

на правах рукописи

Мартыненко Виталий Владимирович

УДК 621.372.54

**ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ
ВЫСОКОГО ПОРЯДКА**

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

43 30.823
ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00778833 (-)

Дисертація являється рукописью.

Робота виконана на кафедрі "Промислова електроніка"
Одеського державного політехнічного університету

Научний керівник:

академик, доктор технічних наук, професор Малахов Валерій Павлович

Научний консультант:

кандидат технічних наук Майко Геннадій Володимирович

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук Кошевой Віталій Михайлович

кандидат технічних наук Пичугин Алексей Євгенєвич

Ведуща організація:

СКБ "Молнія", Одеса.

Захита состоится "27" октября 1994 г. в 14 час. 00 мин.

в аудиторії 115У на засіданні спеціалізованого комітету К-068.19.04

по присудженню учених степеней кандидата технічних наук

Одеського державного політехнічного університету по адресу:

270044, г. Одеса, пр. Шевченко 1, ОПТУ.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці університету.

Автореферат розослан 27^{го} вересня 1994 г.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направлять по указанному выше адресу.

Учений секретарь

спеціалізованого комітету, к.т.н.

В.И. Капинос

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время системы автоматического управления (САУ) находят широкое применение в электронной промышленности. В состав любой такой САУ входят датчики, управляющие устройства и исполнительные механизмы. Надежность и эффективность работы САУ определяется точностью обработки полезных сигналов датчиков и точностью формирования сигналов управления, на которые оказывают влияние различные дестабилизирующие факторы. Для получения достоверного сигнала используются частотно-избирательные устройства, которые позволяют выделить полезный сигнал на фоне шумов и помех. В настоящее время в САУ для этого широко применяют АРС-фильтры, имеющие существенные преимущества по сравнению с другими типами фильтров. Например, одним из распространенных видов обработки сигналов является их спектральное преобразование, когда требуется выделить (подавить) составляющие спектра сигналов с большой точностью. Управляющие устройства САУ, как правило строятся на базе цифровой техники и на этапе временной дискретизации аналогового сигнала датчиков требуется ограничение спектра входного сигнала. Во всех этих случаях в САУ используются АРС-фильтры высокого порядка. При помощи этих фильтров возможна принципиальная реализация заданных характеристик со сколь угодно большой степенью приближения.

Существующие методы проектирования таких фильтров — каскадный, параллельный, имитации LC-прототипа и многопетлевой метод не дают обобщенного подхода к проектированию низкочувствительных структур высоких порядков; при этом при проектировании схемы остро встают вопросы стабильности схемы в целом, даже при использовании высокостабильных каскадов.

Поскольку в настоящее время не существует общей методики проектирования АРС-фильтров высокого порядка, а также их оценки по критериям чувствительности, оптимальная реализация низкочувствительных АРС-

фильтров высокого порядка остается непростой инженерной задачей. Существующие же системы САПР, системы моделирования и средства оценки показателей стабильности схемы могут применяться только на заключительных этапах синтеза, когда известна конкретная принципиальная схема устройства. Исходя из выше изложенного, целью работы является разработка методов и средств оптимальной структурной реализации низкочувствительных АРС-фильтров высокого порядка для повышения метрологических характеристик систем управления.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались матричные модели описания линейных электронных схем, методы теории матриц, теория функций комплексных переменных, методы моделирования электронных схем, а так же экспериментальные исследования реализованных фильтров. Основные теоретические положения и выводы подтверждены результатами экспериментальных исследований в лабораторных условиях и расчетами на ПЭВМ.

Научную новизну работы составляют:

- способ генерации допустимых отрицательных обратных связей с помощью матрицы проводимости АРС-цепи с целью получения полного набора низкочувствительных структурных (принципиальных) схем высокого порядка.
- способ нахождения оптимального положения полюсов и разложения полинома знаменателя передаточной функции для реализации низкочувствительных схем высокого порядка по критерию элементной чувствительности.

Практическую ценность работы составляют: — методика инженерного проектирования низкочувствительных структур АРС-фильтров высокого порядка;

- алгоритмы и программы для ПЭВМ оптимизации АФ на различных этапах проектирования;
- реальные схемы низкочувствительных фильтров высокого порядка.

Реализация результатов работы. Результаты работы в виде законченных программ использованы при выполнении госбюджетной работы "Разработка

пакета прикладных программ автоматизированного проектирования аналоговых активных фильтров" (номер государственной регистрации 01930027490), работе "Гибрид" — "Развитие теории гибридного компьютерного моделирования и исследование принципов интеллектуализации средств гибридной вычислительной техники" по Программе Фонда Фундаментальных Исследований (номер государственной регистрации 01930035060), а так же используются в учебном процессе Одесского государственного политехнического университета на кафедре "Промышленная электроника" в курсе "САПР устройств промэлектроники" и "ЭЦНИД".

Публикации. По результатам исследований, выполненных в процессе работы над диссертацией, опубликовано три печатные работы.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались международной научно-технической конференции в городе Шауляй (Латвия) 1992; на научно-техническом семинаре "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах" Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова в г. Москве в декабре 1992 г.; на научно-технических семинарах профессорско-преподавательского состава кафедры "Промышленная электроника" Одесского государственного политехнического университета.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 80 наименований, приложения, содержит 160 страниц основного текста, иллюстрируемого рисунками на 21 странице.

Выносимые на защиту положения:

1. Способ структурной оптимизации низкочувствительных АРС-фильтров высокого порядка.
2. Способ оптимального разложения полиномов передаточной функции и выбора положения полюсов на комплексной плоскости при реализации низкочувствительных схем высокого порядка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы основные задачи работы, обоснованы пути достижения поставленной цели, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние вопросов проектирования и реализации низкочувствительных активных RC-фильтров высокого порядка. В главе показано, что среди множества существующих типов частотно-избирательных устройств в системах управления целесообразно использовать ARC-фильтры, потому что они имеют целый ряд преимуществ по сравнению с другими типами фильтров. В главе обосновывается использование элементной базы для построения частотно-избирательных устройств в САУ.

АФ на основе ARC-цепей с ОУ в качестве активных элементов находят применение благодаря широкому рабочему диапазону таких цепей (от долей герц до единиц мегагерц), малым габаритам и весу, возможностью интегрального микросэлектронного исполнения, высокому КПД и низкой потребляемой мощностью, хорошим усилительным свойствам, высоким техническим характеристикам современных ОУ.

В процессе анализа способов представления структурных схем таких цепей установлено, что целесообразно использовать матричные модели для этих цепей. При этом оказалось необходимым распространять такие модели на схемы высокого порядка.

В настоящее время существует ряд методов синтеза ARC-фильтров высокого порядка — каскадная реализация, параллельная, многопетлевые структуры, метод имитации LC-цепей.

Традиционным способом построения фильтров высокого порядка (с передаточной функцией выше третьего порядка) является простое каскадирование звеньев второго и/или первого порядка. Однако каскадные схемы не могут обеспечить повышенные требования к избирательности,

динамическому диапазону, стабильности характеристик фильтра.

При параллельной реализации передаточная функция представляется в виде суммы слагаемых второго порядка, каждый из которых реализуется звеном соответствующего порядка. Схема фильтра состоит из параллельно включенных звеньев, имеющих общий вход, выходной сигнал формируется как сумма выходных напряжений звеньев, каждое со своим весовым коэффициентом. Однако на практике этот метод применяется крайне редко в основном из-за сложности настройки и малого динамического диапазона, который невозможно увеличить путем оптимизации схемы.

Перечисленные недостатки заставили разработчиков искать новые, нетрадиционные методы реализации функций высокого порядка. Работы в этом направлении ведутся двумя путями. Первый — конструирование передаточных функций, обеспечивающих более высокую стабильность характеристик, второй путь — создание новых методов реализации схем высокого порядка.

Конструирование новых передаточных функций достигается путем оптимального сочетания пар полюсов и нулей для составляющих схему каскадов, при этом улучшается избирательность устройства, его динамический диапазон, но не повышается стабильность. В связи с этим разрабатываются новые методы основанные на многопетлевых структурах, а также методы, имитирующие двухсторонние нагруженные LC-цепи.

Сравнительно недавно появились более сложные многопетлевые структуры, которые позволяют улучшить стабильность. Большинство из них получено введением дополнительных частотно-независимых обратных связей (ОС) в каскадную структуру. Многопетлевые ARC-фильтры можно строить на базе одинаковых (по схемам и характеристикам) звеньев второго порядка. Их перестройка в ряде случаев выполняется проще, чем в каскадных аналогах, однако проведенный анализ показал, что варианты схемных решений, полученных этим методом, не покрывают всего множества возможных структурных реализаций.

При имитации (моделировании) LC-цепей в качестве промежуточного этапа необходимо получить резистивно-нагруженный пассивный LC-фильтр без потерь с заданными частотными характеристиками; следовательно, схемы получаемые данным методом не обладают усилительными свойствами. Элемент индуктивности реализуется при помощи гиратора, а стабильность улучшается из-за того, что пассивные схемы обладают экстремально низкой чувствительностью.

Как показывает проведенный анализ литературных источников, все известные частные методы синтеза активных фильтров высокого порядка не гарантируют действительно оптимального по различным критериям схемотехнических решений. Поэтому в работе поставлена задача обобщения существующих методик проектирования с целью получения надежного аппарата синтеза ARC-цепей высокого порядка.

В первой главе рассмотрены также различные методы определения стабильности схем на основе анализа показателей чувствительности параметров электронных схем. Был произведен анализ существующих способов оценки чувствительности схемы, их сравнительная характеристика. Рассмотренные методы расчета чувствительности могут быть применены только на этапе анализа готовой схемы. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время не существует законченной методики проектирования активных цепей по заданной при проектировании величине элементной чувствительности. Попытка реализации данного положения при проектировании фильтров высокого порядка была произведена в данной работе. Как наиболее адекватно отражающие поведение схемы, в главе особое внимание было уделено корневой и параметрической чувствительностям. В работе рассмотрено понятие элементной чувствительности в качестве целевой функции поиска оптимального решения среди полученных схемных реализаций.

Все выше изложенное позволило сформулировать в конце первой главы

задачи, на которых целесообразно сосредоточить внимание в работе.

Во второй главе рассмотрены матричные модели структурных схем ARC-цепей. В качестве активных элементов для рассматриваемых моделей были выбраны идеальные операционные усилители (ИОУ). Использование ИОУ в качестве базового активного элемента для структурного синтеза схем позволяет существенно упростить соответствующую математическую модель цепи. Кроме того, как показал анализ проведенный в первой главе, наиболее широко применяются на практике две модификации такого усилителя: ОУ с несимметричным и ОУ с дифференциальным входом. В обоих случаях ОУ имеет несимметричный выход. Поэтому в дальнейшем рассматривались только такие типы ОУ. Однако нетрудно рассмотреть соответствующие матричные модели активных цепей высокого порядка и при подключении других типов ИОУ.

В работе используется универсальная модель электронной схемы высокого порядка — DNBR-матрица, разработанная на кафедре "Промышленная электроника" научным коллективом под руководством академика В.П. Малахова. Было произведено обобщение данной модели на активные фильтры высокого порядка. При использовании каскадного метода в качестве базового, математическая модель фильтра представляется в виде блочно-диагональной DNBR-матрицы. Показывается, что предлагаемая модель адекватно отражает поведение реальной схемы, и возможно использование этой модели как на этапе анализа, так и на этапе синтеза электронной схемы высокого порядка. В главе рассмотрены способы построения обобщенной DNBR-матрицы, восстановление принципиальной схемы по виду DNBR-матрицы высокого порядка.

Метод построения цепей высокого порядка, основанный на многопетлевых структурах, базируется на теории автоматического управления. Известно, что введение дополнительных отрицательных обратных связей однозначно ведет к повышению стабильности схемы. Основываясь на этом положении, используя описанную универсальную модель — DNBR-матрицу, в

главе предложен новый способ синтеза низкочувствительных ARC-схем высокого порядка при помощи генерации полного набора допустимых обратных связей.

Было доказано, что введение ООС эквивалентно появлению элементов в верхней треугольной наддиагональной матрице обобщенной DNBR модели. В главе приводится также доказательство теоремы о том, что обратные связи, вводимые в верхнюю треугольную надблочную матрицу, влияют только на полином знаменателя ПФ. Полученное доказательство позволило ограничиться рассмотрением полинома знаменателя ПФ, однако способ предполагает распространение и на числитель ПФ при введении дополнительных элементов в подблочную матрицу. Допустимые отрицательные обратные связи генерируются при помощи предложенного в главе алгоритма на основе анализа знаков элементов DNBR-матрицы. Отличие от существующих методов введения отрицательных обратных связей состоит в том, что связи вводятся во все возможные узлы схемы, а не только с выходов каскадов как в известных реализациях многопетлевых структур. При этом оказывается, что все известные реализации каскадных и многопетлевых структур входят как подмножество в ряд полученных структурных решений. Таким образом в главе дается подход к обобщению существующих методов структурного проектирования ARC-схем высокого порядка. Такой подход к проектированию позволяет проводить оптимальный выбор необходимых решений по заданным критериям проектирования из полного множества допустимых структурных решений.

Третья глава посвящена вопросам оптимального синтеза ARC-цепей по критерию элементной чувствительности.

Приведен обзор необходимых и достаточных условий реализации низкочувствительных активных RC-схем, проанализированы чувствительности схемных функций: частоты квазирезонанса, эквивалентной добротности и полиномов передаточной функции. В главе был рассмотрен метод повышения

стабильности и устойчивости ARC-фильтров высокого порядка на основе нового способа разбиения полинома знаменателя передаточной функции ARC-фильтра высокого порядка и соответствующего способа выбора оптимального положения корней передаточной функции ARC-фильтра высокого порядка на комплексной плоскости.

Введение ООС однозначно улучшают стабильность схемы, но при этом изменяют его амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Для сохранения вида АЧХ, а значит, и параметров схемы, был предложен способ оптимального разложения полинома знаменателя функции. Следуя алгоритму полином разбивается на две составляющие — полином каскадного прототипа и полином обратных связей таким образом, что вид передаточной функции схемы остается неизменным. С этой целью рассмотрены вопросы выбора оптимального положения корней передаточной функции ARC-фильтра высокого порядка на комплексной плоскости. Рассмотрены направления смещения полюсов функции по мере введения ООС. Предложен алгоритм нахождения области на комплексной плоскости с гарантировано низкой чувствительностью, а также годографа оптимальных положений полюсов ПФ при различных значениях добротности и частоты квазирезонанса (рис. 1, 2).

Полюса передаточной функции полинома Баттерворта 6-го порядка

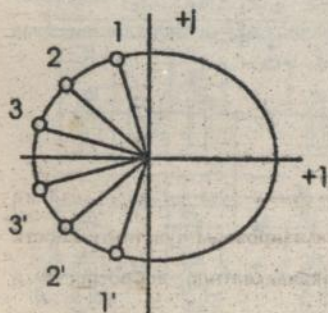


рис. 1

Положение обобщенного полюса при оптимальном разбиении полинома знаменателя ПФ

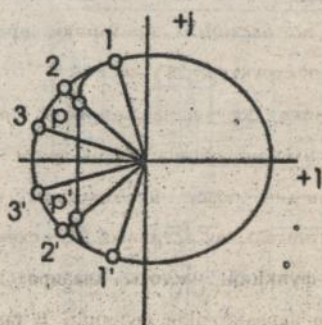


рис. 2

Таким образом, обобщение существующих методик проектирования и рассмотрение вопросов определения чувствительности на этапе синтеза активных схем позволило получить обобщенную методику проектирования низкочувствительных ARC-цепей высокого порядка. Можно утверждать, что предложенный способ охватывает все известные решения синтеза таких цепей. В четвертой главе приведен пример проектирования реального устройства. Для проверки теоретических положений изложенных в диссертации, был произведен расчет новой низкочувствительной структуры высокого порядка, реализующей активный фильтр низкой частоты. В качестве прототипа был использован фильтр Баттерворта шестого порядка, построенный методом каскадной реализации (рис. 3). На основании предложенного способа введения всех возможных допустимых отрицательных обратных связей, используя программу для ПЭВМ было получено 256 новых структурных решений. Далее используя предложенный в данной работе способ разбienia полинома знаменателя передаточной функции удалось получить оптимальную схему схемы активного фильтра шестого порядка и параметры ее элементов (рис. 4).

Схема каскадного прототипа

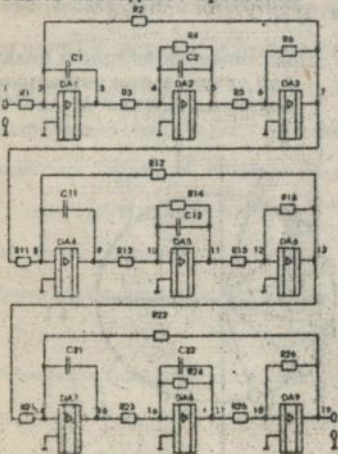


рис. 3

Схема с полным набором допустимых ООС

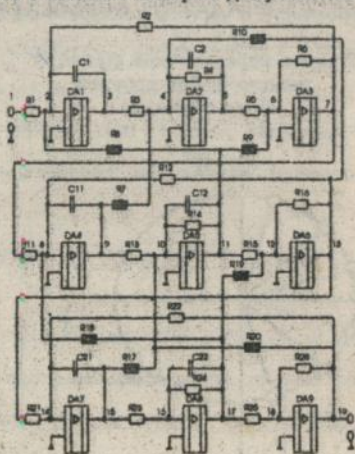


рис. 4

В главе представлен ход проектирования с комментариями, программы на языке математического программирования EURECA, MATLAB, результаты электронного моделирования и входные файлы для программ аналогового моделирования PSPICE. Приведена сравнительная оценка полученных схемных решений.

Анализ полученных результатов моделирования разработанной схемы и схемы прототипа показал, что:

1. При разбросе параметров схемных элементов (резисторов 2%, конденсаторов 1%, величины параметров выбираются по нормальному распределению Гауса), методом Монте-Карло было исследовано 40 вариантов схем; интегральная ширина полосы пропускания полученной схемы на 20% уже схемы каскадного прототипа.
2. При температурах -10 ; 27 ; 40 ; 80 С (температурный коэффициент сопротивления 0.01) интегральная ширина полосы пропускания полученной схемы на 5% уже схемы каскадного прототипа.

В результате анализа математических и макетных моделей полученных устройств можно сделать выводы о том, что при воздействии различных дестабилизирующих факторов — температуры, старения, разброса параметров элементов повторяемость характеристик достаточно высока. Применение предложенной методики позволяет значительно сократить время на проектирование, наладку, и подгонку электронных схем, позволяет повысить точность и эффективность систем управления.

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы:

1. В результате анализа литературных источников, посвященных методам и средствам проектирования и оптимизации частотно-избирательных устройств высокого порядка для систем управления установлено, что необходимо разработать методы и средства их оптимального проектирования с целью повышения точности и эффективности систем управления и контроля.
2. Предложен способ оптимального структурного проектирования низкочувствительных АРС-цепей высокого порядка.
3. Предложен способ генерации допустимых отрицательных обратных связей с помощью матрицы проводимости АРС-цепи с целью получения полного набора низкочувствительных структурных (принципиальных) схем высокого порядка.
4. Предложен способ нахождения оптимального положения полюсов и разложения полинома знаменателя передаточной функции для реализации низкочувствительных схем высокого порядка по критерию элементной чувствительности.
5. Разработана инженерная методика автоматизированной структурной дискретной оптимизации АФ высокого порядка в виде программы для IBM PC AT, позволяющая получать неизвестные ранее схемы.
6. Получены новые, низкочувствительные принципиальные схемы АРС-фильтров высокого порядка, подтверждающие правильность предложенных теоретических положений.

**ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. Малахов В.П., Майко Г.В., Мартыненко В.В. Структурный метод повышения метрологических характеристик активных цепей. Моделирование и контроль качества в задачах обеспечения надежности радиоэлектронных устройств: Матер. межд. науч. — техн. семинара. — Шауляй, 1992. — С. 46.
2. Мартыненко В.В., Малахов В.П., Майко Г.В. Оптимальное проектирование АРС-фильтров высокого порядка: Матер. науч. — техн. семин. "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах" Москва, 1992. — с. .
3. Малахов В.П., Майко Г.В., Мартыненко В.В., Ситников В.С. Структурный синтез АРС-фильтров высокого порядка: Депонирована 18.03.94 # 543 — УК94.

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ

частотно-вибірковий пристрій, низкочуткові ланцюги високого ступеня, елементарна чутковість, блочно-діагональна матриця.

11.50.0111

Мартыненко В.В. Оптимальное проектирование электронных схем высокого порядка. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – "Элементы и устройства вычислительных комплексов и сетей", Одесский Государственный политехнический университет, Одесса, 1994. Диссертационная работа посвящена теоретическим исследованиям в области оптимального синтеза активных фильтров высокого порядка. Предложен способ оптимального структурного синтеза низкочувствительных ARC-цепей. Разработан способ оптимального разбиения полинома знаменателя передаточной функции и соответствующая инженерная методика. Получены новые принципиальные схемы низкочувствительных ARC-фильтров высокого порядка.

ANNOTATION

Martynenko Vitaly. Optimal designing of low sensitive high order active filters. Dissertation of technical science magister on speciality 05.13.05 Parts and devices of computer s equipment and control systems, Odessa state politechnic university, Odessa, 1994. Dissertation work dedicated the theoretical research in area of low sensitive high order active filters optimal design. The way of optimal structure elaboration low sensitive high order ARC-chains was offered. The active filters transfer function optimal spitting method was produced. The corresponding engineering method was worked out. The new non-patented low sensitive high order ARC-filter circuits was obtained.

