

На правах рукописи

**БАЛЫКОВА Александра Юрьевна**

**АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ФИЛЬТРЫ  
В ЗАДАЧАХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ**

**Специальность 05.11.01 - Приборы и методы измерения  
(электрические величины)**



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

**ПЕНЗА 2005**

Работа выполнена на кафедре «Информационно-вычислительные системы» Пензенского государственного университета.

Научный руководитель - доктор технических наук

**Чувькин Б. В.**

Официальные оппоненты - доктор технических наук

**Мясникова Н. В.;**

доктор технических наук

**Михеев М. Ю.**

Ведущая организация - НИИЭМП, г. Пенза.

Защита диссертации состоится 26 мая 2005 года, в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.186.02 в Пензенском государственном университете по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета.

Автореферат разослан 22 апреля 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор



Светлов А. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение точности и помехоустойчивости аналого-цифрового преобразования является одной из важных проблем современных средств измерения. Это стимулирует появление новых высокоточных методов, средств преобразования и обработки измерительной информации в аналоговой и цифровой форме. К числу новых методов относятся методы аналого-цифровой фильтрации. Аналого-цифровые фильтры входят в состав большинства средств измерения, и к ним как к элементам измерительных каналов предъявляются требования по точности преобразования и воспроизведения заданных динамических характеристик.

Первыми для высокоточной реализации алгоритмов аналого-цифровой фильтрации измерительных сигналов использовались интегрирующие АЦП (ИАЦП) (70-80-е гг.), реализующие сложные весовые функции (ВФ). Сочетание высокой точности и помехоустойчивости ИАЦП позволило решить ряд проблем борьбы с помехами в измерительных каналах. Теории ИАЦП было посвящено немало работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Первые отечественные разработки теории построения аналого-цифровых фильтров (АЦФ) на базе ИАЦП, реализующих сложные ВФ, были выполнены в научных школах Вишенчука И. М, Гутникова В. С, Шахова Э. К., Шляндина В. М.

Теоретические разработки алгоритмов аналого-цифровой фильтрации 80-х годов получили широкое применение на практике благодаря успехам в области микроэлектроники и цифровой обработки информации. Это позволило в 90-е годы существенно улучшить метрологические характеристики ИАЦП за счет использования цифровой обработки сигналов. Среди помехоустойчивых средств измерения, сочетающих аналоговые и цифровые методы, лидерами являются сигма-дельта АЦП (фирма Analog Devices), которые реализуют алгоритмы аналого-цифровой фильтрации.

Развитию АЦФ предшествовали аналого-дискретные фильтры: интегрирующие дискретизаторы, сплайн-интерполирующие фильтры, интерполирующие фильтры.

Необходимость развития теории АЦФ в настоящее время очевидна, поскольку возможности технологий принципиально изменились и

позволяют реализовывать структуры АЦФ, имеющие широкие функциональные возможности. Благодаря развитию технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), беспроводных технологий создаются сети беспроводных интеллектуальных датчиков, которые могут функционировать в неблагоприятной среде, обеспечивая очевидные выгоды по стоимости, размерам, энергопотреблению, гибкости и распределенному интеллекту. Российские программы, например, таких научных центров и организаций, как Инновационно-инвестиционный комплекс Санкт-Петербургского государственного технического университета, компания «Терраэлектроника», направлены на разработку МЭМС для биомедицинских применений, промышленной и экспериментальной аэрогидродинамики, теплотехники и теплоэнергетики, вакуумных, инерциальных приборов, SMART-систем.

Разработка и внедрение беспроводных датчиков зависят от новых методов проектирования интегральных схем со смешанными (аналоговыми и цифровыми) сигналами, среди которых АЦФ занимают важное место, так как являются базовым элементом измерительного канала, обладают высокой технологичностью и расширенными функциональными возможностями.

Проектирование аналого-цифровых фильтров для подобных систем представляет собой скорее математическую проблему, чем техническую. Сложность математических расчетов АЦФ является сдерживающим фактором их массового использования. Аналогичная проблема в развитии теории ЦФ наблюдалась в 80-х годах с появлением высокопроизводительных сигнальных процессоров, которые открыли реальную возможность реализации сложной обработки цифровых сигналов.

В разработке множества типов фильтров наблюдался настоящий теоретический бум, но к концу 90-х годов стало ясно, что из всего этого многообразия на практике широко использовались только некоторые типы. По мнению специалистов, основным препятствием для реализации была сложность математического аппарата. Это же повторилось и с вейвлетами, теория которых разрабатывалась в 90-е годы. Несмотря на явные их достоинства и необходимость применения, они стали использоваться практически только лишь в настоящее время благодаря появлению специализированных математи-

ческих пакетов и совершенствованию инструментальных средств проектирования. Также отсутствует и единая методика расчета АЦФ, учитывающая их специфику и позволяющая наиболее быстрым путем получить в простой форме необходимые результаты.

Целью данной работы является разработка методов анализа и синтеза измерительных аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры как средства совершенствования измерительных каналов.

### **Основные задачи исследования:**

1. Анализ тенденций развития и путей совершенствования аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры.
2. Анализ свойств и разработка математических моделей измерительных аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры как базовых элементов для построения измерительных каналов.
3. Разработка методик синтеза и инженерного проектирования измерительных аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры.
4. Определение полного класса топологически инвариантных структур аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры.
5. Анализ погрешностей аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры и разработка методов их уменьшения.
6. Выявление потенциальных возможностей АЦФ для решения задач совершенствования средств измерения применительно к датчикам измерения физических величин.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы аналоговой и цифровой фильтрации, теория линейных импульсных систем, теория операторных методов описания непрерывных, дискретных и непрерывно-дискретных систем, теория дискретизации и восстановления измерительных сигналов. Для аналитических выводов использовались математические пакеты прикладных программ и имитационное моделирование в системах визуального программирования.

### **Научная новизна работы:**

1. Выделен и обоснован подкласс дуальных фильтров, обладающий существенной спецификой математического описания АЦФ замкнутой структуры.

2. Математически подтверждена гипотеза о выполнении условия устойчивости для всего класса дуальных фильтров, основанная на известных и вновь полученных аналитических решениях АЦФ ограниченного порядка. Поставлена и решена задача поиска необходимых и достаточных условий аналитического решения задачи обеспечения устойчивости дуальных АЦФ в общем виде.

3. Определен полный класс структур измерительных аналого-цифровых фильтров, реализующих передаточную функцию дуальных фильтров.

4. Получены аналитические решения синтеза передаточных функций дуальных АЦФ, относящихся к сплайновым функциям.

### **Практическая ценность работы:**

1. Определены новые области применения аналого-цифровых фильтров в измерительных системах как альтернатива аналоговым фильтрам.

2. Обобщен опыт построения помехоустойчивых преобразователей информации замкнутого типа, который послужил основой для разработки инженерной методики проектирования помехоустойчивых преобразователей интегрирующего типа.

3. Разработана методика инженерного проектирования корректирующих ЦФ, основанная на аналитических решениях с использованием математических пакетов прикладных программ.

4. Рассмотрены конкретные приложения теории АЦФ для построения измерительных каналов датчиковой аппаратуры, цифровых акселерометров замкнутого типа, электрокардиографов и помехоустойчивых ИАЦП с расширенным динамическим диапазоном.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Классификация фильтров и математическое описание подкласса дуальных фильтров.

2. Математическое описание АЦФ и условия их реализации в виде многопетлевой замкнутой структуры.

3. Методика проектирования АЦФ и определение полноты подкласса дуальных АЦФ.

4. Новые структуры измерительных преобразователей замкнутого типа с реализацией потенциальных возможностей АЦФ для решения задач совершенствования измерительных каналов.

#### **Реализация работы и внедрение результатов.**

На основе проведенных теоретических исследований и разработки методики инженерного расчета АЦФ создан каталог типовых схем со справочным материалом для АЦФ до пятого порядка включительно. Кроме того, предложена общая методика расчета АЦФ более высоких порядков. Результаты используются в учебном процессе Пензенского государственного университета, а также в НИИ физических измерений г. Пензы.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы обсуждались на конференциях и симпозиумах: Международной конференции молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы современной науки» (г. Самара, 2001 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Методы и средства измерений» (г. Нижний Новгород, 2002 г.); Международной конференции «Континуальные алгебраические логики, исчисления, нейроматематика в науке, технике и экономике» (г. Ульяновск, 2002 г.); Международной научно-технической конференции «Методы и средства измерения в системах контроля и управления» (г. Пенза, 2002 г.); Международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» (г. Пенза, 2002 г.); Научной сессии МИФИ-2002 (г. Москва, 2002 г.); Пятой международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии и системы» (г. Пенза, 2002 г.); Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, 2003 г.); Международном юбилейном симпозиуме «Актуальные проблемы науки и образования» (г. Пенза, 2003 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» (г. Пенза, 2004 г.); Второй международной конференции «Цепи и системы связи» (г. Москва, 2004 г.); Пятой всероссийской научно-технической конференции «Современные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов» (г. Пенза, 2004 г.);

Пятой международной конференции молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы современной науки» (г. Самара, 2004 г.).

### Публикации.

По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ.

### Структура и объем работы.

Диссертация состоит из 4 глав, заключения, списка литературы, содержащего 157 наименований, трех приложений. Объем работы: 180 страниц машинописного текста, 87 рисунков, 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований и разработок измерительных аналого-цифровых фильтров, относящихся к подклассу фильтров, реализующих алгоритмы аналоговой и цифровой фильтрации в рамках общей структуры, относящейся к особому подклассу линейных импульсных систем.

Определены тенденции развития аналого-цифровых фильтров как базового элемента измерительных каналов с целью определения потенциальных возможностей их использования для совершенствования средств измерения, связанных с достижениями в области микроэлектроники и микроэлектромеханических технологий. Особенностью таких средств измерения является наличие процессора в составе измерительного канала, что способствует «интеллектуализации» измерений. Примером являются «интеллектуальные датчики».

Показано, что алгоритмы аналого-цифровой фильтрации совмещены в измерительном канале интеллектуального датчика, обобщенная структура которого приведена на рис. 1, с функцией измерительных преобразований отдельных элементов структуры, т. е. АЦФ должен рассматриваться как интегрированный элемент измерительного канала. Данная структура отражает все этапы преобразования измеряемой физической величины в эквивалентный цифровой код. В структуре отражены как локальные, так и общие обратные связи, не-



обходимые для реализации обратного преобразования из цифрового сигнала в физическую величину.

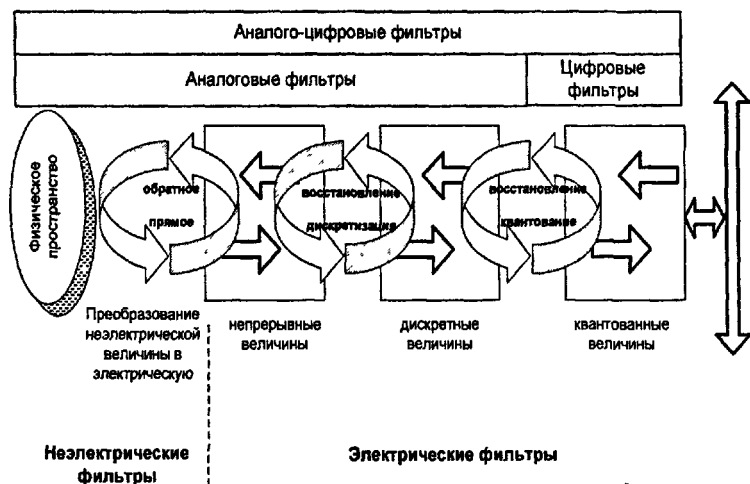


Рис. 1. Структура измерительного канала интеллектуального датчика

Наличие канала обратного преобразования обеспечивает потенциальную возможность улучшения метрологических характеристик. Практически реализуются не все виды комбинаций локальных и общей обратных связей, а их отдельные сочетания, необходимость которых обусловлена решением задачи повышения точности и быстродействия.

Предложена классификация измерительных фильтров, показанная на рис. 2, в основу которой положены признаки, связанные с формой представления измерительного сигнала и с особенностями топологии их структуры в измерительном канале (пунктирной линией выделены мнимые связи). Для АЦФ характерным является одновременное и нераздельное представление информации в аналоговой и цифровой формах, удовлетворяющее принципу дуальности (отсюда название - «дуальный аналого-цифровой фильтр»). Аналоговые и цифровые фильтры в рамках данного определения рассматриваются как частные случаи (вырожденные) общей структуры аналого-цифрового фильтра.

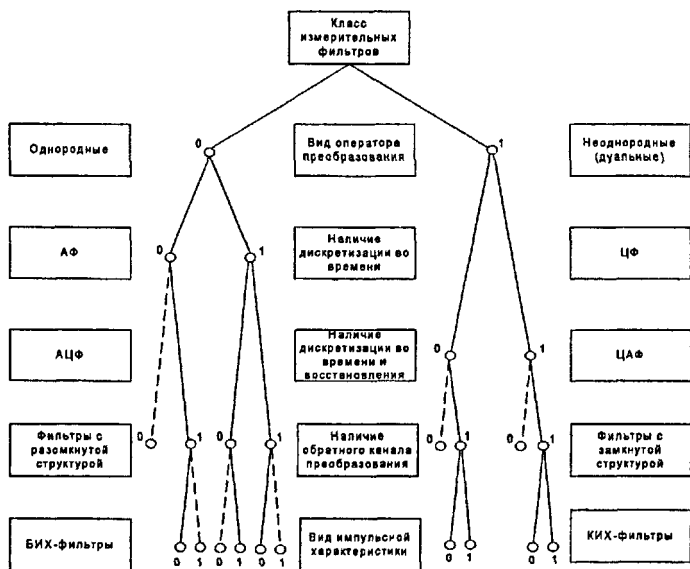


Рис. 2. Классификация измерительных фильтров

Выделены однородные структуры фильтров, в которых измерительный сигнал представлен либо в непрерывной, либо в дискретной форме, и неоднородные структуры - со смешанным непрерывно-дискретным представлением измерительных сигналов.

Проследивая тенденции развития АЦФ, можно заметить, что на первых этапах своего развития структура АЦФ представляла собой набор несвязанных фильтров в соответствии с их местом в измерительном канале. Поэтому теории их анализа и синтеза и практика их разработки развивались отдельно и не были связаны друг с другом.

Определено, что в основу обобщенной синтетической теории АЦФ как сложной измерительной, динамической системы должны быть положены элементы теории АФ, ЦФ и линейных импульсных систем.

В настоящее время наиболее актуальными являются вопросы схемотехнической реализации известных из теории и практики эффективных методов повышения помехоустойчивости средств измерения и

разработки новых методов. Для их реализации перспективными являются АЦФ замкнутой структуры высоких порядков, использование которых стало возможным за счет достижений в области микроэлектроники и цифровой техники. Увеличение порядка АЦФ вызывает снижение надежности и технологичности, увеличение энергопотребления, массогабаритных размеров. Кроме того, резко возрастает сложность математического описания и инженерного расчета таких структур, что связано с эффектом «проклятья размерности», когда увеличение порядка системы приводит к экспоненциальному росту сложности ее математического описания. К настоящему времени перечисленные выше проблемы в значительной степени решены за счет достижений в области технологий, но проблема математического описания и разработки инженерной методики расчета АЦФ замкнутой структуры высоких порядков в настоящее время остается во многом нерешенной. Следовательно, задача математического описания и разработки инженерной методики расчета АЦФ замкнутой структуры высоких порядков как элементов средств измерения является в настоящее время актуальной, а её решение имеет практическую значимость.

Показано, что методика расчета АЦФ должна решать задачу синтеза структуры АЦФ и ее параметров, оптимальных по критерию помехоустойчивости при условии одновременного достижения заданной точности измерений. Эти требования являются взаимно противоречивыми, поскольку увеличение порядка АФ, необходимое для улучшения фильтрующих свойств, приводит к увеличению инструментальных и методических погрешностей средств измерения.

Во второй главе рассмотрены элементы теории АФ, ЦФ и весового интегрирования ИАЦП для обеспечения их преимущества и связи с АЦФ. Разработана математическая модель АЦФ замкнутой структуры, которая изображена на рис. 3 в общем виде замкнутой аналого-цифровой структуры.

Структура АЦФ состоит из АФ, импульсного элемента, ЦФ в прямом канале преобразования, ЦФ и ЦАП в каждой петле обратной связи. В качестве АФ используются  $n$  последовательно включенных интегрирующих звеньев, которые при рассмотрении их в виде автономной структуры реализуют передаточную функцию

$$H_n(p) = \frac{1}{p^n}. \quad 0)$$

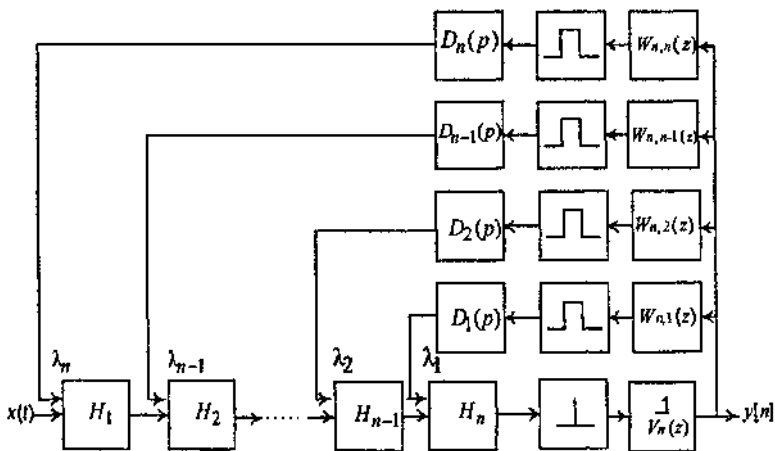


Рис. 3. АЦФ замкнутой структуры

В качестве звеньев АФ могут использоваться звенья с любыми передаточными функциями, в том числе и первичные преобразователи неэлектрических величин в электрические, например, первичные преобразователи акселерометров, которые в идеальном случае реализуют функцию двукратного интегрирования. В качестве АФ, как правило, используются интеграторы, поскольку это дает возможность обеспечить выполнение условий линейности ФЧХ, независимости координат полюсов АФ от значений  $RC$ -элементов и потенциально высокую точность аналого-цифрового преобразования за счет реализации ИАЦП на их основе.

В структуре АЦФ используются ЦФ, реализующие передаточную функцию общего вида

$$H_n(z) = \frac{W_{n,n}(z)}{V_n(z)} = \frac{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}}{1 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}. \quad (2)$$

Для выполнения условия финитности импульсной характеристики АЦФ предложено вводить цифровой КИХ-фильтр с передаточной функцией  $W_{n,n}(z)$  в канал обратной связи, цифровой БИХ-фильтр с

передаточной функцией  $\frac{1}{V_n(z)}$  - в прямой канал.

Цифроаналоговые преобразователи в каналах обратной связи реализуют ступенчатую аппроксимацию цифровой последовательности, что соответствует передаточной функции

$$D_i(p) = \frac{1 - e^{-hp}}{p}. \quad (3)$$

Передаточная функция АЦФ имеет вид

$$H(p, z) = \left( \frac{1}{ph} \right)^n \frac{(V_n(z))^{-1}}{1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i U_i(z) W_{n,i}(z) (V_n(z))^{-1}}, \quad (4)$$

где передаточная функция  $U_i(z)$  эквивалентного ЦФ определяется методом эквивалентных топологических преобразований:

$$U_i(z) = \frac{E_i(z)}{i!(z-1)^i} = \mathbf{Z} \left\{ \mathbf{L}^{-1} [H_i(p) D_i(p)] \right\} = \mathbf{Z} \left\{ \mathbf{L}^{-1} \left[ \left( \frac{1}{pT} \right)^i \frac{1 - e^{-hp}}{p} \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $E_i(z)$  – многочлен Эйлера.

Абсолютная устойчивость структуры (см. рис. 3), по критерию финитности импульсной характеристики, будет иметь место, если знаменатель в (4) будет равен единице. Это дает возможность рассчитать коэффициенты  $a_1 \dots a_n; b_1 \dots b_n$  функции (2).

Предложено определять порядок АЦФ по порядку АФ, входящего в состав общей обратной связи, охватывающей  $n$  интеграторов для обеспечения их устойчивости. Предложен метод расчета коэффициентов обратных связей АЦФ многопетлевой структуры через числа Стирлинга первого рода, обеспечивающий линейность ФЧХ, периодичность нулей АЧХ. Исследованы динамические характеристики АЦФ и определена преемственность в их математическом описании с динамическими характеристиками АФ и ЦФ.

Обоснован принцип дуальности АЦФ и синтезирована обобщенная структура АЦФ. Свойство дуальности заключается в том, что при изменении направления движения информации в АЦФ на противоположное получается цифроаналоговая структура, имеющая подобные динамические характеристики. Обобщенная структура АЦФ

представляет собой синтез последовательно включенных однородных и дуального фильтров (рис. 4).

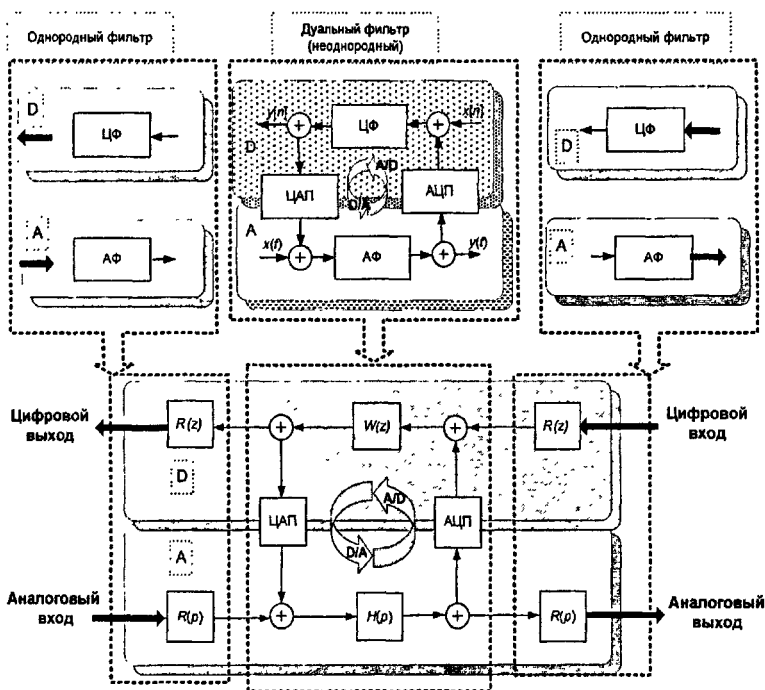


Рис. 4. Синтез обобщенной структуры АЦФ

. Принцип дуальности позволяет в рамках одной структуры строить универсальные аналого-цифровые фильтры. Универсальность заключается в возможности реализации четырех вариантов (режимов) включения АЦФ (без однородных фильтров) в измерительный канал путем изменения расположения точек входа и выхода:

- аналоговый фильтр: аналоговый вход - аналоговый выход;
- цифровой фильтр: цифровой вход - цифровой выход;
- аналого-цифровой фильтр: аналоговый вход - цифровой выход;
- цифроаналоговый фильтр: цифровой вход - аналоговый выход.

Изменение режимов осуществляется на программном уровне. Отметим, что в режиме «цифровой вход - аналоговый выход» АЦФ

используются для построения интерполирующих фильтров, а также являются элементом систем многомасштабного вейвлет-анализа измерительных сигналов с использованием ортогонального базиса сплайн-вейвлетов. В режиме «аналоговый вход - цифровой выход» АЦФ используются в качестве высокоточных помехоустойчивых АЦП. Цифроаналоговый фильтр получается из аналого-цифрового фильтра путем изменения направлений движения информационных потоков на противоположные и замены АЦП на ЦАП и наоборот. АЦФ и ЦАП симметричны, существуют параллельно и независимо, что подтверждает дуальность АЦФ. Принцип дуальности позволяет отыскать тождественные моменты в данных вариантах, а именно совпадение динамических характеристик фильтров.

Определена полнота класса АЦФ, позволившая составить каталог типовых структур АЦФ в форме справочного пособия по каждому варианту структуры.

Предложено для синтеза всего множества (или полного класса топологически инвариантных структур) эквивалентных структур АЦФ использовать метод инвариантных топологических преобразований линейных структур: взаимный однозначный переход от замкнутой к разомкнутой структуре, от многопетлевой к однопетлевой структуре, от прямой к инверсной структуре (направление движения потоков информации меняется на обратное), который широко используется для синтеза структур аналоговых фильтров, цифровых фильтров, систем управления и т. д. Варианты структур АЦФ получаются путем комбинации двух типов структур: прямой и инверсной, количество которых может быть определено методами комбинаторики, а именно:

$$C_k^n = \frac{n!}{(n-k)!k!}, \quad (6)$$

где  $C_k^n$  - количество вариантов структур АЦФ  $n$ -го порядка с  $k$  обратными связями. Все множество эквивалентных структур АЦФ объединено в каталог типовых структур АЦФ.

В третьей главе разработана методика инженерного проектирования измерительных аналого-цифровых фильтров с использованием математических пакетов аналитического решения Mathematica, Maple и системы визуального программирования Matlab/Simulink.



Рис. 5. Синтез методики проектирования АЦФ

В основу разработки методики проектирования АЦФ (рис. 5) были положены этапы проектирования АФ и ЦФ, которые дополнялись элементами проектирования, отражающими специфику АЦФ по отношению к АФ и ЦФ. Особенностью АЦФ является необходимость расчета частоты дискретизации АЦП и соответствующей погрешности, связанной с эффектом переноса частот. Расчет порядка АЦФ является частью комплексной задачи выбора оптимальной частоты дискретизации входного сигнала. Определены условия целесообразности введения АФ перед АЦП, так как использование аналоговой фильтрации для обеспечения необходимого минимума погрешности переноса спектра вносит дополнительную погрешность. Расчет частоты дискретизации производится из условия получения минимального значения или значения, существенно его превышающего (передискретизация).

Получено аналитическое решение задачи определения условий устойчивости аналого-цифровой структуры по критерию конечности импульсной характеристики. На основе решения разработана методика аналитического расчета коэффициентов передаточных функций цифровых фильтров, введение которых в прямую и



обратный каналы преобразования АЦФ обеспечивает устойчивость замкнутой структуры. Для расчета АЦФ использовался графоаналитический метод линейных сигнальных графов Мэсона. Расчет проводился с использованием математических пакетов Mathematica, Matlab, Maple. Корректность математических расчетов проверена методом имитационного моделирования в системе Simulink, входящей в состав интегрированной среды Matlab.

Разработана обобщенная методика синтеза алгоритмов цифровой коррекции динамической погрешности АЦФ, определяющая условие минимизации динамической погрешности на заданных частотных интервалах и основанная на аналитическом решении системы уравнений с использованием математического пакета Mathematica.

Проведен анализ погрешностей и чувствительности АЦФ. Анализ погрешностей проведен методом имитационного моделирования в системе Simulink путем сопоставления математической модели АЦФ идеальной структуры с реальной моделью, в которой учтены источники погрешностей. Сочетание метода имитационного моделирования и аналитических методов расчета общей погрешности, чувствительности АЦФ позволяет решить задачу выбора оптимальной структуры АЦФ, произвести расчет функциональной и принципиальной схем выбранного АЦФ. В отличие от известных методов определения погрешности восстановленного сигнала, составляющие погрешности АЦФ являются функционалом, определяемым всеми параметрами схемы. Анализ чувствительности проведен с помощью направленных графов Мэсона. Преимущество данного метода заключается в возможности одновременного нахождения всех функций чувствительности, так что влияние изменения параметров на общий коэффициент передачи системы можно легко оценить.

Разработан алгоритм цифровой коррекции погрешности АЦФ, вызванной неточностью задания постоянных времени  $RC$  интеграторов, основанный на выявленных математических зависимостях между амплитудными параметрами переходных процессов при тестовых входных воздействиях и отклонением значений постоянных времени  $RC$  интеграторов от номинальных значений. Данный

алгоритм проверен методом имитационного моделирования в системе Simulink.

**В четвертой главе** приведены структуры измерительных преобразователей замкнутого типа с использованием выявленных потенциальных возможностей АЦФ для решения задач совершенствования низкочастотных акселерометров замкнутого типа при измерении линейных ускорений в навигационных системах контроля динамики движения. Показано, что переход к АЦФ позволяет решить задачу коррекции динамической погрешности и повышения точности методом тестовых сигналов.

Разработан АЦФ, используемый в качестве режекторного фильтра в измерительном канале портативного кардиографа для выделения полезной составляющей электрокардиосигнала с высокой точностью. Режекторный АЦФ является альтернативой АФ и ЦФ при наличии широкополосных помех в измерительном канале кардиографа, мощность которых значительно превышает мощность полезных составляющих сигнала.

Разработаны АЦФ для помехоустойчивой дискретизации с расширенным динамическим диапазоном по сетевой помехе. Их использование актуально для подавления сетевых помех при измерении сигналов низкого уровня, например, в структуре микроэлектронного усилителя биопотенциалов мозга.

**В приложении** приводятся документы о внедрении результатов работы и дополнительные материалы по исследуемой теме.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Предложена и обоснована классификация измерительных фильтров. Выявлено свойство дуальности аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры, которое выделяет их в новый подкласс дуальных фильтров.

2. Определены тенденции развития, пути совершенствования аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры и основополагающие элементы теории аналого-цифровой фильтрации, а также перспективы их использования для совершенствования средств измерения.

3. Разработана математическая модель, и проведен анализ свойств аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры.

4. Математически подтверждена гипотеза о выполнении условия устойчивости для всего класса дуальных фильтров, основанная на известных и вновь полученных аналитических решениях аналого-цифровых фильтров ограниченного порядка. Решена задача поиска необходимых и достаточных условий аналитического решения задачи устойчивости дуальных аналого-цифровых фильтров в общем виде.

5. Определен полный класс дуальных аналого-цифровых фильтров с использованием методов комбинаторики. Предложены варианты использования дуальных аналого-цифровых фильтров в измерительных каналах.

6. Обобщен накопленный опыт по проектированию аналого-цифровых фильтров, и разработаны методики синтеза и инженерного проектирования аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры как элементов средств измерения, опирающиеся на достижения в области информационных технологий: пакетов аналитических расчетов, средств визуального программирования для моделирования аналого-цифровых фильтров, систем автоматизированного проектирования.

7. Проведен анализ погрешностей аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры, и разработаны методы их уменьшения.

8. Разработаны программные модули, которые позволили создать справочник по типовым структурам аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры и могут быть интегрированы в существующие системы автоматизированного проектирования.

9. Основные теоретические результаты по диссертационной работе могут использоваться для решения задач совершенствования датчиковой аппаратуры, средств измерения, систем цифровой обработки и частотно-временного анализа сигналов.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Балыкова А. Ю. Анализ «тонкой структуры» измерительных сигналов с использованием аналого-цифровых фильтров / А. Ю. Балыкова, Б. В. Чувькин // Актуальные проблемы современной науки: Тез. докл. 2-й Междунар. конф. молодых ученых и студентов, посвященной 150-летию Самарской губернии. - Ч. 4. - Самара, 2001. - С. 18.

2. Балыкова А. Ю. Аппаратная реализация сплайн-интерполирующих алгоритмов // Новые информационные технологии и системы: Тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. - Пенза, 2002. - С. 168-172.
3. Балыкова А. Ю. Расчет аналого-цифровых измерительных фильтров с использованием метода эквивалентных импульсных характеристик / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев, Б. В. Чувькин // Человек и общество на рубеже тысячелетий: XIV Междунар. сб. науч. тр. - Воронеж, 2002. - С. 82-84.
4. Балыкова А. Ю. Расчет устойчивости интегрирующих преобразователей с цифровой обратной связью // Методы и средства измерения в системах контроля и управления: Междунар. науч.-техн. конф., посвященная памяти Осадчего Е. П. - Пенза, 2002. - С. 80-81.
5. Балыкова А. Ю. Математическая модель аналого-цифрового фильтра с многопетлевой обратной связью / В. М. Жигачев, Б. В. Чувькин, А. Ю. Балыкова // Методы и средства измерений: Материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. - Ч. 2. - Н.Новгород, 2002. -С.11.
6. Балыкова А. Ю. Математическая модель виброчувствительного кабеля / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев, Б. В. Чувькин // Измерения - 2002: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. - Пенза, 2002. - С. 10-11.
7. Балыкова А. Ю. Синтез помехоустойчивых измерительных каналов сейсмических датчиков / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. - Н.Новгород, 2002. - С. 22-24.
8. Балыкова А. Ю. Аналого-цифровой фильтр Баттерворта / В. М. Жигачев, Б. В. Чувькин, А. Ю. Балыкова // Человек и общество на рубеже тысячелетий: XVI Междунар. сб. науч. тр. - Воронеж, 2002. - С. 192-197.
9. Балыкова А. Ю. Аппаратно-программная реализация алгоритма восстановления интерполяционными сплайнами / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев, Б. В. Чувькин // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. - Запорожский национальный тех. университет, 2002.-С. 21-23.
10. Балыкова А. Ю. Интегрирующий аналого-цифровой преобразователь с программируемой весовой функцией / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев, Б. В. Чувькин // Научная сессия МИФИ-2002. - М.: 2002.-С. 17.

11. Балыкова А. Ю. Использование метода стохастической дискретизации для повышения помехоустойчивости измерительных преобразователей / А.Ю.Балыкова, В.М.Жигачев, Б.В.Чувькин // Научная сессия МИФИ-2002. - М., 2002. - С. 31.

12. Балыкова А. Ю. Исследование устойчивости аналого-цифрового фильтра Баттерворта замкнутой структуры третьего порядка / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев, Б. В. Чувькин // Междунар. науч.-техн. конф. «Измерения-2002». - Пенза, 2002. - С. 8-10.

13. Балыкова А. Ю. Моделирование в среде MATLAB 6.0 Simulink 4.0 измерительных каналов датчиковой аппаратуры / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. - Н. Новгород, 2002. - С. 19.

14. Балыкова А. Ю. Моделирование стохастического алгоритма измерения квазипериодических сигналов / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев, Б. В. Чувькин // Методы и средства измерений: Материалы ГУ Всерос. науч.-техн. конф. - Ч. 2. - Н. Новгород, 2002. - С. 12.

15. Балыкова А. Ю. Перестраиваемый полосовой фильтр с использованием ШИМ-модуляции / А.Ю.Балыкова, В.М.Жигачев, Б.В.Чувькин//НаучнаясессияМИФИ-2002.-М.,2002.-С.31.

16. Балыкова А. Ю. Расчет корректирующего фильтра для аналого-цифрового фильтра замкнутой структуры / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. - Н. Новгород, 2002. - С. 21.

17. Балыкова А. Ю. Сплайн - интерполирующий АЦФ / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев, Б. В. Чувькин // Человек и общество на рубеже тысячелетий: XVI Междунар. сб. науч. тр. - Воронеж, 2002. - С. 192-197.

18. Балыкова А. Ю. Фильтрация периодических помех методом компенсации / А. Ю. Балыкова, В. М. Жигачев // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. - Н. Новгород, 2002. - С. 20.

19. Балыкова А. Ю. Распределенная обработка сигналов в беспроводных сенсорных сетях на базе аналого-цифровых вейвлет-фильтров / А. Ю. Балыкова, Б. В. Чувькин // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Доклады V Междунар. конф. - Москва, 2003. - С. 58-61.

20. Балыкова А. Ю. Исследование топологических свойств дуальных аналого-цифровых фильтров // Тр. Междунар. юбилейного симпозиума: в 2-х томах / Под ред. д.т.н., проф. М. А. Щербакова. - Пенза: ИИЦ ПГУ, 2003. - С. 329-332.

21. Балыкова А. Ю. Методика расчета аналого-цифровых фильтров // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. / Под ред. д.т.н., проф. М. А. Щербакова. - Пенза: ИИЦ ЛГУ, 2004. - С. 309-311.

22. Балыкова А. Ю. Многофункциональный аналого-цифровой фильтр // Современные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов: Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. - Пенза: ИИЦ ПГУ, 2004. - С. 234-239.

23. Балыкова А. Ю. Паутина датчиков - новая концепция построения ТСО / А. Ю. Балыкова, А. Д. Грачев, Б. В. Чувькин // Проблемы объектовой охраны: Сб. науч. тр. - Пенза: ИИЦ ПГУ, 2004. - С.11-20.

24. Балыкова А. Ю. Построение измерительных каналов датчиковой аппаратуры на базе аналого-цифровых фильтров // Актуальные проблемы современной науки: Тр. V Междунар. конф. молодых ученых и студентов. - Самара, 2004. - С. 6-9.

25. Руководство по расчету и проектированию аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры / Балыкова А. Ю. - ПГУ. - Пенза, 2004. - 91 с. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 09.06.04, № 982 - В2004.

26. Балыкова А. Ю. Анализ погрешностей и чувствительности аналого-цифровых фильтров замкнутой структуры // Современные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов: Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. - Пенза: ИИЦ ПГУ, 2004. - С.262-266.

27. Balykova Alexandra U. Analog-digital filters on the basis of low power smart sensors / Alexandra U. Balykova, Boris V. Chuvykin // Proc. of 2nd IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications (ICCSC 2004), June 30 - July 2. - Moscow, MTUSI, 2004. - P. 30-35.

*БАЛЫКОВА Александра Юрьевна*

**АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ФИЛЬТРЫ  
В ЗАДАЧАХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ**

Специальность 05.11.01 - Приборы и методы измерения  
(электрические величины)

Редактор *Т. В. Веденеева*

Технический редактор *Н. А. Вьялкова*

Корректор *С. Н. Сухова*

Компьютерная верстка *М. Б. Жучковой*

ИД №06494 от 26.12 01

Сдано в производство 19.04.2005. Формат 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16.

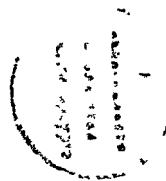
Заказ № 247. Тираж 100.

Издательство Пензенского государственного университета.

440026, Пенза, Красная, 40.

Отпечатано в типографии ПГУ

05.09-05.11



19 МАЙ 2005

- 1337