

На правах рукописи

БАХИТОВ Расуль Радулович

ЦИФРОУПРАВЛЯЕМЫЕ УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ

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

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

УФА 2006

Работа выполнена на кафедре теоретической и общей электротехники Башкирского государственного аграрного университета (БГАУ) и на кафедре физической электроники Башкирского государственного университета (БГУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сапельников Валерий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы РФ
Прохоров Сергей Антонович
доктор технических наук, доцент
Фетисов Владимир Станиславович

Ведущая организация: Уфимский государственный нефтяной технический
университет (УГНТУ, г.Уфа)

Защита состоится 8 декабря 2006 г. в 11 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, ученый совет УГАТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГАТУ.

Автореферат разослан «__» _____ 200__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

Г.Н. Утляков

БАХИТОВ Расуль Радулович

ЦИФРОУПРАВЛЯЕМЫЕ УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Специальность 05.13.05 –

Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 31.10. 2006. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1, 0. Усл. кр. – отт. 1, 0. Уч. – изд. л. 0,9.
Тираж 100. Заказ № 532.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важных операций, осуществляемых в устройствах информационно-измерительной, вычислительной техники, в радиотехнике, является умножение частоты. К таким устройствам относятся измерительные приборы, генераторы сигналов, радиопередающие и радиолокационные устройства, блоки высокочастотных преобразователей и др. В отечественной и иностранной литературе вопросы получения частоты выходного сигнала, кратной частоте входного сигнала, освещены достаточно широко.

Умножители частоты являются важным звеном многих радиотехнических устройств. Следует отметить, что известные до настоящего времени умножители частоты выполнены на основе аналоговых методов. С внедрением цифровых методов преобразования сигналов и управления функциональными блоками радиотехнических устройств возникает потребность в разработке и создании умножителей частоты, которые могли бы быть интегрированы в цифровые системы с учетом следующих факторов:

- цифровой принцип управления характеристиками преобразования;
- возможность использования в качестве входных сигналов непосредственно цифровых потоков (отсчетных значений), а не аналоговых сигналов.

Перспективы широкого распространения умножителей частоты связаны с расширением полосы частот сигнала в радиотехнике, микропроцессорной и вычислительной технике.

Большой интерес представляет способ умножения частоты, использующий в качестве аппаратного средства функциональные цифроаналоговые преобразователи. Однако до сих пор не созданы умножители частоты с цифровым управлением, которые удовлетворяли бы современным требованиям. И, следовательно, существует необходимость разработки цифруправляемых умножителей частоты на современной элементной базе с достаточно высокими техническими и метрологическими характеристиками.

Таким образом, проблема создания цифруправляемых умножителей частоты является весьма актуальной задачей.

Особое внимание в работе уделено цифруправляемым умножителям частоты, разработке математической модели, технической реализации способа умножения частоты гармонического сигнала, подвергаемого нелинейному полиномиальному чебышевского типа преобразованию, исследованию его основных метрологических характеристик.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка, теоретическое и экспериментальное исследование цифруправляемых умножителей частоты, предназначенных для непосредственной работы с цифровыми потоками, развитие теории умножения частоты и фазы в цифровых системах.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведен сравнительный анализ существующих методов умножения частоты и типов умножителей частоты, применяемых в современных устройствах, определены закономерности их работы, достоинства и недостатки.
2. Рассмотрены основы теории умножения частоты и предложено научное обоснование способа цифруправляемого умножения частоты.
3. Разработана математическая модель, позволяющая определить основные технические характеристики цифруправляемого умножителя частоты, проведено компьютерное моделирование процесса цифруправляемого умножения частоты.
4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования цифруправляемого умножителя частоты с целью определения его характеристик и параметров функциональных узлов, влияющих на результат воспроизведения выходного сигнала.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертационной работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследования.

Математическая модель и соотношения, предложенные в работе, основаны

на фундаментальных положениях математического анализа (разложение функций в ряд Тейлора, разложение по обобщенным многочленам Чебышева, представление функций рядом Фурье).

Применялись методы теоретической радиотехники и электроники, теории электрических цепей, теории радиотехнических цепей и сигналов. Для создания умножителей частоты применялся способ функционального цифро-аналогового преобразования.

При проектировании основных узлов аппаратной части применялись методы цифровой и вычислительной техники, теории численных методов обработки информации, математического моделирования, вычислительного эксперимента, создания алгоритмов и программного обеспечения для анализа работы цифруправляемого умножителя частоты.

При разработке программного обеспечения и компьютерного моделирования использовались программные средства Borland Delphi ver. 7.0, Turbo Pascal, Assembler, MathCAD.

На защиту выносятся:

1. Общая концепция построения цифруправляемых умножителей частоты.
2. Математическая модель цифруправляемого умножения частоты гармонического сигнала.
3. Функциональная и принципиальная схемы цифруправляемого умножителя частоты.
4. Результаты теоретических исследований и оценка характеристик при воспроизведении выходного сигнала.
5. Функциональная и принципиальная схемы устройства сопряжения с персональным компьютером.
6. Результаты экспериментальных исследований цифруправляемого умножителя частоты и анализ его работы.

Научная новизна. Впервые исследован способ цифруправляемого умножения частоты, разработана математическая модель цифруправляемого

умножения частоты. На основе компьютерного моделирования (свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2006612687) получены зависимости, определяющие требования к стабильности амплитуды входного сигнала и соотношения сигнал/шум. Исследованы основные характеристики, влияющие на характер формирования выходного сигнала.

Разработан цифроуправляемый умножитель частоты и фазы гармонического сигнала (Пол. решение Роспатента на выд. патента на ПМ по заявке №2006117579) и исследована возможность расширения его динамического диапазона. Получены аналитические выражения для оценки параметров умножителей.

Достоверность. Достоверность математической модели подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов вычислительных и полученных натуральных экспериментов. Полученные в диссертационной работе результаты и выводы подтверждаются актами внедрения в производственный и учебный процессы. Результаты работ апробированы на Международных и Всероссийских научно–технических конференциях.

Практическая ценность работы:

- цифроуправляемый умножитель частоты, реализованный на каскадно включенных функциональных ЦАП;
- средства расчета и анализа цифроуправляемых умножителей частоты, реализованные на базе САПР MathCAD и среды программирования Borland Delphi, позволяющие решать задачи моделирования заданной нелинейной характеристики и оптимизировать схемотехнику умножителей частоты, управляемых цифровым кодом;
- программно-аппаратные средства обработки сигналов и вывода цифрового кода на шину данных контроллера IDE.

Полученные результаты исследования способа умножения частоты используются в учебном процессе Башкирского государственного аграрного университета, Башкирского государственного университета, а также внедрены в производственный процесс в ООО «Производственно–технологическое управление связи «Башнефть».

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

- LVI-ой научной сессии Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, посвященной Дню Радио (Москва, РНТОРЭС, 2001 г.);
- Межвузовской конференций «Электротехнические комплексы и системы», посвященной 25-летию кафедры электрооборудования, летательных аппаратов и наземного транспорта УГАТУ (Уфа, УГАТУ, 2001 г.);
- 8-ой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (Москва, МГТУ им. Баумана, 2002 г.);
- 5-ой Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2003 г.);
- XV-ой научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления «Датчик-2003» (Москва, МГИЭМ, 2003 г.);
- Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, КГТУ, 2004 г.).

Публикации. По результатам научных исследований опубликовано 10 печатных работ, из которых 2 статьи опубликованы в журналах, включенных в перечень ВАК. Две статьи переведены на английский язык и изданы в зарубежных журналах.

Структура и объем диссертации. Общий объем диссертационной работы составляет 144 страницы машинописного текста, состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, четырех глав, заключения, содержит 80 иллюстраций, 5 таблиц и 3 приложений. Список литературы содержит 88 единиц наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении выявлена научно-техническая проблема, решаемая в диссертации, показана ее актуальность и практическая ценность, сформулированы

цель и основные задачи исследования, определены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены существующие умножители частоты, состояние проблемы, методы построения, освещены тенденции развития и использования техники умножения частоты. Показано, что по характеру обрабатываемого сигнала умножители частоты можно разделить на аналоговые и цифровые.

Показано, что применение аналогового или цифрового типов умножителей частоты влияет на технические характеристики устройства и определяет его функциональные возможности. Сформулированы требования и поставлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена созданию и исследованию математической модели умножения частоты, разработке основ теории цифруправляемого умножения частоты.

Исследована корректность допущений, возникающих при составлении данной модели.

На рисунке 1 представлена разработанная функциональная схема умножителя частоты.

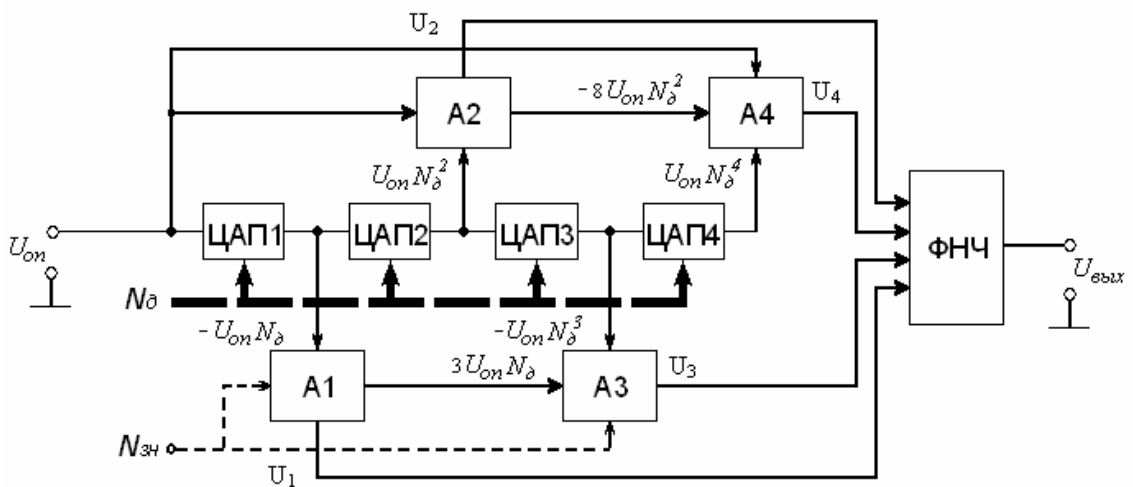


Рисунок 1.

Исследуемый умножитель частоты включает цифроаналоговые

преобразователи ЦАП1÷ЦАП4, масштабные преобразователи А1÷А4 и аналоговый фильтр нижних частот (ФНЧ). Основу схемы составляет цепочка каскадно включенных цифроаналоговых преобразователей, моделирующих степенную зависимость выходного напряжения от управляющего кода.

На аналоговый вход цифроаналогового преобразователя ЦАП1 подается постоянное опорное напряжение U_{on} . В каждом из каскадно соединенных ЦАП осуществляется умножение аналогового сигнала на цифровой код, представленный в виде $N_\delta(t_j)$. Знаковый бит N_{zn} цифрового кода $N_\delta(t_j)$ управляет знаками суммируемых напряжений. На выходе ЦАП1 в дискретные моменты времени формируется однополярный сигнал напряжением $-b \cdot U_{on} \cdot N_\delta(t_j)$. Выход ЦАП1 соединен с аналоговым входом ЦАП2. На выходе ЦАП2 формируется сигнал $b^2 \cdot U_{on} \cdot N_\delta^2(t_j)$, пропорциональный квадрату цифрового кода. На выходе ЦАП3 формируется сигнал $-b^3 \cdot U_{on} \cdot N_\delta^3(t_j)$, пропорциональный кубу цифрового кода. На выходе ЦАП4 – сигнал $b^4 \cdot U_{on} \cdot N_\delta^4(t_j)$, пропорциональный четвертой степени цифрового кода.

Функционирование умножителя частоты заключается в следующем. В дискретные моменты времени t_j ($j=0 \dots \infty$) гармонический сигнал $\sin(\omega t + \varphi_0)$ подвергается аналого-цифровому преобразованию. Сформированный цифровой код $N_\delta(t_j)$ поступает на цифровые входы ЦАП, выполняющих функцию делителей напряжения. Мгновенное значение напряжения $u_1(t_j)$ на выходе первого ЦАП составляет $u_1(t_j) = U_{on} \cdot b \cdot N_\delta(t_j)$, где b – некоторая константа преобразования каждого ЦАП. На выходе каждого i -го ЦАП мгновенное значение $u_i(t_j)$ напряжения будет равно

$$u_i(t_j) = u_{i-1}(t_j) \cdot b \cdot N_\delta(t_j) = U_{on} \cdot b^i \cdot N_\delta^i(t_j).$$

Таким образом, на выходе умножителя частоты дискретные значения напряжения $U_{вых}(t_j)$ в моменты времени t_j будут равны

$$U_{вых}(t_j) = U_{on} \cdot [a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \cdot b^i \cdot N_\delta^i(t_j)].$$

Значения коэффициентов передачи a_i подбираются в соответствии со значением b^i и видом полиномов Чебышева.

Получены выражения для мгновенных значений напряжения выходного сигнала, которые определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} U_1(t) &= \cos(\omega t), \\ U_2(t) &= 2 \cos^2(\omega t) - 1, \\ U_3(t) &= 4 \cos^3(\omega t) - 3 \cos(\omega t), \\ U_4(t) &= 8 \cos^4(\omega t) - 8 \cos^2(\omega t) + 1. \end{aligned} \tag{1}$$

Постоянные коэффициенты, стоящие в системе уравнений (1), зависят от отношения сопротивления обратной связи к сопротивлению на входе операционного усилителя, т.е. от его коэффициента передачи.

Разработаны способы получения заданных гармоник, приведены и исследованы принципиальные схемы. Проведен расчет схем умножителей частоты для получения заданных гармоник.

Показано, что использование цифруправляемого умножителя частоты по сравнению с известными умножителями позволяет существенно увеличить точность устройства, значительно снизить требования к фильтрам нижних частот или полного их исключения за счет высокой точности чебышевского преобразования, добиться снижения уровня паразитных спектральных составляющих, присутствующих на выходе устройства наряду с полезным сигналом.

Показано, что необходимым условием работы умножителя частоты является использование умножающих свойств ЦАП при их каскадном включении.

Третья глава посвящена анализу и исследованию цифруправляемого умножения частоты при помощи современных программ компьютерного моделирования MathCAD и среды программирования Borland Delphi.

Компьютерное моделирование базируется на основе созданной математической модели и анализа полученных выражений при описании способа цифруправляемого умножения частоты. Написана программа, выполняющая три важные задачи.

Первая задача заключается в самом моделировании умножения частоты входного гармонического сигнала и анализе его параметров.

При решении этой задачи программа выполняет следующие действия:

- изменение формы входного сигнала $u(t)$ при изменении его параметров: амплитуды, частоты, начальной фазы и отклонения амплитуды от оптимальной, возможно наложение на входной сигнал белого шума, амплитуда которого определяется в процентном соотношении относительно амплитуды входного сигнала;
- изменение вольтамперной характеристики умножителя частоты, аппроксимация характеристики умножителя частоты описывается полиномами Чебышева;
- графический вывод выходного сигнала $i(t)$, форма которого зависит от выбора полинома Чебышева, согласно выражения (1).

Рабочий вид программы моделирования гармонического сигнала «BMF ver. 3.0» представлен на рисунке 2.

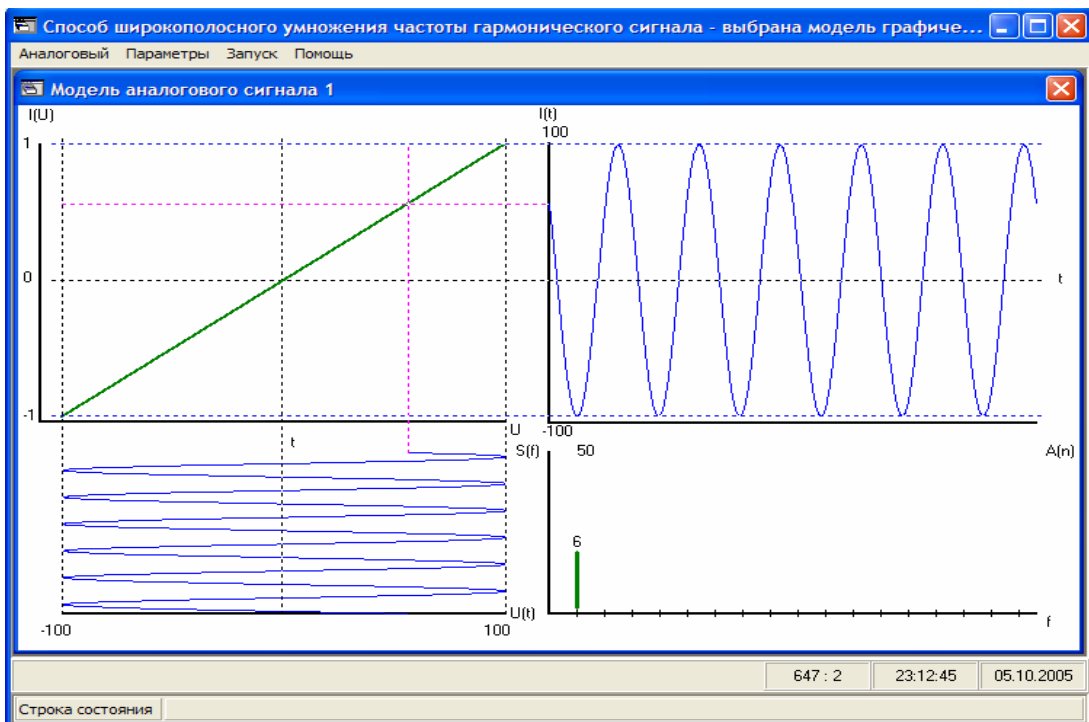


Рисунок 2.

На рисунке 3 представлены графики формы входного и выходного сигналов, получаемых при прохождении через умножитель частоты, вольтамперная характеристика $i(u)$ которого описана третьим полиномом

Чебышева.

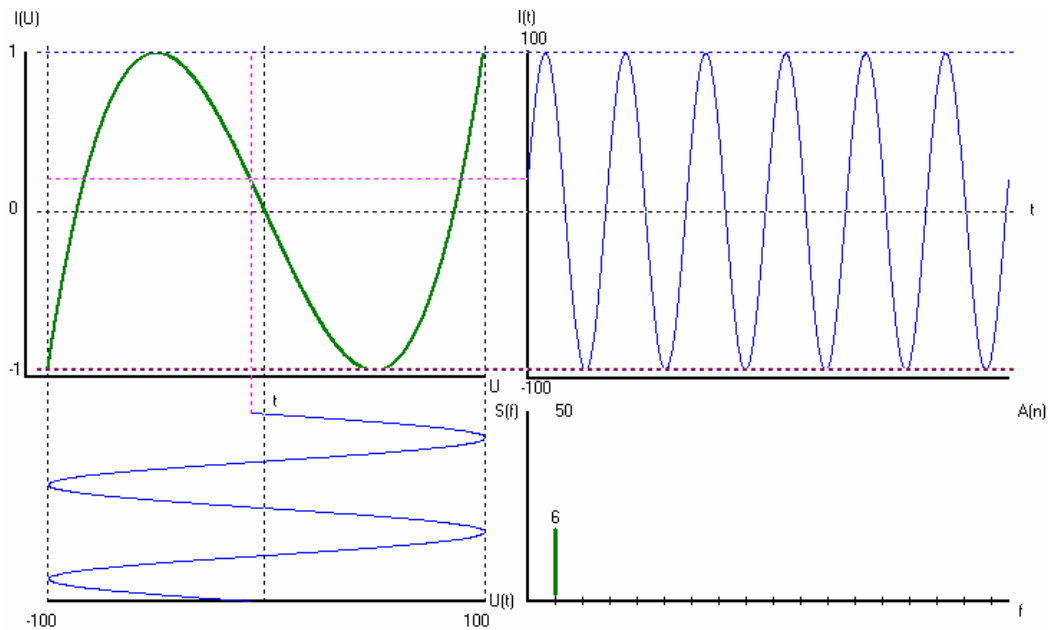


Рисунок 3.

Вторая задача заключается в формировании цифрового кода моделируемого периодического синусоидального сигнала и вывода его на цифровой порт IDE. Решение этой задачи рассмотрено в четвертой главе диссертационной работы.

Третья задача состоит в спектральном анализе полученных результатов выходного сигнала умножителя частоты при разложении его в ряд Фурье, а именно представление в графическом виде амплитудной спектральной диаграммы. На графиках решение представлено в виде спектральной зависимости $S(f)$.

Показаны результаты компьютерного моделирования сигналов, формируемых в цифрууправляемом умножителе частоты, а также спектральный анализ формируемых четырех гармоник методом дискретного преобразования Фурье, как при изменении амплитуды входного сигнала, так и при изменении характеристик моделируемого умножителя частоты.

Четвертая глава посвящена разработке устройства сопряжения (УС), принципа работы и анализа его технических характеристик. УС используется для программного вывода десятиразрядного цифрового кода через 16-разрядную шину данных интерфейса IDE ПК.

УС выполняет две важные функции. Первая функция – интерфейсная, обеспечивающая обмен данными. Ко второй функции относится программная, реализующая программный вывод цифрового кода, обеспечивающего работоспособность умножителя частоты.

Функциональная схема УС показана на рисунке 4. Устройство сопряжения включает интерфейсную часть (ИЧ), дешифратор адреса (ДА), двунаправленный шинный формирователь ШФ, регистр хранения PX1 (по записи из ЭВМ) и PX2 (по чтению в ЭВМ). Сопряжение шины данных (ШД) устройства с шиной данных второго канала IDE ПК осуществляется через шестнадцатиразрядный шинный формирователь (ШФ) и регистры хранения PX1 и PX2. Дешифратор адреса выполняет дешифрацию кода, выставляемого на шине адреса (ША). При выборе адреса 170h по записи или чтению сигнал на выходе дешифратора адреса устанавливается в состояние низкого потенциала и переводит соответственно PX1 или PX2 в активное состояние. Знаковый бит подается на соответствующий разряд ШД.

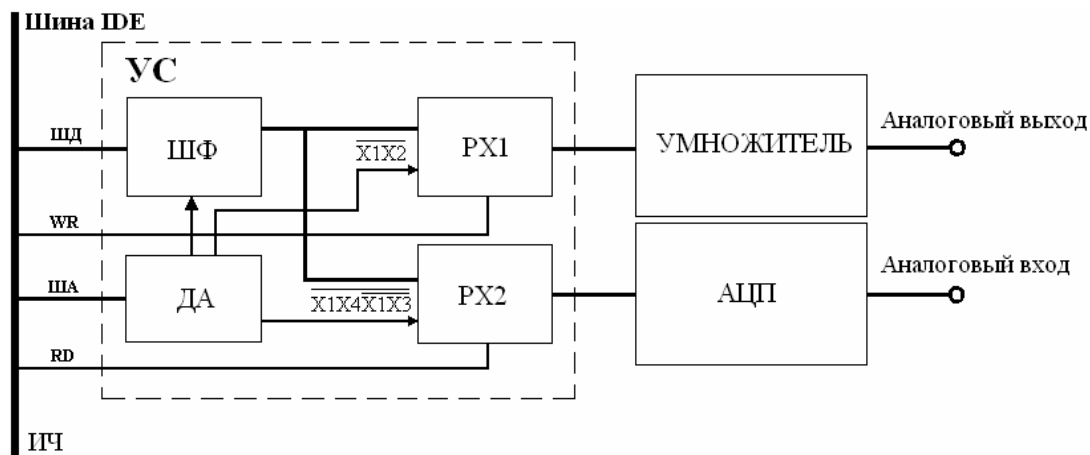


Рисунок 4.

Проведены экспериментальные исследования характеристик функциональных узлов и требований, предъявляемых при проектировании устройства сопряжения. Получены следующие результаты.

- Задержка между выставлением адреса и передним фронтом строба обмена составила не менее 90 нс; это время определяет время распознавания своего адреса проектируемым УС.

- Длительность строба обмена составила 170 нс.
- Задержка между задним фронтом сигнала *IOW* и снятием записываемых данных определена в пределах 30 нс; это время определяет требования к быстродействию принимаемых данных от узлов УС.

Таким образом, спроектированное и разработанное устройство сопряжения позволяет работать на частотах выходного цифрового сигнала до 3,5 МГц. Такая характеристика УС позволяет установить частоту выходного сигнала цифрууправляемого умножителя частоты порядка до 14 МГц при кратности умножения равной четырем.

Показана универсальность устройства сопряжения, которая заключается в возможности применении типов интерфейсов персонального компьютера ISA или АТА, как для чтения, так и для записи цифрового кода.

Установлено, что использование ПЭВМ как источника формирования цифрового кода позволило пренебречь погрешностями, которые возникают при использовании АЦП параллельного типа. Сделан анализ возможных погрешностей и их аналитическое исследование, определено их влияние на формирование сигналов управления и сигналов цифрового кода.

В приложениях приведены процедура программного вывода цифрового кода, обеспечивающая функционирование цифрууправляемого умножителя частоты при управлении от персонального компьютера, сведения о внедрении результатов работы в производственный процесс, листинг программы «BMF ver. 3.0».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

Теоретические и экспериментальные исследования позволили сформулировать следующие основные результаты и выводы:

1. Проведен анализ современного состояния техники умножения частоты и ее реализации при решении научных и практических задач. При анализе

существующих методов умножения частоты выявлены достоинства и недостатки умножителей частоты, показана необходимость разработки цифруправляемых умножителей частоты, которые могут быть интегрированы в цифровые системы.

2. Разработана и исследована математическая модель цифруправляемых умножителей частоты. Разработана программа компьютерного моделирования цифруправляемого умножения частоты гармонического сигнала. Моделирование позволило установить критерии качества результирующего сигнала, как в условиях воздействия помех, так и без помех. Новизна и оригинальность программы подтверждена свидетельством РФ об официальной регистрации программ №2006612687.

3. Установлено, что при воздействии на входной сигнал шума с амплитудой до 1 % от номинальной, в спектре выходного сигнала высшие гармоники не наблюдаются. При воздействии шума с амплитудой 2 % наблюдаются высшие и низшие гармоники с равномерным спектром и амплитудами до 5 % от амплитуды основной гармоники.

4. Установлены требования, предъявляемые к амплитуде входного сигнала, изменение которой влияет на качество выходного сигнала. Показано, что отклонение амплитуды входного сигнала на 1 % от номинальной приводит к визуально заметному искажению выходного сигнала только для четвертой гармоники, а при отклонении на 2 % от номинальной заметные искажения выходного сигнала появляются при формировании третьей гармоники.

5. Разработан цифруправляемый умножитель частоты, проанализированы и исследованы его технические характеристики и возможности их реализации (положительное решение Роспатента на выд. патента на полезную модель по заявке №2006117579). Предложены способы оптимизации схемотехнических решений получения гармоник.

Таким образом, достигнута поставленная цель и решены задачи, имеющие научную и практическую значимость.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. Метод широкополосного умножения частоты. / Гоц С.С., Сапельников В.М., Вахитов Р.Р. // Труды LVI-ой сессии, посвященной Дню Радио. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2001. – С.116-119.
2. Умножитель частоты. / Гоц С.С., Сапельников В.М., Вахитов Р.Р. // Электротехнические комплексы и системы.: Межвузовский научный сборник. Уфа, УГАТУ, 2001. С. 103 – 107.
3. Умножитель частоты и фазы на основе каскадно включенных ЦАП / Сапельников В.М., Коловертнов Г.Ю., Вахитов Р.Р., Хакимов Р.А. // Состояние и проблемы измерений.: Материалы 8-ой Всероссийской научно-технической конференции. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – С. 153-154.
4. Широкополосный цифруправляемый умножитель частоты и фазы. / Максutow А.Д., Гоц С.С., Вахитов Р.Р., Хакимов Р.А., Сапельников В.М. // Цифровая обработка сигналов и ее применение.: Материалы 5-й Международной конференции, М., 2003. – С. 17 – 20.
5. Широкополосный цифруправляемый умножитель частоты и фазы. / Сапельников В.М., Гоц С.С., Вахитов Р.Р., Хакимов Р.А. // Измерительная техника, 2003, № 6. – С. 28 – 31.
6. Функциональные цифроаналоговые преобразователи в умножителе частоты. / Вахитов Р.Р., Хакимов Р.А., Сапельников В.М., Максutow А.Д. // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. тр. под ред. А.И. Громыко. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – С. 666 – 669.
7. Умножитель частоты на функциональных цифроаналоговых преобразователях./ Вахитов Р.Р., Сапельников В.М., Хакимов Р.А. // Приборы и техника эксперимента, 2003, № 5. – С. 76 – 78.
8. Широкополосный умножитель частоты и фазы. / Вахитов Р.Р., Хакимов Р.А., Сапельников В.М., Никаноров В.В. // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления.: Материалы XV-ой научн.-техн. конф. – М.: МГИЭМ, 2003. – С. 251-253.

9. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2006612687. Программа для моделирования широкополосного умножения частоты гармонического сигнала. Вахитов Р.Р. Зарегистрировано 31.07.2006 г.
10. Положительное решение Роспатента на выдачу патента на полезную модель по заявке № 2006117579. Умножитель частоты и фазы гармонического сигнала. Вахитов Р.Р. Приоритет от 30.05.2006 г.

