

На правах рукописи

ХАКИМОВ Рустем Альбертович

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

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

УФА 2007

Работа выполнена на кафедре физической электроники Башкирского государственного университета (БГУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сапельников Валерий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Фетисов Владимир Станиславович

кандидат технических наук, доцент
Ишинбаев Николай Александрович

Ведущая организация: Пензенский государственный университет,
(ПГУ г. Пенза)

Защита состоится «2» ноября 2007 г. в 14⁰⁰ 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 библиотеке Уфимского авиационного технического государственного университета.

Автореферат разослан «29» сентября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Г.Н. Утляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие методов нелинейного цифроаналогового преобразования в нашей стране связано, в первую очередь, с параллельным развитием аналоговой и цифровой вычислительной техники. Для связи цифровых вычислительных машин с исполнительными устройствами, а в гибридных вычислительных системах с аналоговой вычислительной частью, в ряде случаев оказалось целесообразным перенести ряд вычислений на цифроаналоговые преобразователи (ЦАП).

В настоящее время совершенствование функциональных цифроаналоговых 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. 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.

Другим перспективным применением функциональных ЦАП является использование их в системах прямого цифрового синтеза («Direct Digital Synthesis» DDS), в качестве преобразователя «фазовый угол - $\sin$ ». Несмотря на то, что в современных системах DDS роль преобразователя играет постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), в ряде работ показано, что с помощью функциональных ЦАП можно значительно снизить энергопотребление. Например, DDS AD9850 имеет отношение рассеиваемой мощности к тактовой частоте равное 1,4 мВт/МГц (при тактовой частоте 110 МГц). Система DDS с нелинейным ЦАП позволяет достичь величины 0,4 мВт/МГц (при тактовой частоте 230 МГц).

Функциональные ЦАП, реализующие нелинейную полиномиальную характеристику чебышевского типа, находят применение в цифруправляемых умножителях частоты и фазы. При поступлении на вход цифрового сигнала, изменяющегося по гармоническому закону, на выходе получаем сигнал с частотой, кратной частоте входного сигнала. Данное техническое решение дает повышенную широкополосность и быстродействие, так как снижает уровень паразитных спектральных составляющих, присутствующих на выходе устройства. Это позволяет отказаться от узкополосных фильтров, ограничивающих рабочий диапазон частот.

Функциональные ЦАП являются ключевым элементом при построении

цифроуправляемых калибраторов фазы. Преобразование по законам синуса и косинуса позволяет произвести вычисления с квадратурными напряжениями по формуле Эйлера

$$U_{\text{вых}} \approx \cos\left(\frac{\pi}{2}x\right)U_{\text{вх}} + j\sin\left(\frac{\pi}{2}x\right)U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} e^{j\frac{\pi}{2}x}$$

и получить требуемый фазовый сдвиг. Дискретность регулирования угла фазового сдвига определяется разрядностью функционального ЦАП и может быть сделана достаточно малой.

Созданию теории, методов и средств преобразования и математической обработки сигналов посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Смолова В.Б., Угрюмова Е.П., Чернявского Е.А., Фомичева В.С. Алексеева Г.И., Сапельникова В.М., Гоца С.С., Бекмуратова Т. Ф., Чье Ен Уна, Гитиса Э.И., Смиа Б., Канеко Г., Ли К. Ф. Е., Санчеса-Синенсио Э., Вуда П. и др.

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 («nonlinear 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.

Из приведенного выше обоснования сформулированы цель диссертационной работы и задачи исследования.

Цель исследования. Целью настоящей диссертационной работы является развитие теории функционального цифроаналогового преобразования и исследование характеристик функциональных ЦАП, использующих полиномиальную аппроксимацию.

Задачи исследований. Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих задач.

1. Сравнить существующие методы и способы вычисления значений элементарных функций, при одновременном цифроаналоговом преобразовании.
2. Произвести анализ способов полиномиальной 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.

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

При решении поставленной задачи использовались разделы высшей математики: теория степенных рядов, теория интерполяции, среднеквадратичные приближения, методы статистической обработки результатов.

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

При проектировании устройства, разработке программного обеспечения для него, при моделировании и проведении математических расчетов на ЭВМ использовались программные комплексы: Micro-Cap 7, LabVIEW, Turbo Pascal, MathCAD, P-CAD.

Научная новизна.

1. Предложена методика расчета функциональных ЦАП, использующих полиномиальную аппроксимацию функциональных зависимостей. Разработан алгоритм для нахождения полинома наилучшего приближения, используя разложение по многочленам Чебышева.

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. На основании проведенных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований разработан функциональный ЦАП, основу которого составляет цепь 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 студентами кафедры физической

электроники, а также использованы при производстве металлоискателей серии «КРОТ» в ООО «БЛИК» (г. Санкт-Петербург).

На защиту выносятся:

1. Результаты теоретических исследований функционального ЦАП, использующего полиномиальную аппроксимацию.
2. Математическая модель линейного умножающего ЦАП и модель функционального ЦАП на ее основе.
3. Методика проведения эксперимента и полученные результаты.

Достоверность. Полученные в диссертационной работе результаты и выводы подтверждены экспериментальными и теоретическими исследованиями, актами внедрения в учебный и производственный процесс. Результаты работ апробированы на всероссийских и международных научно-технических конференциях.

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

- XII-XV-ой научно-технических конференциях «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления «Датчик-2000-2003» (Москва, МГИЭМ, 2000-2003 гг.);
- LV, LVI-ой научных сессиях Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, посвященной Дню Радио (Москва, РНТОРЭС, 2000, 2001 гг.);
- 6-ом Всероссийском Совещании-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники» (Москва, МГТУ им. Баумана, 2001 г.);
- II-ой Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» (Уфа, УГАТУ, 2001 г.);
- Региональной школе-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике и физике (Уфа, БашГУ, 2002 г.);
- 8-ой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (Москва, МГТУ им. Баумана, 2002 г.);
- Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, КГТУ, СФУ, 2004, 2007 гг.);
- 10-th IMEKO TC7 International Symposium on Advances of Measurement Science (Saint-Petersburg, 2004);
- Международном юбилейном симпозиуме «Актуальные проблемы науки и образования» (Пенза, ПГУ, 2003 г.);
- Международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» (Пенза, ПГУ, 2006 г.);
- 3, 4, 5, 8, 9-ой Международных конференциях «Цифровая обработка

сигналов и ее применение» (Москва, 2000, 2002, 2003, 2006, 2007 гг.);

Публикации. По результатам научных исследований опубликовано 29 печатных работ, из которых 6 статей в российской печати, 4 статьи переведены и опубликованы в зарубежной печати.

Структура и объем диссертации. Общий объем диссертационной работы составляет 146 листа машинописного текста, состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, четырех глав материала, заключения, содержит 61 иллюстрацию, 28 таблиц и 4 приложений. Список литературы содержит 99 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 аналитический обзор существующих методов цифроаналогового преобразования, включая ЦАП с линейной характеристикой преобразования. Проведена классификация функциональных ЦАП на основе способов преобразования. Выделено три группы функциональных ЦАП, в которых математическая обработка производится аналоговым (после линейного цифроаналогового преобразования), цифровым (до линейного цифроаналогового преобразования) либо гибридным (одновременно с цифроаналоговым преобразованием) методом.

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 учетом элементной базы того времени, требуют корректировки. Исследования инструментальных погрешностей и динамических характеристик функциональных ЦАП практически не встречаются в литературе.

Вторая глава посвящена математическому обоснованию принципов работы функциональных ЦАП на основе кусочно-линейной и полиномиальной аппроксимации.

Показано, что для функционального ЦАП с кусочно-линейной аппроксимацией, приведенного в первой главе, возможно расширение класса воспроизводимых функций. С этой целью проведен вывод соответствующих выражений для расчета параметров схемы. Рассмотрено несколько способов аппроксимации по различным критериям: равные длины линейных участков, равные максимальные погрешности на интервалах, равенство входного сопротивления ЦАП на всех участках. Для функции $\sin(x)$ составлены таблицы границ линейных интервалов и максимальных погрешностей на них.

Предложена схема функционального ЦАП (рисунок 1) на основе каскадного включения линейных умножающих ЦАП для реализации полиномиальной зависимости. Показано, что выходное напряжение схемы определяется равенством

$$U_{вых} = -U_{он}(a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5) \approx -U_{он}f(x),$$

где $f(x)$ – воспроизводимая функция; аргумент функции $x = A(N/2^m)$, зависит от цифрового кода N , который изменяется в пределах от 0 до 2^m , m – разрядность ЦАП; A – масштабный множитель; $U_{он}$ – опорное напряжение функционального ЦАП.

Последовательное включение n умножающих ЦАП в совокупности с инвертором и сумматором позволяет воспроизводить многочлен n -ой степени.. Абсолютные значения коэффициентов многочлена определяются отношением

$$|a_i| = R/R_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n,$$

а знаки слагаемых устанавливаются при помощи инвертора на операционном усилителе (ОУ) А1. Рассмотрены случаи, при которых операционные усилители схемы могут перейти в режим насыщения, и предложены решения, позволяющие избежать этого.

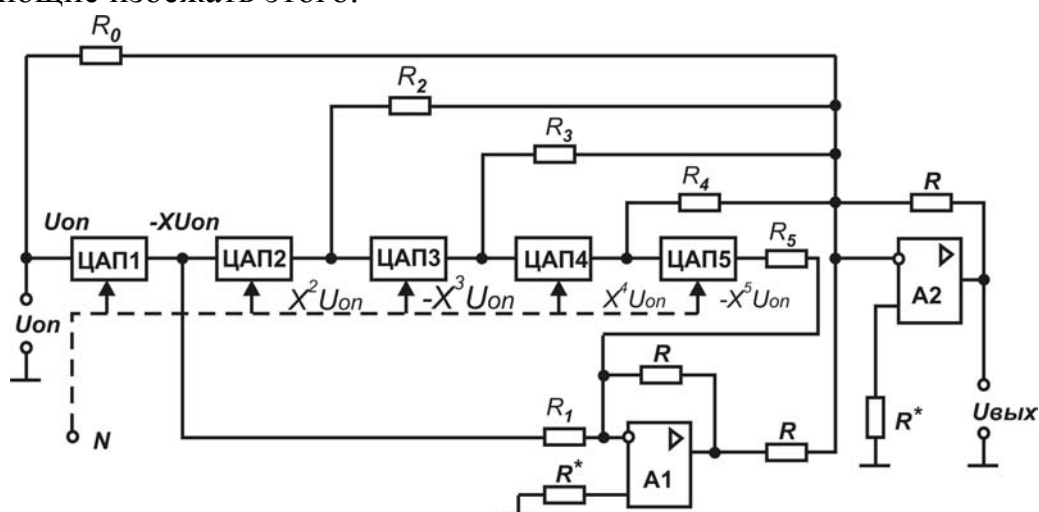


Рисунок 1 – Схема функционального ЦАП, использующего для аппроксимации многочлен пятой степени

Моделирование необходимой функции возможно при использовании

полиномиальной аппроксимации. В простейшем случае можно воспользоваться разложением функции в ряд Тейлора, ограничившись $n+1$ слагаемым. На примере функций $\sin(x\pi/2)$ и $\cos(x\pi/2)$ показано, что лучшие результаты достигаются применением разложения функции по многочленам Чебышева и теории интерполяции. На основании этих трех способов получены коэффициенты аппроксимирующих многочленов для различных степеней, которые сведены в таблицы. Зависимость методической погрешности от степени многочлена для функции $\sin(x\pi/2)$ представлена на рисунке 2.

В работе также приведены распределения методической погрешности по интервалу аппроксимации $[0, 1]$.

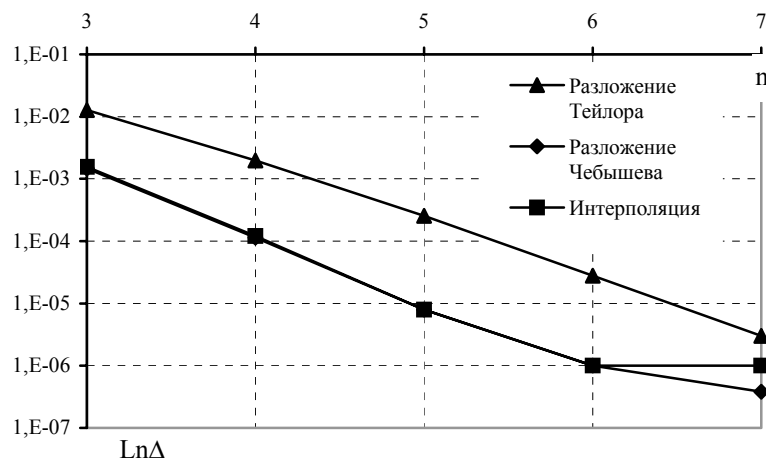


Рисунок 2 – Графики зависимости логарифма абсолютной погрешности от степени многочлена

В третьей главе рассматриваются основные этапы построения модели функционального ЦАП с использованием последовательно включенных умножающих ЦАП в программе схемотехнического моделирования MicroCap 7 (МС7). При разработке модели функционального ЦАП использовались стандартные компоненты из библиотеки программы: резисторы, конденсаторы, ключи, управляемые напряжением, модель операционного усилителя OP_07D.

В программе отсутствуют модели умножающих ЦАП с токовым выходом, поэтому была создана модель линейного умножающего ЦАП КР572ПА1А (зарубежный аналог AD7520), представленная на рисунке 3. Основу модели составляет резисторная матрица R-2R из резисторов R1-R20. Роль КМОП-ключей выполняют ключи $S1, S2, \dots, S20$, управляемые напряжением на цифровых входах $In1, \dots, In10$. Модель составлена таким образом, что при отпирании ключа с нечетным номером происходит запираение соответствующего ключа с нечетным номером и наоборот. Конденсаторы C1 и C2 представляют собой выходные емкости аналоговых выходов $I-$ и $I+$. Источники тока $I1$ и $I2$ моделируют утечки переходов на подложку.

В режиме Монте-Карло вариациям подвергались сопротивления

резисторной матрицы и сопротивления ключей в открытом (R_{ON}) и закрытом (R_{OFF}) состоянии. Установлено, что модель соответствует техническим характеристикам микросхем при отклонении сопротивлений резисторов от номинальных значений на 0,2 %, сопротивления ключей слабо влияют на точность. В качестве критерия соответствия техническим характеристикам используем равенство погрешности полной шкалы $\delta_{\text{пш}}$ модели и интегральной микросхемы КР572ПА1 ($\delta_{\text{пш}} = 3 \text{ ЕМР}$).

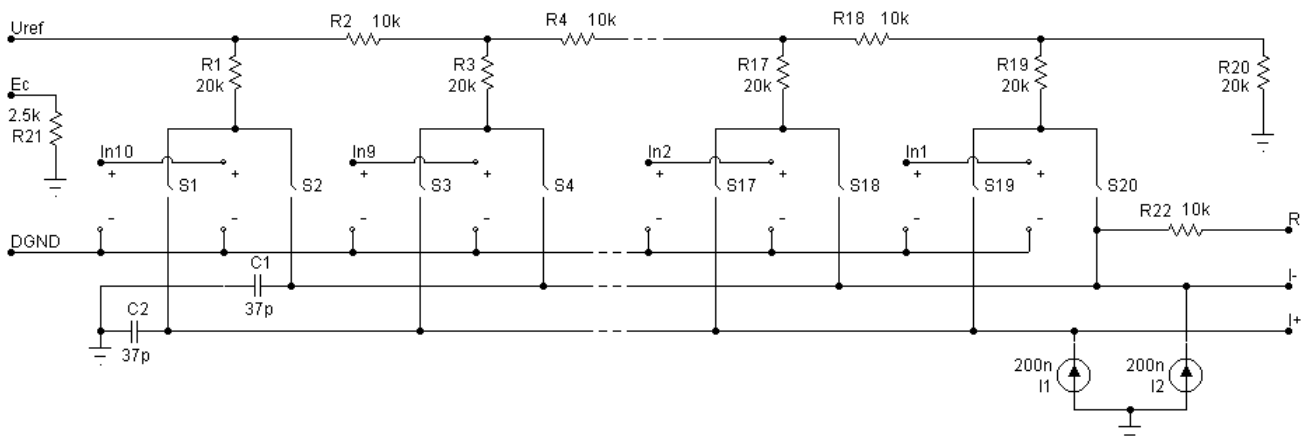


Рисунок 3 – Модель умножающего ЦАП КР572ПА1

На основе модели умножающего ЦАП были построены модели функциональных ЦАП, реализующих функции $\sin(\pi x/2)$ и $\cos(\pi x/2)$. Для них построены графики зависимости погрешности воспроизведения функции от цифрового кода. Проведено сравнение с аналогичным графиком для отдельного умножающего ЦАП.

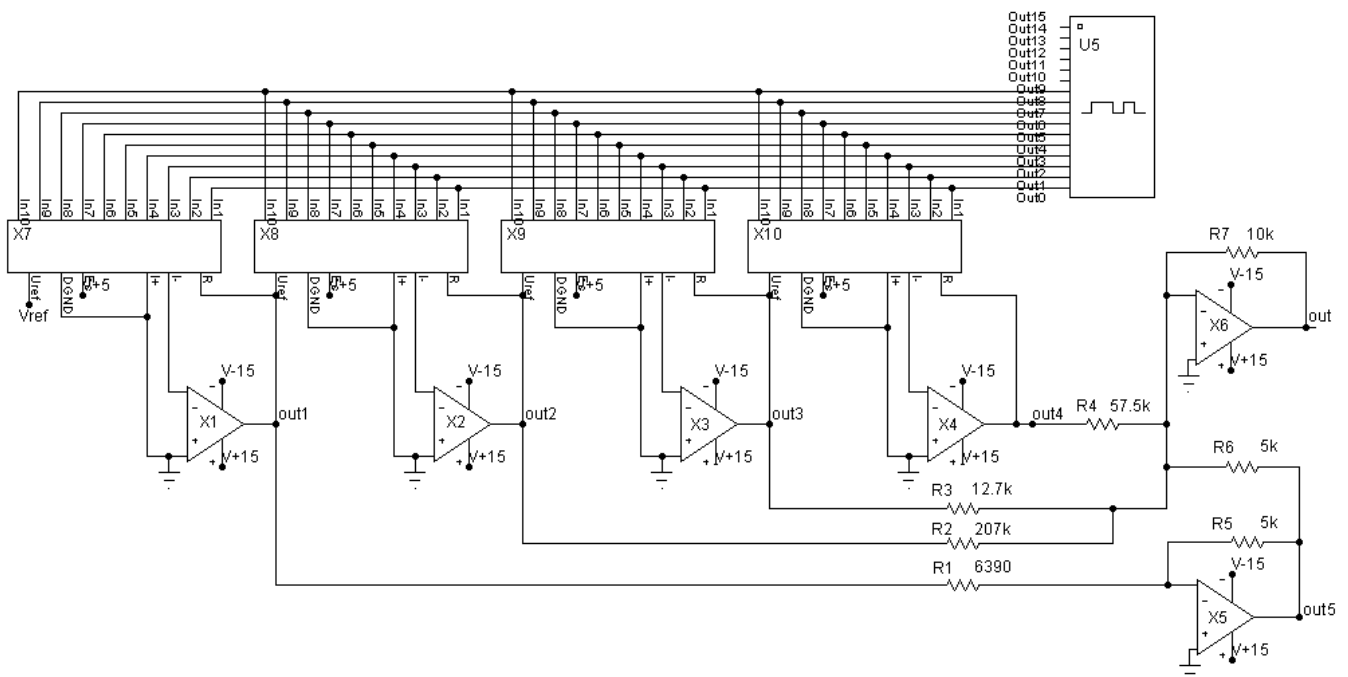


Рисунок 4 – Модель функционального ЦАП

Более детальные исследования проводились над моделью

функционального ЦАП представленной на рисунке 4. Она содержит четыре компонента X7-X10, имеющие указанную выше модель умножающего ЦАП. Элементы X1-X4 - модели ОУ необходимые для преобразования выходного тока ЦАП X7-X10 в напряжение. ОУ X5 служит для инверсии сигналов. ОУ X6 производит итоговое суммирование. Схема модели реализует многочлен четвертой степени. Коэффициенты многочлена аппроксимирующие функцию $f(x) = -\sin(\pi x/2)$ приведены в таблице 1. Коэффициентом a_0 в данной модели пренебрегаем.

Таблица 1.

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
-0.0001	-1.5650	-0.0482	0.7872	-0.1740

На данной модели были получены погрешности воспроизведения функции $f(x) = -\sin(\pi x/2)$ и степенных функций на выходе каждого из умножающих ЦАП. Несмотря на то, что погрешности реализации степенных функций имеют значительную величину, при сложении происходит компенсация, и максимальное значение погрешности функционального ЦАП мало отличается от погрешности одиночного ЦАП.

Разрешающая способность функционального ЦАП зависит как от вида функции, так и от значения кода и в первом приближении определяется по формуле

$$\delta_d = -U_{on} f'(x) \Delta x, \quad (1)$$

где δ_d – разрешающая способность ЦАП; $\Delta x = 1/2^m$ – изменение аргумента при изменении цифрового кода на единицу. Проведенные исследования показали, что имеются значительные отклонения от равенства (1) обусловленные конечным сопротивлением ключей в модели умножающих ЦАП.

В режиме Монте-Карло исследовано влияние точности выполнения резисторов, задающих коэффициенты полинома, и напряжений смещения ОУ на точность вычисления функции. При этом число испытаний равно 100. Случайные отклонения имеют нормальное распределение. Для того чтобы погрешность вычислений была сопоставима с погрешностью отдельного ЦАП, необходимо использовать резисторы с допуском не более 0,1 % и ОУ с напряжением смещения не более 1-2 мВ.

В модели, реализующей функцию $f(x) = -\sin(\pi x/2)$ исследованы переходные характеристики при переключении цифрового кода с нулевого значения на максимальное с постоянным входным напряжением $V_{ref} = 5,12$ В. Полученные динамические характеристики приведены в таблице 2.

Модель показывает, что время установления на выходе функционального ЦАП меньше чем на выходе четвертого ЦАП и превышает время установления

первого ЦАП в 1,2 раза. Скорость нарастания соответствует скорости нарастания используемых ОУ. Результаты моделирования при переключении входного напряжения V_{ref} с нулевого значения на 5,12 В с точностью до десятых долей процента совпадают с приведенными в таблице 2.

Таблица 2

Сигнал на выходе:	Время установления с погрешностью 0,1%, мкс	Скорость изменения, В/мкс	Время возрастания сигнала до уровня $0,1U_{max}$, мкс
ЦАП1	23	-0,30	1,9
Инвертора	22	0,23	2,5
ЦАП2	26	0,29	3,0
ЦАП3	28	-0,29	3,9
ЦАП4	31	0,28	4,8
Функц. ЦАП	28	-0,29	3,2

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию экспериментального макета функционального ЦАП. Схема макета (рисунок 5) повторяет схему модели на рисунке 4.

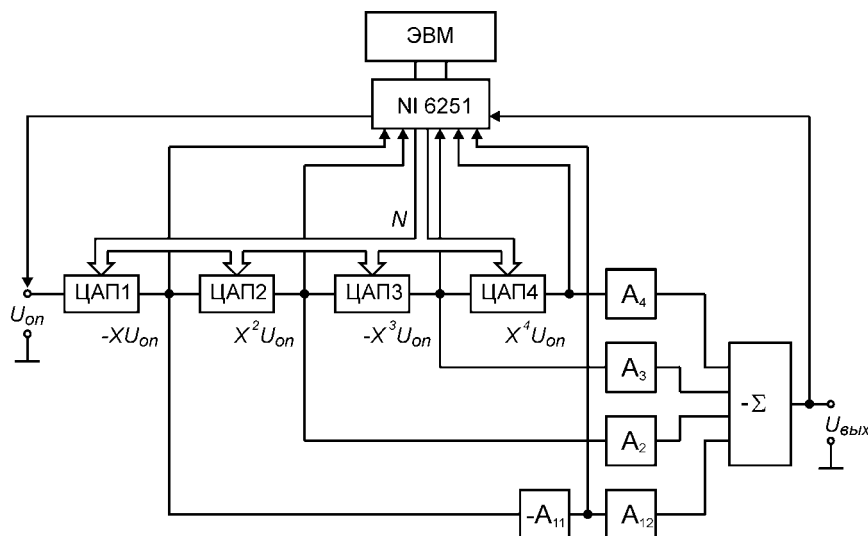


Рисунок 5 – Функциональная схема устройства для исследования экспериментального макета

Она содержит 4 умножающих последовательно соединенных ЦАП ЦАП1-ЦАП4, на которые поступает цифровой код N от ЭВМ. С ЭВМ на аналоговый вход ЦАП1 подается опорное напряжение. Сигналы с выходов ЦАП поступают на масштабирующие блоки A_{12} , A_2 , A_3 , A_4 . Сигнал с выхода первого ЦАП предварительно проходит через инвертор A_{11} . Каждый из этих блоков производит умножение сигнала на соответствующий коэффициент. На сумматоре Σ происходит сложение полученных сигналов. Выходное напряжение функционального ЦАП не содержит постоянного напряжения и

формируется из четырех слагаемых

$$U_{вых} = (-A_{11}A_{12}X - A_2X^2 + A_3X^3 - A_4X^4)U_{он}.$$

В тексте главы подробно описана работа элементов схемы, приведены необходимые расчеты.

Управление экспериментом происходит от электронно-вычислительной машины (ЭВМ) с помощью программно-аппаратного комплекса ELVIS 3.0 и платы сбора данных NI 6251.

В среде программирования LabVIEW разработаны две программы. Первая из них предназначена для изучения погрешностей преобразования сигналов на выходе каждого ЦАП и инвертора. Алгоритм работы программы следующий: устанавливается опорное напряжение, выставляется цифровой код

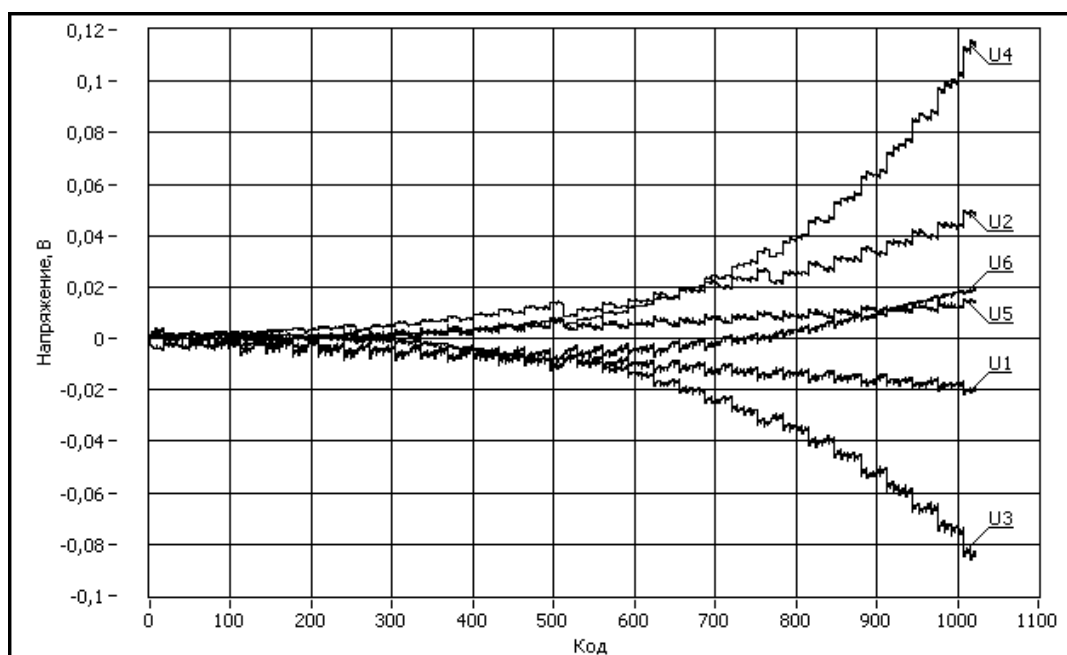


Рисунок 6 – Абсолютная погрешность воспроизведения напряжения функционального ЦАП (U6) и напряжений на выходе ЦАП1 (U1), ЦАП2 (U2), ЦАП3 (U3), ЦАП4 (U4) и инвертора (U5) при $U_{он} = 5,12$ В

на ЦАП1-ЦАП4, производится многократное измерение выходных напряжений ЦАП и инвертора для уменьшения влияния электромагнитных помех, производится расчет погрешности и вывод данных на экран. При проведении серии измерений происходит изменение цифрового кода и процедура повторяется.

Измерения проводились для различных значений опорного напряжения и для различных наборов микросхем ЦАП. Абсолютная погрешность при опорном напряжении 5,12 В приведена на рисунке 6 и по форме совпадает с

графиками полученными для модели. Приведенная погрешность во всех случаях не превышает 0,5 %.

Вторая программа позволяет определить динамические характеристики функционального ЦАП при переключении сигнала на аналоговом или цифровом входе. Измерения осуществляются в одноканальном режиме для достижения максимальной частоты дискретизации. В первом случае измерения производятся при максимальном значении цифрового кода и переключении входного напряжения с нулевого значения на 5,12 В. Во втором случае при постоянном входном напряжении 5,12 В переключается цифровой код с нулевого на максимальное значение.

Таблица 3.

Сигнал на выходе:	Время установления с погрешностью 0,1%, мкс	Скорость нарастания, В/мкс	Время возрастания сигнала до уровня $0,1U_{max}$, мкс
ЦАП1	25	-0,27	1,9
Инвертора	24	0,21	2,6
ЦАП2	32	0,23	4,9
ЦАП3	36	-0,23	5,8
ЦАП4	41	0,22	6,6
Функц. ЦАП	36	-0,29	3,4

Динамические характеристики, полученные при переключении цифрового кода, показаны в таблице 3. Также как для модели время установления напряжения на выходе функционального ЦАП меньше времени установления напряжения на выходе четвертого ЦАП и больше этого же параметра для первого ЦАП в 1,4 раза. Динамические характеристики по аналоговому входу отличаются от приведенных не более чем на 5 %. В главе также представлены графики переходных процессов. Скорость нарастания сигнала на выходе функционального ЦАП соответствует техническим параметрам используемых ОУ (0,3 В/мкс), в то время как скорость нарастания на выходах отдельных ЦАП намного меньше

В приложениях приведены: программа на языке Turbo Pascal, которая позволяет смоделировать тот или иной полином Уолша, рассчитать значение коэффициентов ряда, рассчитать погрешность аппроксимации заданной функции; таблицы параметров компонентов программы Micro-Cap 7, используемых при построении модели умножающего и функционального ЦАП; блок-диаграммы программ измерения инструментальных погрешностей и динамических характеристик функционального ЦАП, написанные в среде LabVIEW; сведения о внедрении результатов диссертационной работы в учебный и производственный процесс.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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

1. В результате проведенного анализа современных методов функционального цифроаналогового преобразования составлена классификация ЦАП с нелинейной характеристикой преобразования. Классификационным признаком послужила очередность процессов цифроаналогового преобразования и математической обработки. Для гибридного метода преобразования рассмотрены варианты использования различных методов аппроксимации: ступенчатой, кусочно-линейной, полиномиальной, дробно-рациональной.
2. Разработан алгоритм нахождения полинома наилучшего приближения, используя разложение по многочленам Чебышева. Для функций $\sin(x\pi/2)$ и $\cos(x\pi/2)$ найдены схмотехнические решения и проведен расчет методических погрешностей, который позволил упростить схему при заданной допустимой погрешности.
3. Разработаны компьютерные модели умножающего и функционального ЦАП, позволившие провести исследования их статических и динамических характеристик и определить основные параметры схемы для достижения необходимой точности.
4. В результате исследования схемы функционального ЦАП, использующего последовательное включение умножающих ЦАП для получения характеристики преобразования в виде полинома, установлено, что при сложении напряжений, пропорциональных степенным функциям, происходит значительная взаимная компенсация погрешностей. Время установления выходного напряжения функционального ЦАП всего в 1,4 раза превышает этот же параметр для отдельного ЦАП.
5. В среде программирования LabVIEW разработаны две программы для проведения макетных исследований. Первая из программ позволяет получить статическую характеристику преобразования на выходе каждого линейного ЦАП в составе функционального ЦАП, рассчитать погрешность. Вторая программа предназначена для исследования динамических характеристик по аналоговому и цифровому входам ЦАП. Программы универсальны и могут быть использованы при исследовании других разновидностей ЦАП.

Таким образом, достигнута поставленная цель и решены задачи, связанные с разработкой теории и исследованием функционального цифроаналогового преобразования, имеющие научную и практическую значимость.

Результаты опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Сапельников В.М., Хакимов Р.А., Коловертнов Г.Ю. Цифроаналоговые преобразователи для воспроизведения тригонометрических функций //Измерительная техника. - 2001. - № 3. - С. 17-20.
2. Сапельников В.М., Гоц С.С., Вахитов Р.Р., Хакимов Р.А. Широкополосный цифруправляемый умножитель частоты и фазы //Измерительная техника. - 2003. - № 6., с 28-31.
3. Вахитов Р.Р., Сапельников В.М., Хакимов Р.А. Умножитель частоты на функциональных цифроаналоговых преобразователях //Приборы и техника эксперимента. 2003. - №5, с 76-78.
4. В.М. Сапельников, Р.А. Хакимов, Г.Ю. Коловертнов, М.А. Шабанов, А.А. Газизов Функциональный цифроаналоговый преобразователь в широкополосном цифруправляемом калибраторе фазы //Приборы и техника эксперимента. 2005. - №4, с 43-46.
5. Сапельников В.М., Хакимов Р.А., Газизов А.А., Шабанов М.А. Функциональные цифроаналоговые преобразователи: принципы построения //Датчики и системы. 2007. - №7, с 46-57.

Других изданиях:

6. Сапельников В.М., Хакимов Р.А., Панафидин А.Н. Нелинейные цифроаналоговые преобразователи для воспроизведения элементарных функций // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XII-ой научн-техн. конф. – М.: МГИЭМ, 2000. С. 275-276.
7. Сапельников В.М. Хакимов Р.А., Панафидин А.Н. Цифро-аналоговые преобразователи для воспроизведения элементарных функций // Труды LV-ой научной сессии, посвященной Дню Радио. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2000. – С. 122-123.
8. Хакимов Р.А., Максutow А.Д., Коловертнов Г.Ю., Сапельников В.М. К вопросу построения функциональных цифроаналоговых преобразователей. / Цифровая обработка сигналов и ее применение: Материалы 3-ей международной конференции. – М., 2000. – С. 206 – 209.
9. Коловертнов Г.Ю., Сапельников В.М., Хакимов Р.А. Широкополосный цифруправляемый калибратор фазы с каскадным включением ЦАП./ Инженерно-физические проблемы новой техники: Материалы 6-ого всероссийского совещания-семинара. - М.: МГТУ им. Баумана, 2001. – С. 154-155
10. Сапельников В.М., Максutow А.Д., Коловертнов Г.Ю., Хакимов Р.А. «Широкополосный цифруправляемый калибратор фазы с каскадным включением ЦАП» // Труды LVI-ой научной сессии, посвященной Дню Радио. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2001. – С. 34-36.

11. Сапельников В.М., Хакимов Р.А. Цифроуправляемый калибратор фазы с каскадным включением ЦАП // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XIII-ой научн-техн. конф. – М.: МГИЭМ, 2001. – С. 276 – 277.
12. Хакимов Р.А., Панафидин А.Н., Фаррахов Р.Р., Гарипов С.Р., Сапельников В.М. Применение степенных рядов для моделирования элементарных функций // Труды Стерлитамакского филиала АН РБ. Серия «Физ.-мат. и техн. науки». Вып. 2. Уфа: Гилем, 2001. - С. 284-287.
13. Сапельников В.М., Хакимов Р.А. Цифроуправляемый калибратор фазы с каскадным включением ЦАП // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Материалы II-ой международной науч.-техн. конф. – Уфа: УГАТУ, 2001. – С. 95-97.
14. Хакимов Р.А. Особенности воспроизведения функции $\ln(x)$ с помощью функционального ЦАП / Региональная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике и физике: Тезисы докладов. – Уфа: РИО БашГУ, 2002. – С. 10.
15. Сапельников В.М., Хакимов Р.А. Широкополосный цифроуправляемый калибратор фазы / Цифровая обработка сигналов и ее применение: Материалы 4-ой международной конференции. - М., 2002. – С. 364 – 366.
16. Сапельников В.М., Хакимов Р.А. Функциональные цифроаналоговые преобразователи и калибраторы фазы на их основе. // Микросистемная техника. – 2002. - № 6 – С. 27-31.
17. Сапельников В.М., Мухортова Е.И., Шабанов М.А., Хакимов Р.А. Способы воспроизведения функции $\ln(X)$ с помощью ЦАП // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XIV-ой научн-техн. конф. – М.: МГИЭМ, 2002. – С. 311 – 313.
18. Сапельников В.М., Хакимов Р.А., Максutow А.Д. Широкополосный цифроуправляемый калибратор фазы // Датчики и системы: Сборник докладов международной конференции. Том III. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. – С. 116 – 120.
19. Сапельников В.М., Коловертнов Г.Ю., Вахитов Р.Р., Хакимов Р.А. Умножитель частоты и фазы на основе каскадно включенных ЦАП/ Состояние и проблемы измерений: Материалы 8-ой Всероссийской научно-технической конференции. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – С. 153-154.
20. Максutow А.Д., Гоц С.С., Вахитов Р.Р., Хакимов Р.А., Сапельников В.М. Широкополосный цифроуправляемый умножитель частоты и фазы. / Цифровая обработка сигналов и ее применение: Материалы 5-ой международной конференции. - М., 2003. – С. 17 – 20.

21. Вахитов Р.Р., Хакимов Р.А., Сапельников В.М., Никаноров В.В. Широкополосный умножитель частоты и фазы // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XV-ой научн-техн. конф. – М.: МГИЭМ, 2003. – С. 251-253.
22. Хакимов Р.А., Сапельников В.М., Никаноров В.В., Коловертнов Г.Ю., Шабанов М.А. Функциональные цифроаналоговые преобразователи в приборостроении. // Актуальные проблемы науки и образования: Труды международного юбилейного симпозиума в 2-х т. Т. 2 – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2003. - С. 258-261.
23. Хакимов Р.А., Гареева Л.Р., Шабанов М.А., Сапельников В.М. Моделирование функционального цифро-аналогового преобразователя с помощью программы MICRO-CAP 7.0. Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. тр. / Под ред. А.И. Громыко, А.В. Сарафанова. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – С. 584 – 586.
24. Вахитов Р.Р., Хакимов Р.А., Сапельников В.М., Максutow А.Д. Функциональные цифроаналоговые преобразователи в умножителе частоты. Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. тр. / Под ред. А.И. Громыко, А.В. Сарафанова. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – С. 666 – 668.
25. Сапельников В.М., Максutow А.Д., Коловертнов Г.Ю., Хакимов Р.А. Функциональные цифро-аналоговые преобразователи – новая возможность приборостроения: Труды 10-го Международного симпозиума ИМЕКО ТС7, Том. 1. СПб., 2004. – С. 205 – 211.
26. Газизов А.А., Хакимов Р.А., Максutow А.Д., Сапельников В.М. Новый метод построения функциональных ЦАП / Цифровая обработка сигналов и ее применение: Материалы 8-ой междунар. конф. – М., 2006. – С. 585–587.
27. В.М. Сапельников, Р.А. Хакимов, М.А. Шабанов, А.А. Газизов Функциональные ЦАП: принципы построения / Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Материалы междунар. научн.-техн. конф. - Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2006. - С. 42-44.
28. Хакимов Р.А., Максutow А.Д., Газизов А.А., Сапельников В.М. Исследование характеристик функционального ЦАП / Цифровая обработка сигналов и ее применение: Материалы 9-ой международной конференции. – М., 2007. – С. 494 – 496.
29. Р.А. Хакимов, А.А. Газизов, А.Д. Максutow, В.М. Сапельников Исследование характеристик функционального ЦАП с помощью лабораторной установки NI ELVIS. Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. статей / Под ред. А.И. Громыко, А.В. Сарафанова. Красноярск: СФУ, 2007. – С. 605 – 608.

ХАКИМОВ Рустем Альбертович

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Специальность 05.13.05 –
Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 27.09.2007. Формат 60×84 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 № 494.

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