

на правах рукописи

КАУЛИО Владимир Валерьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ В СОСТАВЕ  
ДЕЛЬТА-СИГМА АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Специальность: 05.11.16 –  
"Информационно-измерительные и управляющие системы"  
(энергетика)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2003

Работа выполнена на кафедре "Измерительные информационные технологии" Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор Гутников Валентин Сергеевич

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор  
Алексеев Владимир Васильевич

– кандидат технических наук, доцент  
Кривченко Татьяна Игоревна

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт  
"Электроизмерительных приборов" (ВНИИЭП)

Защита диссертации состоится "4" декабря 2003 г. в 13.30 на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая, 21, ауд. 535.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан "3" ноября 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
д.т.н., профессор

Малыхина Г.Ф.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность.**

Дельта-сигма аналого-цифровые преобразователи ( $\Delta\Sigma$ АЦП) находят широкое применение в измерительных каналах информационно-измерительных систем, используемых в частности для решения задач измерения энергетических параметров мощных источников и приемников электрической энергии, а также измерения мощности и энергии слабых электрических и электромагнитных сигналов. Измерительные  $\Delta\Sigma$ АЦП отличаются относительно невысокой стоимостью, высокой точностью аналого-цифрового преобразования и высокой разрешающей способностью, разрядность серийно выпускаемых  $\Delta\Sigma$  преобразователей достигает 24 бит. Исследованию и развитию измерительных  $\Delta\Sigma$ АЦП посвящена данная работа.

Свойства  $\Delta\Sigma$ АЦП определяются качеством  $\Delta\Sigma$  модулятора и свойствами цифрового фильтра.  $\Delta\Sigma$  модулятор осуществляет квантование входного аналогового сигнала с частотой дискретизации, значительно превышающей частоту Котельникова, и формирует спектр шума квантования, смещая основную часть его энергии в область высоких частот. Цифровой фильтр, предназначенный для удаления шума квантования из измеряемого сигнала, определяет степень уменьшения погрешности квантования аналого-цифрового преобразователя, качество подавления внешних помех и в значительной мере обуславливает быстродействие преобразователя. Развитие  $\Delta\Sigma$ АЦП идет по двум направлениям: совершенствование  $\Delta\Sigma$  модуляторов и цифровых фильтров, входящих в  $\Delta\Sigma$  преобразователь. В настоящее время большинство публикаций, посвященных  $\Delta\Sigma$ АЦП, освещают особенности построения  $\Delta\Sigma$  модуляторов. Информация о фильтрах, применяемых в интегральных  $\Delta\Sigma$ АЦП, сосредоточена, главным образом, в обширной технической документации. Поэтому актуальным является исследование цифровых фильтров в составе  $\Delta\Sigma$ АЦП, выпускаемых современными мировыми фирмами, с целью определения тенденций их развития и выявления путей их совершенствования.

Наличие развитого математического аппарата теории цифровой фильтрации, а также стремительное развитие современных программных и аппаратных вычислительных средств создают мощный потенциал для исследования, анализа и совершенствования цифровых фильтров в составе  $\Delta\Sigma$ АЦП с целью повышения точности аналого-цифрового преобразования в измерительном канале.

### **Цель работы.**

Исследование и совершенствование цифровых фильтров в составе современных измерительных  $\Delta\Sigma$ АЦП для повышения точности аналого-цифрового преобразования в измерительном канале путем уменьшения динамической погрешности и эффективного подавления внешних помех.

Для достижения поставленной цели было выполнено:

1. Исследование возможностей современных программно-аппаратных средств аналого-цифровой обработки информации для применения в измерительном канале на базе  $\Delta\Sigma$ АЦП и определение тенденций развития современных интегральных  $\Delta\Sigma$  преобразователей.

2. Исследование амплитудно-частотных характеристик и проведение сравнительного анализа помехоподавляющих свойств цифровых фильтров в составе измерительных  $\Delta\Sigma$ АЦП.

3. Развитие методов повышения точности  $\Delta\Sigma$ АЦП за счет подавления внешних сетевых помех с линейчатым спектром двухступенчатыми фильтрами.

4. Разработка метода повышения точности  $\Delta\Sigma$ АЦП путем масштабирования импульсных характеристик цифровых Sinc-фильтров.

5. Вывод формул для расчета и практической реализации цифровых масштабирующих фильтров на базе Sinc-фильтров произвольного порядка.

6. Разработка средств для синтеза, имитационного моделирования, практической реализации, тестирования и анализа  $\Delta\Sigma$ АЦП на основе существующих и новых цифровых фильтров.

7. Исследование качества подавления погрешности квантования в  $\Delta\Sigma$ АЦП на базе разработанных цифровых масштабирующих фильтров и цифровых фильтров, подавляющих помехи с линейчатым спектром.

#### **Методы исследований.**

Для решения поставленных задач применялись методы теории цифровой фильтрации, спектрального анализа и оценки погрешностей, методы интегрального исчисления и интерполяции, методы моделирования  $\Delta\Sigma$ АЦП. Основные теоретические результаты проверены экспериментально. Имитационное моделирование  $\Delta\Sigma$ АЦП, анализ амплитудно-частотных характеристик цифровых фильтров, анализ погрешностей и помехоподавляющих свойств, а также разработка цифровых масштабирующих фильтров производились с применением системы математических расчетов MATLAB версии 6.5 и среды программирования Visual Studio версии 6.0 на языке программирования Visual C++.

#### **Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработан метод уменьшения динамической погрешности  $\Delta\Sigma$ АЦП путем масштабирования импульсной характеристики Sinc-фильтра.

2. Получены аналитические зависимости для расчета импульсных характеристик цифровых масштабирующих фильтров, позволяющие осуществлять синтез измерительного канала на их основе и проводить исследования их помехоподавляющих свойств.

3. Развита метод цифровой обработки сигнала, позволяющий одновременно подавлять периодические помехи с различными некротными частотами, с целью повышения точности аналого-цифрового преобразования в измерительном канале на базе  $\Delta\Sigma$  модуляции.

### **Практическая значимость:**

1. Проведенное исследование амплитудно-частотных характеристик цифровых фильтров, входящих в состав современных измерительных  $\Delta\Sigma$  АЦП, позволяет синтезировать их структуры, а также проводить имитационное моделирование и синтез новых  $\Delta\Sigma$  преобразователей с целью повышения точности аналого-цифрового преобразования.

2. Использование развитого в работе метода применения цифровых фильтров, одновременно подавляющих две периодические помехи с некратными частотами, позволяет повышать точность аналого-цифрового преобразования в измерительном канале на базе  $\Delta\Sigma$  модуляции.

3. Выведенные общие формулы для расчета цифровых масштабирующих фильтров позволяют эффективно осуществлять их практическую реализацию в составе  $\Delta\Sigma$  АЦП с целью одновременного получения быстрых результатов измерений ограниченной разрядности и высокоточных результатов при ограниченном быстродействии.

4. Разработанные в работе быстродействующие программные средства для имитационного моделирования  $\Delta\Sigma$  АЦП позволяют производить сравнительный анализ цифровых фильтров при практической реализации измерительного канала путем расчета максимального и среднеквадратического значений погрешности квантования.

### **На защиту выносятся:**

1. Метод повышения точности  $\Delta\Sigma$  АЦП одновременным подавлением периодических помех с двумя некратными частотами с помощью двухступенчатого цифрового фильтра.

2. Метод уменьшения динамической погрешности  $\Delta\Sigma$  АЦП путем масштабирования импульсной характеристики Sinc-фильтра.

3. Формулы для расчета импульсных характеристик цифровых масштабирующих фильтров.

4. Программное обеспечение для исследования погрешности квантования аналого-цифрового преобразования на базе  $\Delta\Sigma$  модуляции.

### **Апробация работы.**

Результаты работы докладывались на международной конференции "Sensor & Systems" (Нюрнберг, Германия, 2001 г.), на международной конференции "Датчики и системы" (С.-Петербург, Россия, 2002 г.), обсуждались на Политехническом симпозиуме: "Молодые ученые – промышленности Северо - Западного Региона" (С.-Петербург, 2002 г.).

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 4 статьи и тезисы докладов на 3 конференциях.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержит 121 страницу, включает 80 рисунков, 4 таблицы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определен объект исследований, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования.

### **Глава 1.**

Развитие современной аналого-цифровой интегральной электроники позволяет создавать микросхемы, интегрирующие в себе такие функциональные узлы измерительного канала, как аналоговый нормирующий преобразователь, аналого-цифровой преобразователь и процессор обработки цифрового кода. При совершенствовании средств измерений большое внимание уделяется вопросам увеличения интеграции узлов измерительного канала с целью уменьшению размера и потребляемой мощности измерительной системы, а также унификации электрических характеристик элементов. Примером реализации данного подхода являются программируемые аналого-цифровые микросхемы, которые построены с применением технологии переключаемых конденсаторов и состоят из конфигурируемых аналоговых и цифровых блоков. Цифровые блоки предназначены для обеспечения различных интерфейсов обмена данными, аналоговые блоки служат для реализации таких элементов как усилители с программируемым коэффициентом усиления, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, в том числе на базе  $\Delta\Sigma$  модуляции. Можно предположить, что по аналогии с широким распространением интегральных схем с программируемой цифровой логикой данное направление найдет широкое применение во многих областях обработки аналоговых и цифровых сигналов.

Основным типом аналого-цифровых преобразователей, предназначенных для применения в измерительных системах, в настоящее время являются  $\Delta\Sigma$ АЦП, поскольку их схемотехника хорошо согласуется с технологией изготовления интегральных схем, они обеспечивают высокую точность преобразования и возможность гибкого обмена точности на быстродействие. В работе выполнен обзор современных интегральных микросхем, предназначенных для построения измерительных каналов, и рассмотрены особенности применения  $\Delta\Sigma$  преобразователей в составе программируемых аналого-цифровых микросхем. Автором, в частности, разработаны системы измерения напряжения с применением интегральных нормирующих преобразователей и микроконтроллеров с интегрированными  $\Delta\Sigma$ АЦП [5, 6, 7]. Для определения тенденций развития  $\Delta\Sigma$  преобразователей и способов их реализации в работе был выполнен сравнительный анализ современных интегральных  $\Delta\Sigma$ АЦП следующих фирм: Analog Devices Inc., Texas Instruments Inc., Linear Technology Corp., Maxim Integrated Products, Microchip Technology Inc., Cypress MicroSystems Inc., Xemics SA. Сводная таблица  $\Delta\Sigma$ АЦП, приведенная в работе, содержит более 60 наименований  $\Delta\Sigma$  преобразователей с

указанием разрядности, типа  $\Delta\Sigma$  модулятора и цифрового фильтра, частоты следования выходных отсчетов и степени подавления помех.

Известно, что отличительной особенностью  $\Delta\Sigma$  преобразователей является возможность технологически удобного обмена времени преобразования на точность. Данная возможность реализуется в современных  $\Delta\Sigma$ АЦП путем использования цифровых фильтров с программируемой длиной импульсной характеристики. Это позволяет настраивать  $\Delta\Sigma$ АЦП для получения, например, высокоточных измерений с ограниченной частотой выходных отсчетов или для выполнения быстрых измерений ограниченной точности. Важной задачей измерительных технологий является анализ измеряемых параметров как в стационарном режиме работы системы, так и в переходном или аварийном режиме. Это требуется, например, при измерении энергетических параметров в системах контроля и диагностики для оперативного обнаружения состояний системы, близких к критическим. В серийно выпускаемых  $\Delta\Sigma$ АЦП данная задача решается с использованием специальных механизмов переключения цифровых фильтров. Поэтому актуальной является задача разработки новых цифровых фильтров в составе  $\Delta\Sigma$ АЦП, позволяющих без увеличения аппаратных затрат обеспечивать как быстрые измерения ограниченной точности, так и точные измерения при ограниченном быстродействии.

При разработке измерительных систем для обработки аналоговых сигналов, требующих высокой точности преобразования, необходимо учитывать требования к подавлению внешних помех. С этой целью во многих  $\Delta\Sigma$  преобразователях совместно с основным цифровым фильтром применяются дополнительные дискретные фильтры, образуя, таким образом, один двухступенчатый цифровой фильтр. Одним из путей развития цифровых фильтров в составе  $\Delta\Sigma$ АЦП является обеспечение возможности подавления помех как с частотой 50 герц, так и 60 герц. В современных  $\Delta\Sigma$ АЦП данная задача решается за счет снижения скорости преобразования, либо уменьшения степени подавления сетевой помехи. В настоящее время известны фильтры, предназначенные для эффективного подавления помех с линейчатым спектром, к которым относятся внешние сетевые помехи. Актуальной является задача исследования применения таких фильтров в составе  $\Delta\Sigma$ АЦП с целью определения их влияния на степень подавления погрешности квантования.

## **Глава 2.**

Поскольку техническая документация на выпускаемые  $\Delta\Sigma$ АЦП предназначена в основном для описания правил работы с изделием, в ней не содержится полной информации о структуре цифровых фильтров, что усложняет процесс их анализа. С другой стороны, для цифрового фильтра в составе  $\Delta\Sigma$  преобразователя приводятся диаграммы амплитудно-частотных характеристик. Поскольку амплитудно-частотные характеристики фильтров однозначно соответствуют принципу их действия, они были использованы для

получения импульсных характеристик цифровых фильтров и исследования их помехоподавляющих свойств. Сложность подобного анализа состоит в том, что определять импульсную характеристику фильтра в большинстве случаев требуется по графическому представлению амплитудно-частотной характеристики результирующего фильтра при отсутствии аналитического выражения амплитудно-частотной характеристики и структуры образующих фильтров. Поэтому анализ цифровых фильтров выполнялся методом разработки моделей цифровых фильтров и последующим визуальным анализом их амплитудно-частотных характеристик.

С этой целью в системе математических расчетов MATLAB было разработано соответствующее программное обеспечение для моделирования амплитудно-частотных и импульсных характеристик цифровых фильтров. В результате исследования были получены аналитические представления импульсных характеристик цифровых фильтров в составе измерительных  $\Delta\Sigma$ АЦП и предложена классификация  $\Delta\Sigma$  преобразователей по виду импульсной характеристики цифрового фильтра (см. рис. 1).

В отличие от традиционного обозначения порядка дискретного фильтра количеством его отсчетов, порядком  $L$  Sinc-фильтра принято считать показатель степени  $L$  его амплитудно-частотной характеристики согласно формуле (1):

$$|H(f)| = \left| \frac{\sin(N \pi \frac{f}{f_s})}{N \sin(\pi \frac{f}{f_s})} \right|^L, \quad (1)$$

где  $f_s$  – частота работы  $\Delta\Sigma$  модулятора;  $L$  – порядок Sinc-фильтра;  $N$  – количество импульсов импульсной характеристики Sinc-фильтра первого порядка, которая представляет собой набор импульсов равной амплитуды, следующих с частотой дискретизации  $f_s$ .

В энергетике при разработке измерительных систем для обработки аналоговых сигналов, требующих высокой точности преобразования, важной задачей является подавление внешних сетевых помех. Спектр сетевой помехи, вызываемой влиянием сетевого напряжения, имеет линейчатый характер: мощность помехи сконцентрирована на основной частоте  $f_{E1}$  (частоте питающей сети) и кратных ей частотах высших гармоник  $f_{Ek}$ .

В  $\Delta\Sigma$ АЦП подавление внешних помех возможно за счет встроенного в него цифрового фильтра. Для подавления сетевой помехи, как правило, применяются цифровые фильтры, импульсная характеристика которых представляет собой два импульса, разнесенных на нечетное число полупериодов помехи. Амплитудно-частотная характеристика подобных фильтров описывается формулой (2):

$$|H(f)| = |\cos(\pi f T)|, \quad (2)$$

где  $f$  – частота;  $T$  – расстояние между импульсами импульсной характеристики фильтра. Поэтому такие фильтры в диссертации условно названы косинусными (Cos) фильтрами, хотя развитие этих фильтров приводит к получению более сложных амплитудно-частотных характеристик.

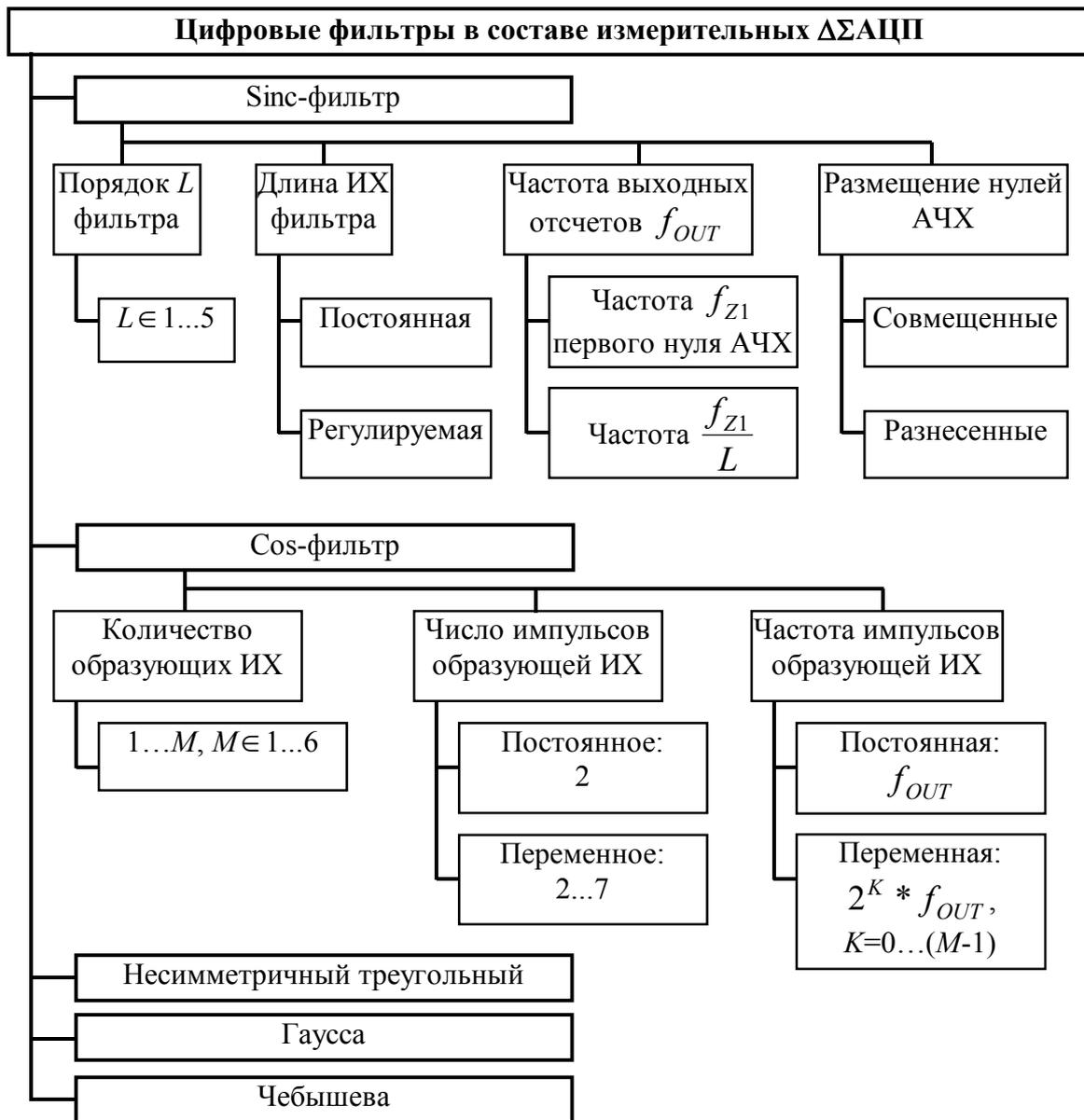


Рис. 1. Классификация цифровых фильтров в составе измерительных  $\Delta\Sigma$  АЦП по виду импульсной характеристики.

В составе  $\Delta\Sigma$  АЦП Cos-фильтры отдельно не применяются, они используются только совместно с другими фильтрами в качестве дополнительного фильтра. Проведенный в работе анализ показал, что в современных  $\Delta\Sigma$  АЦП совместно с основным, например Sinc-фильтром, применяются цифровые фильтры двух типов. Импульсные характеристики цифровых фильтров первого типа образуются сверткой импульсных характеристик, состоящих из двух импульсов, причем расстояние между

импульсами каждой последующей импульсной характеристики увеличивается в два раза. Амплитудно-частотная характеристика фильтров данного типа может быть выражена формулой (3):

$$|H(f)| = \left| \prod_{i=1}^M \cos(2^{(i-1)} \pi f T) \right|, \quad (3)$$

где  $f$  – частота;  $M$  – количество образующих импульсных характеристик;  $T$  – минимальное расстояние между импульсами, которое равняется длине импульсной характеристики основного цифрового фильтра, входящего в состав  $\Delta\Sigma$ АЦП. Данные фильтры можно отнести к классу Cos-фильтров. Импульсные характеристики цифровых фильтров второго типа образуются сверткой импульсных характеристик с переменным числом импульсов, расстояние между которыми одинаково и равно длине импульсной характеристики основного фильтра, число импульсов каждой последующей импульсной характеристики увеличивается на единицу.

Одно из направлений развития  $\Delta\Sigma$ АЦП заключается в совершенствовании цифровых фильтров с целью повышения степени подавления внешних сетевых помех и обеспечения возможности подавления помех как с частотами 50 герц, так и 60 герц. В современных  $\Delta\Sigma$  преобразователях данная возможность реализуется двухступенчатыми фильтрами. На рис. 2 изображены импульсная (см. рис.2, а) и амплитудно-частотная (см. рис. 2, б) характеристики двухступенчатого фильтра, состоящего из Sinc-фильтра третьего порядка и Cos-фильтра с импульсной характеристикой из двух импульсов. Горизонтальными линиями обозначены расчетные значения уровней подавления помех на частотах  $(50 \pm 1)$  герц и  $(60 \pm 1,2)$  герц, они составляют  $-70$  децибел и  $-65$  децибел соответственно.

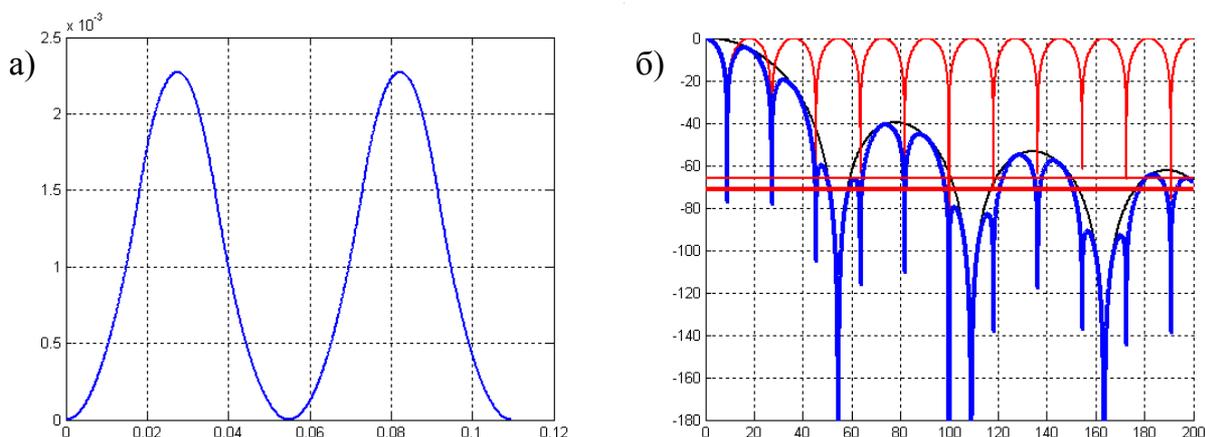


Рис. 2. Импульсная (а) и амплитудно-частотная (б) характеристики двухступенчатого фильтра на базе косинусного фильтра.

Известно, что для подавления сетевых помех могут успешно применяться биномиальные фильтры. Однако до настоящего времени их свойства применительно к  $\Delta\Sigma$ АЦП не были исследованы. Биномиальные фильтры являются разновидностью Cos-

фильтров, их импульсные характеристики образуются сверткой импульсных характеристик, состоящих из двух импульсов с постоянной частотой их следования. Амплитуды импульсов рассчитываются по формуле биномиальных коэффициентов.

С целью подавления двух периодических помех с двумя некрратными частотами в данной работе предлагается строить цифровой фильтр  $\Delta\Sigma$  преобразователя на базе Sinc-фильтра и биномиального фильтра. Длина импульсной характеристик Sinc-фильтра порядка  $L$  настраивается таким образом, чтобы первый нуль амплитудно-частотной характеристики совпадал с частотой помехи  $f_{E1,1}$ . Биномиальным фильтром осуществляется подавление помехи с частотой  $f_{E1,2}$ . Результирующая импульсная характеристика такого биномиального фильтра образуется сверткой из  $M$  образующих импульсных характеристик, представляющих собой два импульса. Расстояние между импульсами равно половине периода подавляемой помехи с частотой  $f_{E1,2}$ . Амплитудно-частотная характеристика результирующего фильтра может быть представлена формулой (4):

$$|H(f)| = \frac{\left| \frac{f_{E1,1} \sin\left(\frac{\pi f}{f_{E1,1}}\right)}{f_S \sin\left(\pi \frac{f}{f_S}\right)} \right|^L \cdot \left| \cos\left(\frac{\pi f}{2 f_{E1,2}}\right) \right|^M, \quad (4)$$

где  $f$  – частота;  $f_S$  – частота дискретизации. На рис. 3 изображены импульсная (см. рис. 3, а) и амплитудно-частотная (см. рис. 3, б) характеристики цифрового фильтра на базе Sinc-фильтра третьего порядка и биномиального фильтра при значении  $M$ , равного четырем.

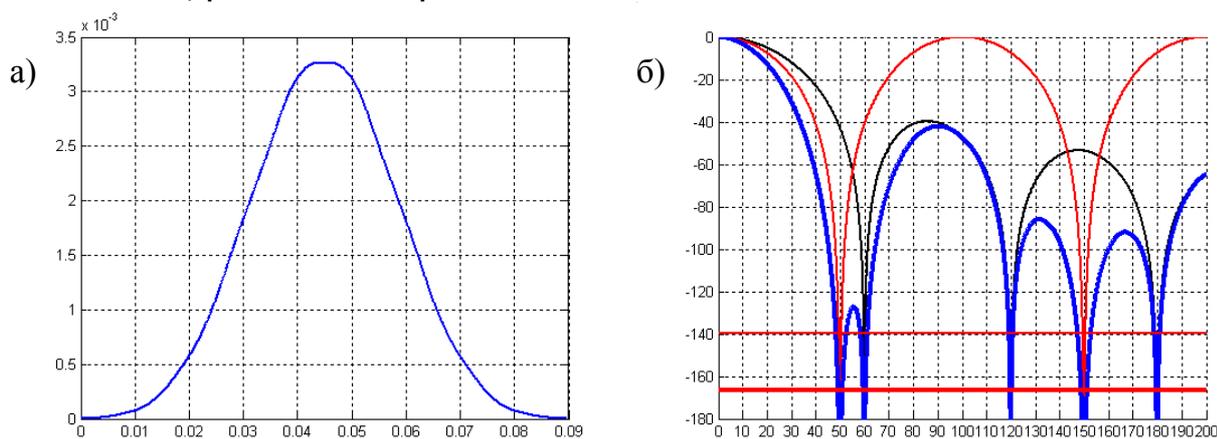


Рис. 3. Импульсная (а) и амплитудно-частотная (б) характеристики двухступенчатого фильтра на базе биномиального фильтра.

Горизонтальными линиями обозначены расчетные значения уровней подавления помех на частотах  $(50 \pm 1)$  герц и  $(60 \pm 1,2)$  герц, они составляют  $-165$  децибел и  $-140$  децибел соответственно, то есть степень подавления

помех увеличивается по сравнению с рассмотренным Cos-фильтром на 95 децибел и 75 децибел. При этом быстродействие  $\Delta\Sigma$  преобразователя увеличивается на 20%. В случае применения биномиального фильтра точность преобразования в смысле среднеквадратического значения погрешности квантования возрастает на 40% при использовании  $\Delta\Sigma$  модулятора первого порядка и на 20% при использовании  $\Delta\Sigma$  модулятора второго порядка. Уменьшение диапазона измерения на 5% позволяет достигать повышения точности на 40% и 50% при использовании  $\Delta\Sigma$  модуляторов первого и второго порядков соответственно.

В результате можно сделать вывод, что предлагаемый способ позволяет повысить точность и функциональность аналого-цифрового преобразования в измерительном канале с применением  $\Delta\Sigma$ АЦП за счет повышения степени подавления двух периодических помех с некратными частотами, увеличения степени подавления погрешности квантования и увеличения скорости преобразования.

### **Глава 3.**

Одной из актуальных задач аналого-цифрового преобразования в измерительном канале является задача одновременного обеспечения высокой точности измерений и высокой скорости реакции системы на изменение входного аналогового сигнала. Это требуется в энергетике, например, для быстрой индикации измеряемых значений с целью оперативного автоматического обнаружения аварийных ситуаций и вместе с тем получения высокоточных средних значений измеряемого сигнала, а также при многоканальных измерениях и т.п.

В результате обзора современных высокоточных  $\Delta\Sigma$  преобразователей выяснилось, что наиболее распространенными цифровыми фильтрами в составе  $\Delta\Sigma$ АЦП являются Sinc-фильтры. Импульсные характеристики таких фильтров образуются сверткой нескольких прямоугольных импульсов во временной области. При этом обмен быстродействия  $\Delta\Sigma$ АЦП на точность производится изменением длины прямоугольных импульсов. Увеличение длины импульсной характеристики цифрового фильтра повышает степень подавления погрешности квантования. Поскольку в современных  $\Delta\Sigma$ АЦП настройка длины импульсной характеристики цифрового фильтра осуществляется редактированием программируемых регистров преобразователя, это позволяет производить настройку  $\Delta\Sigma$ АЦП для получения либо высокой скорости, либо высокой точности аналого-цифрового преобразования, но при этом отсутствует возможность одновременного получения высокоточных измеренных значений и в то же время анализа быстро протекающих процессов. Для решения этой задачи в интегральных  $\Delta\Sigma$ АЦП AD7730/31 фирмы Analog Devices, построенных на основе Sinc-фильтра третьего порядка, производится автоматическое переключение различных фильтров второй степени в зависимости от скорости изменения входного сигнала.

В данной работе предложен метод, названный масштабированием, который позволяет технологически удобно и эффективно уменьшать динамическую погрешность  $\Delta\Sigma\Delta$  и одновременно обеспечивать высокую точность измерения значений, характеризующих среднее значение сигнала. Суть метода масштабирования заключается в следующем. Длина импульсной характеристики цифрового Sinc-фильтра настраивается для минимального времени измерения с приемлемой точностью с целью обеспечения малой динамической погрешности аналого-цифрового преобразования. Выходные отсчеты Sinc-фильтра обрабатываются масштабирующим фильтром, который осуществляет увеличение длины импульсной характеристики Sinc-фильтра без искажения формы (масштабирование) с целью уменьшения погрешности квантования. Это позволяет получать высокоточные измеренные значения, соответствующие медленным процессам. Общая сложность результирующего цифрового фильтра с использованием метода масштабирования оказывается практически такой же, как в случае реализации классического Sinc-фильтра, обеспечивающего аналогичную степень подавления погрешности квантования для низкочастотного сигнала, но исключающего возможность анализа быстропротекающих процессов.

В процессе вывода общей формулы для расчета параметров масштабирующих фильтров для Sinc-фильтров произвольного порядка разработана методика для автоматизированного расчета аналитических представлений импульсных характеристик Sinc-фильтра порядка  $L$ . Данная методика позволила использовать для выполнения поставленной задачи мощный аппарат символьных вычислений системы математических расчетов MATLAB. С целью сохранения формы масштабируемой импульсной характеристики коэффициент децимации выходных отсчетов Sinc-фильтра порядка  $L$  не должен превышать значения  $N$ , равного длине его образующей импульсной характеристики (см. формулу (1)). Количество импульсов  $n$  импульсной характеристики соответствующего масштабирующего фильтра рассчитывается по формуле (5):

$$n = L(W - 1) + 1, \quad (5)$$

где  $W$  – коэффициент масштабирования, то есть увеличения длины импульсной характеристики Sinc-фильтра. Масштабирование осуществляется суммированием выходных отсчетов Sinc-фильтра с определенными весовыми коэффициентами, соответствующим амплитудам импульсов импульсной характеристики масштабирующего фильтра. В основу общего соотношения для расчета параметров масштабирующих фильтров положена выведенная в работе формула (6) масштабирующего многочлена  $I_d(x)$ :

$$I_d(x) = \frac{(x + d - 1)!}{d!(x - 1)!}, x \in \left[1, \frac{n + n \bmod 2}{2}\right], \quad (6)$$

где  $d$  – степень многочлена,  $x$  – аргумент многочлена,  $n$  – количество импульсов импульсной характеристики масштабирующего фильтра.

Общая формула (7) для расчета целочисленных значений амплитуд импульсов импульсной характеристики масштабирующего фильтра выведена путем анализа импульсных характеристик Sinc-фильтров с 1 по 8 порядок с увеличением длины импульсной характеристики от 2 до 7 раз:

$$K_{L,i} = \begin{cases} I_{L-1}(i), i \in [1, W]; \\ I_{L-1}(i) - I_1(L)K_{L,i-N}, i \in [W+1, 2W]; \\ I_{L-1}(i) - I_2(L)K_{L,i-2N}, i \in [2W+1, 3W]; \\ \dots \\ I_{L-1}(i) - I_j(L)K_{L,i-j \cdot W}, i \in [j \cdot W + 1, \frac{n + n \bmod 2}{2}], j = \left\lfloor \frac{n}{2W} \right\rfloor, \end{cases} \quad (7)$$

где  $i$  – номер импульса импульсной характеристики масштабирующего фильтра;  $L$  – порядок Sinc-фильтра;  $W$  – коэффициент увеличения длины импульсной характеристики Sinc-фильтра;  $n$  – количество импульсов импульсной характеристики масштабирующего фильтра;  $\bmod$  – операция вычисления остатка от деления;  $\lfloor \rfloor$  – операция целочисленного деления;  $I_{L-1}(i)$  и  $I_j(L)$  – значения масштабирующего многочлена со степенями  $L-1$  и  $j$  соответственно. Данная формула позволяет вычислить значения амплитуд для первой половины импульсов, остальные значения определяются по формуле симметрии (8):

$$K_{L,i} = K_{L,n-i+1}, i \in [1, \frac{n + n \bmod 2}{2}]. \quad (8)$$

Затем значения амплитуд импульсов  $K_{L,j}$  импульсной характеристики масштабирующего фильтра нормируются для обеспечения равенства единице площади под результирующей импульсной характеристикой путем деления каждого коэффициента на сумму всех коэффициентов.

С целью упрощения расчета параметров масштабирующих фильтров может быть использовано полученное в работе итерационное соотношение (9) для вычисления значений масштабирующего многочлена:

$$I_d(x) = I_d(x-1) \cdot \left( \frac{d}{x-1} + 1 \right), I_d(1) = 1. \quad (9)$$

Таким образом, многочлены  $I_{L-1}(i)$  и  $I_j(L)$  в формуле (7) могут быть рассчитаны по формулам (10) и (11):

$$I_{L-1}(i) = I_{L-1}(i-1) \cdot \left( \frac{L-1}{i-1} + 1 \right), i \in [2, \frac{n + n \bmod 2}{2}], I_{L-1}(1) = 1, \quad (10)$$

$$I_j(L) = I_j(L-1) \cdot \left( \frac{j}{L-1} + 1 \right), I_j(1) = 1. \quad (11)$$

Следовательно, для синтеза масштабирующих фильтров требуется знать два параметра: порядок  $L$  Sinc-фильтра и коэффициент  $W$  увеличения длины его импульсной характеристики.

Увеличение длины импульсной характеристики Sinc-фильтров 3 порядка в 4 раза производится суммированием его выходных отсчетов с весовыми коэффициентами  $\{1, 3, 6, 10, 12, 12, 10, 6, 3, 1\}$ , импульсной характеристики Sinc-фильтра 4 порядка в 3 раза –  $\{1, 4, 10, 16, 19, 16, 10, 4, 1\}$ . Масштабирование данных импульсных характеристик проиллюстрировано на рис. 4. Таким образом, масштабирующие фильтры просты и удобны в практической реализации.

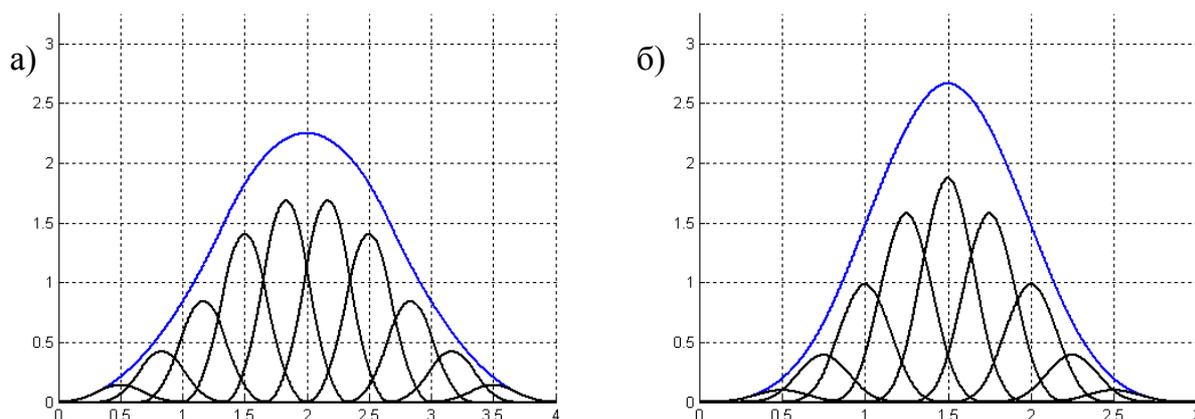


Рис. 4. Масштабирование импульсных характеристик Sinc-фильтров 3 (а) и 4 (б) порядков в 4 (а) и 3 (б) раза.

Для расчета параметров масштабирующих фильтров написаны программы на языке программирования системы математических расчетов MATLAB. Разработан алгоритм быстрого вычисления параметров масштабирующих фильтров и исследованы их помехоподавляющие свойства. Полученные в работе общие формулы для расчета параметров масштабирующих фильтров позволяют эффективно реализовать их на практике с применением современных программно-аппаратных средств и серийно выпускаемых  $\Delta\Sigma$ АЦП.

#### Глава 4.

Данная глава посвящена разработке средств имитационного моделирования  $\Delta\Sigma$ АЦП с целью исследования подавления погрешности квантования цифровыми фильтрами, входящими в состав современных высокоточных измерительных  $\Delta\Sigma$ АЦП, и проверки работы предложенных в работе новых фильтров. Проведенный анализ амплитудно-частотных и импульсных характеристик цифровых фильтров позволил синтезировать модели  $\Delta\Sigma$ АЦП и произвести сравнительную оценку точности аналого-цифрового преобразования. Точность  $\Delta\Sigma$  преобразователей оценена расчетом максимального и среднеквадратического значений абсолютной приведенной погрешности квантования.

Для исследования качества аналого-цифрового преобразования с применением цифровых масштабирующих фильтров, а также биномиальных и Cos-фильтров разработаны программные средства для имитационного

моделирования и анализа погрешностей квантования  $\Delta\Sigma$ АЦП. Разработанные средства выполнены в среде проектирования Visual Studio версии 6.0 с использованием языка программирования Visual C++ на платформе Win32, а также в системе математических расчетов MATLAB. Общая структура разработанных средств представлена на рис. 5.

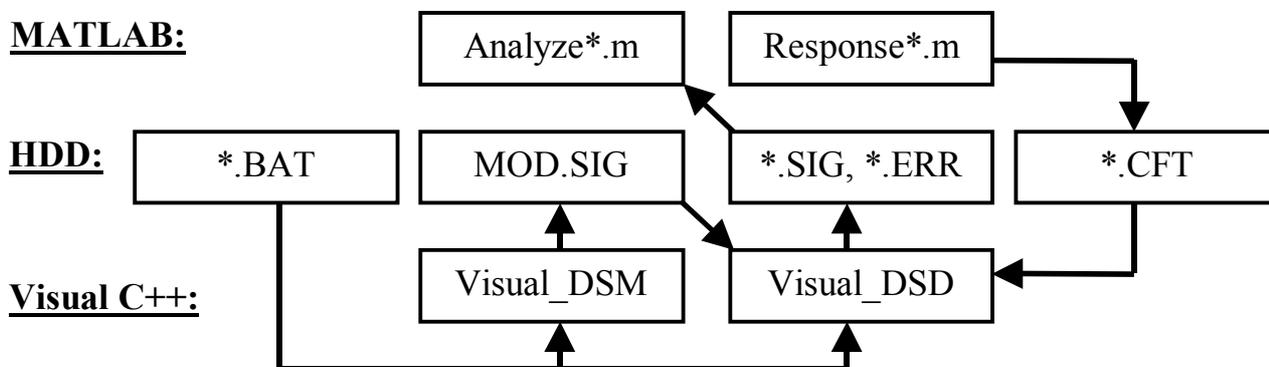


Рис. 5. Структурная схема программного обеспечения.

С целью обеспечения высокой скорости проведения эксперимента  $\Delta\Sigma$  модуляция тестового сигнала, цифровая фильтрация и расчет погрешности квантования осуществляется консольными приложениями `Vusual_DSM.exe` и `Visual_DSD.exe`, разработанными на языке программирования Visual C++. Разработка цифрового фильтра в виде отдельной программы позволяет применять его для обработки  $\Delta\Sigma$  модулированных сигналов в измерительных системах на основе интегральных  $\Delta\Sigma$  преобразователей путем предварительного сохранения их на жестком диске персонального компьютера. Управление запуском осуществляется из командного BAT-файла, в котором указываются параметры  $\Delta\Sigma$ АЦП и моделируемого сигнала. Это позволяет производить автоматизацию эксперимента. Обмен информацией между приложениями производится посредством жесткого диска персонального компьютера. Файлы с расширением "SIG" содержат измерительную информацию, "ERR" – значения погрешности квантования, "CFT" – значения импульсной характеристики цифрового фильтра в составе  $\Delta\Sigma$ АЦП.

Расчет и визуализация импульсных характеристик цифровых фильтров, а также визуализация и дальнейшая обработка погрешности квантования производится в системе MATLAB специальными программами на встроенном языке программирования. Это позволяет применять мощный математический инструментарий данной системы для моделирования и анализа  $\Delta\Sigma$ АЦП. Синхронизация передаваемых между приложениями данных реализована с помощью специального наименования файлов с данными.

Разработанные средства для имитационного моделирования  $\Delta\Sigma$ АЦП и расчета максимального и среднеквадратического значений погрешности квантования позволили исследовать свойства новых фильтров, предложенных в работе и описанных в главах 2 и 3. Полученные в работе импульсные

характеристики двухступенчатых цифровых фильтров типовых  $\Delta\Sigma$ АЦП, серийно выпускаемых ведущими мировыми фирмами, были использованы для проведения сравнительного анализа фильтров на базе Cos-фильтров и биномиальных фильтров.

Поскольку погрешности  $\Delta\Sigma$  преобразователей в справочных данных указываются достаточно кратко, в системе MATLAB были разработаны специальные средства для анализа погрешности квантования  $\Delta\Sigma$ АЦП. Как и ожидалось, проведенные исследования показали, что погрешность квантования по диапазону входного сигнала распределена неравномерно. В частности, в начале и в конце диапазона погрешность в несколько раз превышает значения, характерные для остальной части диапазона. На этом основании были сделаны рекомендации о целесообразном диапазоне изменения входного сигнала при работе с подобными аналого-цифровыми преобразователями.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Как показал проведенный в работе анализ современных средств построения измерительного канала, их развитие идет по пути создания программируемых аналого-цифровых микросхем и широкого применения интегральных  $\Delta\Sigma$ АЦП.

2. В результате анализа цифровых фильтров сделан вывод о том, что в составе измерительных  $\Delta\Sigma$ АЦП в основном применяются двухступенчатые цифровые фильтры, построенные на основе Sinc-фильтров третьего, четвертого порядков и Cos-фильтры, обеспечивающие подавление сетевых помех.

3. В результате развития метода цифровой фильтрации в  $\Delta\Sigma$ АЦП, основанном на одновременном подавлении периодических помех с двумя некротными частотами, были улучшены такие важные свойства  $\Delta\Sigma$ АЦП, как быстродействие и подавление погрешности квантования.

4. В работе предложен метод масштабирования импульсной характеристики Sinc-фильтра порядка  $L$  в составе  $\Delta\Sigma$  преобразователя с целью обеспечения возможности одновременного выполнения быстрых измерений ограниченной разрядности и получения высокоточных измеренных значений сигналов низкой частоты.

5. Полученные в работе общие формулы для расчета параметров масштабирующих фильтров позволяют эффективно реализовывать их на практике с применением современных микропроцессорных средств и серийно выпускаемых измерительных  $\Delta\Sigma$ АЦП.

6. С помощью разработанных в работе программных средств имитационного моделирования  $\Delta\Sigma$ АЦП проведен сравнительный анализ качества аналого-цифрового преобразования на базе  $\Delta\Sigma$  модуляции с применением существующих и новых методов цифровой фильтрации.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гутников В.С., Каулио В.В. Повышение точности дельта-сигма аналого-цифровых преобразователей методом масштабирования импульсных характеристик Sinc-фильтров.//Микропроцессорные средства измерений: Сборник трудов. Выпуск 3, СПб.: Изд-во "Нестор", 2003, С. 5-15.
2. Каулио В.В. Анализ цифровых фильтров в составе дельта-сигма аналого-цифровых преобразователей.//Микропроцессорные средства измерений: Сборник трудов. Выпуск 3, СПб.: Изд-во "Нестор", 2003, С. 45-52.
3. Каулио В.В. Анализ двухступенчатых фильтров в составе дельта-сигма аналого-цифровых преобразователей.//Микропроцессорные средства измерений: Сборник трудов. Выпуск 3, СПб.: Изд-во "Нестор", 2003, С. 53-64.
4. Каулио В.В. Построение дельта-сигма аналого-цифрового преобразователя на программируемых аналого-цифровых интегральных схемах.//Микропроцессорные средства измерений: Сборник трудов. Выпуск 3, СПб.: Изд-во "Нестор", 2003, С. 65-73.
5. V. Kaulio, V. Gutnikov. The Small Soft- and Hardware System of the Measuring Data Acquisition and Processing Using the Microsoft Excel//SENSOR Proceedings, Nuernberg, 2001, Vol.2, P. 583-584, AMA Service GmbH, Wunstorf / Germany.
6. Каулио В.В. Мини-система для измерений угла поворота и силы. Датчики и системы: Сборник докладов международной конференции. Том 2. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002, С. 179-183.
7. Каулио В.В. Универсальная система для измерения напряжения на базе масштабирующего дельта-сигма АЦП.//Политехнический симпозиум "Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона": Тезисы докладов. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002, С.43.