

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени профессора Н.Е. Жуковского



На правах рукописи

БЛОКИН-МЕЧТАЛИН Юрий Константинович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ**

Специальность 05.11.16 – Информационно-измерительные
управляющие системы

Автореферат
диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Жуковский
2020

Работа выполнена в Центральном аэрогидродинамическом институте имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ).

Научный консультант – доктор технических наук,
Главный научный сотрудник ФГУП «ЦАГИ»

Миргазов М.Н.

Официальные оппоненты:

1. доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой МТ-4 «Метрология и взаимозаменяемость» ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана

Пронякин В. И.

2. доктор технических наук, профессор, профессор кафедры КБ-6 «Приборы и информационно-измерительные системы», института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО МГТУ «МИРЭА – Российский технологический университет»

Слепцов В.В.

3. доктор технических наук, профессор, Профессор факультета систем управления и робототехники, директор научно-исследовательского центра технологий контроля качества ракетно-космической техники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Прохорович В. Е.

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы» (ФГУП ВНИИМС).

Защита состоится «___» _____ 2020 г. _____ часов на заседании диссертационного совета Д212.142.04 при ФГБУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, Вадковский пер., д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ «СТАНКИН».

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.142.04
К.Э.Н.

Ромаш Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Создание новых образцов авиационной и ракетно-космической техники требует проведения обширного комплекса экспериментальных исследований на всех этапах создания летательных аппаратов (ЛА), включающих, прежде всего, испытания моделей ЛА в аэродинамических трубах (АДТ).

Исследования в АДТ перспективных моделей ЛА, выполнение заказов зарубежных авиационно-космических фирм требуют существенного повышения качества и экономической эффективности аэродинамического эксперимента.

Решение современных задач экспериментальной аэродинамики зависит от функциональных возможностей, метрологических и эксплуатационных характеристик информационно-измерительных систем и комплексов, применяемых в АДТ.

Поэтому создание специализированных, совершенных и высокоэффективных ИИС нового поколения для работы в тяжелых условиях эксплуатации с использованием новых методов и средств с высокими метрологическими, эксплуатационными и экономическими показателями для повышения качества и эффективности исследований по отработке авиационной и ракетно-космической техники в АДТ является актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение.

Степень разработанности темы. В аэродинамических трубах ЦАГИ информационно-измерительные системы начали создаваться в конце 1960^х – начале 1970^х годов. Первая ИИС «ЭПЮРА» с зарубежной мини-ЭВМ была создана для исследования распределения давления на моделях в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-109.

В период с 1973 г. по 1988 г. создавались ИИС на основе аналоговой тензометрической аппаратуры типа ЛУЧ на постоянном токе (ЛУЧ-3, ЛУЧ-4, ЛУЧ-5) и на несущей частоте типа АНЧ (8АНЧ-23, 8АНЧ-25, 8АНЧ-26), разработанных в ЦАГИ. В составе ИИС использовались отечественные системы сбора данных (К734, ИБК 7/8), связанные с микро и мини-ЭВМ (Электроника-60, СМ4), а также зарубежные системы (IMS3510 – Англия, ADAC635 11/AD – США) с ЭВМ серии PDP11 (США).

В 1980^х годах с участием специалистов ЦАГИ был создан проблемно-ориентированный измерительно-вычислительный комплекс ИБК Л70 на базе аналоговых и цифровых приборов, микро и мини-ЭВМ, выпускаемых приборостроительной промышленностью. Архитектура и состав комплекса позволили создать ИИС, функционально распределенную на подсистемы: измерения параметров воздушного потока, аэродинамических нагрузок, распределения давления на моделях, метрологического обеспечения контроля измерений.

В конце 1980^х годов в практику автоматизации научных исследований начала широко внедряться методология магистрально-модульного международного стандарта САМАС. В рамках «Комплексной программы научно-технического сотрудничества стран-членов СЭВ¹» был разработан измерительно-вычислительный комплекс ИБК М1 в стандарте САМАС с персональным компьютером. На его основе были созданы ИИС для различных видов измерений и испытаний в АДТ.

¹ СЭВ – Совет Экономической Взаимопомощи.

В настоящее время в зарубежных научных центрах наибольшее распространение получили распределенные системы и комплексы сбора данных магистрально-модульной архитектуры с использованием микропроцессорных устройств различного назначения, программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), запоминающих устройств большой емкости и ЭВМ с быстродействующей многоядерной архитектурой.

Цель работы. Информационно-измерительные системы предыдущего поколения не обеспечивали необходимые качество и экономичность исследований моделей ЛА в АДТ, которые зависят от точности и информативности измерений аэродинамических нагрузок, параметров и режимов испытаний, и, как следствие, улучшение их аэродинамики, оптимизацию компоновок и топливной эффективности ЛА. Поэтому целью исследования является повышение точности, быстродействия, информативности и экономической эффективности измерительных преобразователей и информационно-измерительных систем для исследования характеристик моделей ЛА в АДТ.

Задачи работы:

- Исследование по формированию комплекса современных требований к высокоэффективным информационно-измерительным системам для экспериментальной аэродинамики.
- Анализ, исследование и разработка методов и средств повышения точности измерительных преобразователей и систем.
- Исследование и разработка принципов построения и технических решений новых измерительных преобразователей и систем для основных видов измерений и испытаний моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах
- Исследование по созданию единой магистрально-модульной платформы аппаратных и программных средств построения унифицированного измерительно-вычислительного и управляющего комплекса для экспериментальных исследований моделей ЛА в АДТ.
- Создание, экспериментальные исследования и внедрение в практику испытаний моделей ЛА в АДТ высокоэффективных информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) на основе унифицированного измерительно-вычислительного комплекса ИВК М2М на магистрально-модульной платформе.

Научная новизна работы:

- Впервые сформулирован комплекс современных требований к информационно-измерительным системам (ИИС) для исследования аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах. Требования являются руководством при разработке и создании высокоэффективных ИИС.
- Предложена и разработана концепция построения ИИС для экспериментальной аэродинамики на единой магистрально-модульной платформе аппаратных и программных средств в международных стандартах.
- Предложены и разработаны структурные и алгоритмические методы и средства повышения точности измерительных преобразователей и систем для экспериментальной аэродинамики.

- Предложены и разработаны принципы и технические решения построения новых прецизионных измерительных преобразователей и систем и на их основе созданы магистрально-модульные унифицированные ИИС для основных видов измерений и испытаний моделей ЛА в АДТ.
- Разработан и создан многофункциональный, унифицированный измерительно-вычислительный и управляющий комплекс ИВК М2М нового поколения на основе концепции единой магистрально-модульной платформы аппаратных и программных средств. Комплекс включен в Госреестр средств измерения РФ.
- Разработаны, созданы и внедрены в АДТ новые информационно-измерительные и управляющие системы на базе комплекса ИВК М2М для исследования аэродинамических характеристик моделей ЛА в АДТ с совокупностью показателей эффективности: точность – быстродействие – многофункциональность – унификация – экономичность.

Новизна разработанных измерительных преобразователей, систем и комплексов, предложенных методов и средств повышения их точности защищены авторскими свидетельствами СССР № 251687, № 405075 и патентами РФ № 2018173, № 84554, № 2374612, № 240071, № 2396511, № 249107, № 2696930, № 2696945, объектами изобретений в которых являются соответствующие структурные, схемотехнические и алгоритмические решения, обладающие рядом новых положительных свойств.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем:

- Разработанный комплекс требований и концепция единой магистрально-модульной платформы аппаратных и программных средств ИИС являются фундаментальной основой для разработки перспективных методов и средств информационно-измерительных и управляющих систем для исследования аэродинамических характеристик моделей ЛА в АДТ.
- Предложенные структурные и алгоритмические методы и средства повышения точности и быстродействия измерений использованы в разработанных и созданных новых измерительных преобразователях и системах.
- Разработанные измерительные преобразователи и системы для основных видов измерений и исследований аэродинамических характеристик моделей ЛА имеют улучшенные метрологические и эксплуатационные показатели.
- Разработка и внедрение многофункционального унифицированного измерительно-вычислительного и управляющего комплекса ИВК М2М в практику аэродинамического эксперимента улучшило показатели эффективности ИИС: точность – быстродействие – многофункциональность – унификация – экономичность. В результате повысилось качество исследований аэродинамических характеристик моделей ЛА.
- На основе комплекса ИВК М2М созданы ИИС нового поколения в крупных промышленных аэродинамических трубах ФГУП «ЦАГИ» (Т-101, Т-102, Т-103, Т-104, Т-5, Т-106, Т-112, Т-113, Т-116, Т-128), а также в ФГУП «СибНИА» (Т-203, Т-205), ФГУП «ЦИАМ» (У-107), ОАО «ГосМКБ «Радуга» (АУ-1, АУ-2), и в АО «Корпорация «Комета», НПК «КБМ».

- С использованием созданных систем на установках ФГУП «ЦАГИ» проведена отработка аэродинамики самолетов ОКБ ПО Сухого (Су-27, Т-50, RRJ), ФГУП РСК «МИГ» (МИГ-29М), «ОКБ им. Яковлева» (МС-21), беспилотных ЛА, вертолетов ООО «Камов» (К-52), ОАО КВЗ («Ансат»), ракет различного назначения ОАО «Корпорация «Тактическое Ракетное Вооружение», ФГУП «ГосМКБ «Вымпел», ОАО «ГосМКБ «Радуга», ФГУП ГНПП «Сплав», ОАО ОКБ «Новатор».

- Внедрение в эксплуатацию нового поколения ИИС на базе аппаратно-программного комплекса ИВК М2М – ПОТОК с высокими метрологическими характеристиками, надежностью, быстродействием, возможностью совмещать различные виды испытаний в одном пуске с оперативным контролем достоверности измерений позволило повысить точность измерений сигналов датчиков (в $2\div 3$ раза); существенно (на порядок) повысить информативность эксперимента; сократить поточное время испытаний моделей (на $20\div 30\%$); расширить возможности существующих и внедрения новых экспериментов. За счет унификации и открытой архитектуры аппаратных и программных средств значительно (в $2\div 3$ раза) сокращены сроки создания и внедрения новых ИИС (с $12\div 18$ месяцев до $6\div 9$ месяцев), существенно (в разы) снижены затраты на эксплуатацию систем, обеспечивается возможность гибкой модификации систем и прикладного программного обеспечения.

- Новое поколение, разработанных прецизионных ($\leq 0,005\%$) и широкополосных тензометрических модулей на перспективной магистрально-модульной платформе PXI/PXI Express и встраиваемые в объект испытаний микропроцессорные и микроконвертерные измерительные преобразователи и аппаратура, направлено на дальнейшее совершенствование техники и методики аэродинамического эксперимента.

- В Корпоративном университете ФГУП «ЦАГИ» неоднократно прочитан курс лекций «Многоканальный измерительно-вычислительный и управляющий комплекс ИВК М2М для проведения экспериментов в АДТ».

Методология и методы исследования. Создание высокоэффективных ИИС базируется на методологии комплексного подхода к проблеме, в основу которого положены взаимосвязанные теоретические и экспериментальные исследования, сопровождающиеся разработкой, внедрением и определением метрологических характеристик измерительных устройств и систем. Данная проблема включает анализ и синтез объектов и процессов экспериментирования, первичных преобразователей физических величин (датчиков), методов и средств обеспечения высокой точности и быстродействия измерительных каналов, оптимизацию структурно-функционального построения систем, алгоритмов измерения и обработки экспериментальных данных, а также моделирование процессов формирования и обработки сигналов отдельных устройств и систем. Для решения задачи повышения качества и эффективности аэродинамического эксперимента разработана и реализована концепция и методология применения единой открытой магистрально-модульной платформы построения ИИС на основе международных стандартов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Современные требования к информационно-измерительным системам для исследования аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических установках.
2. Методы и средства повышения точности измерительных преобразователей и систем в экспериментальной аэродинамике.
3. Принципы и технические решения построения измерительных преобразователей и систем для измерений:
 - Параметров воздушного потока и углового положения моделей и механизмов.
 - Распределения давления на моделях дренажным методом.
 - Аэродинамических нагрузок при весовых испытаниях моделей.
 - Динамических процессов при испытании моделей.
4. Концепция и технические решения построения многофункционального, унифицированного, магистрально-модульного измерительно-вычислительного и управляющего комплекса ИВК М2М для экспериментальной аэродинамики.
5. Новое поколение высокоэффективных ИИС и ИИУС на базе комплекса ИВК М2М для исследования аэродинамических характеристик моделей ЛА в АДТ.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается данными экспериментальных исследований характеристик измерительных преобразователей и систем на эталонных стендах и многократными испытаниями контрольных моделей ЛА в АДТ.

Результаты работы докладывались и обсуждались на 19 отраслевых и международных конференциях и семинарах, в том числе:

1. Школа-семинар «Аэродинамика летательных аппаратов» (ЦАГИ) в 2006, 2008 годах.
2. Научно-техническая конференция по аэродинамике (ЦАГИ) в 2010, 2011, 2012, 2014, 2019 годах.
3. Отраслевая научно-техническая конференция по измерительной технике и метрологии для экспериментальных исследований летательных аппаратов КИМИЛА (ЦАГИ) в 2014, 2016, 2018 годах.
4. Научные программы специализированных выставок приборов и средств контроля, измерений и испытаний и научно-практические конференции «Современные средства измерений и метрологического обеспечения для создания новой техники» – выставки «Экспоконтроль», Москва в 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 годах.
5. 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Современное состояние методов, средств и метрологического обеспечения исследований, испытаний и эксплуатации изделий авиационной техники» в рамках 14-й Международной выставки испытательного и контрольно-измерительного оборудования «Testing & Control», Москва в 2017 году.
6. Всероссийская конференция «Измерения, испытания, контроль», «Testing & Control», Москва в 2018 году.

Результаты работы демонстрировались на выставках: 1) Авиа МАКС 2001 (г. Жуковский, 2001 г.). 2) 1-я специализированная международная выставка испытательного оборудования, систем и технологий авиационно-космической промышленности. Aerospace Testing Russia 2004 (г. Москва, 2004 г.). 3) 2-я международная специализированная выставка. Aerospace Testing Russia 2005. Испытательное оборудование, системы и технологии авиационно-космической промышленности (г. Москва, 2005 г.). 4) 3-я международная специализированная выставка. Aerospace Testing Russia 2006. Испытательное оборудование, системы и технологии авиационно-космической промышленности (г. Москва, 2006 г.). 5) 12-й Московский международный инновационный форум «Точные измерения – основа качества и безопасности». 12-я выставка средств измерений и метрологического обеспечения «METROLEXPO – 2016» (г. Москва, 2016 г.). 6) 13-й Московский международный инновационный форум «Точные измерения – основа качества и безопасности». 13-я выставка средств измерения и метрологического обеспечения «METROLEXPO – 2017» (г. Москва, 2017 г.). 7) 12-я международная выставка «Гидросалон – 2018» (г. Геленджик, Россия, 6–9 сентября 2018 г.).

Личный вклад автора. Соискателем сформулированы все основные идеи защищаемых методов, средств, методик, принципов построения, структурных и принципиальных электрических схем основных измерительных преобразователей, измерительных систем и комплексов для исследования аэродинамических характеристик модулей ЛА в АДТ. Работы, выполненные в соавторстве, подчинены общей постановке проблемы и концепции ее решения, предложенной соискателем. Соавторы участвовали в разработке конкретных аппаратных и программных средств, конструкций, проведения исследований и испытаний измерительных систем и комплексов, их внедрении в практику аэродинамического эксперимента.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 55 научных работ, из них 19 работ – в изданиях, рекомендованных ВАК, одна монография. Получены два авторских свидетельства СССР, восемь патентов Российской Федерации на изобретение, один из них – на полезную модель. Написаны более 100 научно-технических отчетов, сделаны 19 публичных докладов.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, который включает 142 наименования. Полный объем диссертации составляет 291 страница машинописного текста с 130 рисунками, 25 таблицами.

Основное содержание работы

Во введении дается характеристика аэродинамического эксперимента, как наиболее важного и надежного средства исследования характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах. Обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи. Определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации, публикациях и структуре диссертационной работы.

ГЛАВА 1. Современные требования к информационно-измерительным системам для испытаний моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах

В первой главе на основе комплексного анализа особенностей современного аэродинамического эксперимента, измеряемых физических величин, разнообразия видов исследования моделей, необходимости повышения точности определения аэродинамических характеристик моделей, путей повышения экономичности эксперимента сформулирован комплекс требований к высокоэффективным информационно-измерительным системам для исследования моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах.

Современные ИИС должны обеспечивать:

1) Высокую точность измерений

- Параметров воздушного потока: полного и статического давлений – $\pm(0,01...0,02)\%$; сигналов датчиков давления – $\leq 0,005\%$; числа МАХА – $\leq 0,002$ ед. М; скорости потока V – $\leq 0,2$ м/с.

- Углового положения моделей: угла тангажа (α), угла крена (β) – от $\pm 0,005^\circ$ до $\pm 0,01^\circ$; сигналов датчиков углов – $\leq 0,02\%$.

- Аэродинамических нагрузок: сил X , Y , Z ; моментов M_x , M_y , M_z – $\leq 0,1\%$; сигналов многокомпонентных тензовесов – $\leq 0,01\%$.

- Распределения давления: квазистатических давлений – $\pm(0,15...0,25)\%$; сигналов датчиков давления – $\leq 0,03\%$.

- Динамических процессов: пульсаций давления (в диапазоне до 100 кГц) – $\leq 5\%$; сигналов датчиков динамических процессов – $\leq 0,5\%$.

2) Быстродействие сбора данных. В зависимости от вида измерительного канала быстродействие сбора данных варьируется от 10 Гц до 2,5 МГц.

3) Количество измерительных каналов. С учетом совмещения разнообразных видов эксперимента количество аналоговых измерительных каналов – до 1000, цифровых каналов управления – не менее 32.

4) Точное задание и регистрацию времени измерения. Необходимо для синхронизации отсчетов.

5) Высокую скорость при вычислениях и отображении информации, необходимую для оперативного принятия решения экспериментаторами при нарушении режима измерений и испытаний.

6) Синхронизацию работы измерительных и управляющих подсистем. Это обусловлено необходимостью одновременного измерения параметров, обмена данными между подсистемами, удаленного запуска и контроля их работоспособности.

7) Магистрально-модульное построение на основе международных стандартов. Позволяет реализовать высокую степень унификации и стандартизации оборудования, совместимость с изделиями других фирм, гибко перестраивать систему под новые задачи эксперимента.

Сформулированными требованиями предлагается руководствоваться при разработке и создании современных высокоэффективных ИИС.

ГЛАВА 2. Методы и средства повышения точности измерительных преобразователей и систем для экспериментальной аэродинамики

Во второй главе предложены и разработаны структурные и алгоритмические методы и средства повышения точности измерительных преобразователей и систем.

Структурные методы повышения точности измерений

• Способы преобразования сигналов тензорезисторных мостовых датчиков и их погрешности

Способ дискретного уравнивания тензомоста с одновременным кодированием измеряемого сигнала (цифровые мосты). Передаточная функция такого устройства (Рис.2.1):

$$N_1(P) = \frac{W_M(P) \cdot W_{CC}(P) \cdot W_{ФКЭ}(P)}{1 + W_M(P) \cdot W_{CC}(P) \cdot W_{ФКЭ}(P) \cdot W_{ЦАП}(P)} \cdot \varepsilon_r(P)$$

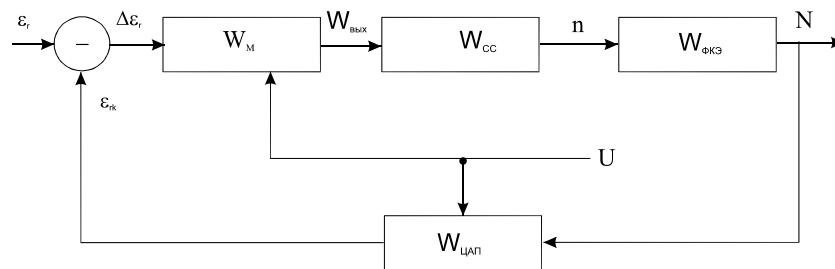


Рис.2.1. Схема преобразования способом дискретного уравнивания тензомоста

Способ кодирования выходного сигнала неуравновешенного тензомоста. В современных тензометрических преобразователях и системах кодируется как непосредственно выходной сигнал тензомоста, так и нормированный измерительным усилителем.

Передаточная функция устройства (Рис.2.2):

$$N_2(P) = \frac{W_M(P) \cdot W_y(P) \cdot W_{CC}(P) \cdot W_{ФКЭ}(P)}{1 + W_{CC}(P) \cdot W_{ФКЭ}(P) \cdot W_{ЦАП}(P)} \cdot \varepsilon_r(P)$$

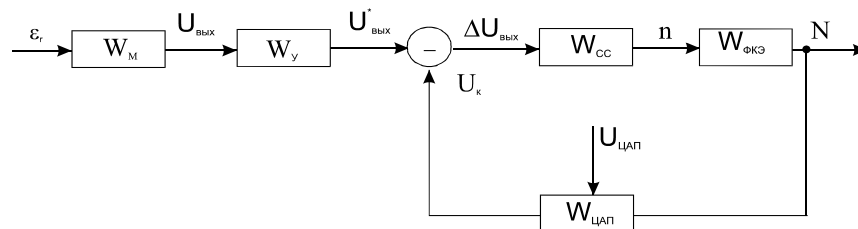


Рис.2.2. Схема преобразования способом дискретной компенсации выходного напряжения неуравновешенного тензомоста

где передаточные функции:

$W_M(P)$ – тензомоста, $W_{CC}(P)$ – схемы сравнения, $W_{ФКЭ}(P)$ – формирователя кода, $W_{ЦАП}(P)$ – цифро-аналогового преобразователя, $W_y(P)$ – усилителя;

$\varepsilon_{r\text{ к}}$ – уравнивающее приращение сопротивлений, $\Delta\varepsilon_r$ – величина недокомпенсации, U – питание тензомоста и ЦАП, $U_{\text{к}}$ – компенсирующее напряжение, $\Delta U_{\text{вых}}$ – величина недокомпенсации, $U_{\text{ЦАП}}$ – напряжение питания ЦАП.

Получены погрешности способов преобразования:

$$\gamma_{N_1} \cong \gamma_{\varepsilon_r} - \gamma_{\text{ЦАП}}; \gamma_{N_2} \cong \gamma_{\varepsilon_r} + \gamma_M + \gamma_Y - \gamma_{\text{ЦАП}}, \text{ где}$$

γ_{ε_r} – приведенная к входу относительная аддитивная погрешность ε_r ;

$\gamma_M, \gamma_Y, \gamma_{\text{ЦАП}}$ – относительные погрешности функций преобразования элементов схем.

Установлено: погрешность преобразования по способу уравнивания тензомоста γ_{N_1} имеет наименьшее число составляющих. Однако использование в качестве ЦАП цепей делителей на основе магазинов проводимостей или параллельного делителя не позволяет достичь высокого разрешения и точности, так как с их увеличением все труднее построить цепи с требуемыми жесткими допусками. В преобразователях, построенных по способу компенсации выходного напряжения тензомоста, погрешность γ_M может быть значительно снижена при формировании напряжения питания тензомоста от общего с ЦАП источника эталонного напряжения. Наибольшую разрешающую способность и точность преобразования дает способ дискретной компенсации усиленного сигнала неуравновешенного тензомоста.

• **Структуры построения тензометрических преобразователей и способы питания тензорезисторного моста**

Определены характеристики и погрешности кодирующих измерительных преобразователей (Таблица 2.1) с питанием тензомоста напряжением U (Рис.2.3) и током I (Рис.2.4), сформированными от источника опорного напряжения $U_{\text{оп}}$ АЦП. На схемах: ИПМ – источник питания ТМ; ПП – переключатель полярности питания; ИОН – источник опорного напряжения, СС – схема сравнения, ФКЭ – формирователь кодового эквивалента N .

$$U_{\text{вых}} = U \cdot \frac{r_2 \cdot r_4 - r_1 \cdot r_3}{(r_1 + r_4)(r_2 + r_3)} \cdot K_Y \quad U_K = U_{\text{оп}} \cdot K_{\text{ЦАП}} \cdot N$$

При условии $U_{\text{вых}} = U_K$ и $U = U_{\text{оп}}$ $N = \varphi(\Delta r/r)$

$$U_{\text{вых}} = \frac{r_2 \cdot r_4 - r_1 \cdot r_3}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} \cdot I \cdot K_Y \quad U_K = U_{\text{оп}} \cdot K_{\text{ЦАП}} \cdot N$$

$$I = U \cdot g_{\text{вх}} = U_{\text{оп}} / R_{\text{ит}} \quad g_{\text{вх}} = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{(r_1 + r_4)(r_2 + r_3)}$$

При условии $U_{\text{вых}} = U_K$ $N = \varphi(\Delta r)$.

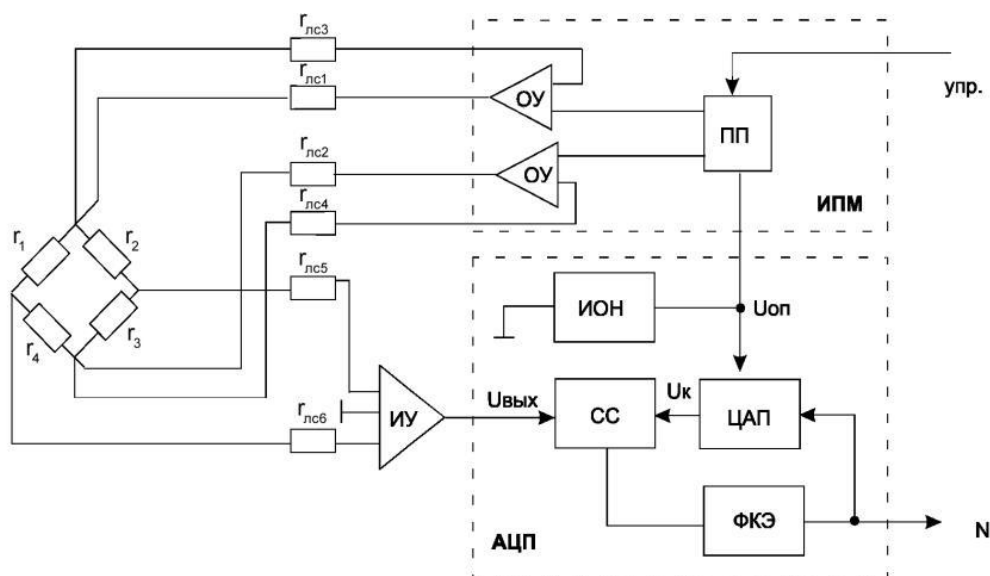


Рис.2.3. Измерительный преобразователь с питанием тензомоста от источника напряжений, сформированного от источника опорного напряжения АЦП

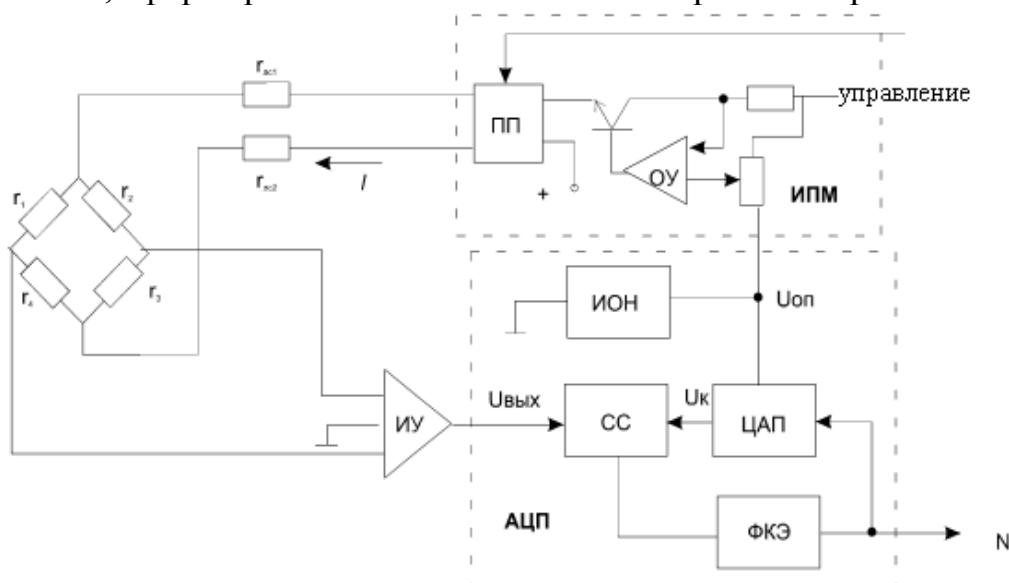


Рис.2.4. Измерительный преобразователь с питанием тензомоста от источника тока, сформированного от источника опорного напряжения АЦП

Показано: при использовании схемы Рис.2.3 обеспечивается: линейная зависимость кодового эквивалента N от измеряемой величины $\varepsilon_r = \Delta r / r$, независимость N от нестабильности источника питания тензомоста U , значительное уменьшение влияния сопротивлений линий связи с преобразователем при 4-х проводной схеме питания ТМ; при использовании схемы Рис.2.4 значительно уменьшается погрешность, вызванная зависимостью сопротивлений тензорезисторов (r) от температуры, так как кодовый эквивалент (N) пропорционален абсолютному (Δr) приращению сопротивлений тензорезисторов, а не относительному (ε_r), практически исключается влияние изменений сопротивлений линий связи тензомоста с преобразователем, что позволяет коммутировать тензомосты с помощью бесконтактных переключателей со значительным сопротивлением в открытом состоянии, кодовый эквивалент N не зависит от нестабильности источника питания ТМ.

Рекомендуется: схему Рис.2.3 использовать для прецизионных измерений сигналов ТМ, образованных проводниковыми тензорезисторами; схему Рис.2.4 при измерении сигналов ТМ, образованных полупроводниковыми тензорезисторами, сопротивления которых существенно зависят от температуры; при невысоких требованиях к метрологическим характеристикам может использоваться схема с потенциально не связанными источниками питания тензомоста и кодирующего преобразователя.

Таблица 2.1 – Характеристики тензометрических кодирующих преобразователей

Характеристики	Структура построения схемы измерения		
	Измерительный преобразователь с питанием тензомоста напряжением, сформированным от источника опорного напряжения кодирующего преобразователя (Рис.2.3)	Измерительный преобразователь с питанием тензомоста током, сформированным от источника опорного напряжения кодирующего преобразователя (Рис.2.4)	Измерительный преобразователь с потенциально не связанными источниками питания тензомоста и опорного напряжения кодирующего преобразователя
Функция преобразования $N = f(\varepsilon_r)$	$N = \frac{K_y}{K_{\text{ЦАП}}} \cdot \frac{\Delta r}{r}$	$N = \frac{K_y}{R_{\text{ИТ}} \cdot K_{\text{ЦАП}}} \cdot \Delta r$	$N = \frac{U}{U_{\text{оп}}} \cdot \frac{K_y}{K_{\text{ЦАП}}} \cdot \frac{\Delta r}{r}$
Чувствительность $S_N = dN/d\varepsilon_r$	$S_N = \frac{K_y}{K_{\text{ЦАП}}}$	$S_N = \frac{K_y}{K_{\text{ЦАП}}} \cdot \frac{r}{R_{\text{ИТ}}}$	$S_N = \frac{U}{U_{\text{оп}}} \cdot \frac{K_y}{K_{\text{ЦАП}}}$
Нелинейность δ_N	0	0	0
Температурная погрешность δ_T	$\delta_T = \frac{\varepsilon_{rT}}{1 + \varepsilon_{rT}} \cong \frac{\Delta r_T}{r}$	$\delta_T = \frac{(\Delta r)_T}{\Delta r}$	$\delta_T = \frac{\varepsilon_{rT}}{1 + \varepsilon_{rT}} \cong \frac{\Delta r_T}{r}$
Погрешность от влияния линий питания тензомоста $\delta_{\text{лс}}$	$\delta_{\text{лс}2} \cong 2 \frac{r_{\text{лс}} \pm \Delta r_{\text{лс}}}{r}$ $\delta_{\text{лс}4} = 0$	$\delta_{\text{лс}4} = 0$	$\delta_{\text{лс}2} \cong 2 \frac{r_{\text{лс}} \pm \Delta r_{\text{лс}}}{r}$ $\delta_{\text{лс}4} = 0$
$\delta_{\text{лс}2}$ – погрешность при 2-х проводной схеме питания ТМ, $\delta_{\text{лс}4}$ – погрешность при 4-х проводной схеме питания ТМ.			

• Структурный метод повышения точности измерительного преобразователя углового положения изделий на основе микромеханических акселерометров

Предложено структурное и схемотехническое построение преобразователя, решающее следующие задачи: повышения чувствительности и точности измерения углов, за счет использования двух двухосевых микромеханических акселерометров с определенной ориентацией осей чувствительности в горизонтальной плоскости и суммированием их сигналов в дифференциальных усилителях; уменьшения температурной погрешности измерения углов, за счет компенсации начальных сигналов акселерометров в дифференциальных усилителях, существенно зависящих от изменения температуры внешней среды; повышения помехоустойчивости измерения углов, за счет согласования высокоомных выходных импедансов акселерометров с входами дифференциальных усилителей с помощью буферных операционных усилителей с низкоомным выходным импедансом; упрощения конструкции и уменьшения габаритов измерителя.

Преобразователь содержит (Рис.2.5): два двухосевых микромеханических акселерометра 1 и 2 (ADXL203), установленных на противоположных сторонах основания таким образом, что их одноименные оси чувствительности X1, X2 и Y1, Y2 направлены горизонтально и перпендикулярно, а разноименные оси X1, Y2 и X2, Y1 направлены в противоположные стороны, при этом вертикальные оси Z1 и Z2 совпадают.

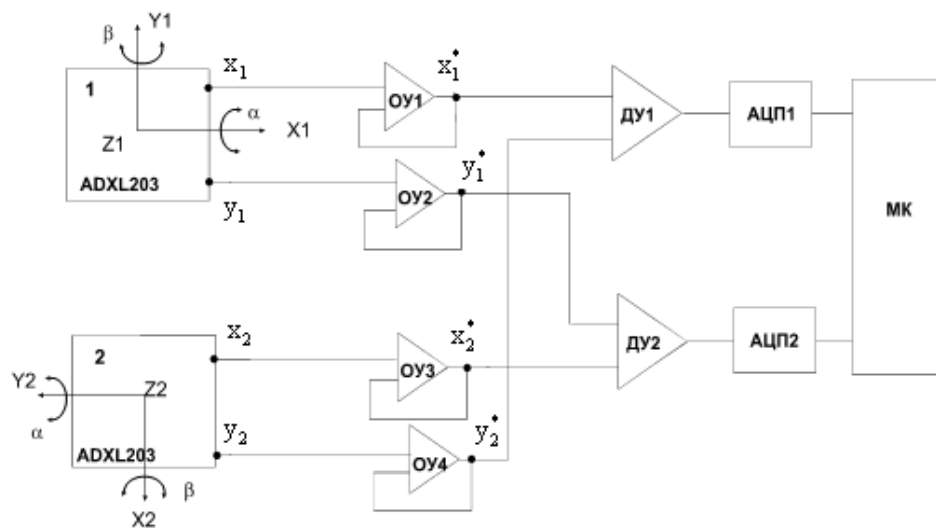


Рис.2.5. Структурно-функциональная схема измерителя угловых положений изделия

Показано, что в результате преобразования и суммирования сигналов двух акселерометров в дифференциальных усилителях разности напряжений ДУ1 и ДУ2 на их выходе сформируются сигналы $2\Delta U_\alpha = K_\alpha \cdot g \cdot \sin \alpha$ и $2\Delta U_\beta = K_\beta \cdot g \cdot \sin \beta$. Определение значения углов положения изделий выполняется путем вычисления арксинусов углов α и β в микроконтроллере МК.

На основе двухосевых микромеханических акселерометров разработан и используется измеритель углового положения моделей и механизмов.

Алгоритмические методы повышения точности измерений

Алгоритмы уменьшения аддитивных погрешностей.

- Предложен алгоритм уменьшения погрешности от влияния термо-ЭДС и смещения «нуля» в рассмотренных тензометрических преобразователях (Рис.2.3, Рис.2.4), основанный на методе компенсации погрешности по знаку, включающим минимум два измерения (X_1 и X_2). Погрешности измерения γ_A входят в результат с противоположным знаком и исключаются при вычислении среднего значения: $\bar{X} = (X_1 + X_2)/2 = [(X + \gamma_A) + (X - \gamma_A)]/2$. Алгоритм реализуется изменением полярности питания тензомоста с помощью переключателя полярности ПП. Используется в цифровых тензометрических преобразователях сигналов аэродинамических весов.

- Предложен алгоритм уменьшения погрешности от дискретизации измеряемой величины в измерителе частоты, основанный на методе вспомогательных измерений. Решает задачу получения заданной постоянной относительной погрешности $\gamma_{отн} = \Delta X/X = \text{const}$, в зависимости от текущего значения измеряемой величины в рабочем диапазоне за счет изменения шага квантования (Рис.2.6).

Алгоритм реализован в разработанном измерителе частоты и в системах измерения параметров воздушного потока АДТ с использованием прецизионных (0,03% ÷ 0,05%) виброчастотных датчиков давления (ВЧД).

- Предложен алгоритм уменьшения погрешности смещения «нуля» АЦП, основанный на методе обратных преобразований измеряемой величины. В схеме преобразователя (Рис.2.7) используется два малоразрядных АЦП1 и АЦП2 и два полупериода преобразования с одновременной коррекцией нуля.

В первом такте напряжение U_x преобразуется в код в АЦП1. Выходное напряжение обратного преобразователя ОП (ЦАП) в первом такте равно нулю. В результате на вход АЦП2 подается разность (ΔU) нулевого напряжения ОП и смещения нулевого уровня усилителя разности УР, вход которого в первом такте соединен с общей шиной с помощью коммутатора К. По окончании первого такта коды $N_1 = K_1 \cdot U_x$ и $N_2 = K_2 \cdot \Delta U$, соответственно устройств АЦП1 и АЦП2, имеющих коэффициенты преобразования K_1 , K_2 , записываются в память процессора ПР. Во втором такте на входы УР поступают напряжение U_x через коммутатор К и опорное напряжение $U_{оп}$ с выхода ОП, пропорциональное коду N_1 . На выходе УР формируется напряжение разности $U_{вых} = U_x - U_{оп}$, которое преобразуется АЦП2 в код $N_3 = K_2 \cdot (U_x - U_{оп} + \Delta U)$. Коды трех преобразований суммируются $N = N_1 - N_2 + N_3$. При условии $K_1 = K_2 = K$, получаем $N = K \cdot U_x$, из которого следует, что выходной код преобразователя пропорционален измеряемому напряжению. При этом напряжение смещения компенсируется. Алгоритм реализован в АЦП, разработанном для измерения сигналов многоканальных модулей давления ММД24 при исследовании распределения давления.

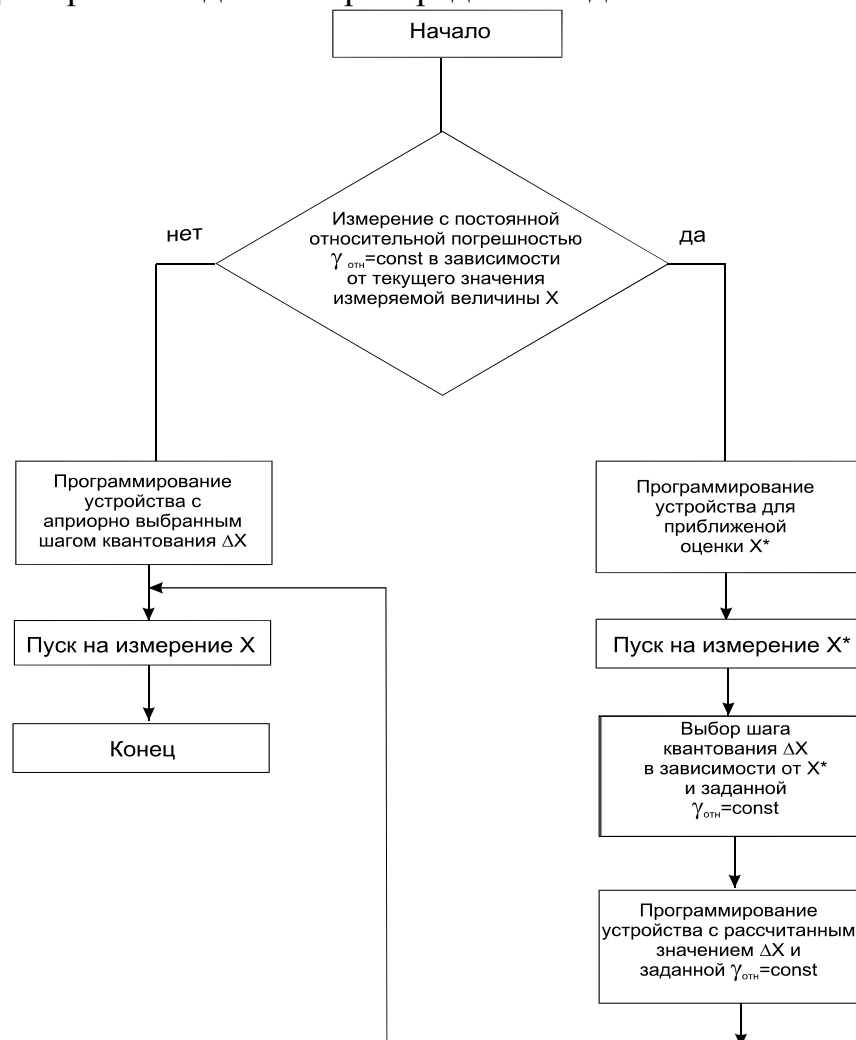


Рис.2.6. Алгоритм метода вспомогательных измерений для получения постоянной относительной погрешности $\gamma_{отн} = \text{const}$ в рабочем диапазоне измерения

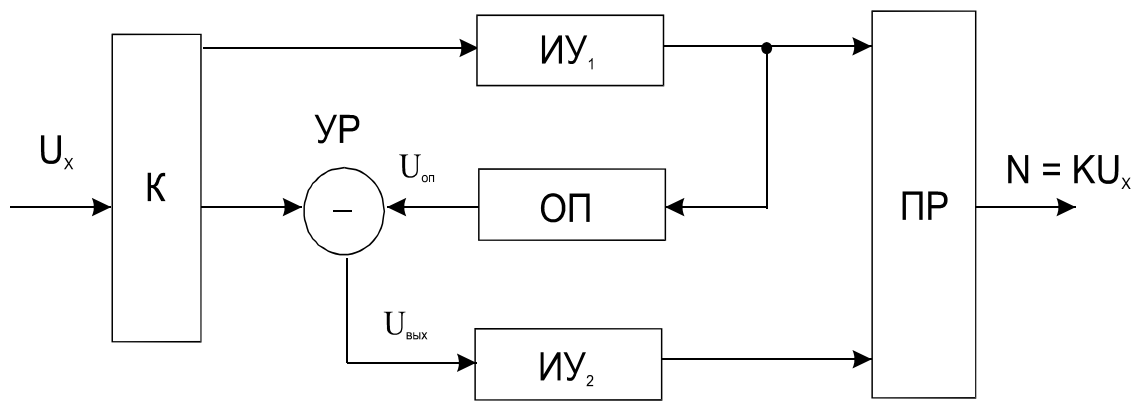


Рис.2.7. Структурная схема АЦП с коррекцией погрешностей методом обратных преобразований

Алгоритмы уменьшения мультипликативных погрешностей.

- Алгоритм метода вспомогательных измерений влияющих факторов. Предложен и реализован алгоритм уменьшения температурной погрешности в измерительных преобразователях и системах измерения параметров потока с вибросчетными датчиками (ВЧД), распределения давления с ММД и углового положения модели с использованием акселерометров.

Зависимости выходных сигналов первичных преобразователей от измеряемой физической величины и температуры даются в виде градуировочной таблицы. Обработка сигналов проводится путем аппроксимации зависимостей полиномами:

$$P^{(k)}(X) = a_0^{(k)} + a_1^{(k)}X + a_2^{(k)}X^2 + a_3^{(k)}X^3 + \dots a_n^{(k)}X^n;$$

$$a_i^{(k)}(T) = b_{i0}^{(k)} + b_{i1}^{(k)}T + b_{i2}^{(k)}T^2 + b_{i3}^{(k)}T^3 + \dots b_{im}^{(k)}T^m,$$

где X – выходной сигнал первичного преобразователя, пропорциональный физической величине $P^{(k)}$, k – номер первичного преобразователя, T – температура окружающей среды. Коэффициенты $a_i^{(k)}$ и $b_{im}^{(k)}$ определяются в результате градуировок первичных преобразователей в диапазоне рабочих температур. В общем виде зависимость физической величины $P^{(k)}$ от выходного сигнала X преобразователя и температуры T представляется в виде двумерного полинома:

$$P^{(k)}(X, T) = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{j=0}^m b_{ij}^{(k)} \cdot T^j \right) X^i,$$

определяемого $(n+1) \cdot (m+1) \cdot k$ коэффициентами $b_{ij}^{(k)}$, если за k принять количество преобразователей.

- Алгоритм метода образцовых мер с временным разделением измерительных процедур. Использовался для уменьшения погрешностей измерения, в частности температурной, в системах исследования распределения давления с коммутаторами пневмотрасс КП48 и ММД, имеющих пневмопереключатели для калибровки (Рис.2.8).

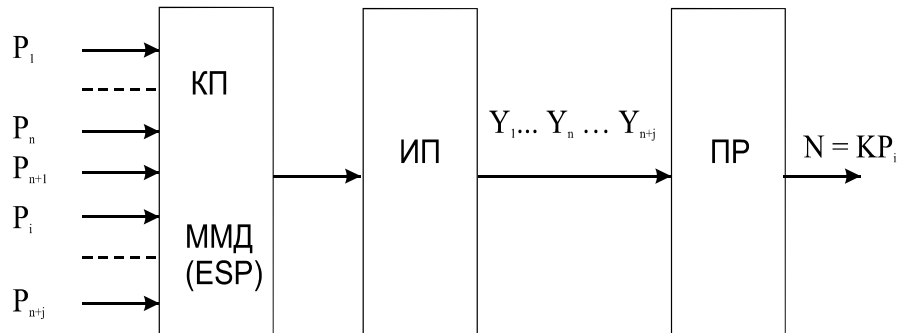
- Процесс измерения состоит из $(n+j)$ измерительных тактов. В n тактах к входу системы последовательно подключаются образцовые меры давления $P_1, P_2, \dots, P_n$, результаты измерений которых $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ измерительным преобразователем ИП, совместно с результатами $Y_{n+1} \dots Y_{n+j}$ последующих тактов измерения

входных величин $P_{n+1} \dots P_{n+j}$, образуют систему уравнений: $Y_1 = \sum_{i=0}^k a_i P_1^i$;

$$Y_2 = \sum_{i=0}^k a_i P_2^i; \dots Y_n = \sum_{i=0}^k a_i P_n^i; Y_{n+1} = \sum_{i=0}^k a_i P_{n+1}^i; \dots Y_{n+j} = \sum_{i=0}^k a_i P_{n+j}^i.$$

Система уравнений решается относительно измеряемых величин $P_{n+1} \dots P_{n+j}$. В случае линейной функции преобразования решение системы уравнений для одной из измеряемых величин, например P_{n+1} , имеет вид: $P_{n+1} = P_1 + (P_2 - P_1) \cdot (Y_{n+1} - Y_1) / (Y_2 - Y_1)$. Как видно, результат измерений не зависит от параметров функций преобразования.

- Тестовые алгоритмы повышения точности измерений. Предусматривают организацию входных воздействий (тестовых сигналов) с участием измеряемой величины.



ИП – измерительный преобразователь, ПР – процессор

Рис.2.8. Структурная схема измерительной системы с коммутаторами пневмотрасс КП48 и многоточечными модулями давления (ММД), реализующая метод образцовых мер с временным разделением измерительных процедур

Предложен тестовый алгоритм измерения сигналов тензорезисторных мостовых датчиков. Алгоритм реализуется путем формирования независимого аддитивного теста ε_r^A и мультипликативного теста ε_r^M (Рис.2.9).

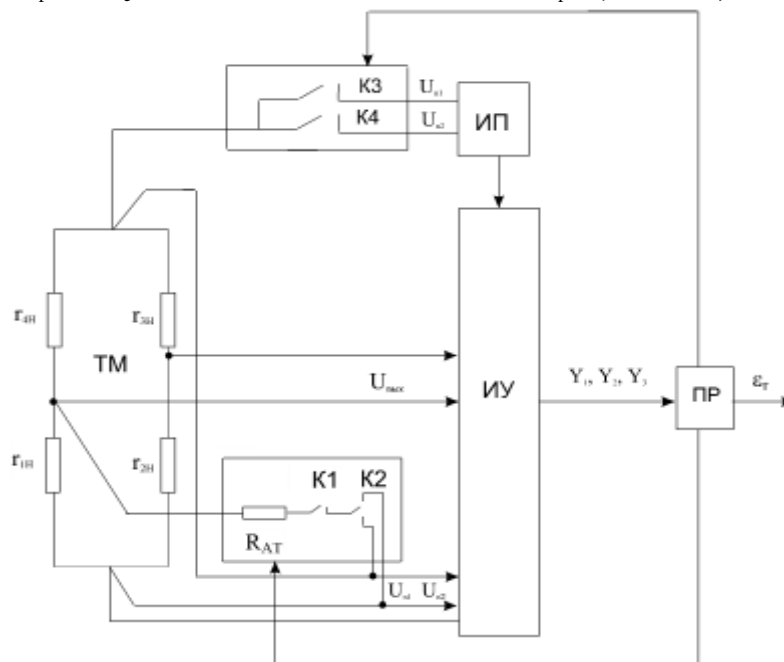


Рис.2.9. Структурная схема тензометрического преобразователя, реализующая тестовый алгоритм измерения (ТМ – тензомост, ИУ – измерительное устройство)

Аддитивный тест $\varepsilon_r^A = \varepsilon_r + \varepsilon_r^0$ задается путем шунтирования смежных плеч тензомоста ТМ прецизионным резистором R_{AT} с помощью переключателей К1 и К2. Мультипликативный тест $\varepsilon_r^M = b\varepsilon_r$ задается изменением напряжения питания тензомоста с помощью переключателей К3, К4. Коэффициент формирования мультипликативного теста b вычисляется процессором как отношение двух уровней напряжения питания тензомоста $U_{п1}$ и $U_{п2}$ по результатам их измерения. В первом такте тестового алгоритма измеряется входная величина $\varepsilon_r = U_{\text{вых}}/U_{п1}$, во втором такте – значение аддитивного теста ε_r^A , в третьем такте – значение мультипликативного теста ε_r^M . По результатам трех измерительных процедур составляется система уравнений: $Y_1 = a_0 + a_1\varepsilon_r$; $Y_2 = a_0 + (\varepsilon_r + \varepsilon_r^0)a_1$; $Y_3 = (a_0 + a_1\varepsilon_r)b$, где a_0, a_1 – параметры функций преобразования. Решив систему уравнений относительно измеряемой величины, получим: $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_r^0}{b-1} \cdot \frac{Y_3 - Y_1}{Y_2 - Y_1}$. Как видно, резуль-

тат измерения не зависит от параметров функции преобразования измерительного канала. Тестовый алгоритм измерения реализуется в разработанных цифровых тензометрических усилителях-нормализаторах сигналов датчиков.

- Алгоритм уменьшения методической погрешности измерения аэродинамических нагрузок от нелинейного взаимовлияния компонент тензовесов. Многокомпонентные аэродинамические тензовесы (ТВ) характеризуются многопараметрической нелинейной функцией преобразования. В статическом режиме математическая модель преобразования сил и моментов в электрический сигнал описывается градуировочной формулой ТВ:

$$X_i = \sum_{f=1}^6 A_f \cdot N_f + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 B_{kj} \cdot N_k \cdot N_j + \sum_{f=1}^6 \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 C_{fjk} \cdot N_f \cdot N_j \cdot N_k$$

где X_i – сигнал с датчика i -й компоненты ТВ; N_f, N_j, N_k – статические нагрузки по f, j, k компонентам; A, B, C – коэффициенты.

Показано, что в динамическом режиме работы тензовесов в АДТ при традиционном алгоритме измерения NFDR, в котором фильтрация (F) выполняется до развязки компонент (R), нелинейное взаимовлияние компонент ТВ может вызывать дополнительную методическую погрешность в определении аэродинамических нагрузок (Рис.2.10).

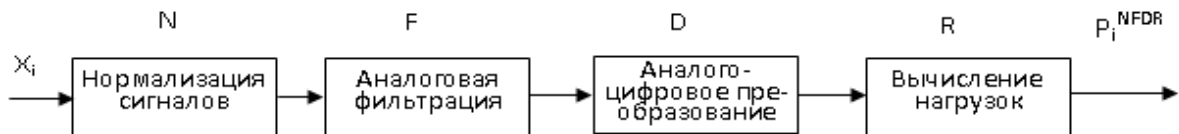


Рис.2.10. Традиционный алгоритм измерения аэродинамических нагрузок в динамическом режиме работы тензовесов

Например, для двухкомпонентного преобразователя силы:

$X_1 = a_1N_1 + b_1N_2 + c_1N_1N_2$; $X_2 = a_2N_1 + b_2N_2 + c_2N_1N_2$, дополнительные методические погрешности оцениваются зависимостями: $\Delta_{M1} = 0,5 c_1 n_1 n_2$ и $\Delta_{M2} = 0,5 c_2 n_1 n_2$, где c_1, c_2 – коэффициенты степени взаимовлияния компонент; n_1, n_2 – уровни гармонически изменяющихся величин одинаковой частоты ω .

Показано, что при реализации алгоритма измерения NDRF (Рис.2.11), при котором фильтрация F динамической составляющей сигнала проводится после развязки R компонент от взаимного влияния, отсутствует дополнительная методическая погрешность. В алгоритме после нормализации сигнала дискретизатор D берет отсчеты в моменты времени $t = kT$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$). В любой k -й момент времени для двухкомпонентного преобразователя силы будем иметь пары отсчетов $X'_1(k)$ и $X'_2(k)$. Используя эти отсчеты, определяются мгновенные значения аэродинамических нагрузок, которые можно представить в виде: $N_1(k) = N_1 + n_1 \cos \omega kT$; $N_2(k) = N_2 + n_2 \cos \omega kT$. Применив программный цифровой ФНЧ к мгновенным дискретным значениям нагрузок, получим их интегральные (средние) значения, свободные от дополнительных методических погрешностей. Алгоритмы NFDR и NDRF реализуются в разработанной весоизмерительной системе на основе тензометрических усилителей-нормализаторов с сигма-дельта (Σ/Δ) аналого-цифровыми преобразователями.



Рис.2.11. Алгоритм измерения, уменьшающий погрешность определения аэродинамических нагрузок в динамическом режиме работы тензовесов

Алгоритмические методы и средства усреднения динамических составляющих в измеряемом сигнале и уменьшения случайных погрешностей. Для практического применения разработаны и используются:

- Активные аналоговые быстродействующие фильтры нижних частот (АФНЧ) непрерывного действия на переключаемых емкостях (Баттерворта, Бесселя, Кауэра). Применяются в разработанных широкополосных цифровых тензометрических усилителях-нормализаторах сигналов датчиков.

- Цифровое усредняющее устройство циклического действия с весовым интегрированием на основе тактирующих импульсно-компенсационных преобразователей напряжения в частоту (ПНЧ) и частоты в код (ПЧК). Является наилучшим для подавления белого шума с равномерной спектральной плотностью. Способ и устройство усреднения применены в разработанном цифровом интегрирующем тензометрическом преобразователе для измерения сигналов тензовесов и других датчиков.

- Усреднители с кусочно-полиномиальной весовой функцией. Обеспечивают возможность повышения точности определения среднего значения переменного сигнала с широким спектром и эффективное подавление помех с неравномерной спектральной плотностью. Усредняющее устройство с параболической ВФ и спектральным окном Парзена применено в разработанных тензометрических усилителях-нормализаторах на основе сигма-дельта АЦП для измерения сигналов тензовесов и других датчиков.

- Цифровые нерекурсивные фильтры Дольфа-Чебышева низких частот с оптимальной помехоподавляющей ВФ. Фильтры реализуются только программно и разработаны для эффективной фильтрации низкочастотных сигналов в весоизмерительных и других системах.

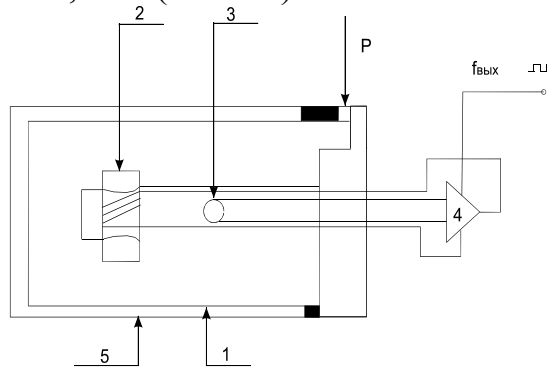
ГЛАВА 3. Измерение параметров воздушного потока, положения модели и механизмов в аэродинамических трубах

В третьей главе представлены результаты разработки и применений методов и средств измерения параметров воздушного потока, положения модели и механизмов в АДТ.

Параметры потока V – скорость, M – число Маха, q – скоростной напор вычисляются по результатам измерений полного давления в форкамере АДТ – P_0 и статического давления на стенке рабочей части АДТ – P или их разности $\Delta P = P_0 - P$.

Основные требования к системе измерения параметров потока: широкий диапазон измерения давлений – от 100 Па до 10^7 Па; постоянство относительной погрешности измерения давлений в широком диапазоне – 0,01%...0,02%; абсолютная погрешность измерения числа Маха – $\leq 0,002$ ед. M ; скорости потока V – $\leq 0,2$ м/с.

Высокую точность измерений обеспечивают виброчастотные датчики абсолютного давления (ВЧД), датчики отличаются вибростойкостью и надежностью. Принцип действия и конструктивная схема ВЧД показана на Рис.3.1. Исследована партия термостатированных виброчастотных датчиков ДВБЧ-У (ООО «Аэроприбор-Восход»). Исследования показали: относительная погрешность измерения давления постоянная в широком диапазоне от 0,001 МПа до 0,5 МПа и не превышает $\pm 0,03\%$ (Рис.3.2).



- 1 – вибрирующий цилиндрический элемент;
- 2 – катушка, возбуждающая колебания;
- 3 – катушка приемная;
- 4 – усилитель-ограничитель;
- 5 – вакуумированная полость, давление в которой служит в качестве опорного

Рис.3.1. Конструктивная схема виброчастотного датчика давления (ВЧД)

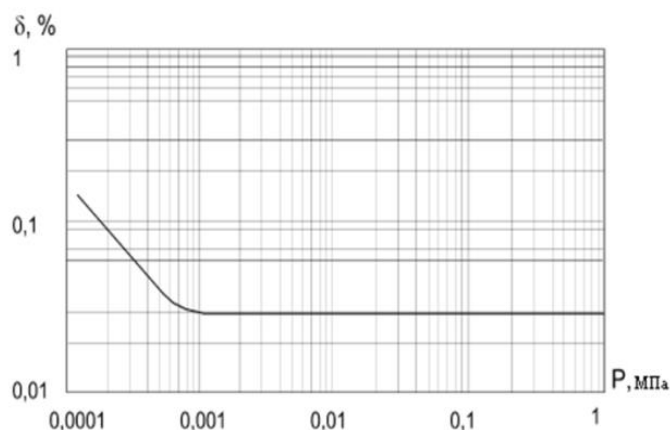


Рис.3.2. Относительная погрешность измерений давлений, полученная по результатам метрологических исследований виброчастотных датчиков ДВБЧ-У

Измерительный преобразователь сигналов датчиков давления с частотным выходом. Разработан измеритель частоты, построенный по принципу сравнения измеряемой частоты f_x и образцовой – f_0 . Время измерения t_x , период измерения частоты T_x и погрешность измерения δ_{Tx} определяются соотношениями: $t_x = n_x T_x$; $T_x = n_0 T_0 / n_x$; $\delta_{Tx} = \pm(|\delta_f| + T_0 / T_x n_x)$, где n_x – число импульсов измеряемой частоты, n_0 – число импульсов образцовой частоты, $|\delta_f|$ – погрешность генератора образцовой частоты (Рис.3.3). Уравнения измерения показывают возмож-

ность оптимизации измерителя частоты (FDC) по точности и быстродействию, путем программирования числа импульсов измеряемой частоты n_x .

Предложен и реализован двухтактный следящий алгоритм измерения частотных сигналов ВЧД для уменьшения аддитивной погрешности дискретизации, позволивший измерять частоту с заданной постоянной относительной погрешностью по шкале δ_{Tx} (0,001%) при постоянном времени измерения t_x (Рис.3.4). Основные характеристики измерителя – модуля FDC8 приведены в таблице 7.1.

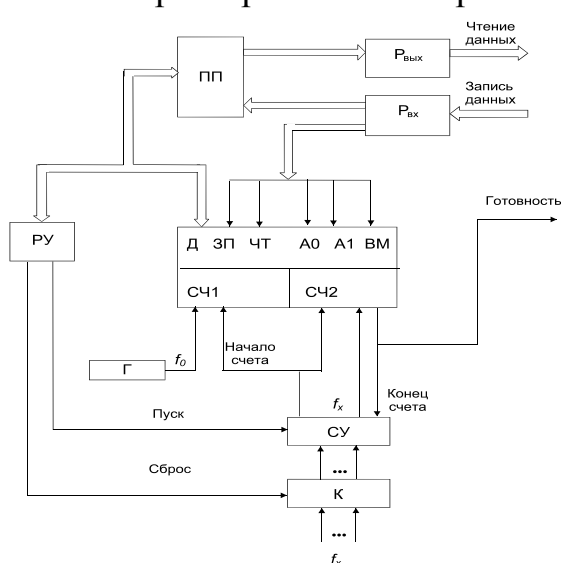


Рис.3.3. Структурно-функциональная схема программируемого измерителя частоты

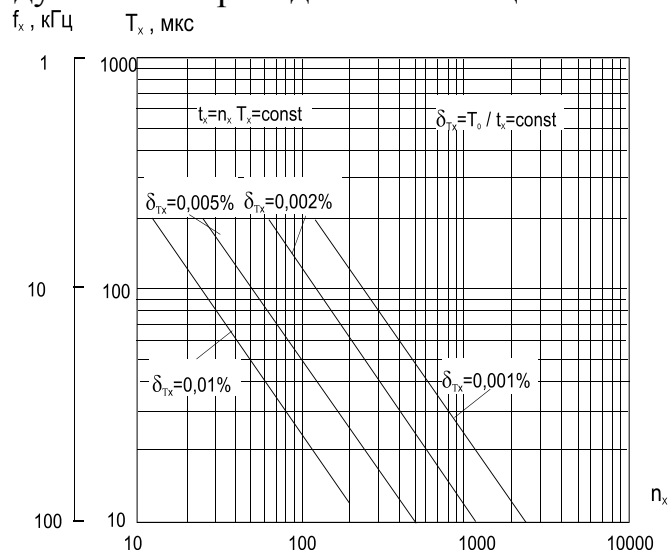


Рис.3.4. Постоянная погрешность измерения периода δ_{Tx} и время измерения t_x в диапазоне измеряемых частот

Впервые получены результаты измерения параметров потока с ВЧД (типа ДДГ-1-4) в сверхзвуковой АДТ Т-109. Установлено: относительная погрешность измерения P_0 и P в зависимости от числа M постоянна в диапазоне 0,3...1,9 M и не превысила $\pm 0,03\%$ и $\pm 0,05\%$ соответственно (Рис.3.5); абсолютная погрешность измерения числа M в диапазоне 0,6...1,6 M не превысила $\pm 0,001$ ед. M ; время измерения числа M не превысило 0,1 с.

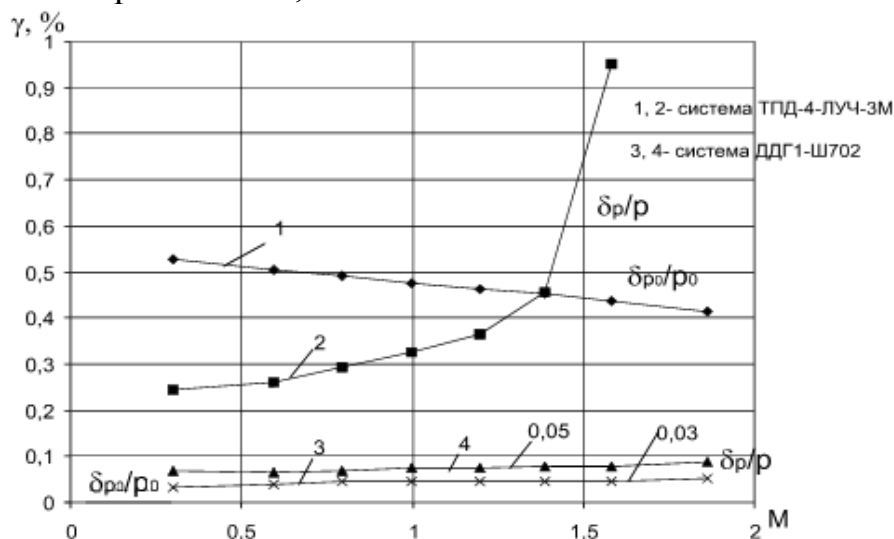


Рис.3.5. Относительные погрешности измерения полного давления P_0 и статического давления P в зависимости от чисел M в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-109

Исследования в АДТ Т-109 послужили основой для разработки и создания прецизионных систем измерения параметров потока с ВЧД (ДВБЧ-У и БИД-2) для трансзвуковых АДТ Т-106 и Т-128 и на их основе цифровых систем автоматического управления числом Маха (САУ М).

Основные характеристики системы измерения параметров потока с термостатированными датчиками ДВБЧ-У и измерителем частоты с двухтактным следящим алгоритмом: диапазон измеряемых давлений – $1000 \text{ Па} \dots 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, абсолютная погрешность измерения давления – $\pm 5 \text{ Па} \dots \pm 10 \text{ Па}$, относительная погрешность в диапазоне $2700 \text{ Па} \dots 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – $\leq 0,05\%$, погрешность определения числа М не превышает $\pm 0,001 \text{ ед. М} \dots \pm 0,002 \text{ ед. М}$, время одновременного измерения давления – $\leq 0,03 \text{ с}$, время определения числа М – $\leq 0,05 \text{ с}$. Для обеспечения повышенной точности измерения параметров воздушного потока в АДТ Т-128 разработана многоканальная измерительная система на базе двухдиапазонных блоков ВЧД БИД-2 с алгоритмической компенсацией температурной погрешности и прецизионными измерителями частоты. Приведенная к диапазонам погрешность измерения давлений ($P_0 = 400 \text{ кПа}$, $P = 135 \text{ кПа}$) – $\pm 0,015\%$.

В процессе испытаний моделей ЛА в АДТ и на испытательных стендах измеряются угловые и линейные перемещения моделей и различных механизмов. Требуемая точность измерения углового положения модели – $\pm (0,005^\circ \dots 0,01^\circ)$.

Измерительный преобразователь углового положения модели на основе двухосевых микромеханических акселерометров ADXL203. Предложен структурный схемо-технический метод повышения точности измерителя углов.

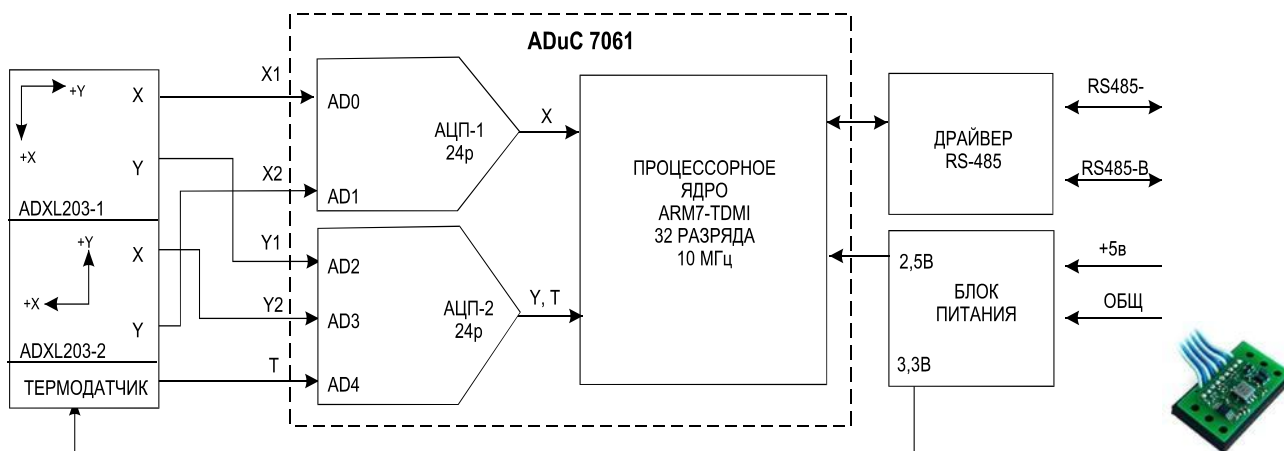


Рис.3.6. Структурно-функциональная схема датчика углового положения 2ADXL203/ADuC с цифровым выходом на основе микромеханических акселерометров и микроконвертера ADuC 7061

Высокая точность измерения обеспечивается за счет: суммирования сигналов двух двухосевых акселерометров по осям чувствительности, компенсации начальных сигналов акселерометров, чувствительных к температуре, согласования выходных импедансов акселерометров с входами дифференциальных усилителей разности сигналов и алгоритмической компенсации температурной погрешности. В измерителе два акселерометра объединены с микроконвертером (ADuC), включающим прецизионные 24-разрядные АЦП и микропроцессор в одном чипе (Рис.3.6).

Исследования измерителя углов 2ADXL203/ADuC показали: диапазон измерения $\pm 20^\circ$, абсолютная погрешность $\leq 20''$, напряжение питания – 5 В, интерфейс RS485, программируемый фильтр нижних частот, габариты – 30×19×5 мм, вес – 12 г. В диапазоне температур от 20° С до 50° С погрешность не превышает 40''. Частотный диапазон датчиков угла перестраивается аппаратно (RC – фильтр) и программно (цифровой фильтр) в диапазоне 0,5 Гц ... 500 Гц.

Габариты и вес позволяют размещать измеритель в малоразмерных моделях и на поверхности элементов конструкции ЛА.

Измерительный преобразователь сигналов фотоэлектронных датчиков углового положения механизмов ENC (ENCODER). Разработан на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Преобразует последовательность импульсов прямоугольной формы датчиков типа ЛИР (СКБ ИС), сдвинутых по фазе на 90° относительно друг друга. В ПЛИС созданы реверсивный счетчик, таймер, буферный и адресный регистры. Путем логического преобразования сигналов датчика образуется слово, которое несет информацию о величине углового положения механизма. Основные характеристики модуля ENC8 приведены в таблице 7.1. Используется для измерения перемещений механизмов установки модели ЛА, координатников, экранов, имитирующих «землю».

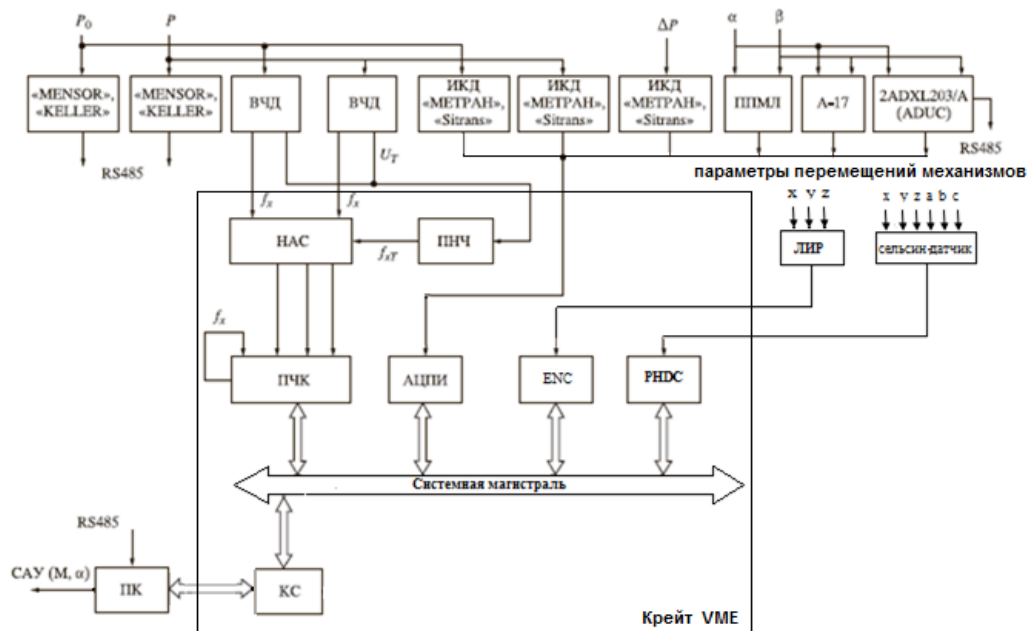
Измерительный преобразователь сигналов сельсин-датчиков – фазометр PHDC. Разработан на основе ПЛИС. Вырабатывает три синусоидальных напряжения питания статорных обмоток датчика, сдвинутых на 120°. Формирование напряжений осуществляется с помощью ПЗУ и ЦАП под управлением ПЛИС. В моменты нулевых переходов синусоидальных напряжений на роторных обмотках датчика формируются импульсы, поступающие в ПЛИС. В результате обработки сигналов логической схемой, сформированной в ПЛИС, определяется фазовый сдвиг напряжений, пропорциональный углу поворота ротора. Основные характеристики модуля PHDC12 приведены в таблице 7.1. Используется для измерения перемещений рейторов электромеханических аэродинамических весов, координатников, экранов, имитирующих «землю».

Магистрально-модульная система измерения параметров воздушного потока, положения моделей и механизмов. Разработана в международном стандарте VME. Обеспечивает измерения сигналов преобразователей различных типов (Рис.3.7), обладает многофункциональностью, высокой точностью измерительных каналов, многоканальностью, унификацией оборудования. Показано применение ИИС в составе системы автоматического регулирования числа Маха (САУ М) с точностью поддержания 0,001...0,002 ед. М.

Применение измерительных систем.

Системы измерения параметров потока с вибросистотными датчиками давления (ДДГ1-4, ДВБЧ-У, БИД-2) исследовались в АДТ Т-109 и Т-03 ЦАГИ и применяются в качестве штатных АДТ Т-128 и Т-106.

Системы измерения угловых и линейных перемещений моделей и механизмов с датчиками ADXL203 на основе акселерометров, фотоэлектронных датчиков типа ЛИР и сельсин-датчиками применяются в АДТ Т-101, Т-5 ЦАГИ, АДТ ОАО «ГосМКБ «Радуга», АО «Корпорация «Комета».



ППМЛ – многооборотные потенциометры; A17, ИУА2 – электромеханические акселерометры; 2ADXL203 – двухосевые микромеханические акселерометры; фотоэлектронный датчик – ЛИР; сальсин-датчик – СД.

НАС – нормализатор амплитуды; ПЧК – преобразователь частоты в код; ПНЧ – преобразователь напряжения в частоту; АЦПИ – интегрирующий АЦП; ENC – ENCODER; PHDC – фазометр; КС – контроллер связи; ПК – персональный компьютер; f_x , f_{xT} , f_k – измеряемая частота; U_T – напряжение, пропорциональное температуре.

Рис.3.7. Магистрально-модульная система измерения параметров потока, положения модели и механизмов в аэродинамических трубах

ГЛАВА 4. Исследование распределения давления в аэродинамических трубах на основе многоканальных измерительных систем

В четвертой главе представлены результаты исследований по разработке и применению методов и средств для измерения распределения давления в АДТ дренажным методом на основе многоканальных измерительных систем.

Нормально к поверхности модели сверлятся отверстия, которые дренажными трубками, проложенными внутри модели, и манометрической трассой герметично соединяются с многоканальными преобразователями – модулями давления ММД.

Сформулированы основные требования к измерительной системе: диапазон измеряемых давлений – $0,1 \cdot 10^5$ Па... $7 \cdot 10^5$ Па; количество каналов – 1000; максимальное приближение ММД к дренажным отверстиям, предельная погрешность измерения перепадов давления (относительно опорного) – $\pm 0,15 \div \pm 0,2\%$; максимально возможное быстродействие сбора данных.

Многоканальные модули давления ММД

Модуль ММД24 первого поколения (разработан под руководством Г.Д. Ташкинова) (Рис.4.1) содержит: два блока чувствительных элементов давления ЧЭД на 12 датчиков каждый, встроенный электронный коммутатор датчиков КД, фольговые нагревательные элементы и два терморезистора. По сигналам одного из них регулируется температура модуля, другой служит для измерения температуры. Датчики измеряют перепады давлений ($P_1 \dots P_{24}$) и опорного ($P_{оп}$) давления. Нагрев (до 70°C) и поддержание температуры модуля осуществляется внешней аппаратурой нагрева и регулирования температуры АК16.

Для испытаний малоразмерных моделей, в том числе совмещенных с весовыми, совместно с ООО «Драйвер», разработан цифровой малогабаритный термостабилизированный модуль ММД32 нового поколения. Модуль (Рис.4.2) содер-

жит: блок ЧЭД (БПД «Inser-32») на 32 датчика, мультиплексор (М), измерительный усилитель с дифференциальным выходом (ИУ), 16-разрядный АЦП, схему управления (СУ), высокостабильный источник опорного напряжения (ИОН) для питания ЧЭД, источник питания модуля (ИП), термостабилизатор, включающий интегральный термодатчик (ВК), теплопроводящую рампу, состоящую из распределенных по поверхности корпуса ММД синхронизированных элементов нагревателя ($U_1 \dots U_n$), П-регулятор (К) температуры, ИОН, индикатор отклонения температуры (ИТ) и плату предварительной настройки (ППН) модуля, микропроцессор (МП), драйвер интерфейса RS485. Модуль имеет и аналоговый выход ($\pm U_{OUT}$) для использования с внешней системой сбора данных. В результате исследований показано: многоканальный модуль давления ММД32 с встроенным стабилизатором температуры, аналоговым и цифровым выходами обеспечивают высокую точность измерения – $\pm(0,15 \div 0,25)\%$, многоканальность и непревзойденные массо-габаритные показатели ($0,2 \text{ см}^3/\text{кан}$), позволяющие встраивать модули в мало-размерные модели ЛА.

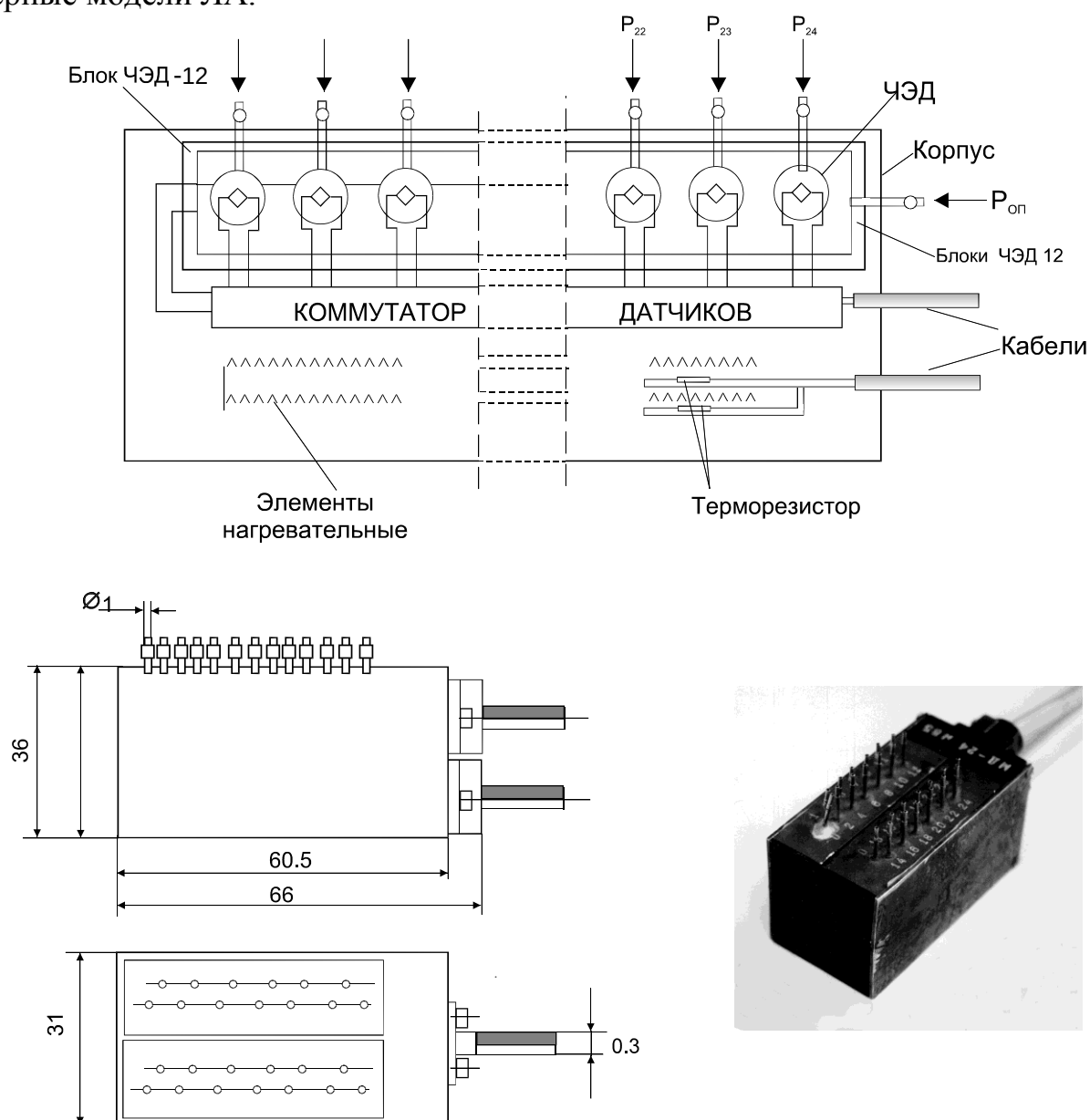


Рис.4.1. Конструктивная схема термостабилизированного многоточечного модуля давления ММД24

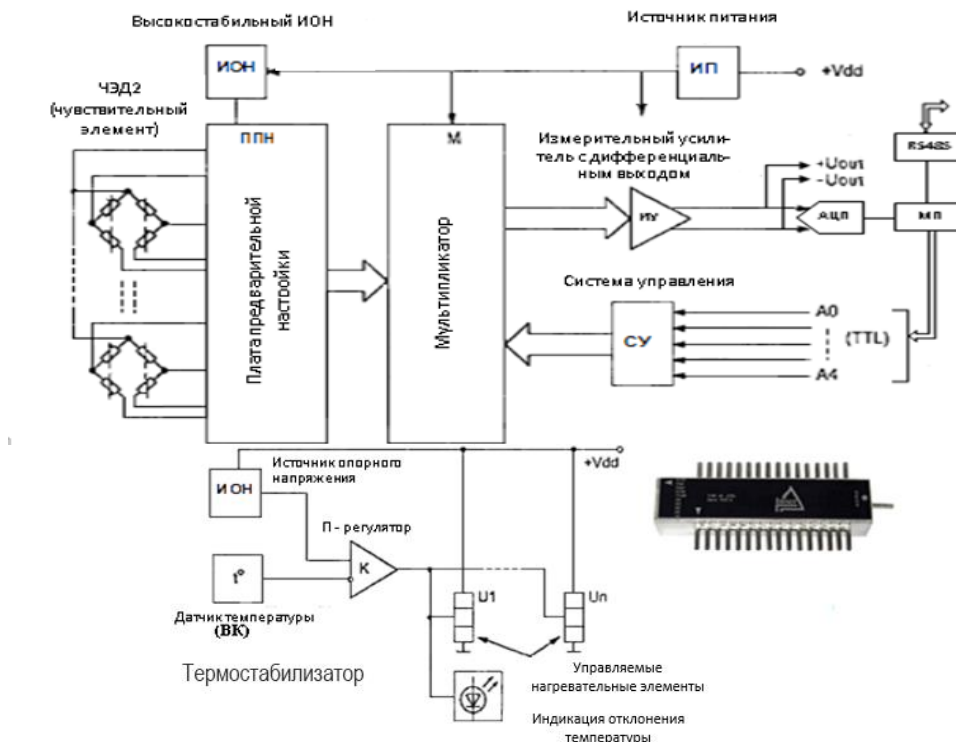
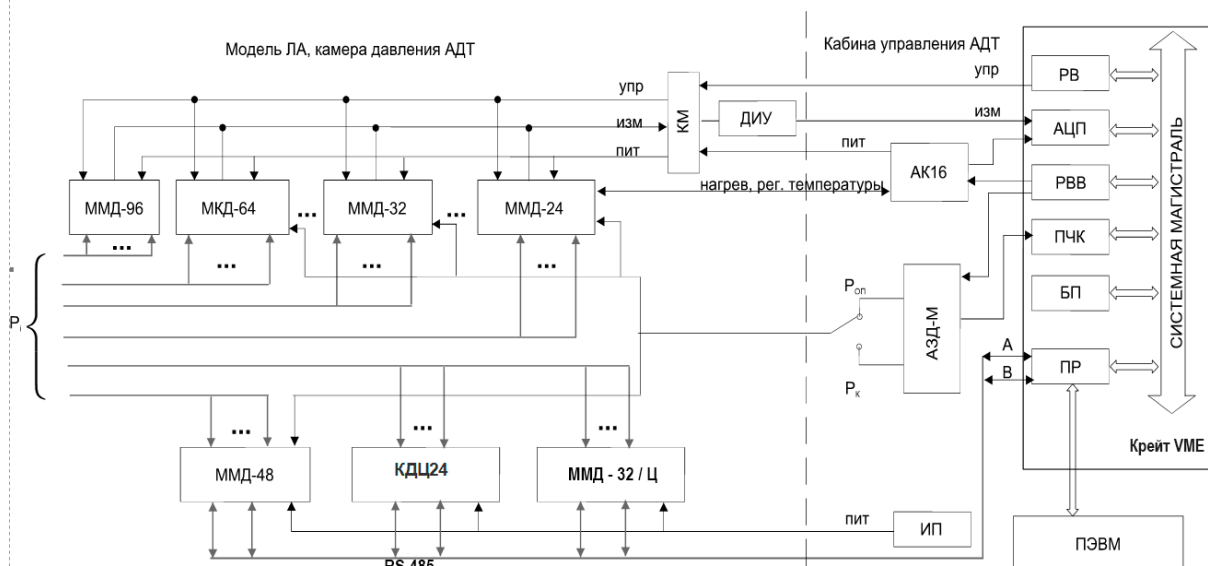


Рис.4.2. Структурная схема и внешний вид миниатюрного, термостабилизированного модуля давления ММД32

Магистрально-модульная унифицированная измерительная система с многоканальными модулями давления для исследования распределения давления. На основе анализа различных схем и конструкций ММД, применяемых в АДТ (Таблица 4.1, Рисунок 4.3), рассредоточенности ММД по объекту исследований, разработана многоканальная ИИС в международном стандарте VME.



КМ – коммутатор модулей; ДИУ – дифференциальный измерительный усилитель; АК16 – аппаратура кондиционирования и термостабилизации ММД; АЗД-М – автоматизированный датчик опорного ($P_{оп}$) и контрольного (P_k) давлений;

РВ, RBV – регистры управления КМ, АК16, АЗД-М; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПЧК – преобразователь частоты в код; ПР – процессорный модуль; ИП, БП – источники питания.

Рис.4.3. Магистрально-модульная унифицированная система для исследования распределения давления с многоканальными модулями давления

Таблица 4.1 – характеристики ММД (разработка ФГУП «ЦАГИ»)

Характеристики	ММД-24 (термостабилизированные)	ММД-32 (термостабилизированные)	МДК-64	ММД-48	КДЦ-24
Число каналов измерения	24	32	64	48	24
Чувствительный элемент давления	ЧЭД-12	БПД «Inser-32»	ИПД-9	БПД «Inser-32»	MEAS (USA)
Исполнение	дифференциальный	дифференциальный	дифференциальный	дифференциальный	Абсолютный или дифференциальный
Диапазон измерений, кПа	± 10 ; ± 40 ; ± 100	± 5 ; ± 10 ; ± 40 ; ± 100	± 10 ; ± 40 ; ± 100	± 40 ; ± 100	1...700 А; ± 7 ; ± 35 ; -90...105; -90...+210
Напряжение питания, В	5	8...16	5; ± 15	± 15	$\pm 8,5$
Выходной сигнал, В	$\pm 0,1$	± 2 RS-485	± 10	RS-485 или Ethernet	RS-485
Пределы допускаемой приведенной погрешности, % от ВПИ (кПа)	$\pm 0,15$	$\pm 0,25$ (± 5 ; ± 10); $\pm 0,2$ (± 40 ; ± 100)	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$
Объем/канальность, см ³ /кан	2,7	0,2	0,39	3,4	2,4

В системе применены: двухступенчатая коммутация сигналов датчиков давления с помощью коммутаторов, размещенных в ММД, и коммутаторов сигналов модулей КМ; полностью дифференциальный измерительный усилитель ДИУ (размещаемые в непосредственной близости от ММД), 16-канальная аппаратура АК16 кондиционирования и термостабилизации модулей (ММД24), автоматизированный датчик давления АЗД-М для формирования опорного ($P_{оп}$) и контрольного ($P_{к}$) давлений, аппаратура управления и сбора информации в стандарте VME.

Разработана схема подключения и алгоритм управления модулями, обеспечивающие высокую точность, быстродействие и помехозащищенность системы. ММД24 с помощью КМ подключаются к магистралям: управления, измерения (по симметричной трехпроводной схеме) и магистрали питания датчиков (по 4-х проводной схеме). В КМ разработана и реализована схема контроля питания модулей и «нуля» измерительного канала аппаратуры. По алгоритму управления одновременно выбираются одноименные каналы в группе модулей и последовательно осуществляется их опрос. Применение алгоритма существенно сокращает время измерения, по сравнению с поочередным опросом каналов каждого модуля: $T_{изм} = 24t_d / N$, где t_d – время опроса датчика, N – количество модулей в группе, $T_{изм}$ – время измерения.

Разработаны элементы ИИС.

Дифференциальный измерительный усилитель ДИУ с дифференциальными входом и выходом, что способствует повышению помехоустойчивости и точности измерений.

Аппаратура питания и термостабилизации модулей АК16, осуществляющая нагрев модулей до 70°C и поддержание температуры с точностью $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Для защиты модуля от перегрева при обрыве линий связи датчика с регулятором в схеме автоматически формируется напряжение, отключающее нагрев модуля. Для исключения влияния помехи на канал измерения давления, возникающей от преры-

вания тока нагревателя в силовой цепи, работа регулятора блокируется на время опроса датчиков сигналом от аппаратуры управления.

Аппаратура сбора, аналого-цифрового преобразования сигналов и управления ММД разработана в виде одноплатных модулей в стандарте VME и модуля мезонинной архитектуры (ADC16). Определены основные характеристики модуля ADC16: количество каналов – 3 дифференциальных (1, 2, 3), 13 недифференциальных (4...16); число разрядов АЦП – 17 (со знаком); время преобразования – 40 мкс; регистр управления коммутаторами – 12 разрядов; основная приведенная погрешность измерения – в диапазоне ± 100 мВ (входы 1, 2, 3) – 0,05%, в диапазоне ± 10 В (входы 4...16) – 0,02% (Таблице 7.1).

Определены основные характеристики измерительной системы с ММД24: число точек измерения давления – 1000; диапазоны измерения давления – $\pm 0,2 \cdot 10^5$ Па, $\pm 1 \cdot 10^5$ Па, $\pm 4 \cdot 10^5$ Па; быстродействие – 5000 каналов в секунду; среднеквадратическая погрешность измерения давления по результатам многократных градуировок (при аппроксимации функций преобразования полиномом 3 степени) – ≤ 5 мм в.ст.; абсолютная погрешность измерения контрольных давлений (± 7000 мм в.ст.) – ≤ 10 мм в.ст.; основная приведенная погрешность измерения давлений – $\pm 0,2\%$.

Микропроцессорная измерительно-регистрирующая аппаратура (МИРА) сигналов модулей ММД32, встраиваемая в модель. Разработана с целью повышения точности и помехоустойчивости измерений за счет существенного сокращения длины измерительных трасс (Рис.4.4.). Получены основные характеристики системы: количество подключаемых модулей ММД32 – до 16; общее количество каналов давления – до 512; напряжение питания, В – 9–18; максимальная частота опроса всех каналов, Гц – 100; среднеквадратическая погрешность измерения сигналов ММД – $\leq 0,1$ мВ (0,01%); габариты аппаратуры – 130×75×40 мм. Система применяется в околзвучковой АДТ Т-106 со штатным ИВК М2М в стандарте VME.

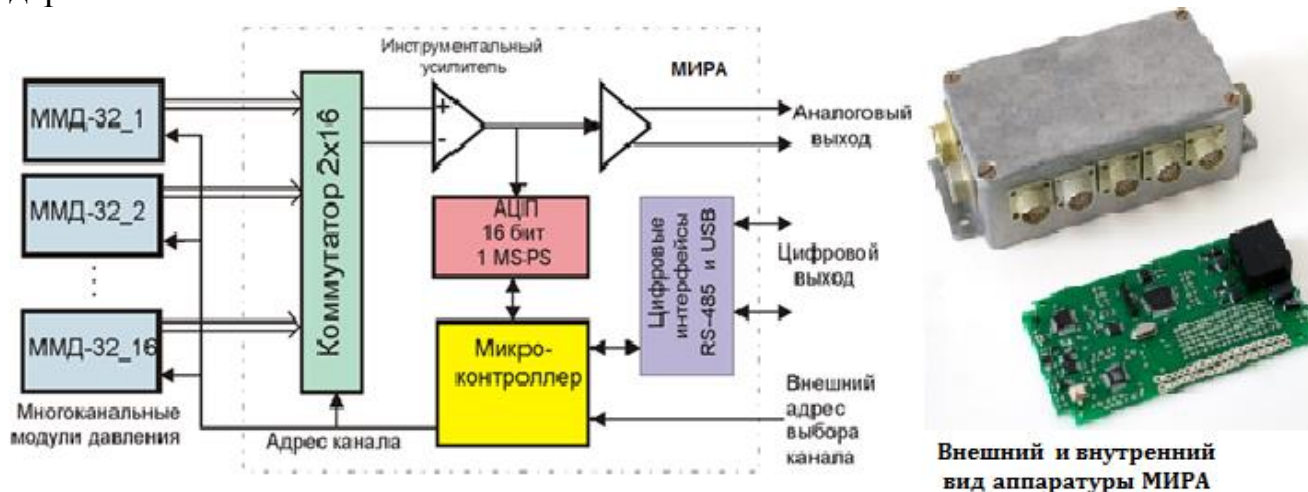


Рис.4.4. Структурная схема аппаратуры МИРА

Автоматизированные средства метрологического обеспечения и контроля многоканальных систем измерения давления. Разработаны автоматизированный задатчик калиброванных давлений АЗД-М для градуировок ММД, задания опорного ($P_{оп}$) и контрольного давления (P_k) и средства формирования контроль-

ных электрических сигналов напряжения питания датчиков и смещения «нуля» измерительного канала.

Техника и методика подготовки и проведения измерений при исследовании распределения давления. Разработана совокупность требований при подготовке и проведении эксперимента, обеспечивающих достоверность и метрологическую надежность результатов исследований. Показано преимущество применения ИИС с ММД по сравнению с системами предыдущего поколения с коммутаторами пневмотрасс (КП), позволившие повысить точность измерений ($\sim$ в 2 раза), быстродействие на порядок, а также эксплуатационную надежность и экономичность системы.

Применение систем измерения распределения давления.

Структурно-функциональное построение, метрологические и динамические характеристики измерительной системы с ММД24 позволили реализовать в трансзвуковой АДТ Т-128 экономичную методику эксперимента при непрерывном изменении угла атаки модели α . Установлено, что расхождения результатов измерения для дискретной и непрерывной методики эксперимента при исследовании полумодели самолета RRJ находятся в пределах инструментальной погрешности ММД24 – $\pm(0,15-0,2)\%$. Поточное время сокращается в $1,5\div 2$ раза.

Система измерения распределения давления с модулями ММД 32/А с аналоговым выходом применяется в АДТ Т-106 ЦАГИ и в АДТ ФГУП «СибНИА» со штатным комплексом ИВК М2М.

Установлено, что измерительная система с модулями ММД32/Ц с цифровым выходом (RS485) в сверхзвуковой АДТ Т-112 при исследовании влияния плазменных и искровых актуаторов на формирование скачков уплотнения на модели сверхкритического профиля крыла при трансзвуковых скоростях потока надежно функционировала в условиях сильных электромагнитных помех, вызванных работой актуаторов.

ГЛАВА 5. Определение аэродинамических нагрузок на основе весоизмерительных тензометрических систем

В пятой главе представлены результаты исследований по разработке и применению методов и средств определения аэродинамических нагрузок на моделях на основе весоизмерительных тензометрических систем.

Аэродинамические нагрузки X , Y , Z и моменты M_x , M_y , M_z измеряются при испытаниях моделей ЛА на многокомпонентных тензометрических весах (ТВ).

Приведенная к диапазонам измерения сил и моментов погрешность ТВ оценивается величинами в диапазоне $\pm(0,1\div 0,02)\%$. Погрешность измерения электрических сигналов ТВ не должна превышать $\pm 0,01\%$. Основные задачи измерений: определение точных средних значений аэродинамических нагрузок, регистрация и контроль динамических составляющих, оптимизация алгоритма измерения и обработки данных.

С учетом задач и особенностей весового эксперимента предложены структурно-функциональные схемы и разработаны новые цифровые тензометрические усилители-нормализаторы сигналов тензовесов и на их основе прецизионные весоизмерительные системы.

Цифровой тензометрический усилитель-нормализатор на основе метода преобразования напряжения в частоту (ПНЧ) и частоты в код (ПЧК). Это усредняющее устройство циклического действия с весовым интегрированием. Устройство – модуль VFC содержит (Рис.5.1) дифференциальный измерительный усилитель (ДИУ) с программируемым выбором коэффициента усиления, преобразователи напряжения в частоту (ПНЧ) и частоты в код (ПЧК), источники питания датчиков напряжением (ИН) и током (ГТ), формирователь калибровочного сигнала (ФКС), коммутатор выбора режима работы (КР), схему смещения шкалы (СШ), схему формирования аддитивного теста и контроля линий связи (АТК) с тензорезисторным мостовым датчиком (ТД), схему гальванического разделения (ГР) аналоговой части от цифровой и системной магистрали, дешифратор команд систем- ной магистрали (ДШ).

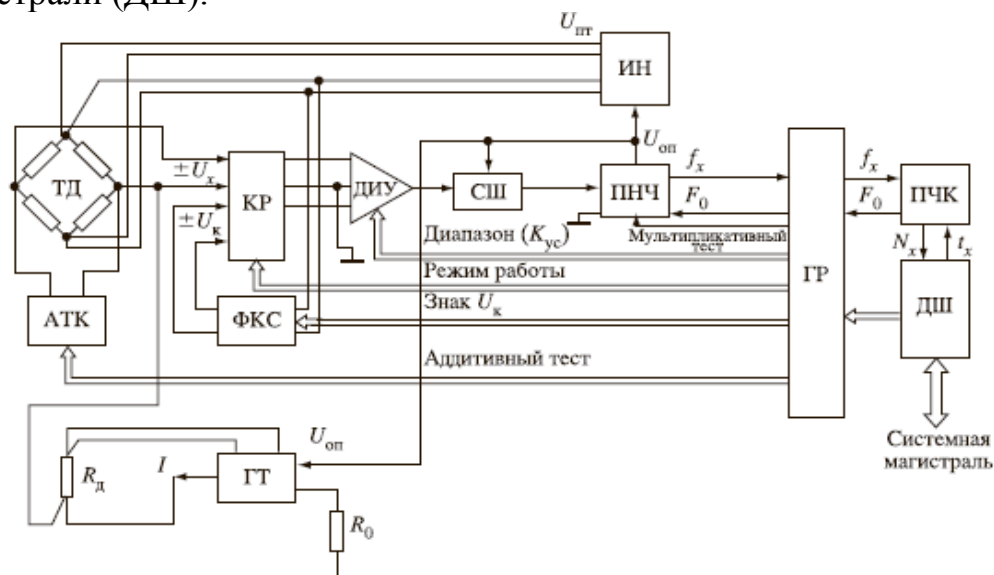


Рисунок 5.1 – Структурно-функциональная схема тензометрического измерительного преобразователя VFC сигналов датчиков

Цифровой эквивалент N_x измеряемой величины ε_1 (относительное приращение сопротивлений тензомоста), полученный после преобразования частоты f_x за время интегрирования, равен $N_x = \int_0^T f_x dt = K \varepsilon_r \cdot T$, где K – коэффициент пропорциональности.

Получены основные характеристики модуля VFC: диапазоны измеряемых напряжений – $\pm 10, \pm 25, \pm 50$ мВ, $\pm 0,5, \pm 5$ В; коэффициенты усиления входных напряжений – 500, 200, 100, 10, 1; питание тензорезисторных мостовых датчиков по четырехпроводной схеме напряжением ($U_{ит}$) – $\pm 6, \pm 9, \pm 12$ В, сформированным от источника опорного напряжения ($U_{оп}$) с изменяемой полярностью; время измерения (интегрирования) – 0,01 с...4 с; основная приведенная погрешность преобразователя в диапазоне входного сигнала – ± 10 мВ (2 мВ/В)... ± 50 мВ (10 мВ/В) не превышает $\pm 0,05\%$ и уменьшается до $\pm 0,01\%$ с увеличением времени интегрирования, как показано на графике (Рис. 5.2).

Структурное и алгоритмическое построение модуля VFC показали его преимущества: широкий динамический диапазон и высокую разрешающую способность, позволившие, в частности, отказаться от устройства балансировки тензомоста датчика, вносящего дополнительные погрешности; отсутствие погрешности

из-за нестабильности напряжения питания датчика за счет его формирования от источника опорного напряжения преобразователя; снижение погрешности от дрейфа нуля усилителя, влияния термо-ЭДС и других аддитивных погрешностей за счет изменения полярности напряжения питания датчика в процессе измерений; уменьшение погрешности от временной нестабильности коэффициента преобразования устройства за счет калибровки непосредственно перед измерениями; адаптация к требуемым точности и быстродействию за счет программного выбора времени интегрирования (измерения). Структурное и алгоритмическое построение модуля VFC послужили основой дальнейшего совершенствования цифровых тензометрических усилителей-нормализаторов.

С целью повышения точности измерений и расширения частотного диапазона разработаны цифровые тензометрические усилители-нормализаторы на основе сигма-дельта преобразователей.

Цифровой тензометрический усилитель-нормализатор – модуль ADC6.

Принципы построения (Рис.5.3): основа – усредняющий Σ/Δ преобразователь AD7710 с программируемым цифровым фильтром (параболическое спектральное окно); формирование питания и опорного напряжения преобразователя от общего эталонного источника (структурный метод уменьшения погрешности от нестабильности питания); изменение полярности питания ТМ (алгоритмический метод уменьшения погрешности от термо-ЭДС и смещения «нуля»); самокалибровка преобразователя; измерение средних и динамических нагрузок. Преобразователь AD7710 имеет два дифференциальных аналоговых входа с программируемыми коэффициентами ускорения от 1 до 128. Один вход (+AIN1, –AIN1) используется для измерения сигнала ТМ, другой (+AIN2, –AIN2) – для измерения напряжения питания ТМ (4-х проводная схема питания). Входной сигнал выбранного аналогового входа непрерывно модулируется (производится выборка) на скорости, определяемой частотой MCLK главного тактового генератора ТГ. Выборка сигналов преобразуется в последовательную цепочку импульсов, которые обрабатываются цифровым фильтром нижних частот (ФНЧ).

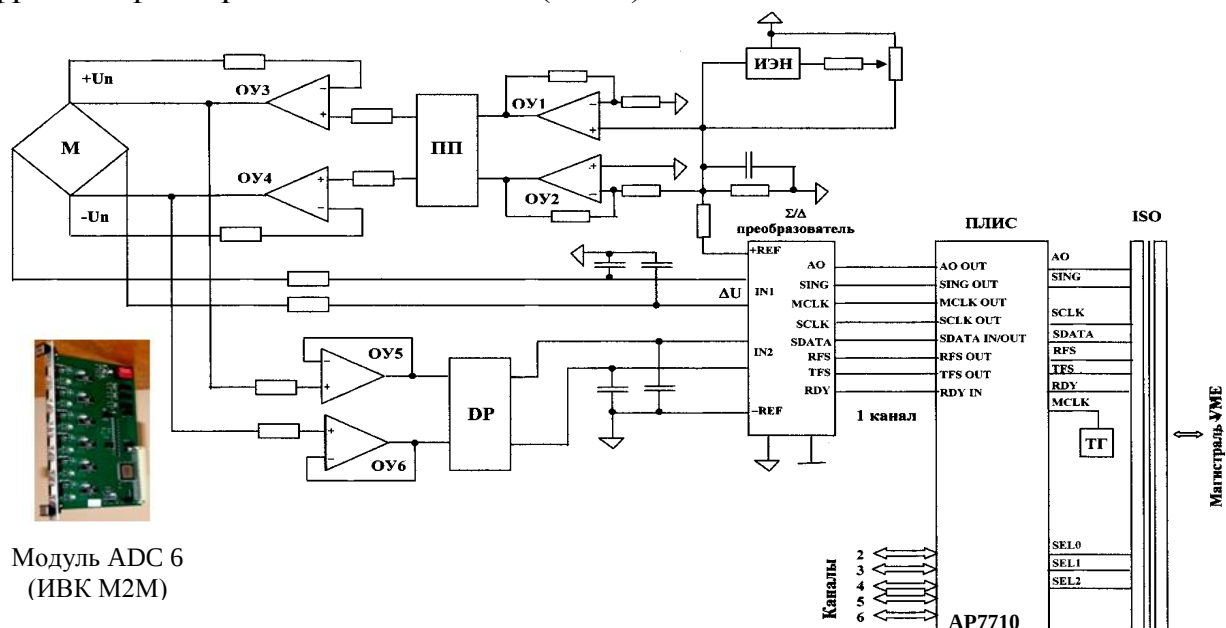


Рис.5.3. Структурно-функциональная схема интегрирующего тензометрического модуля ADC6

Спектральная характеристика ФНЧ описывается законом $(\sin x/x)^3$ – это параболическое спектральное окно, которое обеспечивает ослабление сигнала на частоте 50 и 60 Гц до 100 дБ (усреднитель с кусочно-полиномиальной функцией). Управление 6-ю каналами и обмен данными с компьютером осуществляется с помощью ПЛИС через устройство гальванического разделения ISO по командам от системной магистрали. Относительная погрешность измерительного канала зависит от частоты режекции ФНЧ (частоты отсчетов), как показано на графике (Рис.5.4).

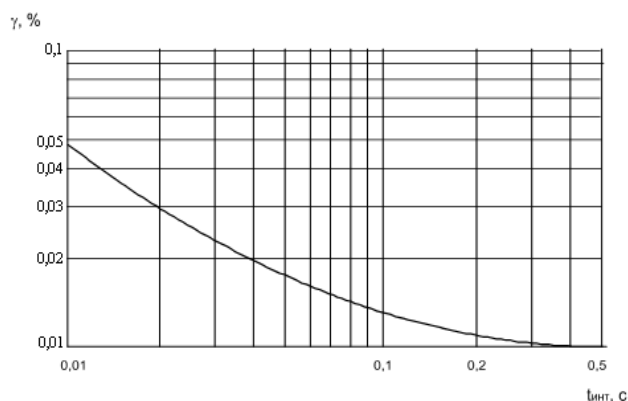


Рисунок 5.2 – Погрешность цифрового тензометрического усилителя-нормализатора VFC на основе преобразователя напряжения в частоту и частоты в код

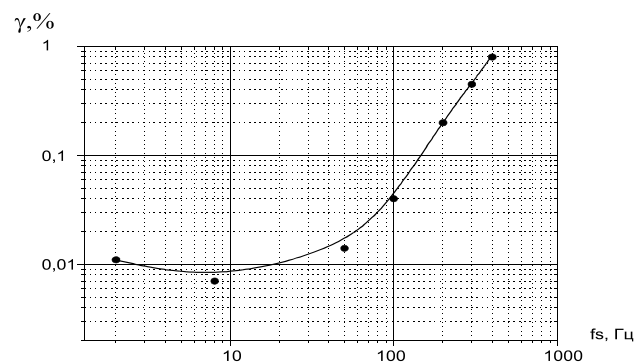
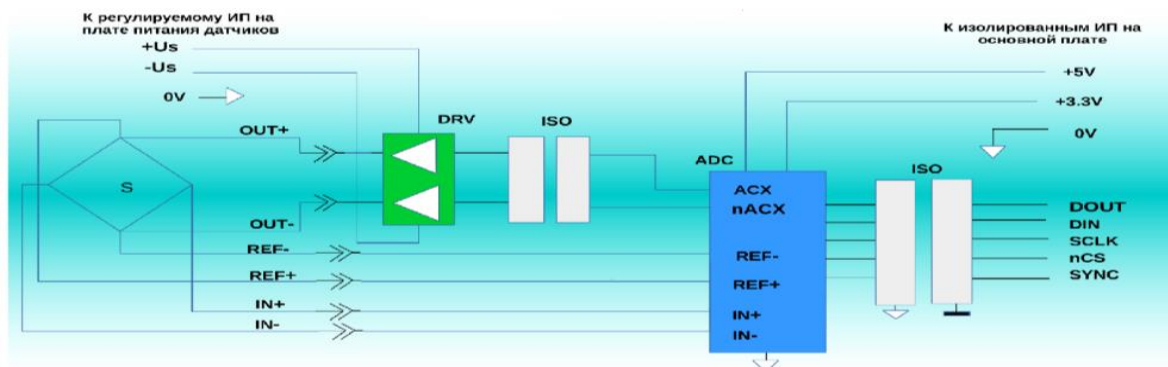


Рис.5.4. Зависимость относительной погрешности измерения γ от частоты отсчетов f_s преобразователя ADC6

Получены основные характеристики модуля ADC6: количество каналов – 6; диапазон измерения, В – $0... \pm 2,5$; питания датчиков, В – 5, 10; разрядность преобразователя, бит – 16, 24; частота отсчетов, эквивалентная частоте режекции ФНЧ, Гц – 2...1000; основная приведенная погрешность в диапазоне входного сигнала – $\pm 10 \text{ мВ}$ (2 мВ/В)... $\pm 20 \text{ мВ}$ (4 мВ/В) – $\pm 0,01... \pm 0,05\%$ в зависимости от частоты отсчетов в диапазоне от 2 Гц до 100 Гц; подавление синфазных помех на частоте 50 Гц – 100 дБ. Преобразователь разработан в стандарте VME (Таблица 7.1).

Цифровые тензометрические усилители-нормализаторы ADC7X95. Разработаны на основе сигма-дельта преобразователя AD7195. Преобразователь отличается очень низким уровнем шумов и возможностью выполнять возбуждение мостовых тензорезисторных датчиков знакопеременным напряжением, позволяющим повысить точность измерений за счет исключения влияния любых смещений тока при работе с мостовыми датчиками. На его основе разработаны шестиканальные модули: одноплатный (ADC7095) и мезонинной архитектуры (ADC7195). Управление измерительным каналом модуля (Рис.5.5) осуществляется последовательной передачей данных по линиям DOUT, DIN. Сигнал SYNC служит для синхронизации работы аналого-цифровых преобразователей модуля и приведения в исходное состояние цифрового ФНЧ $(\sin x/x)^4$ – спектральное окно Парзена. Сигналы ACX и nACX управляют переключением полярности напряжения питания датчика, последнее поступает на входы REF+, REF– опорного сигнала (рatiометрическая схема, повышающая точность измерения).



S – датчик сигнала; DRV – драйвер питания моста; ADC – аналого-цифровой преобразователь AD7195; ISO – изолирующий повторитель цифровых сигналов; ИП – источник питания.

Рис.5.5. Структурная схема измерительного канала модулей ADC7X95

Определены основные характеристики модулей ADC7X95: количество измерительных каналов – 6; диапазоны измерения – $\pm 3,125$; $\pm 6,25$; $\pm 12,5$; ± 25 ; ± 50 ; ± 400 мВ/В; разрядность – 24 бита; коэффициент усиления АЦП – 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128; номинальное напряжение питания датчиков – 5 В, 10 В; частота выборки АЦП: при возбуждении датчика постоянным напряжением – от 4,7 Гц до 4,7 кГц, при возбуждении датчика переменным напряжением – от 1,17 Гц до 1,2 кГц; подавление синфазных помех на частоте 50 ± 1 Гц при частоте выборки от 10 Гц до 50 Гц – 120 дБ. Как показано на графике (Рис.5.6), основная приведенная погрешность в диапазоне входного сигнала $\pm 15,625$ мВ (3,125 мВ/В)...125 мВ (25 мВ/В) при частоте выборки от 4,7 Гц до 100 Гц – $\leq \pm 0,0035\%$, до 1000 Гц – $\leq \pm 0,006\%$. Модули разработаны в стандарте PXI.

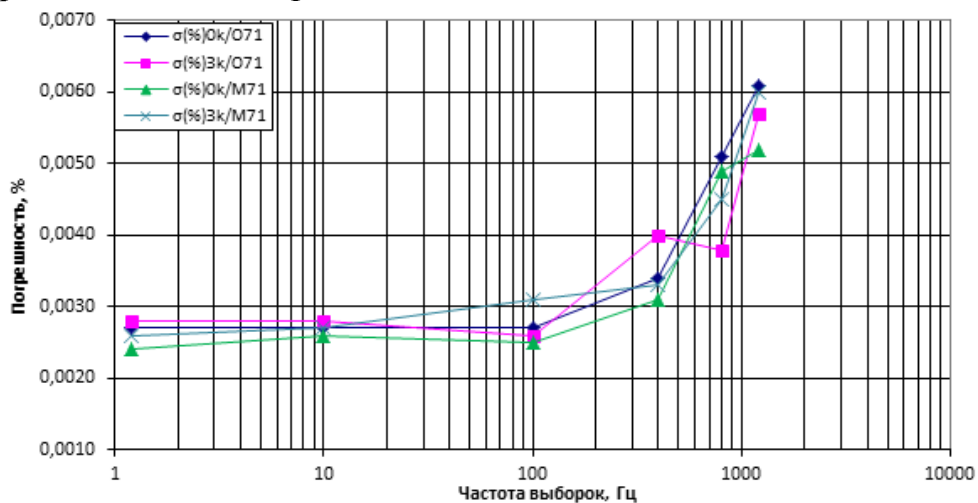


Рис.5.6. Зависимость погрешности измерения модулей ADC7095, ADC7195 от частоты выборки АЦП в диапазоне от 1,2 Гц до 1,2 кГц при питании датчика знакопеременным напряжением (± 5 В) и длине кабеля до тензокалибратора 60 м

Цифровой тензометрический прецизионный усилитель-нормализатор – модуль ADC7021 на несущей частоте. Разработан с целью прецизионных измерений малых приращений аэродинамических нагрузок, повышающих качество исследований по оптимизации компоновок ЛА, улучшения их аэродинамики и, как следствие, топливной эффективности.

Модулирование сигналов тензорезисторных датчиков синусоидальным напряжением несущей частоты позволяет уменьшить влияние различного рода шумов, поскольку информационный сигнал переносится в частотный диапазон,

где усиливается усилителем переменного тока. Далее сигналы проходят синхронное детектирование и низкочастотную фильтрацию для восстановления измеряемого сигнала.

В модуле ADC7021 мостовой измерительный датчик (ТМ) питается синусоидальным сигналом с частотой 225 Гц и напряжением 5 В или 10 В (Рис.5.7а, б). Напряжение питания датчика детектируется синхронным детектором и используется в качестве опорного напряжения сигма-дельта АЦП AD7190 с низким уровнем шумов (рatiометрическая схема измерения). Измеряемый сигнал через коммутатор поступает на вход предварительного усилителя с коэффициентом усиления 100. Режекторный фильтр 50 Гц препятствует перегрузке следующего усилителя с переменным коэффициентом усиления (2,5; 5; 10; 20) при высоком уровне помех. Усиленный сигнал поступает на вход синхронного детектора измеряемого сигнала с коэффициентом передачи 0,4 или 0,8. Этот коэффициент выбирается одинаковым для синхронных детекторов измеряемого и опорного сигналов. Полоса фильтра низких частот, совмещенного с синхронным детектором измеряемого сигнала, устанавливается в одно из трех значений (0,36; 3,6; 36 Гц). Полоса фильтра нижних частот синхронного детектора опорного напряжения – 0,36 Гц. Синхронное детектирование в измерительном канале и в канале опорного напряжения осуществляется переключением полярности напряжения по сигналам SIG_CARRIER и REF_CARRIER, которые представляют собой задержанный сигнал CARRIER. Последний формируется из синусоидального напряжения несущей частоты в прямоугольное с помощью компаратора К (Рис.5.7б). Регулирование задержки выполняется в ПЛИС и необходимо для компенсации реактивной составляющей сигнала (фазового сдвига) в цепи сигналов, вносящего погрешность в результат измерения. Временные сдвиги сигналов регулируются независимо.

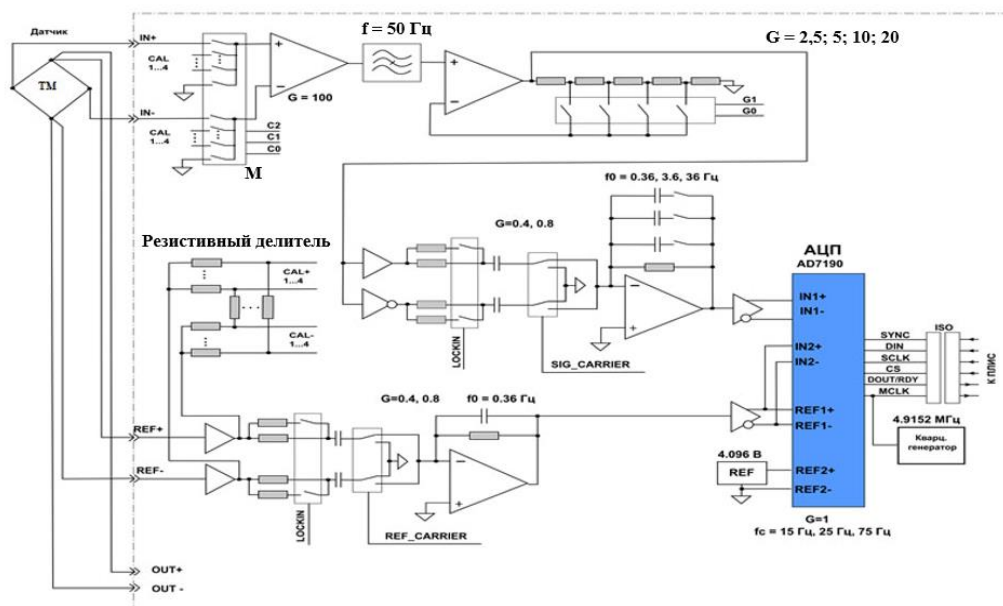


Рис. 5.7а. Схема измерительного канала модуля ADC7021

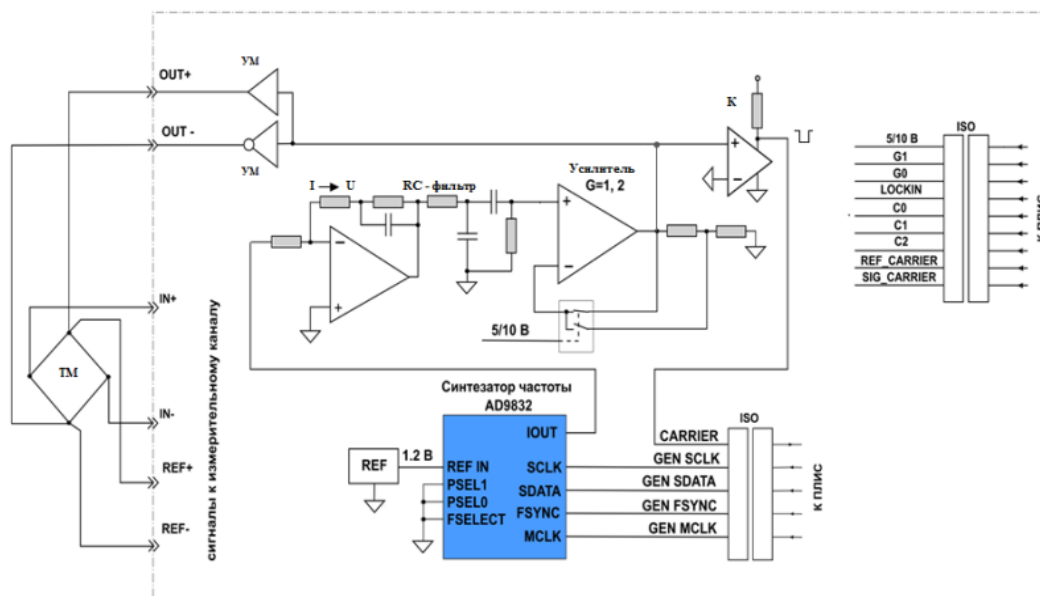


Рис.5.7б. Схема питания датчика модуля ADC7021

Входной мультиплексор позволяет выполнять калибровку нуля и калибровку полной шкалы для каждого диапазона измерения. При калибровке используется эталонный калибровочный делитель напряжения, формирующий сигналы, близкие к диапазонам измерения. Модуль разработан в стандарте PXI.

Определены основные характеристики модуля ADC7021: диапазоны измерения – $\pm 0,625$ мВ/В; $\pm 1,25$ мВ/В; $\pm 2,5$ мВ/В; ± 5 мВ/В; номинальное напряжение питания тензодатчика – 5 В; 10 В; частота возбуждения тензодатчика – 225 Гц; частота среза аналогового фильтра на уровне 3 дБ – 0,36 Гц; 3,6 Гц; 36 Гц; разрядность преобразования – 24 бита; частота режекции цифрового фильтра АЦП – от 4,7 Гц до 4,8 кГц; подавление синфазных помех на частоте 50 Гц – 100 дБ. Как показано на графике (Рис.5.8), приведенная к диапазонам входного сигнала погрешность измерения – $\leq \pm 0,0025\%$ при длине измерительного кабеля 70 м.

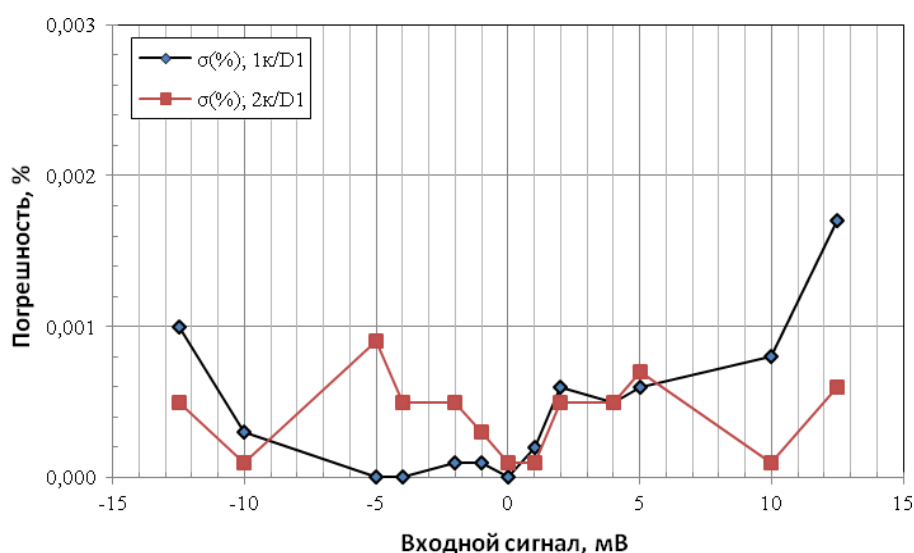


Рис. 5.8. Погрешность измерения в диапазоне входного сигнала $\pm 12,5$ мВ (2,5 мВ/В) при частоте среза аналогового фильтра – 0,36, частоте режекции цифрового фильтра АЦП – 75 Гц и длине кабеля – 70 м

Магистрально-модульная тензометрическая весоизмерительная система.

Разработана в международном стандарте VME. В приведенной конфигурации системы (Рис.5.9) сигналы тензовесов ТВ, датчиков углов положения модели ДП, датчиков давления МЕТРАН параметров потока одновременно измеряются группой тензометрических преобразователей ADC6. Сигналы виброчастотных преобразователей давления ВЧД параметров потока измеряются интегрирующими преобразователями частоты в код FDC8, сигналы термометров сопротивления ТС (измеряющих температуру потока – T_0) – преобразователями сопротивления в код RDC8, сигналы дополнительных преобразователей и датчиков измеряются многоканальным аналого-цифровым преобразователем ADC64 (Таблица 7.1). Сбор и обработка измерительной информации осуществляется процессорным модулем (ПР) и связанным с ним персональным компьютером (ПК).

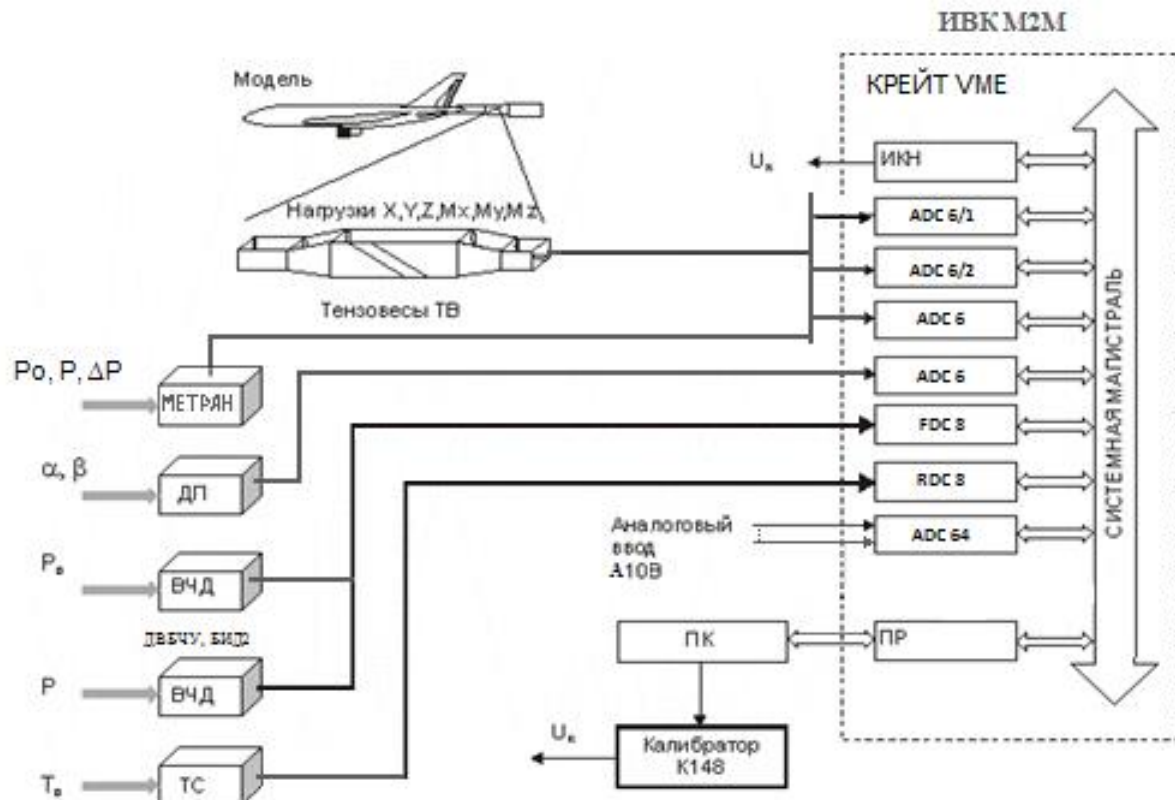


Рис.5.9. Структурно-функциональная схема весоизмерительной системы

Разработан способ контроля безопасности весовых испытаний моделей по статической и динамической нагрузкам, при котором используются два одновременно работающих модуля ADC6/1 и ADC6/2 с разными частотами режекции внутренних цифровых ФНЧ (частотами отсчетов), позволяющие измерять одновременно статические и динамические нагрузки. Для программной постфильтрации динамических нагрузок разработаны низкочастотные программные фильтры Дольфа-Чебышева с оптимальной помехоподавляющей весовой функцией, особенно эффективные при обработке низкочастотных сигналов. Компьютерная программа реализации фильтров Дольфа-Чебышева определяет: минимальное число отсчетов – N (весовых коэффициентов), частоту среза f_n , коэффициенты весовой функции – $a(n)$, АЧХ для любого значения f_n , результат фильтрации –

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot a(n); \text{ время измерения } T_{\text{изм}} = (N-1) \cdot T_d.$$

Для калибровки и поверки измерительных каналов разработан автоматизированный источник калиброванных напряжений ИКН – рабочий эталон, выполненный по схеме резистивного крестообразного делителя напряжений. Используется также и тензокалибратор К148 (фирма НВМ). Установлено, что на каждой из 10 положительных и отрицательных ступеней диапазонов – ± 10 , ± 20 , ± 50 , ± 100 мВ погрешность выходного сигнала ИКН не превышает – $\pm 0,02\%$.

Микроконвертерная тензометрическая весоизмерительная система, встраиваемая в модель.

С целью сокращения длины измерительных трасс, способствующей повышению точности и помехоустойчивости измерений, и уменьшения габаритов, разработан микроконвертерный тензометрический модуль МКТМ и на его основе многоканальная тензометрическая аппаратура МКТА8 и распределенная весоизмерительная система МКТС, встраиваемые в объект испытаний. Модуль МКТМ содержит (рис. 5.10): микроконвертер (ADuC834BS), включающий основной Σ/Δ АЦП с разрядностью 24 бит, дополнительный Σ/Δ АЦП, микропроцессор серии 8052; флэш-память для хранения кодов программ и данных, стандартные последовательные интерфейсы (I2C, SPI, UART), источник эталонного напряжения - ИЭН (AD780AR) микроконвертера, от которого формируется питание тензомоста, источник питания тензомоста по 4-х проводной схеме с переключателем полярности - ПП.

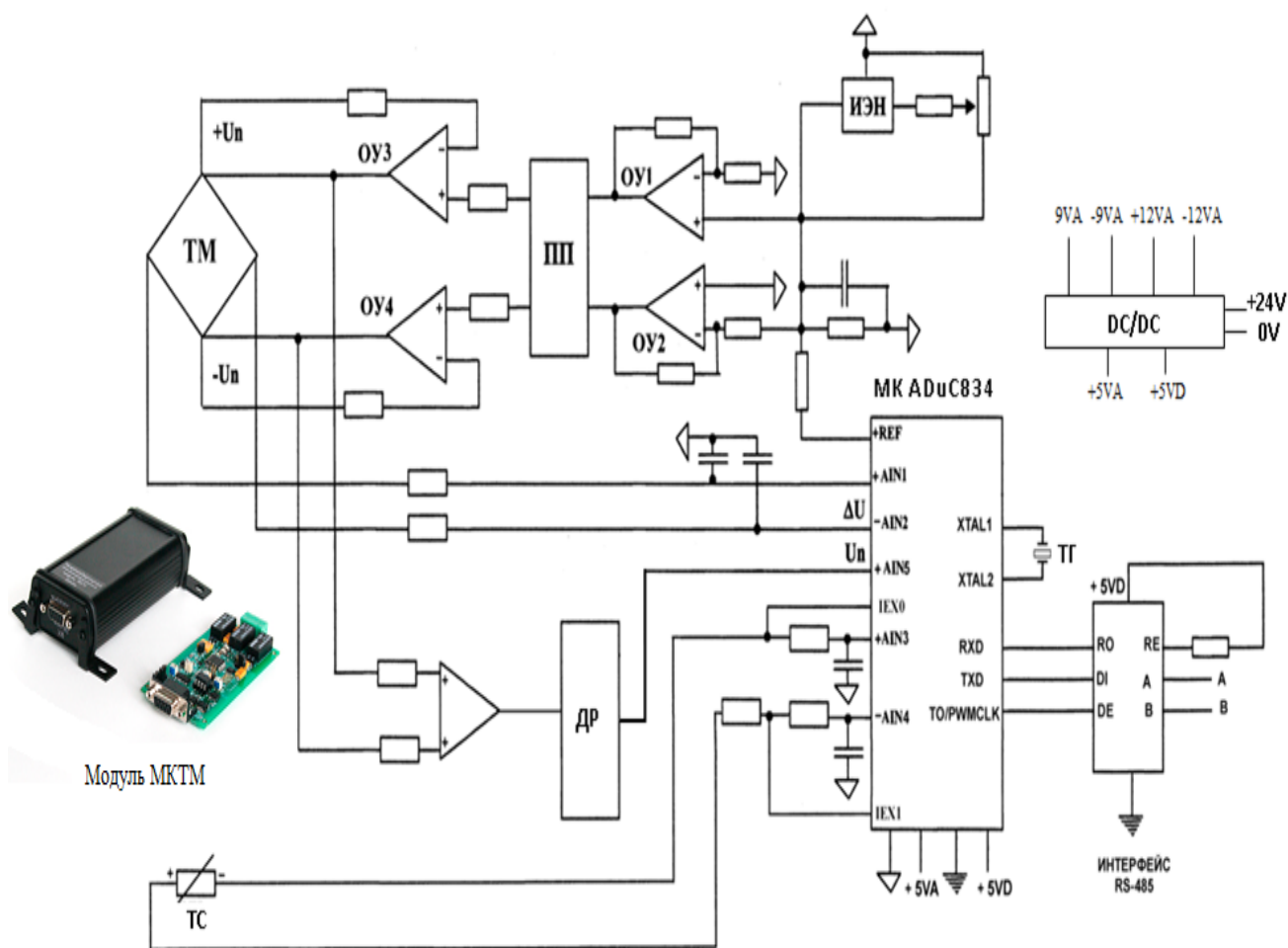


Рис. 5.10 - Структурно-функциональная схема микроконвертерного тензометрического модуля МКТМ

Тензометрическая аппаратура МКТА8 включает: восемь МКТА, объединительную плату с интерфейсом RS485 и источником питания, установленные в малогабаритном корпусе. Модули МКТМ распределенной весоизмерительной системы, или аппаратура МКТА8, размещаются в непосредственной близости от тензодинамометров.

Определены основные характеристики микроконвертерной системы: количество каналов измерения: сигналов тензомостов – 8, сигналов датчиков температуры тензовесов – 8; диапазоны измерения: сигналов тензовесов – $0... \pm 2,5$ В, сигналов термометров сопротивления – 100 Ом...140 Ом; питание тензомостов – 5, 10 В; питание термометров сопротивления от источника тока микроконвертера – 200 мкА; разрядность Σ/Δ АЦП микроконвертера – 24 бит; частота режекции ФНЧ (отсчетов) – 5 Гц...100 Гц; интерфейс связи аппаратуры с компьютером пользователя – RS485; основная приведенная погрешность – $\pm 0,005... \pm 0,05\%$ в диапазоне входного сигнала ± 10 мВ (2 мВ/В), в зависимости от частоты отсчетов; погрешность измерения сигналов термометров сопротивления – $\pm 0,05\%$; габаритные размеры: МКТМ – 117×60×35 мм, МКТМ8 – 150×150×40 мм.

Применение весоизмерительных систем в аэродинамических установках. Для оценки точности измерений проведены многократные испытания контрольных моделей в АДТ Т-103 и в АДТ Т-106 с использованием цифровых усилителей-нормализаторов АДС6. Испытания показали: повышение на порядок точности измерений средних значений сигналов аэродинамических весов, время измерения на экспериментальной точке от 2 с до 5 с; совпадение аэродинамических характеристик и их среднеквадратических отклонений по пятикратным испытаниям, с полученными ранее на весоизмерительных системах предыдущего поколения. Весоизмерительные системы с усилителями-нормализаторами АДС6 применяются в основных АДТ ЦАГИ и других организациях авиационно-космической отрасли. Микроконвертерная весоизмерительная система МКТА8 используется в АДТ ФГУП «СибНИА» и АДТ МГТУ ГА.

Показано направление дальнейшего повышения качества весоизмерительных систем на основе, разработанных и исследованных с образцовыми средствами, прецизионных цифровых усилителей-нормализаторов в стандарте PXI/PXI Express.

ГЛАВА 6. Измерения динамических процессов в аэродинамических трубах на основе тензометрических систем

В шестой главе представлены результаты исследований по разработке и применению средств измерения динамических процессов в АДТ на основе широкополосных тензометрических систем.

Для измерения динамических сигналов используются датчики различных типов: тензометрические, индуктивные, акселерометры. При построении измерительной аппаратуры использовался помехоустойчивый метод измерения на несущей частоте (процессов до 5 кГц) и на постоянном токе – (процессов до 100 кГц). Предложены структурно-функциональные схемы построения и разработаны новые широкополосные цифровые тензометрические усилители-нормализаторы на несущей частоте (модуль ADC UNF) и на постоянном токе (модуль ADC UPT) в

стандарте VME и на их основе многоканальные, широкополосные ИИС с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Цифровой широкополосный тензометрический усилитель-нормализатор динамических сигналов на несущей частоте – модуль ADC UNF

Модуль ADC UNF содержит (рисунок 6.1): генератор несущей частоты G – (AD9832), преобразователь токового сигнала генератора в напряжение – ОУ1, сглаживающий фильтр – F1, усилитель мощности УМ напряжения питания тензомоста ТМ, формирователь сигнала управления (CARR) демодулятором (DM) – К, переключатель режимов работы модуля – MUX1 (измеряемый сигнал – U_x , калибровочный – U_k , нулевой – U_0), предварительный инструментальный усилитель – ИУ1 (AD624), демодулятор (фазочувствительный детектор) – DM (AD630), программируемый ФНЧ – F2, инструментальный усилитель с программируемым коэффициентом усиления – ИУ2 (AD7951), аналого-цифровой преобразователь ADC (AD677), источник эталонного напряжения – ИЭН, резистивный делитель напряжения ИЭН – DP1, резистивный делитель напряжения питания ТМ – DP2, формирующий калибровочное напряжение U_k , резистивный делитель напряжения ТМ – DP3, формирующий напряжение питания цифровых потенциометров (ЦП), программно управляемые ЦП (TCA372DP2), вырабатывающие напряжения, компенсирующие сигналы резистивного и емкостного дисбаланса ТМ, буферные операционные усилители ОУ3, ОУ4, ОУ5, интегратор – ОУ2, переключатель уровня напряжения питания ТМ (5,10 В) – SW, переключатели, задающие сигналы аддитивного теста – SW_+ , SW_- с помощью образцового резистора R_{AT} .

Формирование аддитивного теста (разбалансом ТМ) и мультипликативного теста (изменением уровня напряжения питания ТМ) позволяет реализовать тестовый алгоритм измерения, способствующий повышению точности измерений.

Компенсация емкостного небаланса (фазового сдвига сигнала) осуществляется также смещением фазы сигнала управления модулятором (DM) CARR1. Сдвиг фазы осуществляется программно в ПЛИС.

Для стабилизации амплитуды напряжения питания ТМ разработана схема автоматического регулирования. Напряжение питания ТМ через буферный ОУ3, выпрямитель D и интегратор на ОУ2 подается на вход REF интегратора G. В результате изменяется выходной сигнал генератора G.

Получены основные характеристики модуля ADC UNF (Таблица 7.1): тип датчиков – тензорезисторы, индуктивные, трансформаторные; диапазоны измерения, мВ – ± 5 , ± 10 , ± 20 , ± 40 ; питание датчиков, В – 5, 10; частота напряжения питания датчиков (устанавливается программно), Гц – $1000 \div 20000$; частота среза ФНЧ при несущей частоте 20000 Гц – 500, 1000, 2500, 5000; неравномерность АЧХ, % – 3 (до $0,7 f_{cp}$); разрядность преобразования, бит – 16; время преобразования, мкс – 50; основная приведенная погрешность измерения – $\pm 0,1\%$ (при несущей частоте 5000 Гц), $\pm 0,5\%$ (при несущей частоте 20000 Гц); длина линий связи с датчиком, м – $50 \div 100$; подавление синфазных помех частотой 50 Гц, дБ – 100.

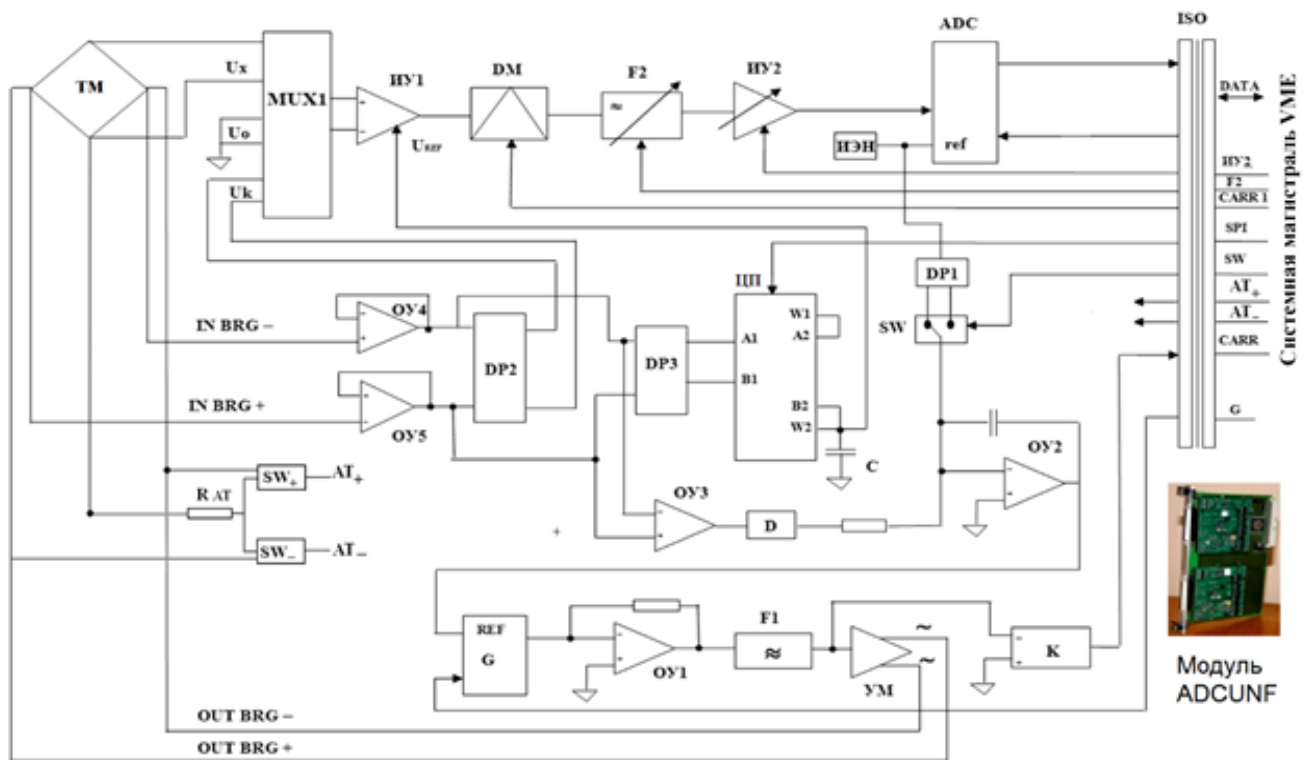


Рис.6.1. Структурно-функциональная схема тензометрического модуля на несущей частоте ADC UNF

Цифровой широкополосный тензометрический усилитель-нормализатор динамических сигналов на постоянном токе – модуль ADC UPT

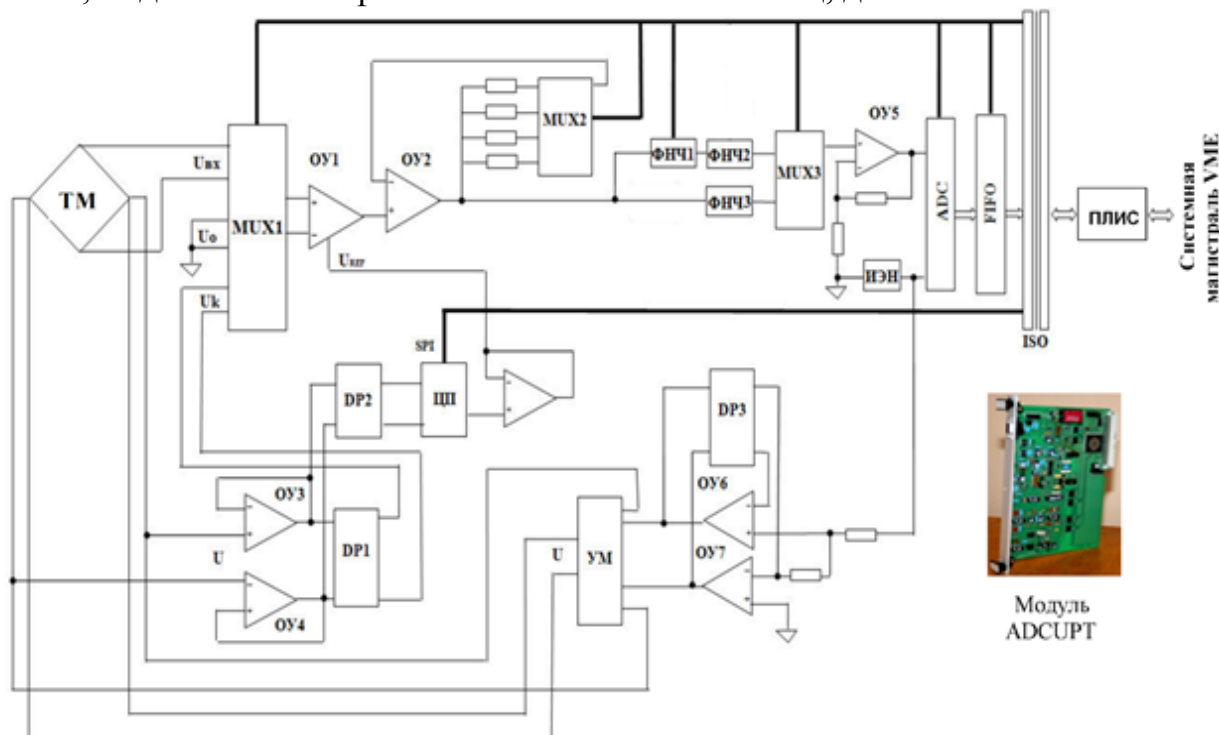
Модуль (Рис.6.2) содержит мультиплексор MUX1, инструментальный предварительный усилитель ОУ1 (AD625) с коэффициентом усиления 10, операционный усилитель ОУ2 (OP285) с программируемым коэффициентом усиления (2,5; 5; 20; 50).

Коэффициент устанавливается коммутацией резисторов в цепи ОС усилителя с помощью мультиплексора MUX2. С помощью мультиплексора MUX1 осуществляется выбор между измеряемым сигналом $U_{вх}$, нулевым U_0 и калибровочным U_k . Последний формируется из напряжения питания U измерительного моста M , поступающего по линиям ОС через буферные операционные усилители ОУ3, ОУ4 и резистивный делитель напряжения DP1. После усиления сигнал фильтруется. До частоты 20 кГц работает измерительный канал с интегральным фильтром Кауэра нижних частот ФНЧ1 восьмого порядка на переключаемых конденсаторах (MAX293). Частота среза f_c ФНЧ1 (1; 2; 5; 20 кГц) устанавливается программно изменением тактовой частоты дискретизации фильтра f_T . Тактовая частота $f_T = n f_c$, где $n=100$.

Чтобы избавиться от остатков тактовой частоты, на выходе ФНЧ1 установлен непрерывный фильтр ФНЧ2 с частотой среза 40 кГц. Для измерения сигналов в частотном диапазоне выше 20 кГц используется канал с непрерывным фильтром ФНЧ3 с частотой среза 125 кГц (MAX275). Частоты среза ФНЧ2 и ФНЧ3 задаются внешними резисторами. Выбор канала фильтрации осуществляется программно с помощью мультиплексора MUX3. Для согласования выходных напряжений фильтров с входом аналого-цифрового преобразователя ADC установлен буферный операционный усилитель ОУ5. Быстродействующий АЦП (ADC 400 нс,

14 разрядов) построен по многокаскадной дифференциальной конвейерной архитектуре с логической коррекцией ошибки (AD9243) и внешним эталонным источником опорного напряжения ИЭН. На выходе ADC установлена буферная память магазинного типа FIFO объемом 64 кбайта (SN74V293). Напряжение питания измерительного моста датчика (5, 10 или 15 В) формируется от источника эталонного опорного напряжения ADC (ИЭН) с помощью операционных усилителей ОУ6, ОУ7 с резистивным делителем напряжения DP3 в цепях ОС; следящий усилитель мощности УМ стабилизирует питание моста по 4-х проводной схеме. Компенсация сигнала, возникающая за счет разброса сопротивлений плеч измерительного моста (балансировка канала), осуществляется подачей напряжения смещения U_{REF} на предварительный усилитель ОУ1. Смещение формируется с помощью цифрового программно управляемого потенциометра ЦП (AD5260). Потенциометр питается напряжением, поступающим с диагонали питания измерительного моста по линиям ОС через буферные операционные усилители ОУ3 и ОУ4 и согласующий резистивный делитель напряжения DP2. Управляется потенциометр сигналами последовательного интерфейса SPI. Сигналами с системной магистралью осуществляется выбор режима работы измерительного тракта (усиление, частотный диапазон измеряемых сигналов, балансировка, калибровка), а также управление работой ADC, буферной памятью FIFO и передачей данных в компьютер.

Получены основные характеристики модуля ADC UPT (Таблица 7.1): диапазоны измерения, мВ – ± 10 , ± 20 , ± 100 , ± 200 ; питание датчиков, В – 5, 10, 15; диапазон программируемых частот среза ФНЧ (Кауэра, Баттерворта 8 порядка), Гц – $500 \div 20000$, неравномерность АЧХ, % – 3 (до $0,7 f_{cp}$); частота среза широкополосного ФНЧ (Бесселя 2 порядка), кГц – 100; неравномерность АЧХ, % – 10 (до $0,7 f_{cp}$); разрядность преобразования, бит – 14; время преобразования, нс – 400; основная приведенная погрешность, % – $\pm 0,2$; длина линий связи с датчиком, м – $50 \div 100$; подавление синфазных помех частотой 50 Гц, дБ – 100.



Ри.6.2. Структурно-функциональная схема широкополосного тензометрического модуля ADC UPT

Магистрально-модульные широкополосные тензометрические системы измерения динамических процессов

Разработаны и созданы на основе модулей ADC UNF и ADC UPT в стандарте VME. Система содержит (Рис.6.3) группу модулей ADC UPT (при необходимости с предварительными усилителями – ПДУ сигналов датчиков D) или группу модулей ADC UNF. Модуль ADC6 используется для измерения сигналов датчиков углов положения модели (ДП) α , β ; модуль FDC8 для измерения сигналов виброчастотных датчиков (ВЧД) параметров потока P , P_0 , модуль RDC8 для измерения сигналов термометров сопротивления ТС температуры потока T_0 (Таблица 7.1).

Для повышения помехоустойчивости сигналы управления тензометрическими модулями ADC UNF и ADC UPT и передачи данных в системный компьютер, а также цепи питания модулей гальванически изолированы от магистрали VME с помощью устройств изоляции ISO и преобразователей напряжений DC/DC.

Разработан алгоритм одновременного запуска измерений динамических процессов в выбранной группе модулей программно или при наступлении фиксированных событий, с применением триггерных сигналов, передаваемых по линиям SERA, SERB шины VME.

Применение широкополосных тензометрических систем.

Применяются для измерений динамических колебаний модулей при контроле безопасности испытаний в АДТ ЦАГИ, измерения и контроля вибраций моделей и силовой установки с помощью акселерометров в ОАО «ГосМКБ «Радуга», для измерения динамических нагрузок при определении нестационарных аэродинамических характеристик моделей в ФГУП «СибНИА».

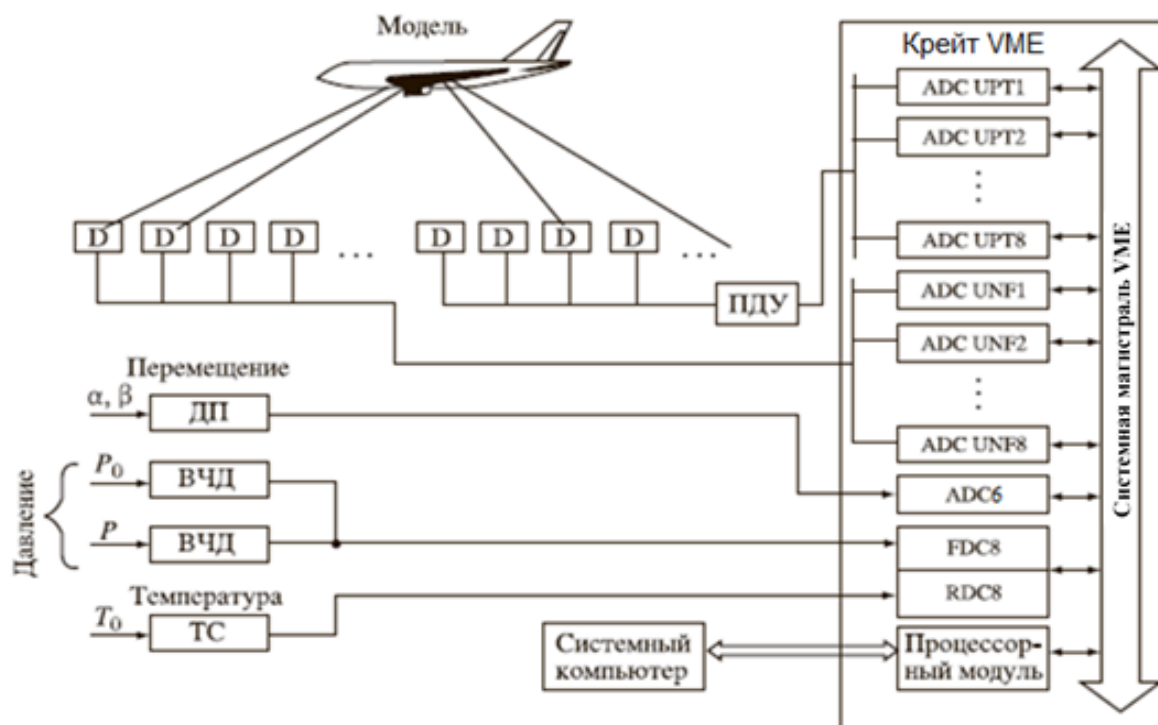


Рис.6.3. Структурно-функциональная схема измерительной системы для регистрации динамических процессов

ГЛАВА 7. Комплексные магистрально-модульные информационно-измерительные и управляющие системы аэродинамических установок и испытательных стендов

В седьмой главе представлены результаты исследований по разработке и применению комплексных информационно-измерительных и управляющих систем для АДТ и испытательных стендов. Измерительно-вычислительные комплексы предыдущего поколения ИВК Л70 и ИВК М1 в стандарте САМАС, разработанные при непосредственном участии автора, стали основой создания нового, более совершенного поколения магистрально-модульных ИВК и на их основе современных ИИС для АДТ и испытательных стендов.

Многоканальный унифицированный измерительно-вычислительный и управляющий комплекс ИВК М2М в стандарте VME. Предложена и реализована концепция единой магистрально-модульной платформы аппаратных и программных средств измерительно-вычислительного комплекса для экспериментальной аэродинамики и на ее основе совместно со специалистами ФГУП «ЭЗАН» и ООО «Спецэлтех» разработан многофункциональный унифицированный комплекс ИВК М2М нового поколения в стандарте VME (Рис.7.1). Базовый состав комплекса включает: крейт в стандарте VME, высокопроизводительный компьютерный модуль (VP9), источник питания крейта (PWC) и широкую номенклатуру измерительных и управляющих модулей (Таблица 7.1). Комплекс ИВК М2М включен в Госреестр средств измерения РФ (Свидетельство об утверждении типа средств измерения ОС.С.34.082А, №72232 от 04.12.2018 г.). Функционирует под управлением унифицированного программного обеспечения – УПК «ПОТОК», разработанного в ЦАГИ.

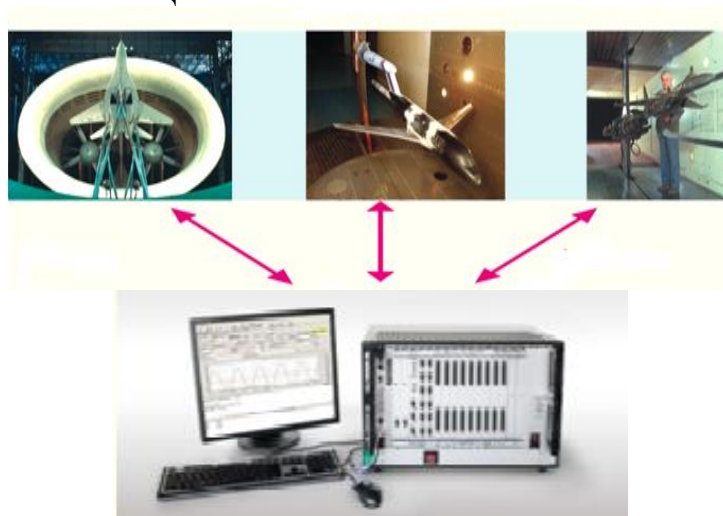


Рис.7.1. Измерительно-вычислительный и управляющий комплекс ИВК М2М

Таблица 7.1 – Состав и основные характеристики оборудования комплекса ИВК М2М

Наименование оборудования	Обозначение	Основные характеристики	Применение
Крейт аппаратуры	KP VME	6U, 17 слот, вентпанель 1U.	Размещение модулей.
Блок питания	PWC	6U, 5B/35A, 12B/8A, –12B/4A.	Питание модулей.
Процессорный модуль на шине VME	VP9	Intel Pentium M, 600...1600 МГц, ОЗУ 2 Гб, жесткий диск 20...40 Гбайт, флоппи-диск 2 Гб, плата связи с Ethernet; два последовательных порта RS/485, три порта USB 2.0.	Программное управление сбором и обработка измерительной информации.

Продолжение таблицы 7.1

Цифровой тензометрический интегрирующий модуль	ADC6	Количество каналов – 6; диапазон входных сигналов $0 \pm 2,5$ В; напряжение питания тензорезисторных мостов датчиков – 5, 10 В; разрядность АЦП – $16 \div 24$ бит; частота отсчетов – $2 \div 100$ Гц; основная погрешность в диапазоне входных сигналов ± 10 мВ – $\pm(0,01...0,1)\%$ (в зависимости от частоты отсчетов в пределах от 2 до 100 Гц)	Измерение статических и квазистатических сигналов датчиков сил, давлений, углов, деформаций
Цифровой тензометрический модуль на несущей частоте	ADC UNF	Количество каналов – 1; диапазон входных сигналов – $\pm 5, \pm 10, \pm 20, \pm 40$ мВ; напряжение питания тензомоста датчика – 5, 10 В; несущая частота – $1000 \div 20000$ Гц; полоса пропускания на несущей частоте 20000 – 500, 1000, 2500, 5000 Гц; разрядность АЦП – 16 бит; время преобразования – 50 мкс; предел допускаемой основной приведенной погрешности: на несущей частоте 5000 Гц – $\pm 0,1\%$, на несущей частоте 20000 Гц – $\pm 0,5\%$	Измерение динамических сигналов тензорезисторных, индуктивных, трансформаторных датчиков; измерение пульсаций давления, динамических нагрузок, вибраций конструкций
Цифровой широкополосный тензометрический модуль на постоянном токе	ADC UPT	Количество каналов – 1. Диапазоны входных сигналов $\pm 10, \pm 20, \pm 100, \pm 200$ мВ. Напряжение питания тензомоста датчика – 5, 10, 15 В. Полоса пропускания: 0,5...20 кГц, 100 кГц. Разрядность – 14 бит. Время преобразования – 400 нс. Предел допускаемой основной приведенной погрешности $\pm 0,2\%$.	Измерение динамических сигналов датчиков. Измерение пульсаций давления динамических нагрузок, вибраций конструкций.
Модуль аналого-цифрового преобразования и управления	ADC16	Количество каналов – 16. Диапазоны входных сигналов: $\pm 10, \pm 5, \pm 2, \pm 1$ В. Разрядность АЦП – 16 бит. Время преобразования – 40 мкс. Предел допускаемой основной приведенной погрешности $\pm 0,05\%$. Выходной управляющий регистр – 8 разрядов. Выходное напряжение питания внешних устройств – ± 5 В, ± 15 В.	Измерение распределения давления на моделях с помощью многоточечных модулей давления ММД.
Модуль преобразователей частота-код (измерителей частоты)	FDC16	Количество каналов – 16. Емкость счетчиков: образцовой частоты – 32 разряда; измеряемой частоты – 16 разрядов. Диапазон измеряемых частот – 1 Гц... 2 МГц. Предел основной приведенной погрешности $\pm 0,001\%$.	Измерение сигналов ВЧД параметров тока. Измерение оборотов двигателей.
Модуль преобразования сигналов термометров сопротивления и термопар	RDC16	Количество каналов – 16. Разрядность – 20 бит. Время преобразования – 165 мс (16 каналов). Погрешность измерения сигналов: термометров сопротивления $\leq \pm 0,1\%$; термопар $\pm 0,05\%$; напряжения 0...2,5 В – $\pm 0,025\%$; токов 0...20 мА – $\pm 0,025\%$.	Измерение температуры потоков, технологического оборудования АДГ.
Модуль преобразователей сигналов термометров сопротивления	RDC32	Количество каналов – 32. Диапазон измерения сопротивления – $100 \div 138$ Ом. Диапазон измерения температуры, $^{\circ}\text{C}$ – 0...100. Основная приведенная погрешность измерения – $\pm 0,1\%$.	Измерение температуры в форкамере и в технологических системах АДГ.
Модуль преобразователей сигналов фотоэлектронных датчиков угловых перемещений	ENC8	Количество каналов – 8. Число разрядов реверсивного счетчика – 21. Число разрядов счетчика-таймера – 32. Тактовая частота – 16 МГц. Дискретность отсчета $1,2^{\circ}$. Погрешность измерения $\leq 15^{\circ}$.	Измерение сигналов датчиков угловых перемещений типа ЛИР. Измерение перемещений модели, координатника, экрана.
Модуль преобразователей сигналов сдвига фаз сельсин-датчиков угловых перемещений	PHDC12	Количество каналов – 12. Диапазон рабочих частот – 300...500 Гц. Диапазон измерения углов фазового сдвига сигналов сельсин-датчиков ($0...360^{\circ}$) $\times$ число оборотов. Основная допускаемая погрешность измерения – $\pm 1^{\circ}$.	Измерение перемещений рейтера рычажных аэродинамических электромеханических весов.
Модуль аналого-цифрового преобразователя	ADC64	Количество каналов – 64 (64 однопроводных или 32 дифференциальных). Диапазоны измерения – $\pm 10, \pm 5, \pm 2, \pm 1$ В. Разрядность – 16 бит. Время преобразования – 40 мкс. Предел основной приведенной погрешности – $\pm 0,05\%$.	Измерение нормированных сигналов промышленных датчиков и аналоговой измерительной аппаратуры.
Модуль быстродействующего аналого-цифрового преобразователя	ADC32	Количество каналов – 16. Диапазон измерения – 0... 5 В. Разрядность – 14 бит. Время преобразования – 400 нс (2,5 МГц). Объем буферной памяти – 2 килобита. Предел основной приведенной погрешности – $\pm 0,05\%$.	Измерение широкополосных нормированных сигналов датчиков и аналоговой измерительной аппаратуры.
Модуль цифро-аналоговых преобразователей и ввода/вывода дискретных сигналов	DA16/DIO32	DAC16: Количество каналов – 16. Диапазон выходного напряжения ± 10 В. Разрядность – 16 бит. Время преобразования – 10 мкс. Погрешность преобразования – $\pm 0,05\%$. DIO32: Количество каналов дискретного ввода – 16. Входное напряжение – 5, 12, 24 В. Входной ток ≤ 5 мА. Количество каналов дискретного вывода – 16. Максимальное напряжение выходного транзистора – 50 В. Максимально допустимый ток – 50 мА.	Управление механизмами и двигателями.
Модуль управления шаговыми двигателями	МУЩД2	Количество каналов – 2. Напряжение питания двигателей – не более 40 В. Ток в фазу – не более 5 А. Частота вращения двигателя – 50 шагов в секунду. Возможность ручного управления. Индикация состояния двигателей.	Управление шаговыми двигателями ДШМ-16-8 и аналогичными.

Комплекс ИВК М2М обеспечивает: измерение нормированных и ненормированных сигналов первичных измерительных преобразователей и датчиков в широком диапазоне частот; высокую точность измерения на постоянном токе и на несущей частоте; аналоговую и цифровую фильтрацию сигналов датчиков; управление режимами работы измерительных каналов; управление положением модели в АДТ, элементами механизации модели, исполнительными механизмами экспериментальной установки; экономичную технологию проведения весовых испытаний и исследования распределения давления при непрерывном изменении параметров испытаний (α , М); контроль безопасности испытаний моделей; мониторинг и диагностику технологического оборудования экспериментальной установки.

Основные характеристики комплекса ИВК М2М: количество измерительных каналов: тензорезисторных преобразователей силы (тензовесов) – до 40, тензорезисторных многоканальных модулей давления – до 1000, тензорезисторных и индуктивных датчиков динамических процессов – до 16, термометров сопротивления и термопар – минимум 16, датчиков с частотным выходом – минимум 8, фотоэлектронных импульсных датчиков перемещений – минимум 4, сельсин-датчиков перемещений – минимум 6; погрешности измерения сигналов: тензорезисторных преобразователей силы и многоканальных модулей давлений – $\pm(0,01\div0,1)\%$, тензорезисторных и индуктивных датчиков динамических процессов – $\pm(0,1\div0,5)\%$, датчиков температуры – $\pm(0,025\div0,1)\%$, датчиков с частотным выходом – $\pm0,005\%$, фотоэлектронных датчиков угловых перемещений – ± 1 бит (шкала 21 бит, погрешность измерения – $\leq 15''$), сдвига фаз сельсин-датчиков перемещений – $\pm 1^\circ$; быстродействие сбора данных – от 0,1 с (10 Гц) до $0,4 \cdot 10^{-6}$ с (2,5 МГц) (в зависимости от вида измерительного канала); количество каналов управления: дискретного вывода – минимум 16, дискретного ввода – минимум 16, аналогового вывода – минимум 16. Комплекс ИВК М2М функционирует под управлением унифицированного программного обеспечения – УПК «ПОТОК».

На базе аппаратно-программного комплекса ИВК М2М – ПОТОК разработаны, созданы и внедрены ИИС и ИИУС в ряде аэродинамических установок и испытательных стендов авиационной и ракетно-космической отрасли.

ИИС трансзвуковой АДТ Т-128 ($M=0,15\div 1,7$), созданной на базе комплексов ИВК М2М, включает систему измерения параметров потока и распределения давления на моделях (ИИС/РД) и систему контроля безопасности весовых испытаний моделей (ИИС/БМ). Последняя основана на информации о допустимых статических и динамических нагрузках, получаемых одновременно непосредственно с тензовесов.

ИИУС трансзвуковой АДТ Т-106 ($M=0,15\div 1,1$). Оснащение АДТ Т-106 комплексом ИВК М2М и новой ленточной подвеской модели со встроенной внутри электропроводной трассой и дренажными трубками, позволяет проводить весовой эксперимент совместно с исследованием распределения давления и автоматизированное управление числом Маха и углом атаки модели α .

ИИС АДТ Т-104 ($V=5\div 150$ м/с) обеспечивает испытания моделей ЛА, связанных, главным образом, с отработкой аэродинамики самолетных и вертолетных двигательных установок и их элементов. Измеряются тяговые усилия, крутящие

моменты, обороты двигателей винтовых приборов (ВП), давление и температура потока за ВП, технологические параметры ВП.

ИИУС АДТ Т-102 ($V=5\div 55$ м/с) и **Т-103** ($V=5\div 110$ м/с) построена на основе единого комплекса ИВК М2М, обеспечивающего проведение испытаний моделей ЛА и промышленных сооружений одновременно в двух АДТ в автоматическом режиме управления параметрами испытаний.

ИИУС АДТ Т-5 ($V=0\div 55$ м/с) обеспечивает испытание морских судов, подводных лодок, вентиляторных установок, разнообразных производственных объектов. Особенностью системы является измерение аэродинамических нагрузок с помощью прецизионных электромеханических рейтерных весовых элементов с сельсин-датчиками.

ИИУС эталонной АДТ Т-203 ФГУП «СибНИА» ($V=10\div 90$ м/с), разработанная на основе комплексов ИВК М2М, обеспечивает испытание модулей различных ЛА, двигателей, агрегатов, парашютов с помощью специализированных систем с широкой номенклатурой измерительных и управляющих модулей комплекса.

ИИУС аэродинамических установок АУ-1 (до $M=3$), **АУ-2** ($V=5\div 60$ м/с) **ОАО «ГосМКБ «Радуга»** обеспечивают исследования по отработке аэродинамических форм отечественных образцов высокоточных управляемых ракет. Системы, разработанные на базе комплексов ИВК М2М, выполняют функции сбора и обработки измерительной информации, управления экспериментальным оборудованием, контроль параметров энергетических установок, обеспечивающий безопасность испытаний.

ИИУС стенда для определения центра масс и тензора инерции космических аппаратов АО «Корпорация «Комета». Комплекс ИВК М2М обеспечивает управление стендом с помощью трехфазных электродвигателей, измерение сигналов тензодинамометров и фотоэлектронных датчиков ЛИР углового положения стенда. С помощью электродвигателей и аппаратуры управления возбуждаются колебания измерительной платформы стенда для определения моментов инерции.

ИИУС метрологического стенда СГД-4 – рабочего эталона давлений. Система предназначена для исследования и градуировок многоканальных модулей давления ММД и датчиков давления различных типов. Комплекс ИВК М2М выполняет функции управления задатчиком эталонного давления стенда, измерения и обработки сигналов образцового вибросигнального датчика и исследуемого средства измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан комплекс требований к современным высокоэффективным информационно-измерительным системам (ИИС) для исследования аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов (ЛА) в аэродинамических трубах (АДТ).

Сформулированные требования являются руководством для разработки методов и средств измерения аэродинамических характеристик моделей ЛА в АДТ.

2. Разработана концепция единой магистрально-модульной платформы аппаратных и программных средств ИИС для экспериментальной аэродинамики, обеспечивающая: широкие функциональные возможности, высокие метрологические характеристики и быстродействие, унификацию аппаратных и программных

средств, гибкую архитектуру, единое обслуживание и снижение затрат на эксплуатацию и внедрение ИИС.

3. Разработаны и внедрены структурные и алгоритмические методы и средства повышения точности и быстродействия измерительных преобразователей и систем для экспериментальной аэродинамики.

4. Разработаны принципы, технические решения построения и созданы, исследованы новые измерительные преобразователи и системы магистрально-модульной архитектуры для основных видов измерений при исследовании аэродинамических характеристик моделей ЛА в АДТ.

5. Разработаны перспективные малогабаритные измерительные преобразователи и аппаратура, встраиваемые в объект испытаний, для измерения аэродинамических нагрузок, распределения давлений, углового положения моделей.

6. Разработан, создан и внедрен в АДТ многофункциональный унифицированный измерительно-вычислительный и управляющий комплекс нового поколения ИВК М2М в международном стандарте VME на основе:

- концепции магистрально-модульного построения и состава аппаратных и программных средств;
- структурных и алгоритмических методов и средств повышения точности и быстродействия измерительных преобразователей и систем;
- новых измерительных преобразователей и систем для основных видов измерений и исследований моделей ЛА в АДТ.

Комплекс включен в Госреестр средств измерения РФ. Оборудование комплекса производится на специализированных приборостроительных предприятиях России.

7. На базе комплекса ИВК М2М – ПОТОК созданы и внедрены высокоэффективные информационно-измерительные и управляющие системы в экспериментальные установки ФГУП «ЦАГИ», ОАО «ГосМКБ «Радуга», ФГУП «СибНИА», ФГУП «ЦИАМ», АО «Корпорация «Комета», ОАО «НПК «КБМ».

8. Внедрение нового поколения информационно-измерительных и управляющих систем в практику аэродинамического эксперимента повысило точность измерений сигналов датчиков (в 2÷3 раза), информативность экспериментов (на порядок), сократило время измерений (на 20÷30%), снизило затраты на создание, внедрение и эксплуатацию систем, обеспечило возможность гибкой модификации систем. В результате создано конкурентоспособное отечественное оборудование для исследования аэродинамических характеристик моделей ЛА в АДТ, отвечающее в совокупности показателям эффективности: точность – быстродействие – многофункциональность – унификация – экономичность.

9. Заложены основы дальнейшего развития техники и методики исследований аэродинамических характеристик моделей ЛА в направлении создания и внедрения в АДТ ИИУС на перспективной магистрально-модульной платформе PXI/PXI Express и встраиваемых в объект испытаний микроконвертерных измерительных преобразователей, аппаратуры и систем.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи, опубликованные в периодических изданиях, рекомендуемых ВАК:

- 1) Блокин-Мечталин, Ю.К. Многопредельный автоматический калибратор сигналов тензометрических мостов/ Ю.К. Блокин-Мечталин// Измерительная техника. – 1978. № 4. – С. 20–21.
- 2) Блокин-Мечталин, Ю.К. Многоканальный аналого-цифровой измерительный преобразователь для магистрально-модульных систем/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.М. Власенко, В.И. Матвиив, В.А. Судаков// Измерительная техника. – 1991. № 11. – С. 15–16.
- 3) Беклемищев, А.И. Измерительная информационная система с многоточечными модулями давления для исследования распределения давления по моделям в аэродинамических трубах/ А.И. Беклемищев, Ю.К. Блокин-Мечталин, В.И. Бирюков [и др.]// Измерительная техника. – 1994. № 8. – С. 43–45.
- 4) Блокин-Мечталин, Ю.К. Тензометрический измерительно-вычислительный комплекс 32ИВК-01/ Ю.К. Блокин-Мечталин, Н.И. Морозов, Б.Д. Муриев [и др.]// Измерительная техника. – 1994. № 8. – С. 49–51.
- 5) Блокин-Мечталин, Ю.К. Измерительный преобразователь сигналов датчиков для магистрально-модульных систем/ Ю.К. Блокин-Мечталин// Измерительная техника. – 1997. № 11. – С. 15–17.
- 6) Аполлонова, Г.Б. Система измерения аэродинамических нагрузок на моделях/ Г.Б. Аполлонова, Ю.К. Блокин-Мечталин, В.М. Власенко, С.М. Сватков, Т.Н. Шатаева// Измерительная техника. – 1998. № 5. – С. 43–45.
- 7) Блокин-Мечталин, Ю.К. Измерительно-вычислительный комплекс для автоматизации научных исследований в аэродинамических трубах/ Ю.К. Блокин-Мечталин// Измерительная техника. – 2000. № 12. – С. 31–34.
- 8) Блокин-Мечталин, Ю.К. Тензометрический измерительно-вычислительный комплекс ИВК М2М/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.В. Петроневич, Е.К. Чумаченко// Датчики и системы. – 2004. № 3. – С. 14–17.
- 9) Блокин-Мечталин, Ю.К. Цифровые тензометрические преобразователи и системы/ Ю.К. Блокин-Мечталин// Датчики и системы. – 2009. № 12. – С. 31–37.
- 10) Блокин-Мечталин, Ю.К. Измерительно-вычислительная и управляющая система для определения центра масс и тензора инерции космических аппаратов/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.В. Богданов, И.Н. Панченко, В.В. Петроневич, В.А. Сабреков, Е.К. Чумаченко// Датчики и системы. – 2010. № 5. – С. 33–36.
- 11) Беклемищев, А.И. Стенд СГД-4 для метрологических исследований и паспортизации многоканальных модулей давления/ А.И. Беклемищев, Г.В. Бирюков, Ю.К. Блокин-Мечталин// Датчики и системы. – 2010. № 5. – С. 43–45.
- 12) Блокин-Мечталин, Ю.К. Многофункциональный измерительно-вычислительный и управляющий комплекс для экспериментальной аэродинамики/ Ю.К. Блокин-Мечталин// Датчики и системы. – 2010. № 5. – С. 10–16.
- 13) Петроневич, В.В. Комплексная автоматизация аэродинамического эксперимента в трансзвуковой аэродинамической трубе АДТ Т-106/ В.В. Петроневич, Ю.К. Блокин-Мечталин, П.В. Савин [и др.]// Датчики и системы. – 2010. № 5. – С. 16–19.
- 14) Блокин-Мечталин, Ю.К. Методы и средства повышения точности измерительных преобразователей и систем для экспериментальной аэродинамики/ Ю.К. Блокин-Мечталин// Датчики и системы. – 2011. № 7. – С. 8–18.
- 15) Блокин-Мечталин, Ю.К. Микромеханический двухосевой измеритель углового положения изделий/ Ю.К. Блокин-Мечталин, М.М. Богатырев, М.Ю. Заливако [и др.]// Датчики и системы. – 2013. № 8. – С. 16–20.
- 16) Бирюков, Г.В. Многоканальный пре-

образователь давления INSER 1800/32/ Г.В. Бирюков, Ю.К. Блокин-Мечталин, В.А. Колесников, А.Е. Назаров// Датчики и системы. – 2014. № 9. – С. 55–58. 17) Блокин-Мечталин, Ю.К. Микроконвертерная тензометрическая аппаратура/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.А. Сабреков// Датчики и системы. – 2014. № 8. – С. 32–35. 18) Блокин-Мечталин, Ю.К. Прецизионные тензометрические модули на платформе PXI/ Ю.К. Блокин-Мечталин, Б.Д. Муриев, В.А. Сабреков, С.Е. Лангваген, М.Ю. Маслов// Датчики и системы. – 2017. № 4. – С. 21–25. 19) Блокин-Мечталин, Ю.К. Цифровой прецизионный тензометрический преобразователь на несущей частоте/ Ю.К. Блокин-Мечталин// Датчики и системы. – 2019. № 7–8. – С. 41–46.

Публикации в других изданиях

20) Авторское свидетельство СССР № 251687, G 01 r 21e, 29/02 опубликовано 10.09.1969 бюл. № 28. 21) Авторское свидетельство СССР № 405075, G 01 r 17/06 опубликовано 22.10.1973 бюл. № 44. 22) Беклемищев, А.И. Тензометрические мосты с дискретными компенсаторами/ А.И. Беклемищев, Ю.К. Блокин-Мечталин// Труды ЦАГИ. – 1976. № 1689. – С. 108–118. 23) Беклемищев, А.И. Измерительная аппаратура «Эпюра»/ А.И. Беклемищев, Ю.К. Блокин-Мечталин, В.А. Алексеенко, В.М. Власенко// Труды ЦАГИ. – 1981. № 2105. – С. 84–93. 24) Беклемищев, А.И. Информационно-измерительная система ЭПЮРА. Основные требования к системе. Общая схема измерения/ А.И. Беклемищев, Ю.К. Белорусов, Ю.К. Блокин-Мечталин, Г.Д. Ташкинов// Труды ЦАГИ. – 1981. Вып. 2105. – С. 79–83. 25) Блокин-Мечталин, Ю.К. Устройства оперативного метрологического исследования и контроля/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.К. Маскаев, В.А. Алексеенко, В.М. Власенко// Труды ЦАГИ. – 1981. Вып. 2105. – С. 94–97. 26) Абашкин, А.М. Типовая методика выполнения измерений при определении распределения давления на моделях с применением коммутаторов пневмотрасс/ А.М. Абашкин, В.Р. Бертынь, Ю.К. Блокин-Мечталин [и др.]// Труды ЦИАМ. – 1989. № 1258. – С. 198–206. 27) Блокин-Мечталин, Ю.К. Измерительно-вычислительная система с генераторными датчиками давления для определения параметров газового потока/ Ю.К. Блокин-Мечталин, Н.А. Кудрин, Т.В. Каймина [и др.]// Труды ЦИАМ. – 1989. № 1258. – С. 155–163. 28) Блокин-Мечталин, Ю.К. Магистрально-модульный ИВК для аэродинамических исследований/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.М. Власенко, С.М. Сватков, В.А. Судаков// Методы и средства экспериментальных исследований в аэронавтике. Международная конференция, посвященная 75-летию ЦАГИ. Жуковский, Россия, 1993 г. Тезисы доклада. 29) Блокин-Мечталин, Ю.К. Перспективы применения VME в информационно-измерительных системах для аэродинамических испытаний/ Ю.К. Блокин-Мечталин// Сборник трудов. Конференция/выставка VV conex 93, VME/VXI bus в промышленности и научных исследованиях VERA, Москва, 1993. – С. 79–82. 30) Пат. РФ № 2018173, G 04 F 10/04, G 01 R 23/00 опубликовано 15.08.1994 бюл. № 15. 31) Беклемищев, А.И. Структура распределенной ИИС для аэродинамических испытаний/ А.И. Беклемищев, Ю.К. Блокин-Мечталин, В.В. Богданов// Труды ЦАГИ. – 1995. № 2567. – С. 3–8. 32) Блокин-Мечталин, Ю.К. Подсистема весовых испытаний моделей/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.А. Судаков, М.А. Левченко// Труды ЦАГИ. – 1995. № 2567. – С. 18–23. 33) Абашкин, А.М. Средства метрологического обеспечения распределенной ИИС/ А.М. Абашкин, Ю.К. Блокин-Мечталин, В.А. Судаков, С.А. Шульга// Тру-

ды ЦАГИ. – 1995. № 2567. – С. 31–36. 34) Блокин-Мечталин, Ю.К. Подсистема определения параметров потока в аэродинамической трубе/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.М. Власенко, Л.Ф. Назарова// Труды ЦАГИ. – 1995. Вып. 2567. – С. 9–17. 35) Блокин-Мечталин, Ю.К. Подсистема исследования распределения давления/ Ю.К. Блокин-Мечталин, Ю.М. Еремеев, В.А. Маркиянов, Э.Р. Суворова// Труды ЦАГИ. – 1995. Вып. 2567. – С. 24–30. 36) Беклемищев, А.И. Разработка и исследование многоканального модуля давления ММД-96/ А.И. Беклемищев, В.П. Кулеш, В.Н. Чекрыгин, Ю.К. Блокин-Мечталин [и др.]// Всероссийская НТК «Фундаментальные проблемы аэротермодинамики силовых установок летательных аппаратов». Тезисы доклада, г. Жуковский, ЦАГИ, 1999. 37) Блокин-Мечталин, Ю.К. Программно-аппаратный комплекс нового поколения ИВК М2М – ПОТОК для автоматизации экспериментальных исследований и технологических процессов/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.В. Петроневич// Техника Воздушного Флота. – 2002. № 1–2. – С. 53–57. 38) Мамедов, О.С. Современные информационные технологии на базе аппаратно-программного комплекса нового поколения для отработки изделий авиационно-космической техники в аэродинамических установках/ О.С. Мамедов, В.В. Петроневич, Ю.К. Блокин-Мечталин// IV научная конференция Волжского регионального центра РАН Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. Аннотация доклада. – Саров, ВНИИЭФ, 2005. – С. 167. 39) Блокин-Мечталин, Ю.К. О точности измерений в аэродинамической трубе Т-106 с ИВК нового поколения/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.М. Власенко, В.В. Гольцева, Н.В. Наседкин, В.А. Судаков, Т.Н. Шатаева// Материалы XVII школы-семинара «Аэродинамика летательных аппаратов». 2–3 марта 2006 г. п. Володарского Московской обл. – С. 23. 40) Блокин-Мечталин, Ю.К. Повышение качества и эффективности аэродинамического эксперимента в АДТ ОАО «ГосМКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка с применением аппаратно-программного комплекса ИВК М2М – ПОТОК/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.В. Гончаренко, Г.Г. Жирнов [и др.]// Материалы XVII школы-семинара. 2–3 марта 2006 г. п. Володарского Московской обл. – С. 47. 41) Блокин-Мечталин, Ю.К. Комплексная автоматизация аэродинамического эксперимента в аэродинамической трубе АДТ Т-106/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.М. Власенко, Н.В. Наседкин, В.В. Петроневич [и др.]// Материалы XIX школы-семинара «Аэродинамика летательных аппаратов» ЦАГИ, 2008 г. п. Володарского Московской обл. – С. 29. 42) Блокин-Мечталин, Ю.К. Цифровые тензометрические системы для экспериментальных исследований в аэродинамических установках и на испытательных стендах/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.М. Власенко, Б.Д. Муриев, В.А. Сабреков, В.А. Судаков// Материалы XIX школы-семинара «Аэродинамика летательных аппаратов». 28–29 февраля 2008 г. п. Володарского Московской обл. – С. 28. 43) Петроневич, В.В. Комплексная автоматизация аэродинамического эксперимента/ В.В. Петроневич, Ю.К. Блокин-Мечталин, Е.К. Чумаченко// Полет. – 2009. № 5. – С. 46–49. 44) Пат. РФ № 84554, G 01 M 9/06 опубликовано 10.07.2009 бюл. № 19. 45) Пат. РФ № 2374612, G 01 M 9/06 опубликовано 27.11.2009 бюл. № 33. 46) Пат. РФ № 240071, G 01 D 9/00 опубликовано 27.09.2010 бюл. № 27. 47) Пат. РФ № 2396511, G 01 B 7/16 опубликовано 10.08.2010 бюл. № 22. 48) Блокин-Мечталин, Ю.К. Многофункциональный, унифицированный измерительно-вычислительный и управляющий комплекс для экспериментальной аэродинами-

ки/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.Г. Горбунов// Материалы XXI научно-технической конференции по аэродинамике. 25–26 февраля 2010 г. п. Володарского Московской обл. – С. 29–30. 49) Блокин-Мечталин, Ю.К. Система комплексного контроля безопасности весовых испытаний моделей/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.В. Буров, М.Ф. Гарифулин, А.М. Головкин [и др.]// XXII научно-техническая конференция по аэродинамике. 3–4 марта 2011 г. п. Володарского Московской обл. – С. 25–26. 50) Пат. РФ № 2491507, G 01 C 21/10 опубликовано 27.08.2013 бюл. № 24. 51) Блокин-Мечталин, Ю.К. Исследование по реализации методики непрерывного весового эксперимента и эксперимента по распределению давления в АДТ Т-128 на дозвуковых режимах/ Ю.К. Блокин-Мечталин, Г.В. Бирюков, К.Д. Бухаров, А.Р. Горбушин [и др.]// Материалы XXV научно-технической конференции по аэродинамике. 27–28 февраля 2014 г. п. Володарского Московской обл. – С. 55. 52) Блокин-Мечталин, Ю.К. Микроконвертерная тензометрическая аппаратура, встраиваемая в объект испытаний/ Ю.К. Блокин-Мечталин, В.А. Сабреков, В.А. Судаков// Материалы XXV научно-технической конференции по аэродинамике. 27–28 февраля 2014 г. п. Володарского Московской обл. – С. 55–56. 53) Блокин-Мечталин, Ю.К. Информационно-измерительные управляющие системы экспериментальной аэродинамики/ Ю.К. Блокин-Мечталин – М.: Наука, 2015. – 261 с. 54) Пат. РФ № 2696945, G 01 L 9/04, G 01 L 15/00, G 12 B 7/00, G 01 D 3/028, G 01 k 13/00 опубликовано 07.08.2019 бюл. № 22. 55) Пат. РФ № 2696930, G 01 B 7/16 опубликовано 07.08.2019 бюл. № 22.