со сжатием данных. Активность сигналов (скорость изменения самого сигнала и его производных) первого типа, как следует из представленных материалов, весьма значительно меняется во времени. Эти сигналы имеют, как правило, два явно выраженных участка максимума активности: в начале и в конце эксперимента.

Анализ сигналов второго типа, рис. 2.10 и рис. 2.12, показал, что сигналы второго типа могут быть описаны

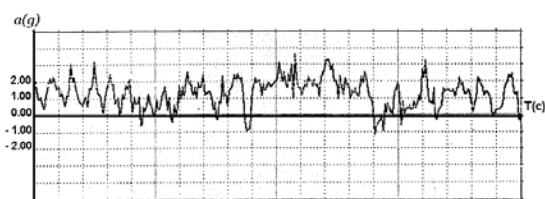


Рис. 2.10. Сигналы 4-й группы - 20 шт.

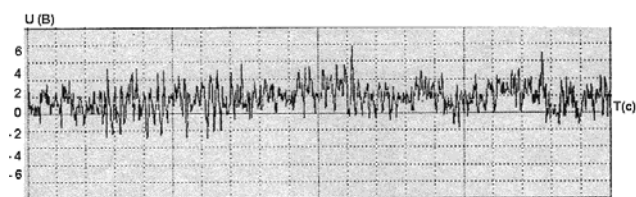


Рис. 2.12. Сигналы 6-й группы - 10 шт.

как стационарные случайные процессы с корреляционными функциями:

$$R_1(\tau) = \exp(-\alpha|\tau|) [1 + \alpha|\tau| + \alpha^2\tau^2/3], \quad (2.12)$$

$$R_2(\tau) = \exp(-\alpha^2\tau^2). \quad (2.13)$$

Спектральные плотности таких сигналов равны соответственно

$$S_1(\omega) = \frac{16\alpha^5}{3(\alpha^2 + \omega^2)^3} \quad \text{и} \quad (2.14)$$

$$S_2(\omega) = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\pi} \exp(-\omega^2 / (4\alpha^2)) \quad (2.15)$$

Для сжатия квазидетерминированных сигналов, содержащих смесь гармонического колебания и низкочастотной составляющей (тренда), предлагается использовать способ, при котором передаче подлежат значения экстремумов сигнала. Для восстановления такого сигнала могут быть использованы различные способы. Если амплитуда колебаний существенно меньше диапазона измерений сигнала, то наиболее простой способ заключается в линейной интерполяции отсчетов. В этом случае погрешность аппроксимации будет зависеть от соотношения диапазона изменения сигнала и амплитуды колебаний. Для сжатия стохастических сигналов описывающих стационарные случайные процессы (сигналы 4, 5 и 6 групп), применяются методы необратимого и апертурного сжатия. *Апертурное сжатие* проводится на основе интерполяционных полиномов 1-2 степеней. Установлено, что для квазидетерминированных сигналов 1-3 групп, при передаче значений экстремумов этих сигналов, возможно осуществление их сжатия с коэффициентом превышающим 5. Сжатие стохастических сигналов 4 - 6 групп может производиться с коэффициентом, достигающим значения 1,7. Применение моделирования потока измерительной информации для СКИ «Агат» позволило увеличить количество каналов измерения при существующей пропускной способности оптического канала (25Мбит/сек) для семейства СКИ «Агат» в 1,7 – 2 раза.

В разработанной методике вычисления уровня механического напряжения в материале лопаток авиационных двигателей, измерение уровня механического напряжения ( $\sigma$ ) проводится, расчетным путем, на основе измерения уровня напряжения (мВ) на тензорезисторах, подключенных к измерительным каналам СКИ «Агат». В основу расчета уровня напряжения материала ( $\sigma$ ) взята формула закона Гука – закона упругости, для малых напряжений и деформаций, который имеет вид простой пропорциональности:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (\text{Па или Н/м}^2) \quad (2.33)$$

где:  $E$  - модуль Юнга (модуль упругости) и зависит только от свойств материала;

$\varepsilon$  - относительная деформация равна:  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ , где:  $\Delta L$  - удлинение или сжатие материала,  $L$  - исходная длина материала.

Вычисление уровня напряжения материала, в соответствии со схемой рис. 2.17, производится косвенным путем согласно формуле (2.33), при этом переменным входным параметром является измеряемые изменения напряжения на тензорезисторе, причем должно быть также учтено реальное значение чувствительности тензодатчика.

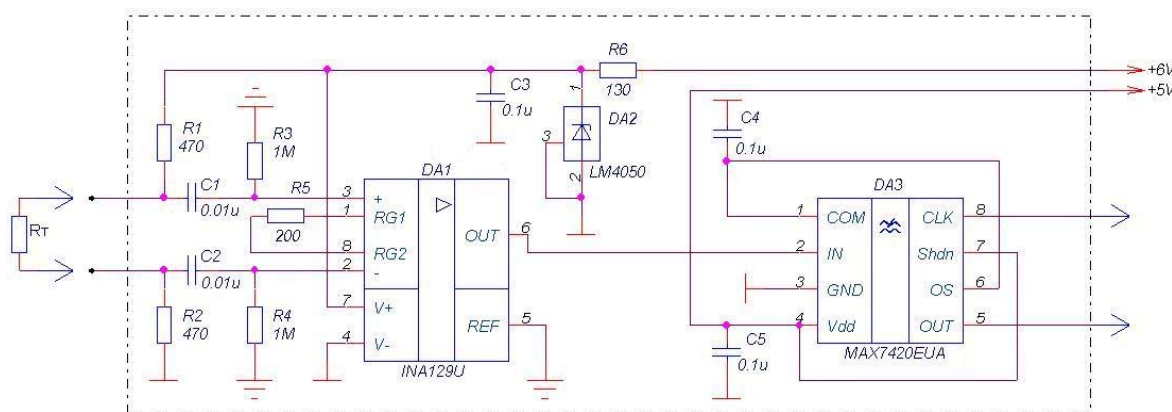


Рис. 2.17. Схема подключения тензодатчика к измерительному входу СКИ «Агат»

В нашем случае, согласно рис. 2.17, когда имеют место питание тензорезистора от источника напряжения и значение входного сопротивления операционного усилителя, конечно, это выражение дает погрешность от 0,2 % до 0,6 % – при различных сопротивлениях тензорезисторов, поэтому более строгим является выражение для расчета  $\sigma$ , учитывающее эти факторы:

$$\sigma = \frac{U_{\text{изм}i}}{K \cdot U_{\text{ном}}} \cdot \frac{S_{\text{ном}}}{S_{\text{реальн}}} \cdot \varepsilon_{\text{ном}} \cdot E \quad (2.39)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий влияние сопротивления тензорезисторов и входного сопротивления при деформации, равной  $\varepsilon_{\text{ном}}$ .

$$K = \frac{U_{реальн}}{U_{ном}} \quad (2.40)$$

Подставляя в выражение для вычисления входного напряжения в системе значения  $R_{вх}$ ,  $R_{д ном}$ ,  $R_{д реальн}$ ,  $\Delta R_{ном}$ ,  $\Delta R_{реальн}$ ,  $U_{пит}$  и заменяя член  $\Delta R_{реальн}/\Delta R_{ном}$  на  $R_{реальн}/R_{ном}$ , что удобнее, получим значение:

$$K = \frac{R_{тр.реальн}}{R_{тр.ном}} \times \frac{(R_{тр.ном} + R_{вх})^2}{(R_{тр.реальн} + R_{вх})^2} \quad (2.41)$$

Таким образом, окончательное выражение для расчета напряжения в материале  $\delta_{изм}$  приобретает вид:

$$\sigma_{изм} = \frac{U_{изм i}}{U_{ном}} \cdot \varepsilon_{ном} \cdot E \cdot \left[ \frac{S_{ном}}{S_{реальн}} \cdot \frac{R_{тр.ном}}{R_{тр.реальн}} \cdot \frac{(R_{тр.реальн} + R_{вх})^2}{(R_{тр.ном} + R_{вх})^2} \right] \quad (2.42)$$

где  $\delta_{изм}$  - значение уровня напряжения материала, кг/мм<sup>2</sup>;  $U_{изм i}$  - значение напряжения на входе системы, мВ;  $U_{ном}$  - значение напряжения на входе системы при номинальных значениях относительной деформации  $\varepsilon_{ном}$ , чувствительности тензорезистора  $S_{ном}$  и сопротивлении тензорезистора  $R_{тр ном}$ , мВ;  $R_{тр реальн}$  - реальное значение сопротивления тензорезистора, Ом;  $R_{тр ном}$  - номинальное значение сопротивления тензорезистора, Ом;

$S_{реальн}$  - реальное значение чувствительности тензорезистора, мВ;  $S_{ном}$  - номинальное значение чувствительности тензорезистора, мВ.  $E$  - модуль Юнга для материала детали, кг/мм<sup>2</sup>.

Значение номинального входного напряжения от тензодатчика  $U_{вх.ном}$  определяется по формуле:

$$U_{вх.ном} = U1 - U2 = \left| \frac{E_{п} \times \Delta R_{тр.ном} \times R_{вх}}{(R_{тр} + R_{вх})^2} \right| \quad (2.43)$$

где:  $U1 = \frac{E_{п} \times R_{тр}}{R_{тр} + R_{вх}}$  - напряжение на тензорезисторе при  $\Delta R_{тр} = 0$ ;

$$U_2 = \frac{E_n \times (R_{тр} \pm \Delta R_{тр.ном})}{R_{тр} + R_{вх} \pm \Delta R_{тр.ном}}$$
 - напряжение на тензорезисторе при его изменении на  $\Delta R_{тр.ном}$

Заменяя  $\Delta R_{тр.ном}$ , значением согласно формуле (2.104), получим:

$$U_{вх.ном} = \frac{E_n \cdot S_{ном} \cdot \varepsilon_{ном} \cdot R_{тр.ном} \cdot R_{вх}}{(R_{тр.ном} + R_{вх})^2}, \quad (2.44)$$

где:  $E_n$  - напряжение питания потенциометрической схемы.

Основное новшество методики, направленное на повышение точности и достоверности результатов измерений, заключается в прямом постоянном измерении уровня напряжения (мВ) на тензорезисторах, подключенных к измерительным каналам СКИ «Агат», которое является входным контролируемым параметром. Остальные значения аргументов в формулах (16) и (18) известны из паспортных данных применяемых тензорезисторов и материала лопаток компрессора и турбины авиационного двигателя и записываются, перед началом эксплуатации в базу данных для расчета  $U_{вх.ном}$  и  $\sigma_{изм}$ .

## Выводы к 2-й главе

2.1. Понятие адаптации или адаптивности в технике носит очень широкий характер и имеет, поэтому много толкований. К сожалению, до сих пор нет точного общепринятого определения адаптивной системы, поэтому конкретизация определения адаптации обычно связана с целями исследования и конструирования.

2.2. В зависимости от цели управления адаптивные системы можно условно разделить на следующие уровни:

- первый уровень характеризуется способностью самонастройки параметров регулятора на основе информации о состоянии объекта, находящегося под возмущающим действием внешней среды. Оценка состояния объекта может осуществляться либо прямым измерением требуемых параметров, либо путем их идентификации. В последнем случае на объект подаются определенные пробные управляющие воздействия, фиксируется его реакция и на основании анализа поведения объекта дается оценка априорно неизвестным или изменившимся его параметрам.

- второй уровень адаптации характеризуется включением в состав управляющего устройства дополнительных информационных средств, обеспечивающих сбор и обработку данных о состоянии внешней среды. На основании анализа изменений внешней среды осуществляется коррекция параметров, позволяющая в новых условиях достичь поставленной цели.

- третий уровень адаптации характеризуется развитыми средствами сбора информации о внешней среде, самодиагностирования и саморемонта компонент управляемой производственной системы. Рассмотренные уровни адаптации

различаются не столько количеством дополнительных устройств, обеспечивающих сбор и обработку информации об изменении параметров оборудования, внешней среды и характере их взаимодействия, сколько возможностью организовывать системы, способные функционировать во все более сложных, непредсказуемых изменениях условий эксплуатации.

2.3. Для систем контрольно измерительных (СКИ) «Агат» предложен метод самообучения, который реализован и проверен восьмилетней эксплуатацией этих изделий на моторостроительных предприятиях России.

В основе адаптивной телеметрической системы контроля двигателей летательного аппарата стоит:

- изменение характеристик входных сигналов заключающихся в значительном сокращении избыточной измерительной информации – сжатие данных.

- самообучение на основе накопления базы данных об основной и дополнительной погрешности измерений, возникающей дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или ее выхода за пределы нормальной области значений получаемой в результате проведения тестовых испытаний.

2.4. Основную роль в приведенной погрешности измерения составляет  $\delta_{\text{АЧХ}}$  - погрешность за счет неравномерности АЧХ в рабочем диапазоне температур: от минус 20 °С до +80°С где и производится аппроксимация погрешности измерения.

2.5. Предложенный алгоритм метода самообучения адаптивной телеметрической системы контроля двигателей летательных аппаратов реализован в СКИ «Агат» и проверен восьмилетней эксплуатацией этих изделий на моторостроительных предприятиях России.

2.6. При построении устройств сжатия данных на основе апертурных методов наиболее часто используются полиномы Тейлора (экстраполяция) и Лагранжа (интерполяция).

2.7. Предварительная линейная фильтрация сигналов используется, как правило, для уменьшения влияния входных помех, что, с одной стороны, уменьшает погрешность восстановления на приемной стороне, а с другой - увеличивает средний интервал дискретизации, увеличивает коэффициент корреляции сигнала, повышает его "гладкость" и тем самым "сжимаемость".

2.8. Математическая модель сигналов от датчиков различных величин системы телеметрии ЛА использовалась для моделирования потока измерительной информации ЛА и в системах контрольно измерительных (СКИ) «Агат» с целью сокращения избыточности измерительной информации, т.е. для построения адаптивной телеметрической системы со сжатием данных. Установлено, что для квазидетерминированных сигналов 1 - 3 групп, при передаче значений экстремумов этих сигналов, возможно осуществление их сжатия с коэффициентом превышающим 5.

2.9. Применение моделирования потока измерительной информации для СКИ «Агат» позволило увеличить количество каналов измерения при существующей пропускной способности оптического канала (25 Мбит\сек) для семейства СКИ «Агат» в 1,7 – 2 раза.

2.10. Разработана и внедрена «Методика вычисления уровня механического напряжения в материале лопаток авиационных двигателей».



### Глава 3. Разработка адаптивной телеметрической системы контроля двигателей ЛА

Структурная схема адаптивной телеметрической системы двигателей летательных аппаратов СКИ «АГАТ», приведена на рисунке 3.4, состоит из:

- 1) измерительного устройства сбора и передачи данных (УСПД), которое устанавливается на валу двигателя и содержит:

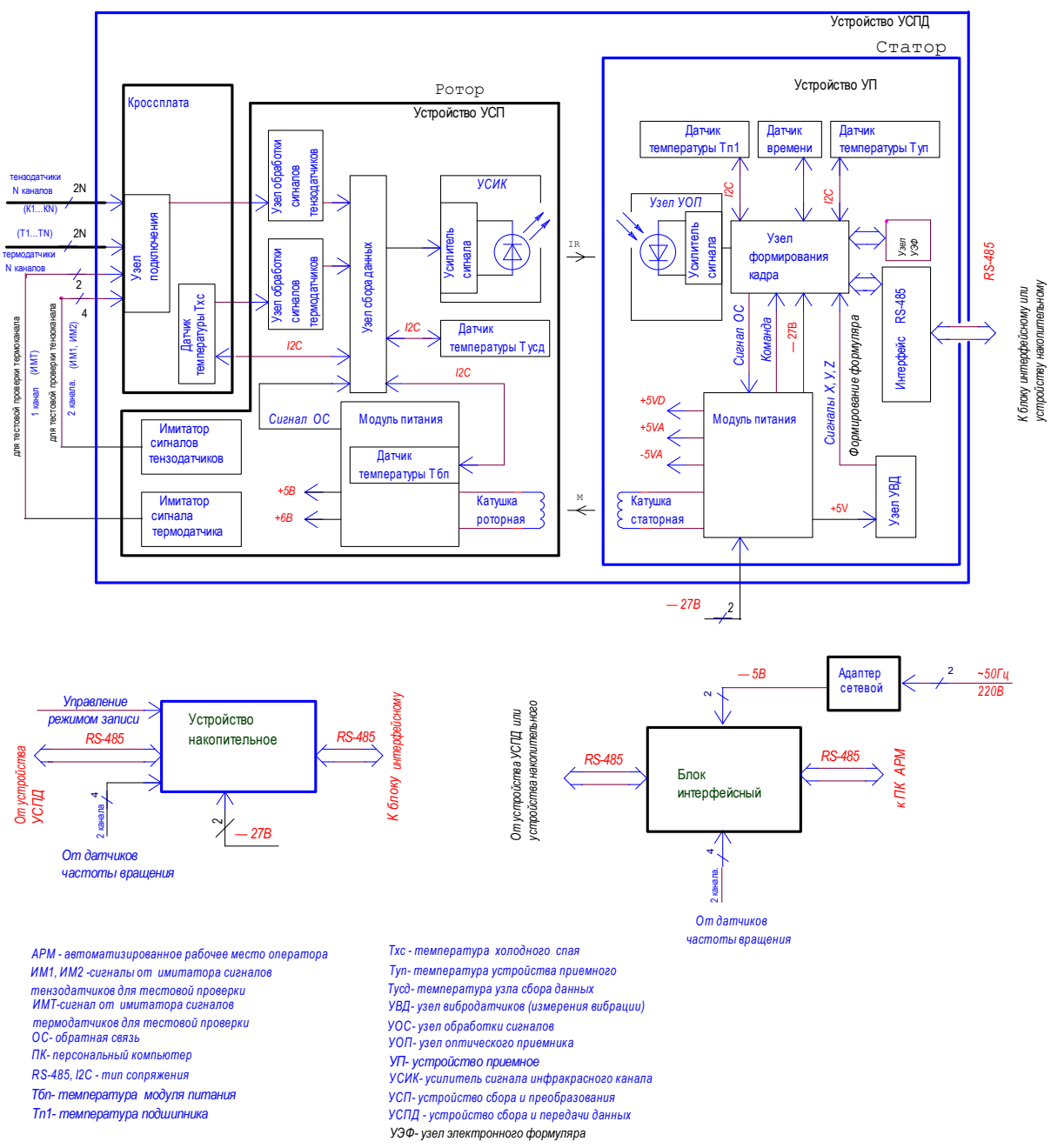


Рис. 3.4. Базовая архитектура семейства СКИ «АГАТ»

а) в роторной части:

- кроссплату с узлом подключения и датчиком температуры холодного спая Тхс;

- устройство приемное (УП) с датчиком температуры Туп и датчиком температуры подшипника Тп1, состоящее из узла оптического приемника (УОП), из статорной катушки, из модуля питания статорной части, из узла формирования кадра (УФК) с датчиком времени, из узла вибродатчиков, предназначенного для измерения вибрации, из узла электрического формуляра и интерфейса RS-485, используемого для передачи измерительной информации;

2) устройства накопительного, где может накапливаться и храниться измерительная информация при летных испытаниях и обрабатываются сигналы от датчиков частоты вращения;

3) блока интерфейсного, предназначенного для обработки сигналов от датчиков частоты вращения и для связи устройства сбора и передачи данных (УСПД), с компьютером

4) адаптера сетевого для обеспечения электропитанием блока интерфейсного;

5) программного комплекса, управляющего работой системы.

Передаваемый сигнал содержит:

- измерительную информацию, представляющую собой совокупность циклических выборок оцифрованных сигналов с информативностью 25 Мбит/с;

- служебную информацию, представляющую собой совокупность сигналов синхронизации, контрольных напряжений и температуры окружающей среды в узлах УСД (Тусд) и модуле питания (Тбп), а также температуры холодного спая (Тхс).

Кодирование передаваемого сигнала производится с помощью самосинхронизирующегося кода Manchester II. Сигнал поступает на узел оптического приемника (УОП) на статорной части УСПД, где сигнал усиливается и поступает в узел формирования кадра (УФК), в котором также собирается служебная информация, предназначенная для формирования электронного формуляра: от датчика температуры подшипника (Тп1), от датчика температуры приемного устройства (Туп), от датчика времени, регистрирующего текущее время и время наработки, и от узла вибродатчиков (УВД), где измеряются параметры условий эксплуатации: виброускорения, виброскорости и виброперемещения по осям X, Y, Z. Предусмотрено сохранение служебной информации устройств УСП и УП неординарного и экстремального характера в энергонезависимой памяти узла электронного формуляра (УЭФ).

В узле УФК формируется телеметрический кадр, который затем по интерфейсу «RS-485» передается в АРМ с информативностью 25 Мбит/с через блок интерфейсный, где обрабатываются сигналы, поступающие от датчиков частоты вращения, которые используются для синхронизации измерительной информации.

В соответствии с базовой архитектурой семейства СКИ «АГАТ» (рис. 3.4), подсистема электропитания питания включает в себя следующие основные составные части: УППЭ; узел преобразования и передачи электроэнергии; УПЭ; узел приема электроэнергии; УФН; узел формирования напряжения.

Разработаны и используются базовые конструктивы трех типов:

1. Консольный конструктив типа «АГАТ1.1» или «АГАТ-Л» для газотурбинных двигателей со скоростью вращения ротора до 15000 об/мин;
2. Двухпорный конструктив для газотурбинных двигателей со скоростью вращения типа «АГАТ-117» до 30000 об/мин и типа «АГАТ-500С» до 44000 об/мин;
3. Конструктивы автономного исполнения, размещаемые внутри вращающегося ротора типа «АГАТ-222» или на роторе типа «АГАТ-АНТ».

Для конструктивов типа 1 и 2 реализован вариант конструкции устройства сбора и преобразования (УСП) - роторной части аппаратуры «АГАТ», представленный на рис. 3.12, обеспечивающий лучшие параметры линейных перегрузок, температуры окружающей среды и канала передачи данных.

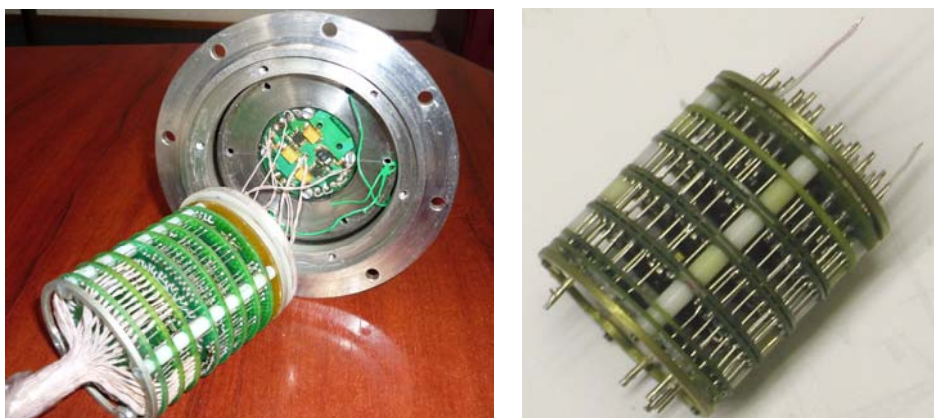


Рис. 3.12. Внешний вид конструкции УСПД

Разработанные конструкторско-технологические решения позволили создать семейство цифровой аппаратуры «АГАТ», используемых при испытаниях авиационных турбореактивных двигателей и работающих при тяжелых механических нагрузках: вибрации до 20 g, линейные ускорения до 50000 g на радиусе 21 мм печатной платы, при оборотах вращения до 44 000 об/мин.

В основе конструктива стоят круглые печатные платы, электрические соединения между которыми производится с помощью медных проводов. Механическое соединение плат производится с помощью четырех шпилек.

Программный комплекс СКИ «АГАТ» включает: драйвер блока интерфейсного; модуль базы данных для определения конфигурации и параметров измерительных тензодатчиков; модуль обработки ИИ в РМВ; модуль постсеансной обработки ИИ; модуль работы с УН.

Программное обеспечение СКИ «АГАТ» обеспечивает выполнение основных задач АРМ:

прием ИИ от ПУ ее преобразование, регистрацию и хранение; оперативный вывод измеряемых параметров на экран монитора ПК АРМ в режиме реального масштаба времени (РМВ); постсеансную автоматизированную первичную обработку ИИ с последующей выдачей результатов обработки на экран монитора ПК АРМ; документирование зарегистрированной и обработанной ИИ на HDD; текущую оценку качества принимаемой информации (количество сбойных маркеров и т.д.) ТМИ;

Технологическое ПО включает в себя: базу данных для задания параметров каналов и определения программы проверки СКИ «АГАТ»; программу управления и обработки результатов проверки СКИ.

Технологическое ПО, обеспечивает программную поддержку: определения корректирующих коэффициентов АЧХ и температурных корректирующих коэффициентов; проведения проверки работы изделия в процессе отладки и сертификации; формирования протоколов с результатами проверки погрешностей измерения тензометрических каналов и канала измерения скорости вращения.

Для реализации функций электронного формуляра в аппаратуре СКИ «АГАТ» необходима установка датчиков: фиксирующих температуру в критических узлах электронных блоков на роторе и статоре, а также в подшипниках для двухопорного варианта исполнения СКИ «АГАТ»; вибрации для измерения параметры условий эксплуатации: виброускорения, виброскорости и виброперемещения по осям X, Y, Z; формирования бортового времени работы СКИ «АГАТ» с привязкой к текущему календарному времени; контроля питающих напряжений.

Предусмотрено сохранение служебной информации устройств УСП и УП неординарного и экстремального характера в энергонезависимой памяти в узле электронного формуляра (УЭФ) с привязкой к дате и времени. Все учетные данные о движении, инвентаризации, ремонте и техническом обслуживании регистрируются в программе посредством оформления электронных документов записываемых в энергонезависимой памяти электронного формуляра.

С целью повышения достоверности адаптации телеметрической системы контроля двигателей ЛА, проведения самообучения СКИ «Агат» в части механических воздействий при вращении до 50000 об/мин и проведении приемо-сдаточных испытаний, создан стенд вращения. Необходимость в разработке стенда была вызвана отсутствием оборудования для испытаний СКИ «АГАТ» при вращении до 50000 об/мин как на предприятии «Comelpro» SRL так и на моторостроительных предприятиях России и Украины. Стенд реализован как аппаратно-программный комплекс на базе ПК типа Pentium, состоит из стола с разгонным двигателем и стойки управления.

Для проверки основных метрологических характеристик семейства СКИ «АГАТ» необходима аппаратура, имитирующая сигналы датчиков (ИСД) механического напряжения (тензорезисторы) и сигналы датчиков температуры (термопары). Реализация такой проверки с помощью стандартных измерительных приборов (прецизионных генераторов переменного напряжения, набора

прецизионных сопротивлений и цифровых вольтметров с погрешностью менее 0,1 %) невозможна из-за того, что измерительные каналы СКИ «АГАТ» вращаются со скоростью до 44000 об/мин в зависимости от ее типа. Использование ИСД с относительной погрешностью не более 0,3 % достаточно для проведения проверок метрологических характеристик аппаратуры СКИ «АГАТ», при условии, что суммарная погрешность не превысит значения 1,5 – 2 %. ИСД применяется для поверки, аттестации и при проведении заводских приемо-сдаточных испытаниях СКИ «АГАТ» при вращении на скоростях до 44000 об/мин.

С помощью этого имитатора можно проверить и оценить дополнительную погрешность СКИ «АГАТ» из-за влияния воздействующего фактора, центробежного ускорения, в рабочем диапазоне вращения СКИ «АГАТ». На рис. 3.23 приведена разработанная схема имитатора сигналов датчиков, на рис. 3.24 его внешний вид.

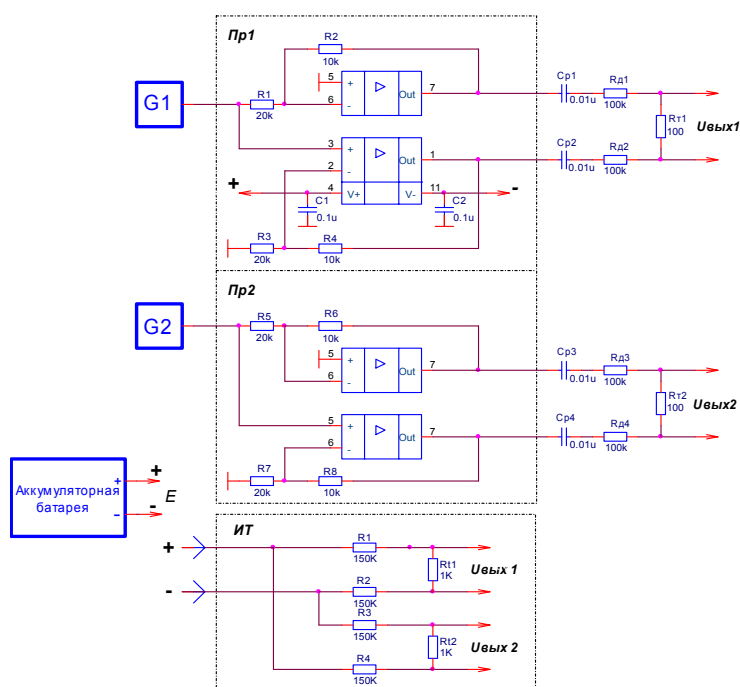


Рис. 3.23. Схема имитатора сигналов датчиков

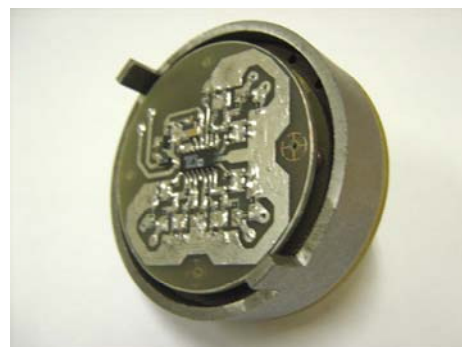


Рис.3.24 Внешний вид ИСД

Преобразователь Пр выполнен по схеме состоящей из двух операционных усилителей (например OP482) с общим коэффициентом усиления равным 2, это позволяет снизить уровень шума, не ухудшая коэффициента нелинейных искажений.

Имитатор термосопротивлений (ИТ) подключен через высокоомные прецизионные резисторы  $R_d$  к аккумуляторной батарее в 6В. Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_t$  имитатора термосопротивления образуют высокоомный делитель в 301 кОм с коэффициентом деления 1 к 301, это продиктовано малой емкостью аккумуляторной батареи и временем непрерывной работы ИСД не менее одного часа.

Оценку влияния дополнительной погрешности выходного напряжения имитирующего сигналы датчиков механического напряжения от влияющего

фактора - вращения ИСД проводим косвенным путем, исходя из анализа формулы:

$$\delta_{\text{вр.сум.}} = (\delta^2_{\text{вр.ски}} + \delta^2_{\text{вр.исд}})^{1/2} \quad (3.6)$$

где:  $\delta_{\text{вр.ски}}$  – погрешность СКИ «АГАТ» от влияющих факторов при вращении;  $\delta_{\text{вр.исд}}$  – погрешность ИСД от влияющего фактора центробежного ускорения при вращении.

Проверка и аттестация метрологических характеристик ИСД проводилась на предприятии ООО «COMELPRO» г. Кишинев, Республика Молдова, в июне-июле 2010 года совместно специалистами ООО «COMELPRO» и Государственным Центром Испытаний Средств Измерений «Воентест» 32 ГНИИ МО РФ г. Мытищи, Московской области, Россия. Проверялись относительная погрешность амплитуды напряжения ( $U_n$ , мВ) имитируемых сигналов датчиков механического напряжения ( $\delta_{\text{нкв}_u}$ ), относительная погрешность задаваемой частоты ( $F_n$ , Гц) для проверки неравномерности АХ ( $\delta_{\text{нкв}_f}$ ) и относительная погрешность амплитуды напряжения имитируемых сигналов датчиков температуры в нормальных климатических условиях. Эти проверки также были проведены при температуре +40 °С. На рис. 3.25 и 3.26 показаны графики относительной погрешности амплитуды напряжения ( $U_n$ , мВ) и частоты имитируемых сигналов датчиков механического напряжения. Максимальное значение относительной погрешности амплитуды напряжения составило 0,027 %, а частоты 0,042 %.

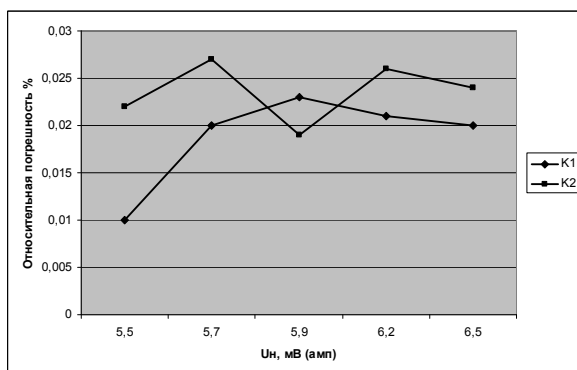


Рис. 3.25. Относительная погрешность амплитуды

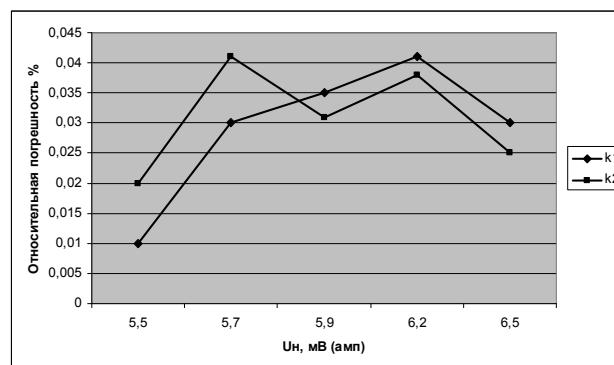


Рис. 3.26. Относительная погрешность частоты имитируемых сигналов при изменении питающего напряжения

В испытаниях при вращении ИСД совместно с СКИ «АГАТ-500» снимались экспериментальные кривые  $\delta_{\text{вр}}$  зависимости приведенной погрешности измерения амплитуды напряжения переменного тока, соответствующего значениям механического напряжения лопаток турбины для 12 из 24 измерительных тензометрических каналов, в диапазоне частот вращения валов двигателя от 0 до 44000 об/мин. На рис. 3.27 показаны кривые зависимости приведенной погрешности измерения амплитуды напряжения переменного тока для каналов K4, K7, K13, K18 и K23 от частоты вращения СКИ «АГАТ» совместно с ИСД. Максимальное значение погрешности составило  $\pm 0,17$  %, в канале K23, причем резонансная частота лежала в диапазоне частот вращения от 20000 до 30000 об/мин.

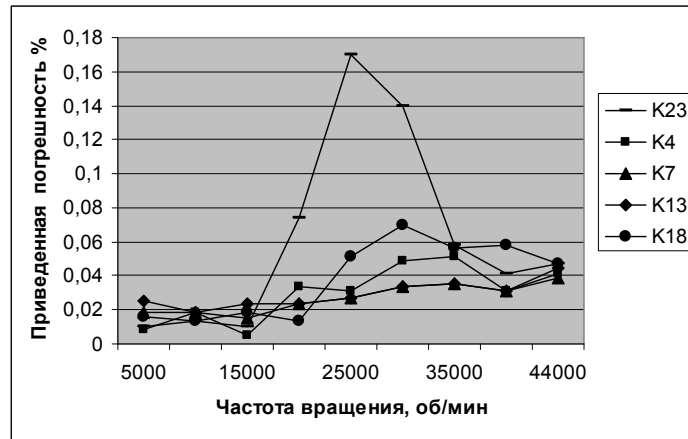


Рис. 3.27. Зависимость приведенной погрешности измерения амплитуды напряжения от частоты вращения СКИ «АГАТ» совместно с ИСД

Для остальных каналов максимальная приведенная погрешность измерения амплитуды напряжения переменного тока не более 0,07 %. Исходя из вышеизложенного сделан вывод, что в канале K23, где значение погрешности 0,17 %, основная составляющая этой погрешности вызвана погрешностью СКИ «АГАТ» в этом канале, так как в остальных каналах максимальная погрешность не превышала 0,07 % и ее можно не учитывать при определении погрешности ИСД. Если предположить что дополнительные погрешности вносимые ИСД и СКИ «АГАТ» одинаковы, тогда, исходя из формулы (3.6) для ИСД дополнительная погрешность, от влияющего фактора вращения, составит 0,049 %. Определяем дополнительную погрешность, вызванную влиянием вибрации, изменения напряжения питания и вращения по формуле :

$$\delta_{\text{звф}}(\text{доп}) = \sqrt{\delta_{\text{нум}}^2 + \delta_{\text{вибр.}}^2 + \delta_{\text{пит}}^2 + \delta_{\text{вр.}}^2} \quad (3.7)$$

Расчеты показали, что относительные погрешности каналов ИСД воспроизведения амплитуды и частоты датчиков механического напряжения и датчиков температуры меньше допустимого  $\pm 0,2$  %, поэтому ИСД можно использовать, в качестве нестандартного средства, для определения основной и дополнительной погрешности от воздействующего фактора – вращения измерительных каналов системы контрольно-измерительной СКИ «АГАТ» на скоростях до 44000 об/мин.

Разработана методика поверки СКИ «АГАТ», которая была взята за основу при проведении работ по утверждению типа средств измерений СКИ «КИС1.1», СКИ «АГАТ-117», СКИ «АГАТ-500» в Российской Федерации. Основные новшества методики поверки СКИ «АГАТ», направленные на повышение точности и достоверности результатов заключаются в следующем: постоянное измерение механического напряжения лопаток двигателей ЛА, на всех режимах работы аппаратуры СКИ «Агат»; автоматическое определение метрологических характеристик и документирование результатов проверки.

Новые направления работ связаны с использованием архитектуры адаптивной телеметрической системы контроля двигателей ЛА (СКИ «АГАТ») для: бесконтактного измерения температуры вращающихся элементов газотурбинных двигателей; измерения радиального зазора лопаток компрессора, турбины газотурбинного двигателя; измерения амплитуды напряжения изгиба несущего вала винта вертолета.

Работы по созданию и использованию перископического пирометра для измерения температуры рабочих лопаток турбины авиационных двигателей (типа АЛ-31Ф), с последующей обработкой информации о температуре лопаток специализированным программным комплексом и созданием карты теплового состояния лопаток для их анализа и определения дефектов лопаток были начаты в 2008 году для ОАО «Сатурн», Россия. Краткие технические характеристики пирометра: диапазон измерения температуры: от (+200 до +1700) С°; точность измерения температуры:  $\pm 6$  С°; расстояние до объекта измерения: не менее 40 мм.

На рис. 3.29 приведена фотография опытного образца перископического пирометра. Натурные испытания были проведены в феврале 2010 года, на предприятии Лыткаринский механический завод, Московской области, входящего в ОАО «Сатурн». Была получена тепловая карта лопаток первой ступени, турбины, смотри рис. 3.30.

В работе по измерению радиального зазора лопаток компрессора, турбины газотурбинного двигателя сделан вывод, что емкостные методы измерения радиального зазора компрессоров наиболее подходят по критерию цена-качество для газотурбинных двигателей пятого поколения. Предлагаемый вариант исполнения системы измерения радиальных зазоров (СИРЗ) обеспечивают широкий спектр возможностей измерения РЗ как при проведении исследовательских работ так и в штатном рабочем режиме.



Рис. 3.29. Опытный образец перископического пирометра

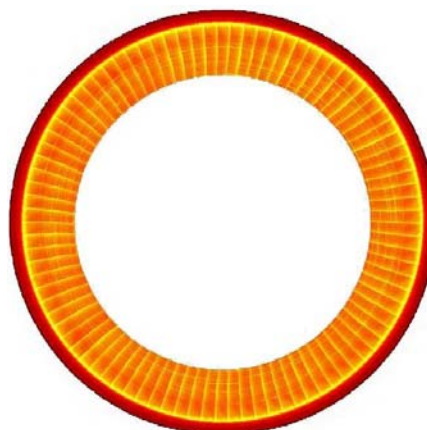


Рис. 3.30. Тепловая карта лопаток турбины



Эти решения базируются на опыте создания систем типа СКИ «АГАТ» в части реализации сбора, передачи и обработки измерительной информации, измерения частоты вращения валов двигателя. На рис. 3.31. приведена структурная схема 16-ти канальной СИРЗ.

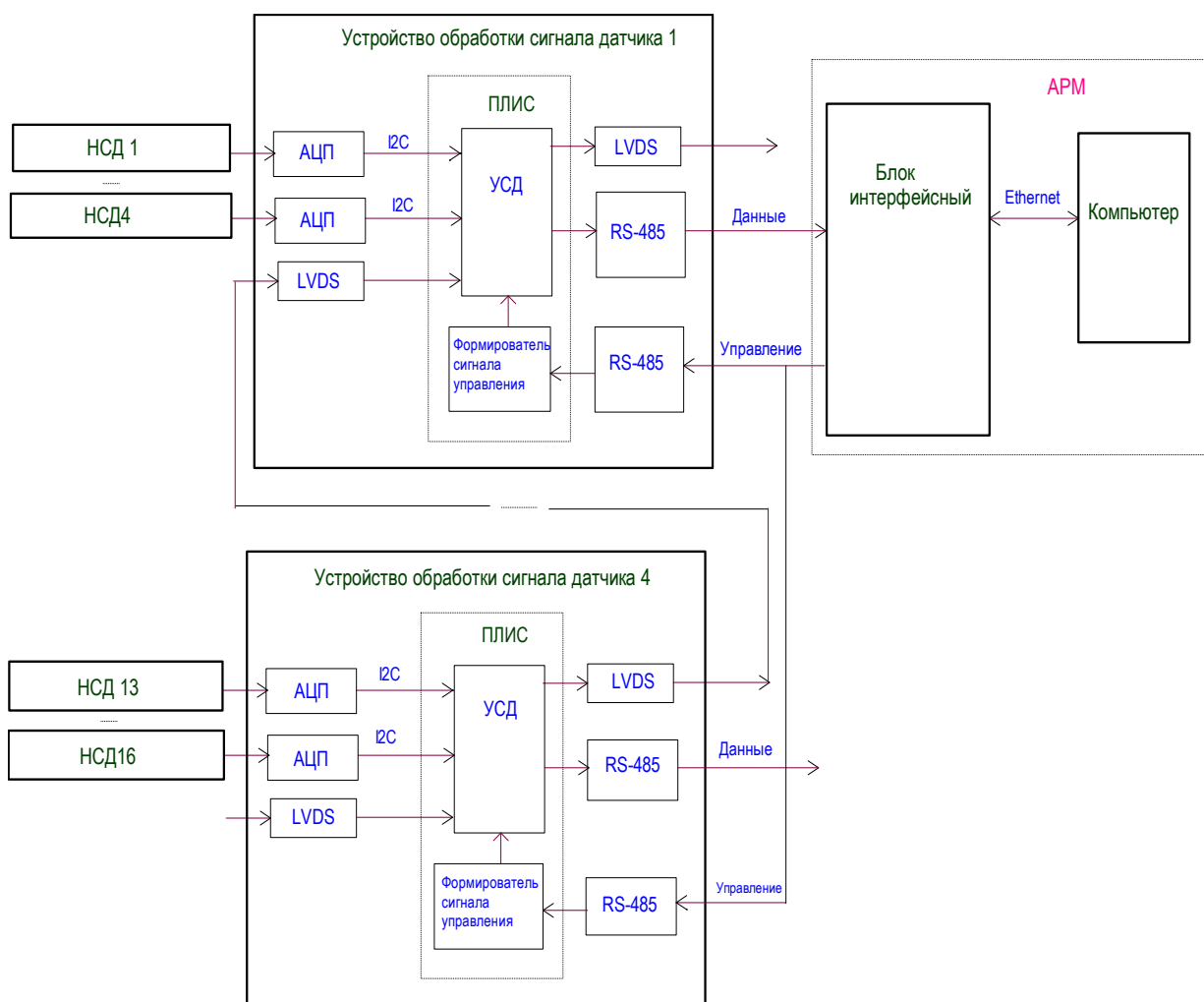


Рис. 3.31. Структурная схема 16-ти канальной СИРЗ

Точность измерения РЗ, не хуже: в интервале РЗ от 0 до 1,5 мм -  $\pm 0,01$  мм; в интервале РЗ от 1,5 до 4 мм -  $\pm 0,05$  мм;

Скорость передачи ИИ через RS-485 - 25 Мбит/с.

Количество зондов, подключаемых к одному УОСД – до 4-х;

Максимальная частота вращения ротора - 15 тыс. об/мин.

На рис. 3.32 приведен внешний вид емкостного датчика с кабелем, разработанного и изготовленного на предприятии «COMELPRO» SRL, используемого для измерения радиального зазора лопаток ГТД. Экспериментальная проверка и отладка СИРЗ проводилась с использованием макета ступени турбины с 11-ю лопатками, смотри рис. 3.34 которые вращаются с помощью электродвигателя, установленного на валу макета ступени турбины.

Испытания показали высокую точность, не хуже  $\pm 0,01$  мм, в интервале РЗ от 0 до 1,5 мм, измерения радиальных зазоров лопаток.

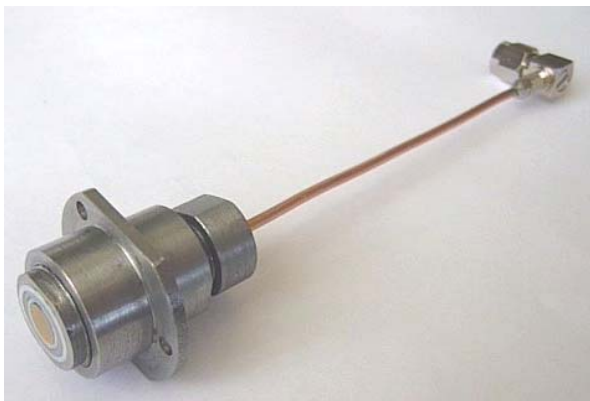


Рис. 3.32. Внешний вид конструкции емкостного триаксиального датчика с кабелем



Рис. 3.34. Внешний вид СИРЗ с емкостным датчиком

Испытания выявили зависимость емкости кабеля подсоединения емкостного датчика к нормализатору сигнала датчика НСД от температуры. На рис. 3.35 представлен график зависимости емкости кабеля от температуры. Согласно графика, емкость кабеля, длиной порядка 10 см, в диапазоне температур от  $+10^{\circ}\text{C}$  и до  $300^{\circ}\text{C}$  меняется на 0.6 пф и имеет линейную зависимость. В то же время измеряемая емкость радиального зазора, в худшем случае, для лопатки с торцевым размером в 1мм, составляет величину такого же порядка, т.е. около 0.6-1пф. Это означает, что для проведения измерений радиального зазора лопаток турбин в авиационном двигателе необходимо проводить адаптацию - обучение системы согласно методике изложенной в главе 2 диссертации.

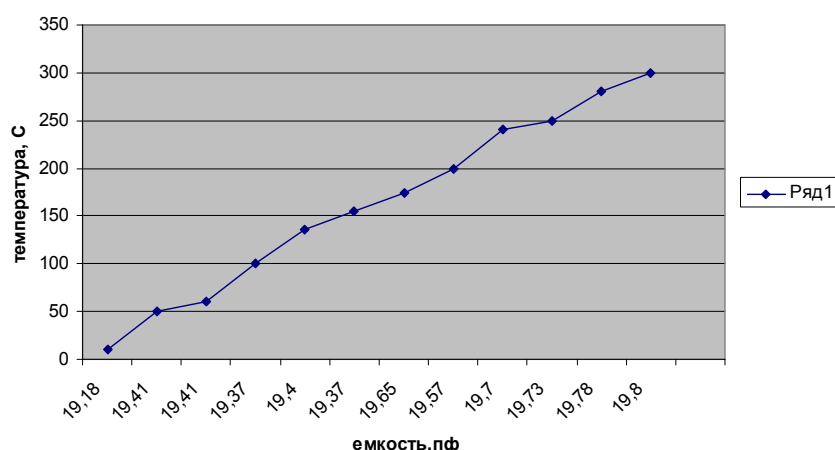


Рис. 3.35. Зависимость емкости кабеля от температуры

Работы по созданию системы измерения и индикации амплитуд напряжений изгиба несущего вала винта вертолета проводятся с марта 2011 года для вертолета «Ансат», Казанского вертолетного завода. На Российских вертолетах такой системы еще не устанавливали, поэтому проводимая в настоящее время

разработка системы измерения и индикации амплитуд напряжений изгиба несущего вала винта вертолета на основе результатов исследований, изложенных в настоящей диссертации по созданию СКИ «Агат», позволит создать штатную систему для вертолетов, производимых в России. В основу измерения амплитуд напряжений изгиба несущего вала (НВ) винта вертолета положен тензометрический принцип измерения, позволяющий добиться высоких метрологических характеристик. Конструктивно измеритель состоит из роторной (вращающейся) части, статора, усилителя и блока индикации. Роторная часть содержит электронный узел для преобразования сигнала тензорезисторных датчиков в форму, пригодную для передачи. Электропитание роторной части осуществляется, индуктивным способом, через воздушный трансформатор с зазором в 2-5 мм. Измеренный сигнал амплитуд изгиба НВ передается по оптическому каналу связи на статорную часть системы. Полученный полезный сигнал усиливается и передается в блок индикации. Этот блок содержит микроконтроллер, обрабатывающий сигналы от тензорезисторных датчиков и датчика частоты вращения.

### **Выводы по 3-ой главе**

3.1. Разработана и внедрена в аппаратуре СКИ «АГАТ» архитектура адаптивной телеметрической системы контроля двигателей ЛА. Развитие архитектуры адаптивной телеметрической системы контроля двигателей ЛА позволило создать новые перспективные направления работ на предприятии «Comelpro» SRL:

- погружной пирометр для исследования температурных полей лопаток турбин двигателей ЛА;
- создание системы измерения радиальных зазоров лопаток компрессоров и турбин авиационных двигателей.

3.2. Разработанные конструкторско-технологические решения адаптивной телеметрической системы контроля двигателей ЛА позволили создать целый ряд семейства СКИ «АГАТ» на основе базовых конструктивов трех типов:

1. Консольный конструктив типа «АГАТ 1.1» или «АГАТ-Л» для газотурбинных двигателей со скоростью вращения ротора до 15000 об/мин;
2. Двухпорный конструктив для газотурбинных двигателей со скоростью вращения типа «АГАТ-117» до 30000 об/мин и типа «АГАТ-500» до 44000 об/мин;
3. Конструктивы автономного исполнения, размещаемые внутри вращающегося ротора типа «АГАТ-222» или на роторе типа «АГАТ-АНТ».

3.3. Разработаны принципы формирования электронного формуляра и осуществлена его реализация в аппаратуре СКИ «АГАТ». Электронный формуляр обеспечивает автоматическое ведение учета работы изделия при эксплуатации, хранении и ремонту с фиксацией энергонезависимым запоминающим устройством всех изменений в работе аппаратуры, выходящих за допустимые нормы эксплуатации, с привязкой к дате и времени.

3.4. Разработан, изготовлен и метрологически аттестован стенд вращения, предназначенный для испытания СКИ семейства «АГАТ» и прочих изделий в части механических воздействий при вращении до 50000 об/мин.

Необходимость в разработке стенда была вызвана отсутствием оборудования для испытаний СКИ «АГАТ» при вращении до 50000 об/мин как на предприятии «Comelpro» SRL так и на моторостроительных предприятиях России и Украины.

3.5. Разработан, изготовлен и метрологически аттестован имитатор сигналов датчиков механического напряжения и температуры с относительной погрешностью воспроизведения частоты и амплитуды напряжения переменного тока, соответствующего значениям механического напряжения и температуры не более 0,2% - 0,3%, который позволяет его установку на вращающуюся часть СКИ «АГАТ» для испытаний при вращении до 50000 об/мин.

3.6. Разработана и внедрена «Методика вычисления уровня механического напряжения в материале лопаток авиационных двигателей». Данная методика апробирована более чем 8-ми летней эксплуатацией семейства СКИ «АГАТ» на моторостроительных предприятиях России и Украины.

3.7. Разработана методика поверки СКИ «АГАТ», которая была взята за основу при проведении работ по утверждению типа средств измерений СКИ «КИС1.1», СКИ «АГАТ-117», СКИ «АГАТ-500» в Российской Федерации. Поверка систем проводится в соответствии с документом «Системы контрольно-измерительные СКИ «АГАТ-117», СКИ «АГАТ-500». Методика поверки», утвержденным начальником ГЦИ СИ «Воентест» 32 ГНИИИ МО РФ в 2008 и 2010 годах.

3.8. В новых направления работ, связанных с дистанционным измерением температуры и радиальных зазоров лопаток в ГТД, также необходима адаптация-самообучение системы измерения по методике изложенной в главе 2 настоящей диссертации.

Экспериментальные работы показали, что приведенную погрешность измерения температуры и радиальных зазоров лопаток ГТД можно довести до значений 0,5- 1%.

#### **Глава 4. Экспериментальные исследования и практическое применение семейства адаптивной телеметрической системы «Агат» для контроля двигателей ЛА.**

В четвертой главе представлен обзор семейства адаптивной телеметрической системы «Агат» для контроля двигателей летательных аппаратов и бортовой системы телеметрического контроля космического аппарата и их практическое применение. Проведен сравнительный анализ семейства адаптивной телеметрической системы «Агат» с зарубежными аналогами. Представлены результаты исследования основных метрологических характеристик адаптивных телеметрических систем: СКИ «Агат 1.1.», СКИ «Агат-Л», СКИ «Агат-117», СКИ «Агат-500», СКИ «Агат-Л48», СКИ «Агат - АНТ» на предприятии «Comelpro» SRL г. Кишинэу, в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Московской области, ФГУП ММПП «Салют» г.Москва, 32 ГНИИИ МО РФ, г. Мытищи, Московская область, Летном Испытательном Институте (ЛИИ) им.

М. М. Громова, г. Жуковский, Московской области, ОАО «Сатурн», Лыткаринский механический завод, г. Лыткарино, Московской области.

На сегодняшний день компанией «COMELPRO» S.R.L. серийно выпускаются 8 типов семейства адаптивных телеметрических систем «АГАТ»: «АГАТ-1.1», «АГАТ-Л», «АГАТ-500С», «АГАТ-АНТ», «АГАТ-222С», «АГАТ-117», «АГАТ-Л48», «АГАТ-500» и два типа адаптивных телеметрических систем «АГАТ» для космических аппаратов и летательных объектов различного назначения. На рис. 4.4, 4.11, 4.13, 4.15, 4.16, 4.21, 4.25 и 4.26 представлены внешний вид указанных СКИ «Агат»

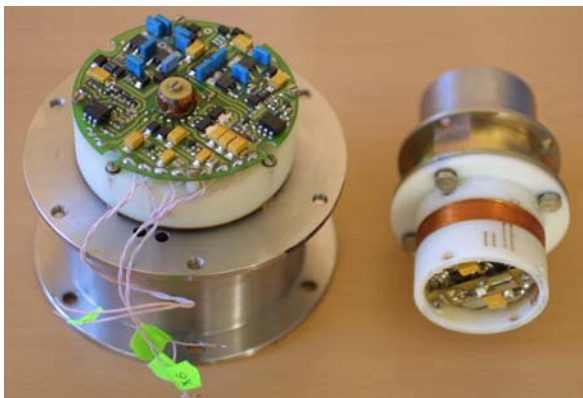


Рис. 4.4. Внешний вид СКИ «Агат-1.1», СКИ «Агат-Л»



Рис. 4.11. Внешний вид СКИ «Агат-500»



Рис. 24. Внешний системы СКИ «Агат-АНТ»



Рис. 25. Внешний вид системы СКИ «Агат-222С»

Проведен сравнительный анализ семейства адаптивной телеметрической системы «Агат» с зарубежными аналогами. Выявлено, что наиболее близким зарубежным аналогом к адаптивной телеметрической системе семейства «Агат» по структурно-технической реализации являются телеметрические системы фирмы «ROTADATA Limited», (Англия) и в частности телеметрическая система ROTATEL (окончание вала). Адаптивная телеметрическая система СКИ «Агат», отличается от телеметрических системы фирмы «ROTADATA Limited», (Англия) тем, что нет наземной станции типа компании «ROTADATA». Если компьютер в телеметрической системе компании «ROTADATA» выполняет только функции отображения и управления, то в адаптивных телеметрических системах СКИ «Агат» компьютер со специальным программным обеспечением выполняет

функцию АРМ оператора и производит все операции наземной станции по приему, преобразованию, регистрации и хранению.



Рис. 4.16. Внешний вид системы СКИ «Агат-117»



Рис. 4.21 Внешний вид системы СКИ «Агат-148».



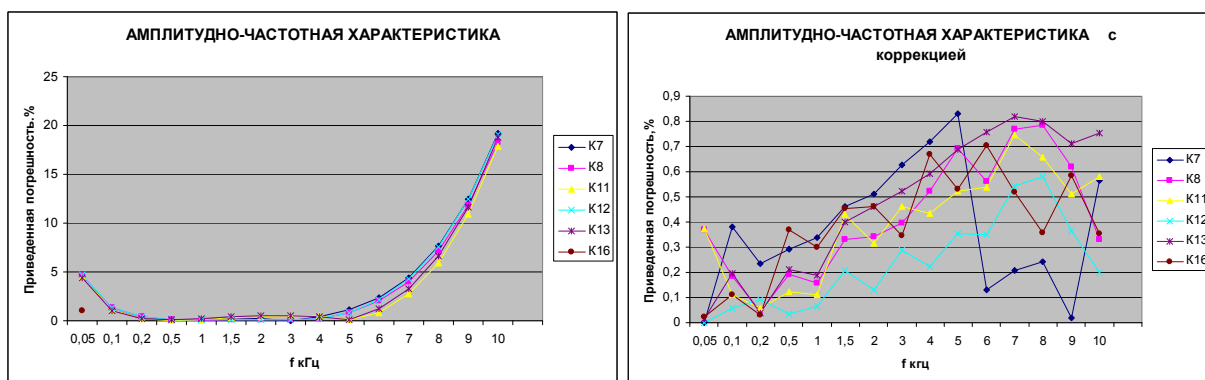
Рис. 4.25. Внешний вид бортового блока телеметрии комплекса БКТМ



Рис. 4.26. Внешний вид бортовых блоков телеметрии комплекса БКТМ большого космического аппарата

В СКИ «Агат» реализовано устройство, имеющее в своем составе штатные датчики вибраций, температуры, акселерометры и др., которое записывает внешние и внутренние возмущающие воздействия на всех режимах эксплуатации, в энергонезависимом запоминающем устройстве. т. е. реализован электронный формуляр изделия – электронный паспорт изделия, отражающий объективную картину эксплуатации, ремонта и хранения на всех стадиях существования изделия.

Результаты исследования основных метрологических характеристик адаптивных телеметрических систем семейства СКИ «Агат» на предприятии «Comelpro» SRL г. Кишинэу, в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, ФГУП ММП «Салют» г. Москва, 32 ГНИИ МО РФ, г. Мытищи, Московская область, Летном Испытательном Институте (ЛИИ) им. М. М. Громова, ОАО «Сатурн», Лыткаринский механический завод, показал, что после проведения процедуры самообучения СКИ «Агат», согласно методике изложенной в разделе 2 настоящей диссертации, на предприятии – изготовителе «Comelpro» SRL, г. Кишинэу, основная приведенная погрешность измерения АЧХ не превышает допустимого значения (например 1%). Так, например, для СКИ «Агат 1.1», получено значение основной приведенной погрешности измерения не более 0,83%, при требуемой не более 1 %, во всем диапазоне частот (50-10000) Гц, см. рис. 4.31.



а) без коррекции

б) с коррекцией

Рис. 4.31. Основная приведенная погрешность измерения АЧХ

Для остальных СКИ «Агат» экспериментально полученные кривые зависимости основной приведенной погрешности измерения АЧХ, до коррекции и после коррекции, имеют такую же или близкую к приведенным на рис. 30 форму. Это позволяет сделать заключение об эффективности предложенного метода адаптации, изложенного во 2-й главе диссертации.

Убедительным доказательством практического применения семейства адаптивной телеметрической системы «Агат» для контроля двигателей ЛА является успешное использование СКИ «Агат 1.1» в летных испытаниях модернизируемого двигателя АЛ -31Ф и применение СКИ «АГАТ-АНТ» при проведении летных испытаний двигателя АИ-222-25 на самолете ЯК-130 по оценке эффективности функционирования опытной системы противопомпажной защиты, по результатам первых полетов была выявлена причина наличия ложных срабатываний системы противопомпажной защиты, произведена корректировка программного обеспечения блоков управления и защиты двигателя ЭСУ-222 и продолжены испытательные полеты.

## Выводы по 4-ой главе

4.1. Разработаны и производятся ряд адаптивных телеметрических систем контроля и испытаний «Агат» авиационных двигателей различного назначения. На сегодняшний день компанией «COMELPRO» S.R.L. серийно выпускаются 8 типов семейства адаптивных телеметрических систем «АГАТ»: «АГАТ-1.1», « АГАТ-Л», «АГАТ-500С», «АГАТ-АНТ», «АГАТ-222С», «АГАТ-117», «АГАТ-Л48», «АГАТ-500С» и два типа адаптивных телеметрических систем «АГАТ» для космических аппаратов и летательных объектов различного назначения.

4.2. Впервые, в практике летных испытаний разрабатываемых и модернизируемых авиационных двигателей моторостроительных предприятий Российской Федерации, в ЛИИ им. М.М Громова было проведено 6 полетов на летающей лаборатории СУ-27 № 3711 с двигателем АЛ-31Ф, в передней опоре которого установлена аппаратура «АГАТ-Л» с накопительным устройством.

4.3. СКИ АГАТ-АНТ обеспечила оперативное и с высоким качеством проведение летных испытаний двигателя АИ-222-25 на самолете ЯК-130 по оценке эффективности функционирования опытной системы противопомпажной защиты. С мая по ноябрь 2009 года проведено более 50 полетов, общая наработка СКИ АГАТ-АНТ с учетом стендовых и летных испытаний составила более 50 часов. По результатам первых полетов используемой СКИ «АГАТ-АНТ» была выявлена причина наличия ложных срабатываний системы противопомпажной защиты, произведена корректировка программного обеспечения блоков управления и защиты двигателя ЭСУ-222 и продолжены испытательные полеты.

4.4. Адаптивные телеметрические системы СКИ «Агат-1.1» , СКИ «Агат-Л», и СКИ «Агат-Л48» одноопорные, устанавливаемые на окончании вала ротора двигателя и не имеют аналогов по конструктивному исполнению.

4.5. Адаптивные телеметрические системы СКИ «Агат-АНТ» и СКИ «Агат-222» имеют в своем составе накопительные устройства, в которых записывается измерительная информация во время эксперимента – полета. Съем информации и анализ производится после полета в лабораторных условиях.

4.6. Адаптивные телеметрические системы «Агат-500С», «Агат-500» и «Агат-117» применяются в стендовых испытаниях высокооборотных двигателей, до 44000об\мин., и могут быть также использованы для летных испытаний авиационных двигателей

4.7. Применение адаптивных телеметрических систем «Агат» значительно повысило точность и достоверность результатов испытаний, позволило уменьшить объем статистической обработки результатов испытаний, ускорить процедуру летных испытаний и внедрения новых двигателей в серийное производство.

4.8. Практическая проверка основных положений и результатов диссертационной работы была осуществлена в стендовых и летных испытаниях авиационных двигателей в следующих предприятиях, конструкторских бюро и отраслевых институтах:



«COMELPRO» SRL, Молдова, г. Кишинев;  
ФГУП ММП «Салют», Россия, г. Москва;  
НТЦ им. А. Люльки ОАО «Сатурн», Россия, г. Москва;  
ОАО «Климов», Россия, г. Санкт-Петербург;  
ГНЦ РФ ЦИАМ им. «П. И. Баранова», Россия, г. Москва;  
ОАО НПП «Аэросила», Россия, г. Ступино, Московской обл.;  
АНТК «Антонов», Украина, г. Киев;  
НПП «Мотор», Россия, г. Уфа.  
ЛИИ им. М.М. Громова, Россия, г. Жуковск, Московской области,  
ГЛИЦ им. В. Чкалова, Россия, г. Ахтубинск, Волгоградской обл.

4.9. Экспериментальные исследования с 2003г. по 2011г. проводились на предприятиях и в организациях:

- Предприятие «COMELPRO» SRL, Молдова, г. Кишинев, с 2003г по 2010г.;
- ФГУП ММП «Салют», Россия, г. Москва, с 2004г. по 2011г.;
- НТЦ им А. Люльки ОАО «Сатурн», Россия, г. Москва, в 2005г.;
- Государственный центр испытаний средств измерения Центрального Аэрогидродинамического Института им. профессора Н. Е. Жуковского, Россия, г. Жуковск, Московской области, с 2005г. по 2006г.;
- Лыткаринский механический завод, Россия, Промзона Тураево, г. Лыткарино, Московской области с 2006 по 2010г.;
- 32 Научно Исследовательский Испытательный Институт Министерства Обороны России, г. Мытищи, Московской области, в 2005г. и в 2008г.;
- ЛИИ им. М.М. Громова, Россия, г. Жуковск, Московской области, с 2005 по 2006.

4.10. Сравнительный анализ семейства адаптивной телеметрической системы «Агат» с зарубежными аналогами показал, что наиболее близким зарубежным аналогом к адаптивной телеметрической системе семейства «Агат» по структурно-технической реализации являются телеметрические системы фирмы «ROTADATA Limited», (Англия) и в частности телеметрическая система ROTATEL (окончание вала).

4.11. Адаптивная телеметрическая система «Агат», отличается от телеметрической системы фирмы «ROTADATA Limited», (Англия) тем, что:

- В статорной части размещены узлы приема, усиления, преобразования сигналов измерительной информации, электронный формуляр и узел формирования кадра для передачи их непосредственно в компьютер;
- В статорной и роторной части размещены датчики времени, температуры контрольных точек устройства, данные от которых регистрируются в электронном формуляре и передаются в компьютер;
- В системе предусмотрено наличие накопительного устройства для сохранения измерительной информации во время летных испытаний с последующей передачей информации через блок интерфейсный на компьютер для послеполетных исследований в лабораторных условиях.
- Отсутствует наземная приемная станция, чем существенно сокращает массо- габаритные и стоимостные показатели системы.
- Используется как в стендовых, так и в летных испытаниях авиационных двигателей.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Создано новое направление работ в Республике Молдова, и в частности на предприятии «Comelpro» SRL, адаптивные телеметрические системы контрольно измерительные, СКИ «Агат», для контроля параметров двигателей летательных аппаратов различного назначения. Это направление работ имеет большое научно- практическое значение для ведущих моторостроительных корпораций, занимающихся разработкой и производством современных двигателей ЛА, значительно повысило точность и достоверность результатов испытаний, позволило уменьшить объем статистической обработки результатов испытаний, ускорить процедуру летных испытаний и внедрения новых двигателей в серийное производство и предназначено для: измерения механического напряжения лопаток компрессоров и турбин двигателей летательных аппаратов; измерения радиального зазора лопаток компрессоров и турбин двигателей летательных аппаратов; дистанционного измерения температурного поля для различных ступеней компрессора и турбины двигателей летательных аппаратов.

2. Разработана и внедрена методика вычисления уровня механического напряжения в материале лопаток авиационных двигателей ( $\sigma$ ), которая используется для расчета уровня механического напряжения в материале лопаток авиационных двигателей для всего семейства СКИ «Агат».

3. Разработаны математические модели сигналов от датчиков различных величин системы телеметрии ЛА для моделирования потока измерительной информации ЛА при построении адаптивной телеметрической системы со сжатием данных.

4. Разработан структурно – функциональный подход построения архитектуры адаптивной телеметрической системы контроля двигателей ЛА.

5. Разработан имитатор сигналов датчиков механического напряжения и температуры, для испытаний телеметрических систем при вращении до 50000 об/мин, с относительной погрешностью воспроизведения частоты и амплитуды напряжения переменного тока, соответствующего значениям механического напряжения и температуры не более 0,2 - 0,3%.

6. Разработана методика вычисления коррекции дополнительной погрешности от амплитудно-частотной характеристики измерительного тракта, температуры, вибрации и частоты вращения телеметрической системы.

7. Разработаны принципы формирования электронного формуляра и осуществлена его реализация в аппаратуре СКИ «Агат». Электронный формуляр обеспечивает автоматическое ведение учета работы изделия при эксплуатации, хранении и ремонту с фиксацией энергонезависимым запоминающим устройством всех изменений в работе аппаратуры, выходящих за допустимые нормы эксплуатации, с привязкой к дате и времени.

8. Разработанная и практически апробированная методика поверки СКИ «Агат», была взята за основу при проведении работ по утверждению типа средств измерений СКИ «КИС 1.1», СКИ «АГАТ-117», СКИ «АГАТ-500» в Российской Федерации.

9. Компанией «COMELPRO» S.R.L, в настоящее время, серийно выпускаются 8 типов семейства адаптивных телеметрических систем «АГАТ»: «АГАТ-1.1», «АГАТ-Л», «АГАТ-500С», «АГАТ-АНТ», «АГАТ-222С», «АГАТ-117», «АГАТ-Л48», «АГАТ-500» и два типа адаптивных телеметрических систем «АГАТ» для космических аппаратов и летательных объектов различного назначения.

10. Адаптивные телеметрические системы СКИ «Агат» сертифицированы в России: «Агат-1.1», Сертификат об утверждении типа средств измерений MD.E.34.082.A №24728 зарегистрирован в Государственном реестре средств

измерений под №32248-06; «Агат-117 », Сертификат об утверждении типа средств измерений MD.E.34.082.B №31074 зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под №37393-08; «Агат-500», Сертификат об утверждении типа средств измерений MD.E.34.018.B №41172 зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 45480-10.

11. Адаптивные телеметрические системы СКИ «Агат-1.1» , СКИ «Агат-Л», и СКИ « Агат-Л48» одноопорные, устанавливаемые на окончании вала ротора двигателя и не имеют аналогов по конструктивному исполнению.

12. Адаптивные телеметрические системы СКИ «Агат-АНТ» и СКИ «Агат-222» имеют в своем составе накопительные устройства, в которых записывается измерительная информация во время эксперимента – полета.

13. Адаптивные телеметрические системы «Агат-500С», «Агат-500 » и «Агат-117» применяются в стендовых испытаниях высокооборотных двигателей, до 44000об\мин., и могут быть также использованы для летных испытаний авиационных двигателей

14. Адаптивные телеметрические системы СКИ «Агат» могут быть использованы для регистрации и измерения давления, температуры, напряжений, потока, вибраций в узлах вентиляторов, камер сгорания, турбин и компрессоров на стендах разработки, двигателей ЛА, газотурбинных установок. Дальнейшее развитие адаптивных телеметрических систем СКИ «Агат», может быть представлено в **следующих рекомендациях** по практическому использованию результатов исследований:

а). бесконтактное измерение крутящего момента и мощности на вращающихся и неподвижных валах машин и механизмов в ходе их испытаний или эксплуатации;

б). регистрация характеристик потока - угла потока, температуры и давления, на двигателях для стендовых и полетных измерений. Датчики регистрации должны размещаться в двигателе или на испытательном стенде в любом месте вентилятора, компрессора, камеры сгорания, турбины или выхлопа;

в). анализ горячих выхлопных газов. Датчики регистрации должны устанавливаться на авиационном двигателе или газовой турбине и работать при температурах выше 1300°С.

г). создание тепловых карт авиационных двигателей, аэродинамических поверхностей роторов и статоров газовых турбин, а также для оценки расчетного срока службы лопастей газовых турбин с помощью оптических пирометров. Измеряемая температура - от 200°С и до 1800°С. Оптические пирометры исключают необходимость в использовании термопар, присоединяемых к вращающимся частям двигателей и сканируют всю аэродинамическую поверхность, а не только отдельную точку, как термопара.

д). измерение радиального зазора лопаток компрессоров и турбин двигателей летательных аппаратов. Емкостные методы измерения радиального зазора компрессоров наиболее подходят по показателям цена-качество для газотурбинных двигателей пятого поколения.

е). измерение и индикация амплитуд напряжений изгиба несущего вала винта вертолета в штатном режиме эксплуатации.

### **Список опубликованных работ по теме диссертации:**

1. Владов М.П., Добров Д.И., Украинцев Д.И. Семейство цифровых систем контрольно измерительных «Агат» труды 2- й международной конференции г.Кишинев, май ІСТЕІ 2008г.
2. Владов М.И., Добров Д.И., Колпакович М.Ю. Бесконтактное измерение температуры для оценки состояния поверхности рабочих лопаток газотурбинного двигателя труды 2-й международной конференции г.Кишинев, май ІСТЕІ 2008г.
3. М. Владов, В. Килимчук, А. Дороган, А. Чумаков. Оценка качества внутреннего охлаждения лопаток турбин высокого давления (ТВД) тепловым методом (методика, результаты, оценка влияния различных факторов) труды 2- й международной конференции г.Кишинев, май ІСТЕІ 2008г.
4. Е. Белый, М. Владов, В. Негру. Описание математической модели цифрового электронного регулятора турбореактивного двигателя МД-120М. труды 2- й международной конференции г.Кишинев, май ІСТЕІ 2008г.
5. Владов М.П., Гусев А.Б. Герасимов В.В. Эксплуатация бесконтактных токосъемников семейства контрольно измерительных систем «Агат» на предприятиях РФ труды Международной конференции г. Москва, НПО «Сатурн», май 2008г
6. Владов М.П., Добров Д.И Семейство цифровых систем контрольно измерительных «Агат» труды Международной конференции г. Москва, НПО «Сатурн», май 2008г.
7. Михаил Владов, Дмитрий Добров, Даниил Украинцев  
Архитектура семейства СКИ «Агат» Сборник статей 1-й МНТК АО СП завод «Топаз» г. Кишинев, октябрь 2008г.
8. Владов М.П., Добров Д.И., Конструкторско-технологические решения семейства СКИ «Агат» Сборник статей 1-й МНТК АО СП завод «Топаз» г. Кишинев, октябрь 2008г.
9. Владов М.П., Добров Д.И., Украинцев Д.И. Семейство цифровых систем контрольно измерительных «Агат». Часть 2 Сборник статей 1-й МНТК АО СП завод «Топаз» г. Кишинев, октябрь 2008г.
10. М. Владов, В. Чепурняк, В. Негру Экспериментальный стенд для испытаний газотурбинной энергетической установки работающей по замкнутому циклу Брайтона. Сборник статей 1-й МНТК АО СП завод «Топаз» г. Кишинев, октябрь 2008г.
11. Блинов В.К., Владов М.П., Добров Д.И., Украинцев Д.И. Бортовая система телеметрического контроля летательного аппарата.
12. Ион Бостан, Валерий Блинов, Михаил Владов, Дмитрий Добров, Валерий Канцер, Николай Секриеру. Концепция построения и реализации молдавского микроспутника.
13. М. Владов. Обзор цифровой аппаратуры семейства „Агат” для контроля и испытаний авиационных двигателей.
14. М. Владов. Архитектура цифровой аппаратуры семейства „Агат” для контроля и испытаний авиационных двигателей.
15. М. Владов. Конструкторско-технологические решения цифровой аппаратуры семейства „Агат”.
16. М. Владов, Д. Добров. Оценка состояния поверхности рабочих лопаток газотурбинного двигателя пирометрическим комплексом. Труды пятой научной конференции с международным участием „Космос, экология, нанотехнологии, безопасность” SENS 2009, София, 2-4 ноября 2009г.

17. Михаил Владов, Петр Гецов, Дмитрий Добров, Валерий Канцер. Комплексная система мониторинга различных объектов на базе беспилотных летательных аппаратов.

18. Блинов В.К., Владов М.П., Добров Д.И., Украинцев Д.И. Бортовая система телеметрического контроля летательного аппарата.

19. Михаил Владов, Дмитрий Добров, Максим Колпакович Даниил Украинцев. Сканер дистанционного зондирования Земли

20. Ион Бостан, Валерий Блинов, Валерий Блажа, Михаил Владов, Дмитрий Добров, Валерий Канцер, Николай Секриеру, Даниил Украинцев. Описание проекта молдавский микроспутник. Proceeding of the 6<sup>th</sup> International Conference on «Microelectronics and computer Science», oct. 1-3, 2009, Chisinau, Moldova

21. Валерий Блинов, Михаил Владов. Бортовая система телеметрического контроля космического аппарата 458 -462 с.

22. Ион Бостан, Михаил Владов. Дмитрий Добров, Валерий Канцер, Николай Секриеру. Структурное построение и конструкция молдавского микроспутника. 468с, Moldavian Journal of the Physical Sciences

23. Vladov M. The choise of methods for compressing the input signals of an adaptive telemetering system. Moldavian Journal of the Physical Sciences №1 pp. 112-116. 2010.

24. Vladov M. and Kantser V. Mathematical models of the input signals in an adaptive telemetering system. Moldavian Journal of the Physical Sciences №3-4 pp. 378-383. 2009.

25. Vladov M. and Kantser V. Aperture methods of the redundancy reduction of the measuring information in telemetry systems. Moldavian Journal of the Physical Sciences №3-4 pp. 384-387, 2009,

26. Ion Bostan, Mihail Vladov, Valeriu Dulgheru, Igor Mardare, et al "Moldavian Microsatellite"- Aerspatial project launched at the Technical University of Moldova. – UNIVERSITAT SIEGEN Institut fur Digitale Kommunikationssysteme Wissenschaftliches Kommunikations-und Sicherheitskolloquium, 2009. p.161-170.

27. Vladov M. Methods of self-training of the adaptive telemetry monitoring system of engines of flight venicles. Sixth Scientific Conference with International Participation SPACE, ECOLOGY, SAFETY 2-4 November 2010, Sofia, Bulgaria.

28. Vladov Mihail, Dobrov Dmitry. The review of open company "Comelpro" control and measuring devices for engine plants of the Russian Federation. Sixth Scientific Conference with International Participation SPACE, ECOLOGY, SAFETY 2-4 November 2010, Sofia, Bulgaria.

29. Vladov M. The simulator of signals of detectors of mechanical stress and temperature for family SCM "Agate" check. AEROSPASE RESEARCH IN BULGARIA. №24, 2011.

30. Vladov M. Technique of calculation of level of pressure of material in SCM "Agate". AEROSPASE RESEARCH IN BULGARIA. №24, 2011.

31. Владов М.П., Добров Д.И. ОБЗОР контрольно-измерительных систем «COMELPRO» для двигателестроительных предприятий РФ. III международная научно-техническая конференция "АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА". ЦИАМ 30.11.10 - 3.12.10, Москва.

### **Изобретения**

32..(54) TITLUL: Sistem telemetric adaptiv de control al motoarelor aparatelor de zbor 51) Cl. Int.<sup>8</sup> G01R 17/00

Vladov M. P. Sistemul adaptiv telemetric de control a motoarelor aparatelor de zbor.