Гребенко Юрий Александрович. Системотехническое проектирование однородных устройств обработки сигналов : диссертация ... доктора технических наук : 05.12.04.- Москва, 2002.- 253 с.: ил. РГБ ОД, 71 03-5/200-9

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

ГРЕБЕНКО ЮРИЙ АЛЕКСЛВДрбвИЧ

СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ОДНОРОДНЫХ УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Специальность 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и

устройства радионавигации, радиолокации и телевидения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант доктор технических наук, профессор С.М. Смольский

Москва

Аннотация

В диссертации представлены теоретические основы системотехнического проектирования однородных аналоговых и цифровых устройств обработки сигналов. Показано, что использование базиса из идентичных функциональных модулей позволяет улучшать точностные показатели преобразования за счет рационального построения структурной схемы. Выявлены свойства потенциально лучших структурных схем и получены формулы для расчета показателей их качества. Предложены варианты реализуемых структурных схем, близких по свойствам к оптимальным, и разработаны методики их расчета. Предложена обобщенная процедура проектирования разнообразных функциональных блоков на базе идентичных модулей. На ее основе разработаны методики проектирования однородных масштабных преобразователей, линейных инерционных преобразователей, параметрических и нелинейных безынерционных преобразователей. Предложен новый метод цифрового моделирования аналоговых фильтров, названный методом инвариантных частотных характеристик. Предложены способы обеспечения реализуемости цифровых фильтров на идентичных звеньях. Рассмотрен класс комплексных аналоговых и цифровых фильтров и предложены варианты оценки близости таких фильтров по свойствам к аналитическим фильтрам. Разработаны методики проектирования комплексных фильтров на базе идентичных звеньев. Предложенные методики проектирования проиллюстрированы большим количеством примеров.

Список сокращений

ABM - аналоговая вычислительная машина

АФП - аналоговый фильтр прототип

АЦП - аналого-цифровой преобразователь

АЧХ - амплитудно-частотная характеристика

БИХ - бесконечная импульсная характеристика

ИЧХ - инвариантная частотная характеристика

КДФ - комплексный дискретный фильтр

КИХ - конечная импульсная характеристика

ЛБП - линейный безынерционный преобразователь

ЛИП - линейный инерционный преобразователь

МП - масштабный преобразователь

НБП - нелинейный безынерционный преобразователь

НЧ - низкая частота

ОС - обратная связь

ОУ - операционный усилитель

ПБП - параметрический безынерционный преобразователь

ПЗФ - полосно-задерживающий фильтр

ПЛИС - программируемая логическая интегральная схема

ППФ - полосно-пропускающий фильтр

УФР - условия физической реализуемости

ФБ - функциональный блок

ФВЧ - фильтр верхних частот

ФМ - функциональный модуль

ФНЧ - фильтр нижних частот

ФЧХ - фазочастотная характеристика

ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь

ЦРФ - цифровой рекурсивный фильтр

8

21

21

22

26

29

31

35

37

39

42

45

45

46

47

59

61

61

63

64

66

66

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1 .Основы системотехнического проектирования однородных устройств обработки сигналов

1.1. Общая характеристика подхода

1.2. Выбор и описание базиса аналоговых устройств обработки

сигналов

1.3. Выбор и описание базиса цифровых устройств обработки

сигналов

1.4. Структурные схемы и расчет погрешности преобразования

1.4.1 .Анализ мультипликативной погрешности

1.4.2. Анализ нелинейной погрешности

1.4.3. Анализ аддитивной погрешности

1.4.4. Анализ влияния неточности реализации связей

1.5.Оптимальная структурная схема

1.6. Методика синтеза структурных схем

1.6.1 .Постановка задачи

1.6.2. Аппроксимация в функциональной области

1.6.3. Реализация структурной схемы

1.7.0сновные результаты

2. Синтез однородных масштабных преобразователей

2.1. Методы обеспечения высокой точности

2.2. Проектирование масштабных преобразователей

2.3. Базовые усилительные модули

2.4. Синтез стабильных масштабных преобразователей

2.4.1. Параметры стабильных масштабных

преобразователей

2.4.2. Аппроксимация в функциональной области 69

2.4.3. Проверка устойчивости 71

2.4.4. Реализация структурной схемы 74

2.5. Синтез усилителей с контролируемыми частотными

характеристиками 76

2.5.1. Усилители с заданной формой АЧХ 77

2.5.2. Усилители импульсного сигнала 81

2.5.3. Усилители с малыми частотными искажениями 84

2.5.4. Узкополосные масштабные преобразователи 89

2.6. Основные результаты 94

3. Синтез однородных аналоговых линейных инерционных

преобразователей 96

3.1. Современное состояние и проблемы проектирования 96

3.2. Схемотехника базовых звеньев 98

3.3. Синтез структурных схем ЛИП 103

3.3.1. Синтез по передаточной функции 104

3.3.2. Синтез по НЧ-прототипу 105

3.4. Синтез однородных активных RC-фильтров с низкой

параметрической чувствительностью 107

3.5. Масштабирование 115

3.6. Примеры проектирования 117

3.6.1. Каскадная реализация 117

3.6.2. Каноническая реализация 120

3.6.3. Избыточная структура с симметрированием 121

3.7. Основные результаты 124

4. Синтез параметрических и нелинейных безынерционных

функциональных преобразователей 125

4.1. Современное состояние и проблемы проектирования 125

4.2. Функциональный базис 126

4.3. Системотехническое проектирование 129

4.4. Примеры проектирования 130

4.4.1. Проектирование параметрических безынерционных 130

преобразователей

4.4.2. Проектирование нелинейных безынерционных 132

преобразователей

4.5. Основные результаты 134

5. Синтез аналоговых комплексных линейных инерционных

преобразователей 135

5.1. Базовые понятия и термины 135

5.2. Аналоговые аналитические фильтры 141

5.3. Определение передаточных функций комплексных полосно-пропускающих фильтров 142

5.4. Реализация аналоговых комплексных фильтров 143

5.5. Проектирование аналоговых аналитических фильтров 154

5.5.1. Оценка степени аналитичности комплексных

аналоговых полосно-пропускающих фильтров 155

5.5.2. Использование каскадирования для построения

аналитических фильтров 159

5.6. Основные результаты 161

6. Синтез однородных цифровых фильтров 163

6.1. Метод инвариантных частотных характеристик 164

6.2. Синтез однородных цифровых БИХ-фильтров 170

6.2.1. Комбинирование способов численного

интегрирования 171

6.2.2. Метод билинейного преобразования 177

6.2.3. Метод «заглушки» 185

6.3. Каскадирование идентичных блоков 189

6.4. Синтез цифровых ФНЧ без операций умножения 193

6.5. Основные результаты 197

7. Синтез цифровых комплексных фильтров 198

7.1. Дискретные комплексные сигналы и фильтры 198

7.2. Дискретные аналитические фильтры 202

7.3. Оценка степени аналитичности комплексных дискретных

фильтров 204

7.4. Метод смещения передаточной функции дискретного

ФНЧ

7.5. Аналитические дискретные БИХ-фильтры

7.6. Аналитические дискретные КИХ-фильтры

7.7. Дискретные комплексные фильтры без операций умножения

7.8.Определение передаточных функций комплексных

цифровых фильтров методом инвариантной частотной характеристики

7.9. Цифровое моделирование аналоговых комплексных

фильтров

7.10. Основные результаты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Литература

**Заключение**

Представленные в диссертационной работе результаты исследований позволяют сделать следующие обобщающие выводы:

1. Системотехнический подход позволяет формализовать процедуру проектирования, создавая предпосылки для автоматизации проектирования устройств обработки сигналов.
2. Использование базиса, состоящего из идентичных модулей, делает роль структурной схемы в обеспечении точности преобразования доминирующей, обеспечивает удобство перестройки параметров устройств обработки, соответствует требованиям технологии микроэлектронного исполнения.
3. Системотехническое проектирование разнообразных аналоговых и цифровых устройств обработки вещественных и комплексных сигналов может проводиться в рамках единой процедуры проектирования на базе идентичных модулей.
4. Существуют свойства структурных схем, а именно, симметрия относительно отдельных модулей и равенство максимальных уровней сигналов на их входах, обеспечивающие минимизацию вкладов комплекса погрешностей в результирующую погрешность преобразования.
5. Применение избыточных структурных схем во многих случаях может оказаться достаточным для обеспечения показателей качества, близких к оптимальным.
6. Каскадирование блоков обработки сигналов, построенных с использованием небольшого числа идентичных модулей, не нарушает симметрию структурной схемы и во многих случаях оказывается эффективным способом построения фильтрующих устройств высокого порядка.
7. Использование понятия аналитического фильтра, как

идеализированного устройства, обеспечивающего преобразование

вещественного сигнала в аналитический, оказывается весьма полезным и позволяет ввести показатели, отражающие степень близости комплексного фильтра к аналитическому.

1. Предложенный метод инвариантных частотных характеристик эффективен при цифровом моделировании аналоговых узкополосных устройств с произвольным видом АЧХ и ФЧХ.
2. Цифровые комплексные фильтры, близкие по свойствам к аналитическим, могут быть реализованы без применения операции умножения.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработаны теоретические основы системотехнического проектирования типовых устройств (функциональных блоков) обработки аналоговых и цифровых сигналов на базе идентичных модулей, включающие:
* формулировку требований к математическим моделям рассматриваемых функциональных блоков и модулей;
* методику нахождения функциональной связи между математическими моделями функциональных блоков и базовых модулей в виде дробно-рациональной функции;
* исследование влияния вида структурной схемы на точностные показатели функциональных блоков и выявление условий обеспечения минимизации погрешностей преобразования;
* разработку методик реализации структурных схем функциональных блоков, в том числе и структурных схем, близких по свойствам к оптимальным.
1. На основе предложенных общих принципов системотехнического

проектирования однородных устройств обработки сигналов разработаны методики проектирования разнообразных аналоговых функциональных блоков: стабильных масштабных преобразователей, масштабных

преобразователей с контролируемыми частотными характеристиками, масштабных преобразователей с малым уровнем частотных искажений в полосе рабочих частот, однородных активных фильтров высокого порядка, параметрических и нелинейных безынерционных преобразователей на базе перемножителей.

1. Разработаны методики синтеза цифровых фильтров на базе идентичных звеньев и предложены способы обеспечения вычислимости (реализуемости).
2. Предложены методики проектирования однородных устройств обработки аналоговых и цифровых комплексных сигналов.
3. Определен класс аналитических фильтров и введены показатели степени близости комплексного фильтра по свойствам к аналитическому.
4. Предложен метод цифрового моделирования аналоговых фильтров, ориентированный на точное воспроизведение их частотных характеристик в ограниченной полосе частот, и показано, что при проектировании полосно­пропускающих цифровых фильтров этот метод приводит к цифровым фильтрам с комплексными коэффициентами.
5. Предложен и исследован метод проектирования аналитических КИХ и БИХ цифровых фильтров, базирующийся на методе смещения частотных характеристик цифровых фильтров нижних частот с вещественными коэффициентами.
6. Предложен и исследован метод построения симметричных структурных схем аналоговых и цифровых однородных фильтров путем

последовательного соединения одинаковых фильтров невысокого порядка с симметричными структурами.

Предложен метод построения цифровых преобразователей вещественного сигнала в аналитический без использования операции умножения, который можно рассматривать также и как метод расчета цифровых полосовых фильтров без использования операции умножения