

На правах рукописи

ГАЗИЗОВ Азат Ахатович

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СПЛАЙНОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ И
КАЛИБРАТОРЫ ФАЗЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

**Специальность 05.13.05 — Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Уфа 2008

Работа выполнена на базе кафедры автоматики и электротехники Башкирского государственного аграрного университета (БГАУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сапельников Валерий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки и техники РБ
Ураксеев Марат Абдулович

кандидат технических наук, профессор
Крысин Юрий Михайлович

Ведущая организация: ФГУП «НИИЭМП», г. Пенза

Защита диссертации состоится «26» сентября 2008 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ) по адресу: 450000, г. Уфа-центр, ул. К Маркса, 12, в актовом зале 1 корпуса УГАТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета; автореферат размещён на сайте университета <http://www.ugatu.ac.ru/science> .

Автореферат разослан «25» августа 2008 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
д-р техн. наук, профессор

Г. Н. Утляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В электронике, информационно-измерительной технике, приборостроении и других областях техники широко используется обработка информации, представленной в аналоговой и цифровой формах. Это связано с тем, что исходная информация о физических величинах, как правило, носит аналоговый характер. Выходную информацию во многих случаях также необходимо представить в аналоговом виде. В то же время цифровая форма представления информации предоставляет несравненно больше возможностей для её обработки. Как следствие этого, появился класс преобразователей, который является связующим звеном между цифровыми и аналоговыми устройствами — цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП).

Диапазоны выпускаемых современной промышленностью микросхем ЦАП и областей их применения в различных устройствах очень широки. Однако существующие ЦАП, за редким исключением, могут выполнять только линейные преобразования. В то же время в различных областях техники необходимо с высокой точностью воспроизводить нелинейные функциональные зависимости. Например, такая необходимость возникает в системах обработки звука, в системах цифровой связи, при построении функциональных генераторов, при разработке цифруправляемых фазовращателей и калибраторов фазы. Здесь следует отметить, что зависимость фазового сдвига от изменения регулируемой величины всегда нелинейна.

Развитие данного направления началось в 50—60-ых годах прошлого столетия, когда появилась необходимость вводить информацию с различных объектов в цифровые вычислительные машины и выдавать на исполнительные устройства и механизмы. Тогда же возникла необходимость создания функциональных цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей (АЦП), которые в процессе преобразования формы информации осуществляли бы определенные вычислительные операции. Такие преобразователи, по существу, являются гибридными вычислительными устройствами и использовались в гибридных вычислительных системах.

В настоящее время совершенствование функциональных цифро-аналоговых преобразователей не теряет актуальности. Совместно с функциональными аналого-цифровыми преобразователями они находят применение в системах связи с импульсно-кодовой модуляцией. В таких системах нелинейная передаточная характеристика имеет больше квантовых уровней полного выходного диапазона для малых сигналов и меньше для сигналов большой амплитуды. В сущности это уменьшает шумы квантования, связанные с малыми сигналами, и увеличивает шумы квантования для больших сигналов. Предпочтительной оказывается логарифмическая функция, которая позволяет обеспечить преобразование в соответствии с так называемым « μ -законом». « μ -закон» позволяет получить динамический диапазон около 4000:1 используя восемь разрядов, в то время как восьмиразрядный линейный преобразователь обеспечивает диапазон только 256:1.

Функциональные ЦАП являются ключевым элементом при построении цифруправляемых калибраторов фазы. Преобразование по законам синуса и косинуса позволяет произвести вычисления с квадратурными напряжениями по формуле Эйлера и получить требуемый фазовый сдвиг. Дискретность регулирования угла фазового сдвига определяется разрядностью функционального ЦАП и может быть сделана достаточно малой. Таким образом построены образцовые меры фазового сдвига.

Основная часть отечественной литературы, касающаяся вопросов построения функциональных ЦАП, относится к периоду развития гибридной вычислительной техники и нуждается в адаптации на современную элементную базу. В зарубежной литературе функциональные ЦАП (*англ.* «non-linear DAC»), как правило, рассматриваются применительно к конкретным техническим задачам без изучения общих принципов построения.

Широкое распространение функциональных ЦАП сдерживает несколько факторов. Во-первых, недостаточно изучены характеристики функциональных ЦАП при различных способах построения. Во-вторых, разработчики различных систем не всегда выделяют функциональные ЦАП в виде отдельного блока или устройства и вместо разработки универсального функционального ЦАП используют схемы, решающие узкие технические задачи.

Цель исследования. Целью настоящей диссертационной работы является развитие теории функционального цифро-аналогового преобразования, исследование характеристик функциональных ЦАП, использующих сплайновую аппроксимацию, а также изучение возможности применения их в цифруправляемых калибраторах фазы.

Задачи исследований. Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих задач.

1. Сравнить существующие методы и способы вычисления значений элементарных функций при одновременном цифро-аналоговом преобразовании.
2. Произвести анализ способов сплайновой аппроксимации применительно к проблемам воспроизведения функциональных зависимостей.
3. Разработать математическую модель функционального ЦАП для выявления основных факторов, влияющих на результат преобразования.
4. Провести экспериментальные исследования функционального ЦАП с целью определения его характеристик и параметров. Сравнить результаты, полученные для функционального и линейного ЦАП.
5. Изучить возможности применения функциональных ЦАП, использующих сплайновую аппроксимацию, для построения цифруправляемых калибраторов фазы.

Методы исследования. В диссертационной работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследования.

При решении поставленной задачи использовались методы теоретической электротехники, разделы высшей математики: теория степенных рядов, теория интерполяции, среднеквадратичные приближения, теория сплайнов.

При составлении компьютерной модели и проведении вычислительного эксперимента использовались методы математического описания электрических схем, теории электрических цепей и методы статистической обработки результатов.

При проектировании основных узлов аппаратной части функционального ЦАП применялись основы теоретической электротехники, электроники, основы информатики, цифровой и вычислительной техники, информационно-измерительной техники, теория цифровой обработки сигналов.

Практическая реализация осуществлена путём компьютерного моделирования, создания алгоритма и программного обеспечения для проверки работоспособности и анализа характеристик функционального ЦАП. Программа для автоматизации эксперимента была написана на графическом языке программирования в среде LabVIEW. Ввод и вывод информации осуществлен программными средствами, предоставляемыми драйверами DAQmx.

При проектировании устройства, разработке программного обеспечения для него, при моделировании и проведении математических расчетов на ЭВМ использовались программные комплексы: OpenOffice.org, MathCAD, Micro-Cap, LabVIEW, Free Pascal, KiCad.

Научная новизна.

1. Предложена методика построения функциональных ЦАП, использующих каскадное включение линейных ЦАП для реализации сплайновой аппроксимации функциональных зависимостей. Тем самым развита научная база построения функциональных ЦАП.
2. Разработаны математические модели функциональных ЦАП и их структурных составляющих и проведено моделирование в программе MicroCap 7.
3. Изучены метрологические и инструментальные характеристики разработанных функциональных ЦАП. Показана возможность создания прецизионных приборов на их основе. Результаты подтверждены с помощью моделирования и на экспериментальном макете.

Практическое значение и внедрение результатов работы. Предложен способ функционального цифроаналогового преобразования, который позволяет доступными аппаратными средствами решить задачу моделирования заданной нелинейной характеристики. Исследованы свойственные этому способу методические погрешности.

На основании проведенных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований разработаны функциональные ЦАП, основу которых составляют цепи каскадно включенных умножающих ЦАП. Программное обеспечение, разработанное в среде LabVIEW, достаточно универсально и может быть использовано при измерении характеристик различных ЦАП.

Полученные результаты исследования способа функционального цифроаналогового преобразования используются в учебном процессе Башкирского государственного университета на кафедре физической

электроники. Предложенные в работе функциональные ЦАП применяются при разработке и исследовании метрологических характеристик регистраторов технологических параметров РТП-4, разработанных в ООО НПЦ «УралЭнергоРесурс». Также имеется акт использования результатов научных исследований в ООО НПЦ «УралЭнергоРесурс».

На защиту выносятся:

1. Структурная и функциональная схемы функционального ЦАП, использующего каскадное включение линейных ЦАП для реализации сплайновой аппроксимации, и результаты теоретических исследований предложенного ЦАП, показавшие снижение методических погрешностей по сравнению с аналогичными решениями.
2. Математические модели функциональных ЦАП с использованием сплайновой аппроксимации и калибраторов фазы на их основе.
3. Методика проведения эксперимента и полученные результаты, позволившие подтвердить правильность первоначальных теоретических исследований.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждена их сходимостью и повторяемостью при теоретических и экспериментальных исследованиях.

Апробация работы. Содержание и основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- Межрегиональной научно-практической конференции «Системы качества и их метрологическая поддержка: от преподавания к сертификации» (Пенза, ПГУ, 2005г.);
- Международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» (Пенза, ПГУ, 2006 г.);
- 12-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2006 г.);
- Всероссийской научно-практической конференции «Перспективы агропромышленного производства регионов России в условиях реализации ПНП «Развитие АПК»» (Уфа, БГАУ, 2006 г.);
- 8, 9–ой Международных конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, РНТО им. Попова, 2006, 2007 гг.);
- Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, КГТУ, СФУ, 2007 гг.).

Публикации. По результатам научных исследований опубликовано 17 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Одна статья переведена и опубликована в зарубежной печати.

Структура и объём диссертации. Общий объём диссертационной работы составляет 172 листа машинописного текста, состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, четырёх глав материала, заключения, содержит 86 иллюстраций, 11 таблиц и 4 приложения. Список литературы содержит 177 единиц наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, выносимые на защиту, указана научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе дан обзор известных методов, способов и технических приёмов, используемых при построении как линейных, так и функциональных ЦАП. Проведена классификация функциональных ЦАП на основе способов преобразования. Выделено три группы функциональных ЦАП, в которых математическая обработка производится после линейного цифроаналогового преобразования (аналоговым методом), до него (цифровым методом), либо одновременно с цифроаналоговым преобразованием (гибридные ЦАП).

Аналоговые вычислительные устройства достаточно хорошо описаны в литературе, поэтому функциональные ЦАП первой группы не рассматриваются. В функциональных ЦАП второй группы математическая обработка производится: с помощью постоянного или оперативного запоминающего устройства, в котором хранятся значения необходимой функции, микропроцессором по заданному алгоритму или цифровым функциональным преобразователем на логических интегральных схемах.

Наибольшее внимание уделено последней группе, для которой рассматриваются различные способы построения, определяемые используемой разновидностью аппроксимации: ступенчатой, кусочно-линейной, полиномиальной, дробно-рациональной.

Проведённый анализ показал, что теоретические основы гибридного преобразования, заложенные в 70-80-ые годы прошлого века с учётом элементной базы того времени, требуют корректировки. Исследования инструментальных погрешностей функциональных ЦАП практически не встречаются в литературе.

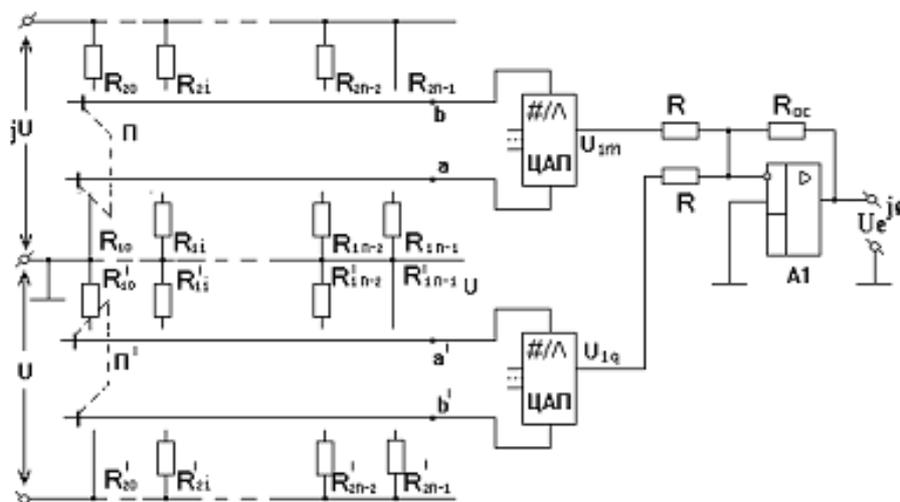


Рисунок 1 — Принцип построения синусно-косинусного калибратора фазы

Кроме того в первой главе рассмотрен вопрос применения функциональных ЦАП в составе более сложных устройств. Так как в настоящее время наибольшее применение функциональные ЦАП нашли в калибраторах фазы и фазометрах компенсационного типа, значительное внимание в работе уделено рассмотрению существующих схем и принципов работы калибраторов фазы и возможности применения в них новых функциональных ЦАП с целью снижения методических погрешностей. На рисунке 1 приведён пример построения калибратора фазы на основе двух функциональных ЦАП, реализующих кусочно-линейную аппроксимацию тригонометрических функций.

Вторая глава посвящена вопросам математического моделирования функциональных ЦАП, использующих аппроксимацию кубическими сплайнами.

Предложена структурная схема устройства, реализующего аппроксимацию кубическими сплайнами (рисунок 2). Показано, что выходной сигнал данной схемы определяется равенством

$$S(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \approx f(x),$$

где $f(x)$ — воспроизводимая функция;

a_i, b_i, c_i, d_i — коэффициенты сплайна.

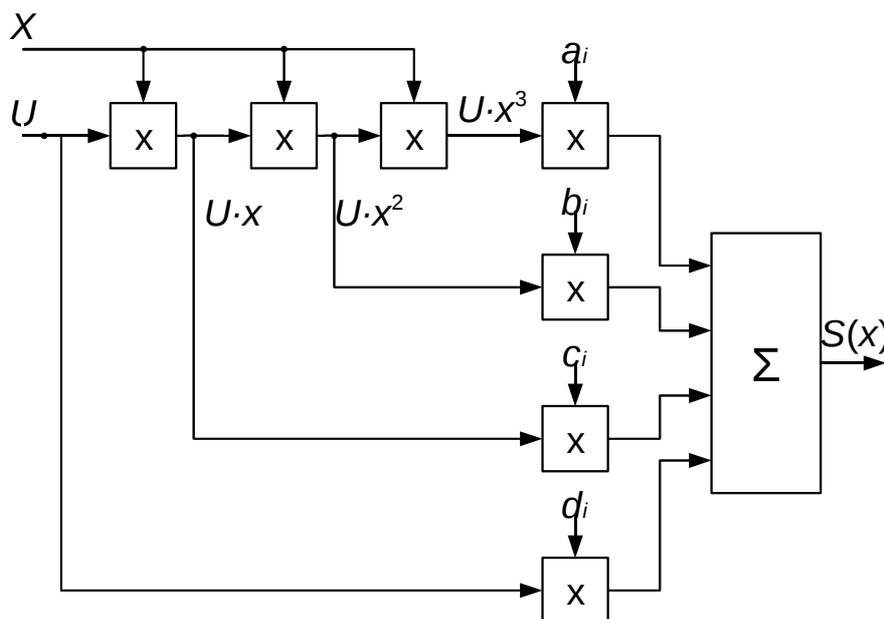


Рисунок 2 — Структурная схема устройства, реализующего сплайновую аппроксимацию

На основе структурной схемы предложена функциональная схема функционального ЦАП, представленная на рисунке 3. Для реализации степенной зависимости в ней каскадно включены 3 линейных умножающих ЦАП. Масштабирование сигналов в соответствии с коэффициентами сплайна производится остальными 4 линейными умножающими ЦАП. Хранение коэффициентов обеспечивает кодопреобразователь КП, который может быть выполнен на элементах ПЗУ малой ёмкости или, в некоторых случаях, на

логических элементах. Суммирование сигналов осуществляется схемами на базе операционных усилителей.

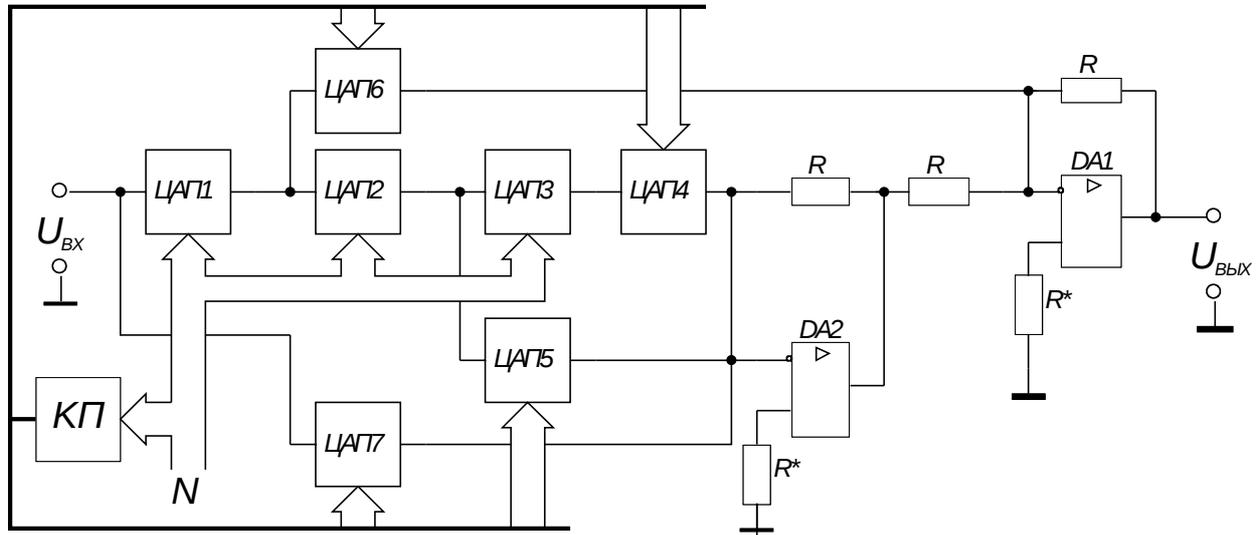


Рисунок 3 — Функциональная схема функционального ЦАП, обеспечивающего сплайновую аппроксимацию нелинейных зависимостей

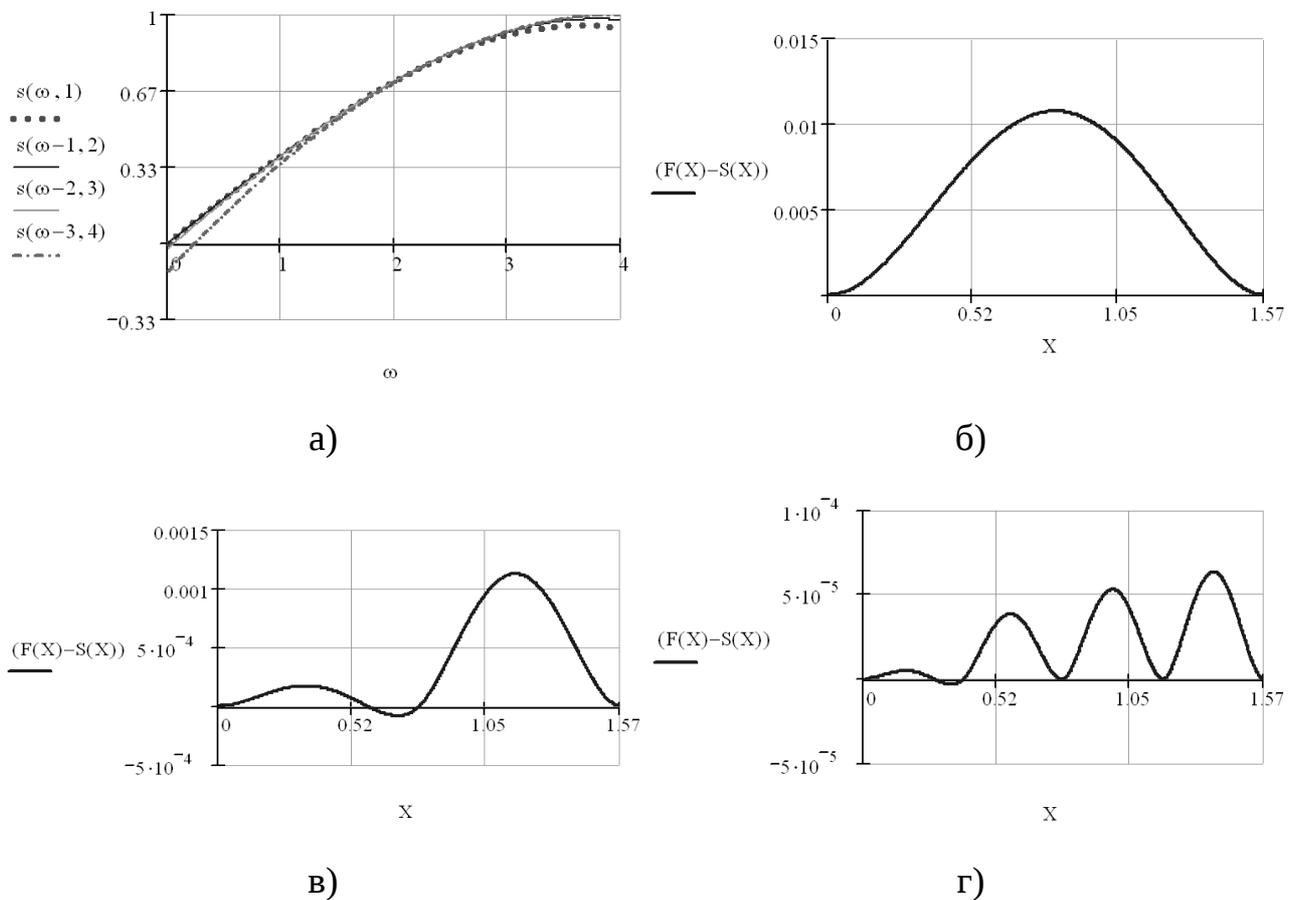


Рисунок 4 — Результаты моделирования в среде MathCAD

Для анализа методических погрешностей функциональных ЦАП, реализованных с использованием сплайновой аппроксимации, была построена математическая модель в пакете MathCAD.

На рисунке 4 представлены результаты математического моделирования аппроксимации кубическими сплайнами функции $\sin(x)$ на интервале $[0; \pi/2]$: выходные характеристики функционального ЦАП при аппроксимации четырьмя (а) полиномами, методические погрешности воспроизведения функции при делении интервала на один (б), два (в) и четыре (г) участка. Максимальные значения методических погрешностей составили 1,1 % при одном участке в интервале $[0; \pi/2]$, 0,1 % — при двух участках, 0,02 % — при трёх. При шести интервалах погрешность составила $1 \cdot 10^{-3}$ %.

Схемотехническое моделирование функционального ЦАП было проведено в программе Micro-Cap. Выходные характеристики всего ЦАП и отдельных его составляющих, получаемые при моделировании, представлены на рисунке 5. Линия 2 отображает выходную характеристику функционального ЦАП, реализующего функцию $\sin(x)$ на интервале $[0; \pi/2]$. Линии 4, 1, 3 и 5 — соответственно слагаемые d_i , $c_i x$, $b_i x^2$, $a_i x^3$ полиномов, составляющих сплайн. Видно, что несмотря на резкие изменения составных напряжений на границах участков результирующее напряжение изменяется плавно.

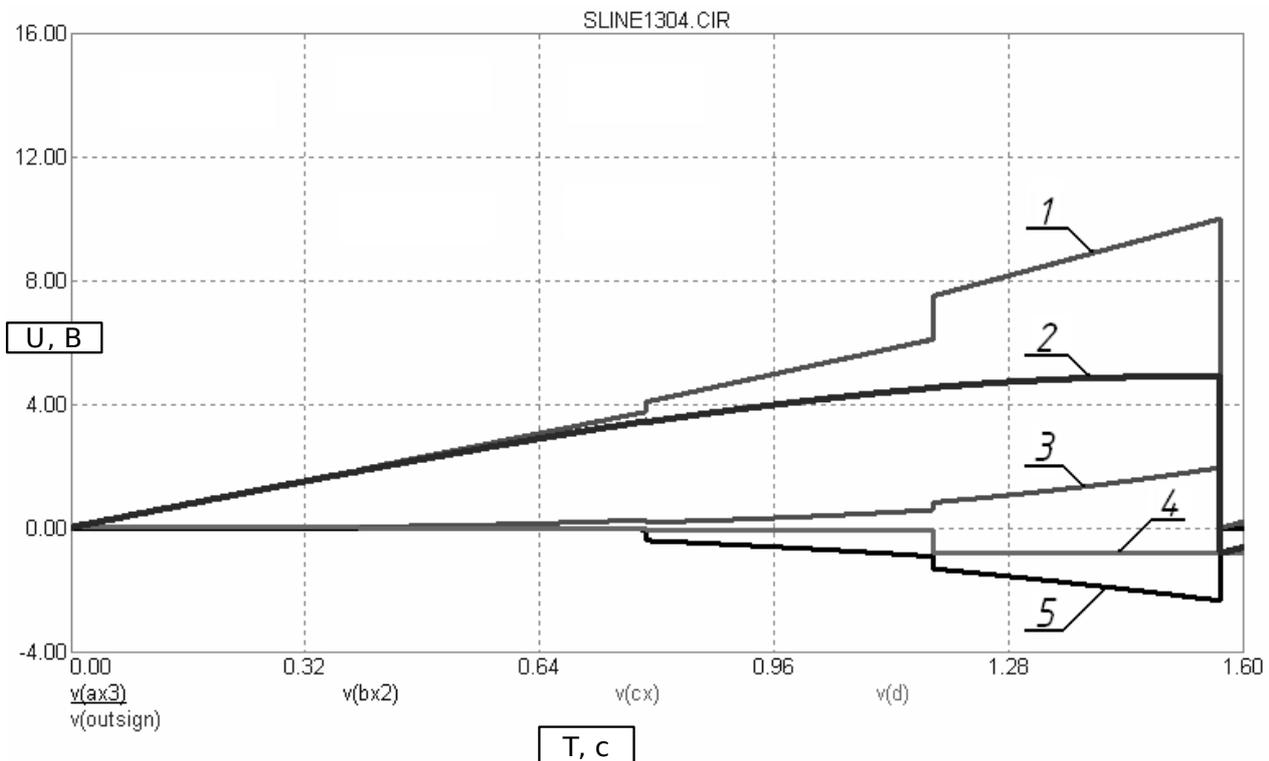


Рисунок 5 — График зависимости напряжений на выходах каждого линейного ЦАП и всего функционального ЦАП от времени

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований и их анализ.

Для экспериментального исследования способа функционального цифро-аналогового преобразования с использованием сплайновой аппроксимации

разработана схема, которая используется для воспроизведения функции $\cos(x)$. В качестве элементной базы выбраны двенадцатиразрядные четырёхканальные ЦАП MAX514 с последовательным интерфейсом и операционные усилители K140УД17.

Управление работой функционального ЦАП осуществляется через ЭВМ с помощью лабораторной установки ELVIS фирмы National Instruments. Передняя панель разработанного для этого виртуального прибора представлена на рисунке 6. Оператор может с её помощью задавать путь к файлу коэффициентов сплайнов, зависящих от вида аппроксимируемой функции, количество интервалов аппроксимации и опорное напряжение, подаваемое на функциональный ЦАП. Также в случае необходимости сравнения выводимых характеристик с результатами компьютерного моделирования можно задать путь к файлу, содержащему данные моделирования в MicroCap.

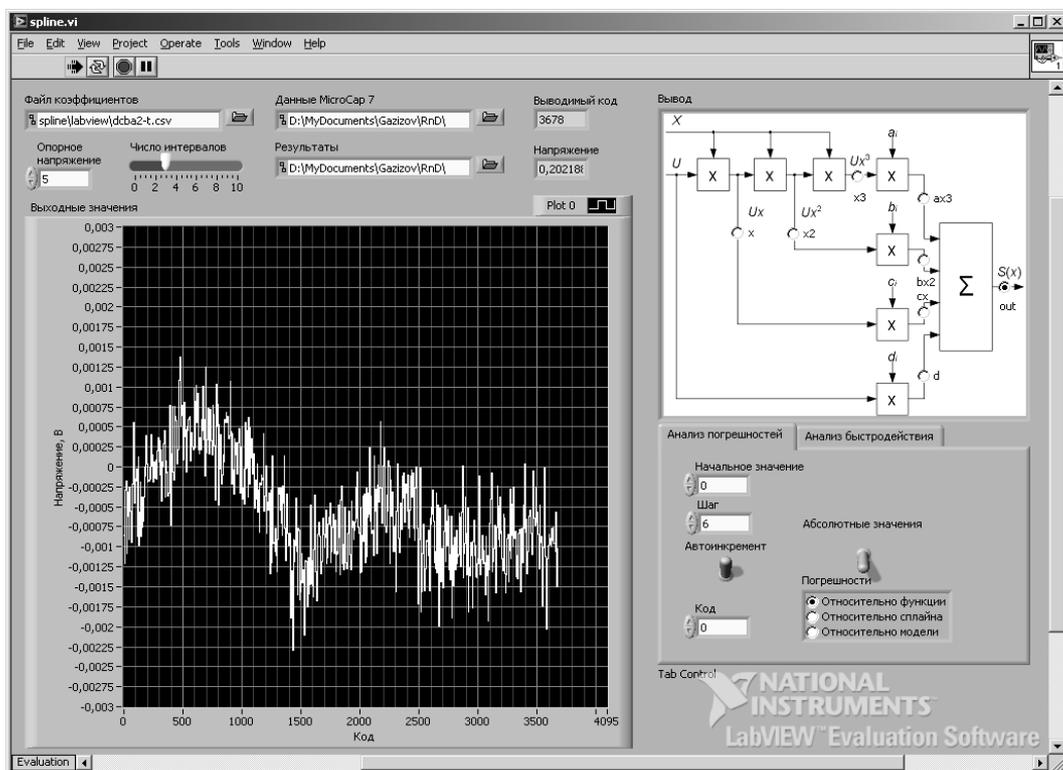
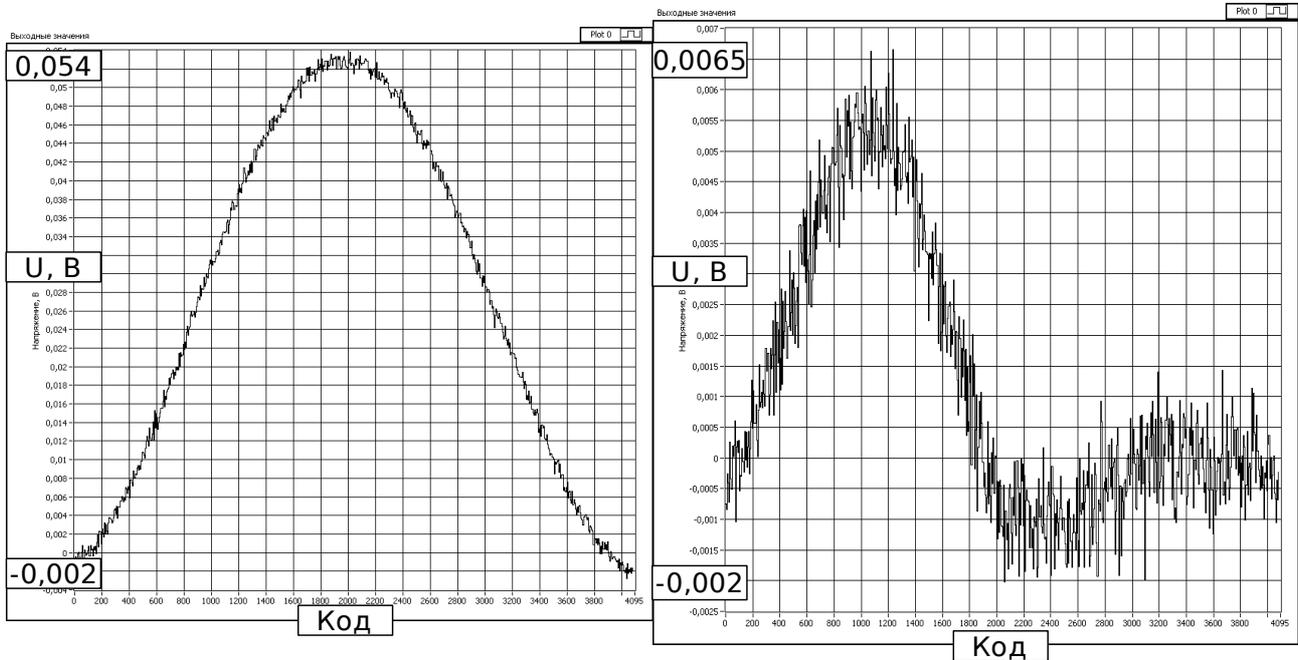


Рисунок 6 — Внешний вид виртуального прибора

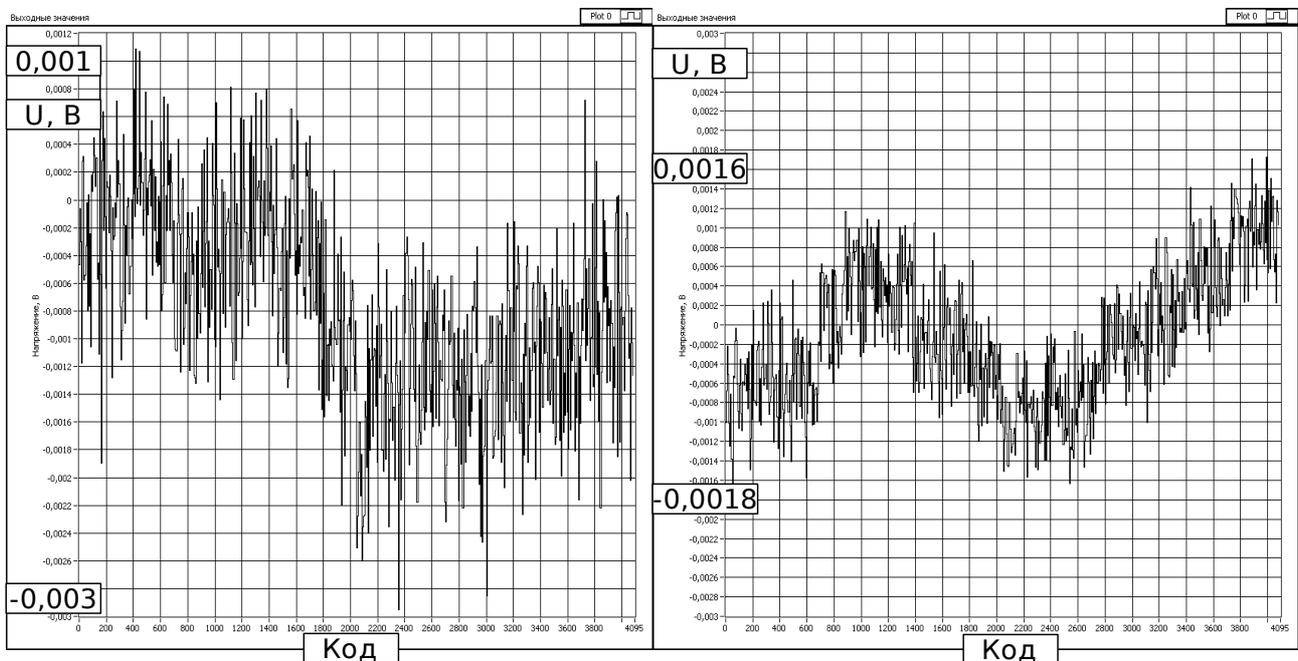
На основной дисплей панели можно вывести: выходную характеристику функционального ЦАП; выходную характеристику с выхода одного любого линейного ЦАП; погрешности функционального ЦАП относительно аппроксимируемой функции, относительно аппроксимирующего сплайна или относительно компьютерной модели; погрешности с выхода одного любого линейного ЦАП относительно соответствующей этой точке функциональной зависимости или относительно компьютерной модели; график переходного процесса для всего функционального ЦАП при изменении входного кода или опорного напряжения.

На рисунке 7 представлены погрешности функционального ЦАП, реализующего функцию $\cos(x)$ в интервале $[0; \pi/2]$, при аппроксимации функции одним (а), двумя (б), четырьмя (в) и шестью (г) кубическими полиномами.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 7 — Погрешность воспроизведения функции $\cos(x)$ функциональным ЦАП с использованием сплайновой аппроксимации

В четвёртой главе рассмотрен вопрос применения разработанных функциональных ЦАП для построения калибраторов фазы.

В основе предлагаемого калибратора фазы лежат два функциональных ЦАП, реализующих тригонометрические зависимости $\sin(x)$ и $\cos(x)$. В качестве опорного напряжения на них подаются гармонические сигналы одной частоты, равные по амплитуде и сдвинутые по фазе на 90 градусов. Сигналы с выходов ЦАП подаются на входы инвертирующего сумматора на операционном усилителе.

Формирование выходного сигнала происходит в соответствии с выражением:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = C(x)\dot{U}_{\text{вх}} + jS(x)\dot{U}_{\text{вх}} ,$$

где

$$C(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3 \approx \cos(\pi x/2),$$

$$S(x) = e_i + f_i x + g_i x^2 + h_i x^3 \approx \sin(\pi x/2)$$

— кубические сплайны, аппроксимирующие функции $\cos(\pi x/2)$ и $\sin(\pi x/2)$. Здесь x — относительное значение цифрового кода N/N_{max} , подаваемого на входы всех ЦАП, и изменяющееся в интервале $[0; 1]$; N_{max} — максимальное значение цифрового кода N . Таким образом, изменение величины x в интервале $[0; 1]$ позволяет регулировать угол фазового сдвига в диапазоне от 0 до $\pi/2$.

Методическая погрешность воспроизведения фазового сдвига и нестабильность амплитуды выходного напряжения калибратора фазы определяются следующими соотношениями:

$$\Delta\varphi = x - \arctg \frac{S(x)}{C(x)} , \quad \delta U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 1 - \sqrt{C^2(x) + S^2(x)} .$$

Распределение погрешностей по интервалу регулирования фазового сдвига $[0; \pi/2]$ в частном случае при четырёх участках аппроксимации показано на рисунке 8. Все значения по оси ординат являются относительными и показывают отклонение модуля от номинального значения. По оси абсцисс отложен угол в радианах.

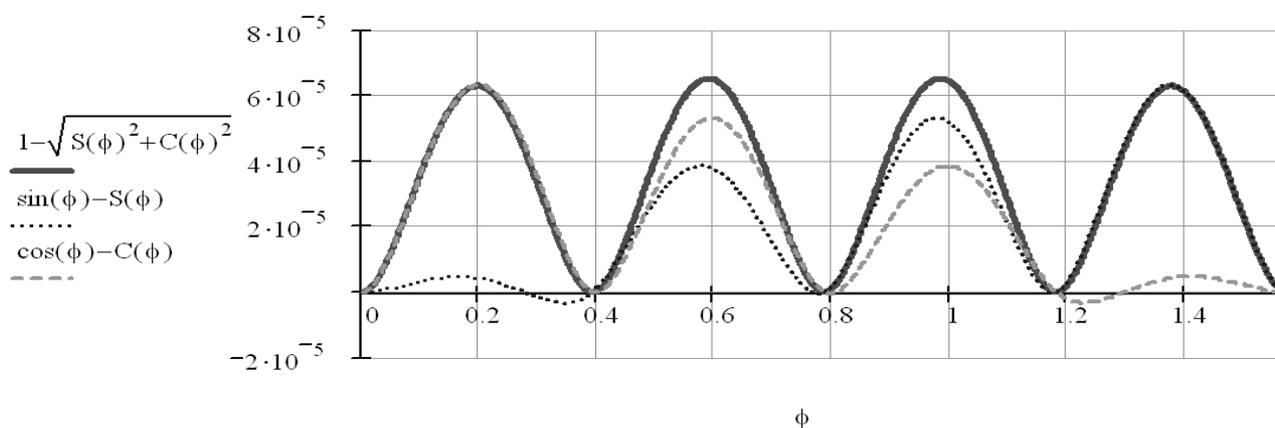
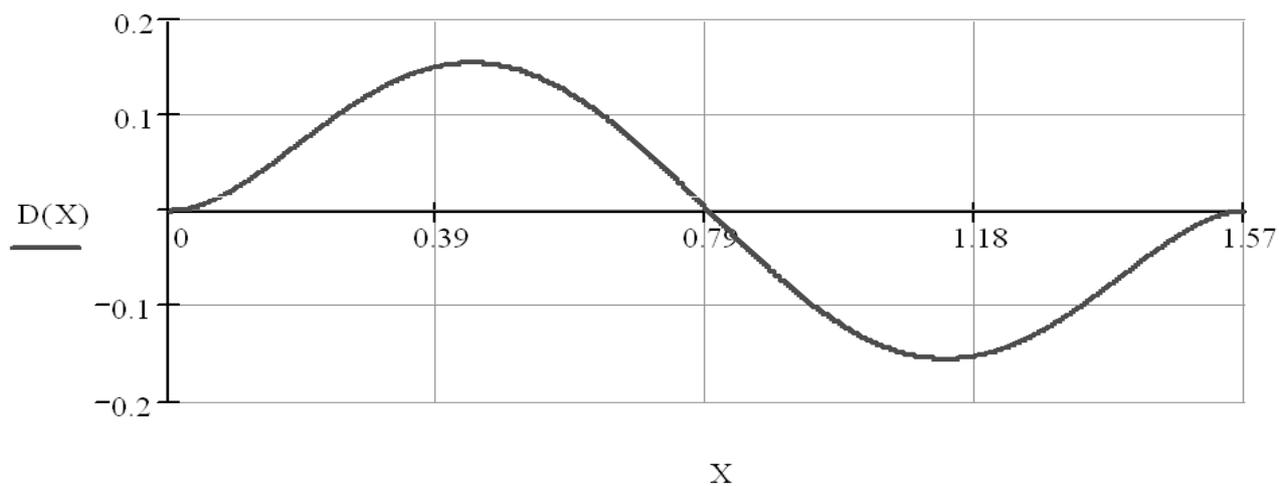
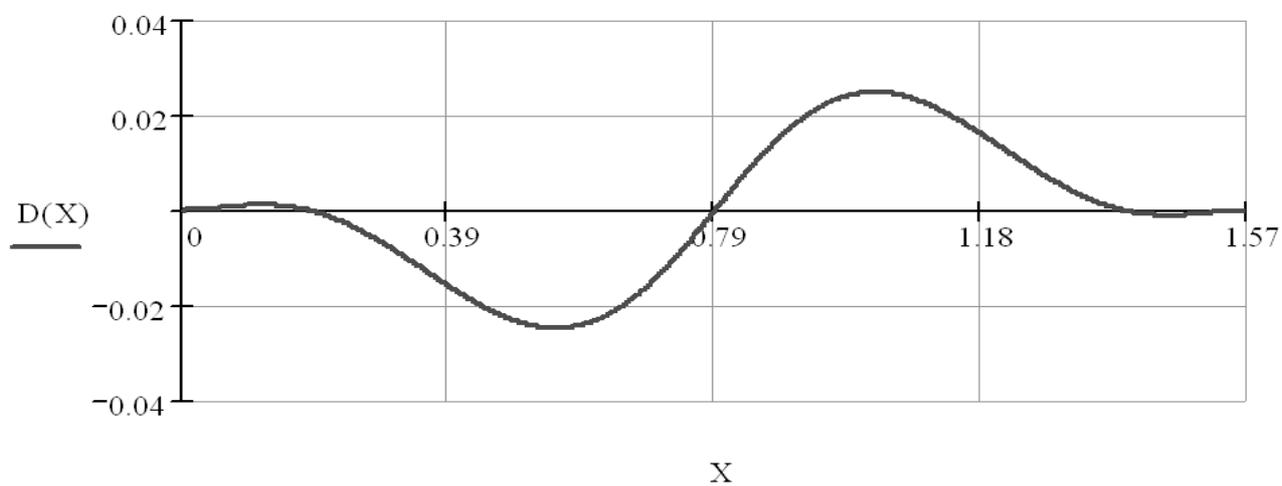


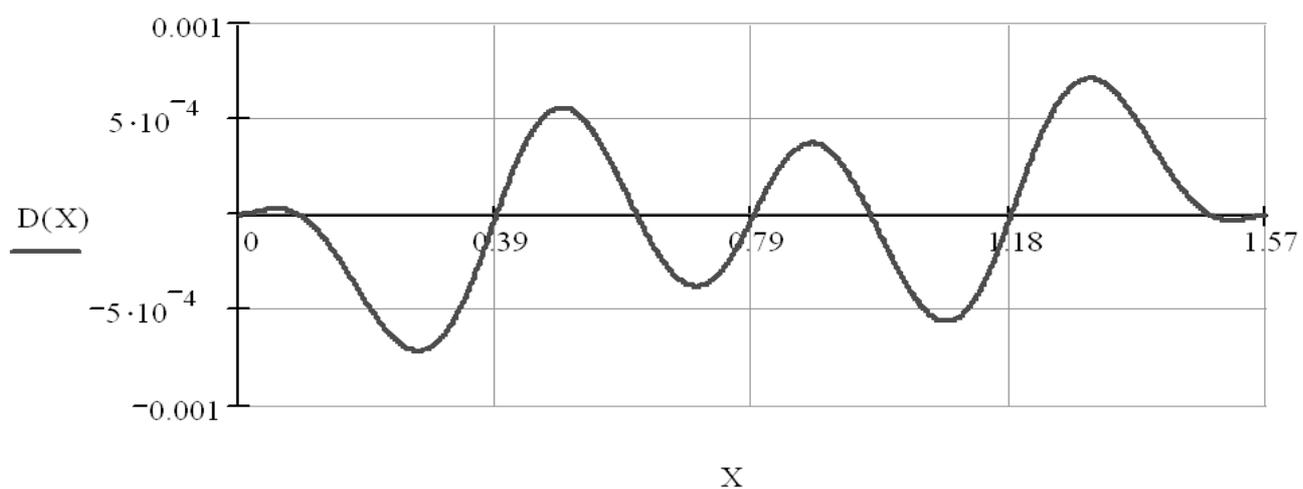
Рисунок 8 — Методические погрешности воспроизведения амплитуды напряжения калибратором фазы при $n = 4$



а)



б)



в)

Рисунок 9 — Методические погрешности воспроизведения угла фазового сдвига калибратором фазы

На рисунке 9 представлены методические погрешности воспроизведения угла фазового сдвига калибратором фазы при одном (а), двух (б) и четырёх (в) участках сплайновой аппроксимации. По оси абсцисс отложен угол в радианах, по оси ординат — отклонение угла от задаваемого значения в градусах.

В таблице 1 приведены максимальные значения погрешностей для метода сплайновой аппроксимации в сравнении с методами разложения функциональных зависимостей в ряды Тейлора, Чебышева и методом степенной интерполяции. Здесь n — количество отрезков, на которые разбивается интервал, в случае сплайновой аппроксимации и степень полиномов в случае других методов.

Таблица 1 — Максимальные значения методических погрешностей калибратора фазы при применении различных методов аппроксимации

n	Метод Тейлора		Метод Чебышева		Метод сплайн-аппроксимации	
	$\Delta\varphi, ^\circ$	$\delta U_{\text{вых}}, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$	$\delta U_{\text{вых}}, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$	$\delta U_{\text{вых}}, \%$
1					0,15	1,52
2					0,025	0,11
3	0,5	1	0,07	0,2	0,003	0,022
4	0,1	0,6	0,009	0,01	0,0007	0,007
5	0,01	0,06	0,0006	0,001	$2,3 \cdot 10^{-4}$	0,0023
6	0,002	0,002	0,0006	$3 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$	0,0012

Из таблицы видно, что метод сплайновой аппроксимации даёт снижение методических погрешностей калибратора фазы до нескольких секунд по сдвигу фазы и тысячных долей процента по воспроизведению амплитуды уже при четырёх-пяти интервалах аппроксимации.

В приложениях приведены:

- текст математической модели в пакете MathCAD,
- схема электрическая принципиальная, составленная в программе KiCad,
- блок-схема виртуального прибора для анализа характеристик функциональных ЦАП, созданного в программе LabVIEW,
- акты внедрения и использования результатов научных исследований,
- решение о выдаче патента на изобретение.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили сформулировать следующие основные результаты и выводы.

1. Среди существующих методов и способов вычисления значений элементарных функций при одновременном цифро-аналоговом преобразовании особое место занимают гибридные функциональные ЦАП, благодаря созданию которых стало возможным строить цифрууправляемые калибраторы фазы,

цифроуправляемые умножители частоты, функциональные генераторы, функциональные АЦП, программируемые усилители.

2. Применение сплайновой аппроксимации для построения функциональных ЦАП позволяет снизить методические погрешности до сотых долей процента для тригонометрических функций $\sin(x)$ и $\cos(x)$ при использовании трёх и более кубических полиномов на одном интервале $[0; \pi/2]$. Полученные результаты подтверждают возможность построения на основе функциональных ЦАП прецизионных устройств.

3. Математическое моделирование с применением программ MathCAD и MicroCap позволило определить влияние основных параметров на погрешности функциональных ЦАП: вид аппроксимируемой функции, количество интервалов сплайновой аппроксимации и номер интервала.

4. Экспериментальные исследования функционального ЦАП подтвердили правильность теоретических выводов и позволили получить численные результаты погрешностей воспроизведения функциональных зависимостей. Для функции $\cos(x)$ они составили 1,1 % при одном участке в интервале $[0; \pi/2]$, 0,16 % — при двух участках, 0,08 % — при трёх. По сравнению с функциональными ЦАП на базе микроконтроллеров гибридные функциональные ЦАП обладают большим быстродействием и меньшей сложностью.

5. Исследование применения функциональных ЦАП для построения калибраторов фазы показало возможность создания калибраторов фазы с погрешностью воспроизведения фазового сдвига до $0,01^\circ$, что соответствует требованиям к эталонам фазового сдвига первого разряда согласно Государственной поверочной схеме угла фазового сдвига между двумя напряжениями.

Результаты опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Функциональный цифроаналоговый преобразователь в широкополосном цифроуправляемом калибраторе фазы. /Сапельников В. М., Хакимов Р. А., Коловертнов Г. Ю., Шабанов М. А., Газизов А. А. // Приборы и техника эксперимента. — 2005. — № 4. — С. 43—46.

2. Функциональные цифроаналоговые преобразователи: принципы построения. /Сапельников В. М., Хакимов Р. А., Газизов А. А., Шабанов М. А. // Датчики и системы. — 2007. — № 7. — С. 46—57.

3. Функциональные цифро-аналоговые преобразователи и их применение. /Газизов А. А., Сапельников В. М. // Физика волновых процессов и радиотехн-е системы. — 2007. — № 3, том 10. — С. 109—118.

В других изданиях:

4. Автоматизированная контрольно-тренажерная система по курсу «Основы цифровой электроники». /Сапельников В. М., Газизов А. А. // Компьютерное моделирование 2005: Труды VI Международной научно-

технической конференции. — СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2005. — С. 630—632.

5. Функциональные цифроаналоговые преобразователи — новая элементная база информационных систем в АПК. /Сапельников В. М., Газизов А. А. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 2005. — № 11. — С. 13—16.

6. Функциональный ЦАП с использованием сплайновой аппроксимации. / Газизов А. А., Хакимов Р. А., Сапельников В. М. // Системы качества и их метрологическая поддержка: от преподавания к сертификации : сборник статей Межрегиональной научно-практической конференции / ред. Г. П. Шлыков. — Пенза : [Информационно-издательский центр ПГУ], 2005. — С. 120—122.

7. Новый метод построения функциональных ЦАП. /Газизов А. А., Хакимов Р. А., Максutow А. Д., Сапельников В. М. // Цифровая обработка сигналов и её применение : Доклады 8-й Международной конференции. В 2-х т. Т. 2. — М. : РНТО радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, 2006. — С. 585—588.

8. Функциональный ЦАП с использованием сплайновой аппроксимации. / Газизов А. А., Хасанов М. И. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Двенадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. — М. : МЭИ, 2006. — С. 95—96.

9. Применение кусочно-линейной аппроксимации для построения логарифмического цифроаналогового преобразователя. /Газизов А. А., Шабанов М. А., Сапельников В. М. // Перспективы агропромышленного производства регионов России в условиях реализации ПНП «Развитие АПК» : Материалы всероссийской научно-практической конференции в рамках XVI Международной специализированной выставки «АгроКомплекс—2006». — Уфа : Башкирский ГАУ, 2006. — С. 115—117.

10. Функциональные ЦАП: принципы построения. /Сапельников В. М., Хакимов Р. А., Шабанов М. А., Газизов А. А. // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Международной научно-технической конференции (Россия, Пенза, 19—21 октября 2006 г.) / Под редакцией профессора Е. А. Ломтева. — Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2006. — С. 42—44.

11. Исследование характеристик функционального ЦАП. /Хакимов Р. А., Максutow А. Д., Газизов А. А., Сапельников В. М. // Цифровая обработка сигналов и её применение : Доклады 9-й Международной конференции. В 2-х т. Т. 2. — М. : РНТО радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, 2007. — С. 494—496.

12. Новые возможности приборостроения. /Сапельников В. М., Газизов А. А., Максutow А. Д. // Мир измерений. — 2007. — № 8. — С. 50—55.

13. Моделирование функционального ЦАП с применением сплайновой аппроксимации. /Газизов А. А., Хасанов М. И., Сапельников В. М. // Современные проблемы радиоэлектроники : Сб. науч. ст. / ред.: А. И. Громыко, А. В. Сарафанов. — Красноярск : Сибирский федеральный ун-т; Политехнический ин-т, 2007. — С. 340—342.

14. Исследование характеристик функционального ЦАП с помощью лабораторной установки NI ELVIS. /Хакимов Р. А., Газизов А. А., Максutow А. Д., Сапельников В. М. // Современные проблемы радиоэлектроники : Сб. науч. ст. / ред.: А. И. Громько, А. В. Сарафанов. — Красноярск : Сибирский федеральный ун-т; Политехнический ин-т, 2007. — С. 605—608.

15. Цифроуправляемый калибратор фазы на базе функциональных ЦАП с использованием сплайновой аппроксимации. /Газизов А. А., Сапельников В. М., Хакимов Р. А. // Информационно-измерительная техника : тр. ун-та. Межвуз. сб. науч. тр. — Вып. 31/ под ред. профессора Е. А. Ломтева. — Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. — С. 57—65.

16. Цифроуправляемый калибратор фазы на базе функциональных цифроаналоговых преобразователей. /Газизов А. А., Шабанов М. А., Канарейкин В. И., Тарасов А. В., Сапельников В. М. // Инновации и перспективы сервиса : Сборник научных статей IV Международной научно-технической конференции, 18 декабря 2007 года. — Уфа : Уфимск. гос. академия экономики и сервиса, 2007. — С. 41—45.

17. Сравнительный анализ двух способов функционального цифроаналогового преобразования. /Садыков А. Р., Хакимов Р. А., Газизов А. А., Максutow А. Д., Сапельников В. М. // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. / ред.: А. И. Громько, А. В. Сарафанов. — Красноярск : ИПК СФУ, 2008. — С. 41—45.

18. Решение о выдаче патента на изобретение от 26.05.2008 по заявке № 2007113128 "Функциональный цифро-аналоговый преобразователь" / Газизов А. А., Косулин И. А., Сапельников В. М., Гоц С. С.

ГАЗИЗОВ Азат Ахатович

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СПЛАЙНОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ И
КАЛИБРАТОРЫ ФАЗЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Специальность 05.13.05 — Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.08.2008. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.– отт. 1,0. Уч.– изд. л. 0,9
Тираж 100. Заказ № 308

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12