ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Гончаров Валерий Иванович

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Специальность: 05.13.01 – Управление в технических системах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 1995 г.

Работа выполнена в Томском политехническом университете.

Официальные оппоненты:
Академик МАНВШ, доктор технических наук, профессор Рубан А.И.;
Член-корреспондент РИА, доктор технических наук, профессор Шурыгин Ю.А.
Доктор технических наук, профессор Оскорбин Н.М.

Ведущая организация: Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «6» декабря 1995 г. в 15.00 часов на заседании специализированного совета Д 063.80.03 Томского политехнического университета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета (634034, г. Томск, ул. Белинского, 55).

Автореферат разослан «27» октября 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного
совета Д 063.80.03
к.т.н., доцент   И.Л. Чудинов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Развитие промышленного потенциала в настоящее время неразрывно связано с массовым применением систем автоматического управления (С А У), отвечающих возрастающим требованиям все усложняющихся объектов управления. Возможности САУ и эффективность их работы во многом определены этапом проектирования, в частности, используемыми методами расчета. Несмотря на наличие большого о числа и разнообразие методов и непрерывное их совершенствование, остается неизменным необходимость повышения их эффективности.

Традиционные методы, имея достаточно много положительных сторон, обеспечивают приемлемые результаты при проектировании сравнительно простых систем. Повышение их порядка, переход к многоконтурным структурам, учет распределенности параметров объектов управления и другие особенности вызывают определенные трудности расчета САУ. За последние десятилетия проявились новые аспекты этой проблемы, вызванные применением ЭВМ и численных методов. В связи с этим разработка новых методов расчета и исследования САУ остается по-прежнему важной задачей, а их машинно-ориентированная форма усиливает значимость и современность результатов.

Цель и задачи работы. Данная работа посвящена разработке основ непрерывного и дискретного вещественных преобразований, численной формы представлен и н функций-изображений н решению на этой математической базе основных задач автоматического управления для класса линеаризуемых непрерывных и импульсных систем.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие взаимосвязанные задачи:

- разработка основ непрерывного и дискретного вещественного преобразований и численных машинно-ориентированных моделей вещественных изображений;

- решение приближенных задач расчета САУ на основе численных моделей с контролем погрешности решения в области времени и разработка механизма перераспределения погрешности;

- создание вещественного интерполяционного метода синтеза передаточных функций непрерывных и дискретных корректирующих устройств САУ, обобщение его на многоконтурные и неминимально-фазовые системы, и системы, описываемые передаточными функциями с иррациональными и трансцендентными составляющими;

- распространение вещественного интерполяционного метода на синтез передаточных функций эталонных систем по их временным динамическим характеристикам, параметрическую идентификацию непрерывных и дискретных объектов;

- получение формулы перехода от непрерывных передаточных функций к дискретным па основе вещественных преобразований и численных моделей;

- разработка на базе численных моделей программы автоматизированного синтеза законов управления, алгоритмов параметрической идентификации и прибора для идентификационной диагностики САУ и их элементов, и также расчет регуляторов тростильно-крутильных машин.

Методы исследования. Реализация сформулированных цели и задач осуществляется с помощью методов операционного исчисления, линейной алгебры, функционального анализа, теории автоматического управления, в частности, адаптивного управления и идентификации, а также численного моделирования на ЭВМ.

Научная новизна проведенных исследований заключается в следующем.

1. Предложены интегральное и дискретное вещественные преобразования, позволяющие получать для непрерывных и дискретных функций времени изображения, являющиеся функциями вещественной переменной. Класс функций-оригиналов охватывает динамические характеристики устойчивых и неустойчивых реальных линеаризуемых стационарных объектов и систем. Введение вещественных преобразований позволили сохранить простоту выполнения операций с изображениями (по сравнению с действиями над их

оригиналами) и обеспечить дополнительное упрощение за счет замены комплексной или мнимой переменной вещественной.

2. В целях дальнейшего упрощения операций над математическими описаниями САУ и представления в ЭВМ вещественных изображений введена численная форма модели изображения, имеющая значение динамической характеристики системы. Предложена компактная запись численных моделей САУ в виде диагональных матриц, что снимает проблему их обращения при структурных преобразованиях системы. Получены условия существования и единственности взаимно однозначного перехода между передаточными функциями и численными моделями и алгоритмы преобразований.

3. Предложен итерационный способ решения приближенных задач, опирающийся на совпадение в интерполяционных узлах точных и приближенных решений в форме вещественных функций-изображений. Показана возможность оценивания точности решения как в области изображений, так и в области времени, включая, в частности, критерий равномерного приближения. На основе идеи чебышевского альтернанса разработан алгоритм приближения к решению, наилучшему в равномерной метрике. Он распространяется на системы, описываемые передаточными функциями с дробно-рациональными, иррациональными и трансцендентными составляющими.

4. Доказана возможность н предложен способ решения задач параметрического синтеза законов управления в терминах численных моделей; показан итерационный путь распространения результатов на задачи структурного синтеза.

5. Алгоритм синтеза в виде решения системы нелинейных алгебраических уравнений обобщен на многоконтурные САУ, обеспечивая получение параметров корректирующих устройств всех контуров без декомпозиции желаемых свойств системы по каждому из них в отдельности. На базе численных моделей и специальным образом формируемых передаточных функций эталонных систем решена задача синтез систем управления неминимально-фазовыми объектами.

6. Разработаны алгоритмы формирования желаемых передаточных функций и численных моделей непрерывных и импульсных систем по их переходным и

импульсным характеристикам, которые могут быть заданы аналитическими выражениями, таблицами или графиками. Форма решения и алгоритм допускают априорное назначение нулей и полюсов передаточных функций или иных необходимых параметров.

7. Получена формула перехода от непрерывных передаточных функций к дискретным, не требующая знания временных динамических характеристик.

Теоретическая значимость результатов работы. Предложенный в работе путь получения вещественных функций-изображений соответствует общей тенденции перехода к функциям вещественного аргумента при выполнении численных расчетов. Он достаточно обоснован, опираясь на аппарат преобразования Лапласа, и позволяет максимально использовать результаты и знания, накопленные в этой области операционного исчисления. Введение описаний динамических систем и сигналов в форме вещественных функций и их численных моделей позволяет выполнять численным образом структурные преобразования систем и решить задачи исследования и расчета САУ. Важное в вычислительном отношении значение приобретает возможность представления численных моделей диагональными матрицами, что снимает сложную проблему обращения матриц при решении матричных уравнений.

Разработанные интерполяционные для области изображений алгоритмы решения ряда основных задач проектирования САУ позволяют достичь точного решения, если оно существует, или приближенного на основе интегрального критерия сближения, обладающего свойством линейности для области времени. Существенная особенность такого критерия состоит в наличии экспоненциальной весовой функции, изменяя параметры которой, можно перераспределять погрешность приближения на интервале. Этот механизм открывает в рамках итерационного процесса возможности для использования явления альтернанса в задачах приближения к наилучшим в равномерной метрике решениям. В частности, эта возможность распространена на корректно САУ, при которой временная динамическая характеристика скорректированной системы по отношению к эталонной отвечает требованиям равномерного приближения, близкого к наилучшему. Критерий близости и основанный на нем вещественный интерполяционный метод синтеза САУ охватывают широкий класс объектов управления, передаточные функции которых могут содержать иррациональные и трансцендентные выражения.

Введенные вещественные преобразования и численные модели открыли путь для разработки алгоритмов формирования передаточных функций эталонных систем по их реакциям на заданные входные воздействия, а также возможность формирования программных движений. При этом для области времени можно использовать критерий, обеспечивающий приближение в среднем на интервале, или интерполяционный критерий, приводящий к совпадению назначенной и программной траекторий в заданные моменты времени.

Практическая ценность результатов работы. Предложенные вещественные преобразования базируются на интегральном и дискретном преобразованиях Лапласа и потому позволяют использовать имеющиеся результаты для описания динамических систем в области изображений. При этом сам переход к вещественным моделям оказывается достаточно простым для инженерной практики. Преимущества вещественного аргумента и численная форма моделей, в том числе в виде диагональных мафии, обеспечивают сокращение вычислительных затрат. Это относится к автоматизированным системам проектирования, но особо важное значение приобретает для встроенных в САУ вычислительных средств, работающих в реальном времени. Высокая степень формализации описания систем в форме численных моделей, внутреннее единство непрерывных и импульсных систем и возможность его сохранения на уровне численных описаний позволяют создавать единое математическое обеспечение систем этих классов, приводящее к значительному сокращению объема программных средств по сравнению с известными решениями.

Предложенный подход и алгоритмы расчета распространяются на системы, описываемые передаточными функциями, которые могут содержать помимо дробно-рациональных выражений также иррациональные и трансцендентные составляющие, характерные дня объектом с распределенными параметрами. Дальнейшее расширение облает практических приложений вещественного интерполяционного подхода связано с синтезом сложной коррекции, включающей последовательные корректирующие устройства и обратные связи в условиях многоконтурных систем. При этом повышается точность результатов за счет устранения весьма произвольных назначений эталонных свойств каждого контура на основе требований, предъявляемых к системе в целом, уменьшается трудоемкость задачи в связи с объединением задач коррекции каждого контура в единую задачу синтеза.

Важным для практики результатом является получение формулы и алгоритма перехода от непрерывных передаточных функций к их дискретным аналогам. Необходимость такого перехода при расчете САУ, содержащих непрерывные и дискретные элементы, все увеличивающаяся частота появления этих задач в связи с развитием микропроцессорных систем управления, а также отсутствие необходимости привлечения функций времени, делает предложение важным и перспективным для инженерной практики.

Реализация результатов работы. Многие решения, приведенные в диссертации, были получены в результате проведения научно-исследовательских работ, основная часть которых выполнялась Кибернетическим центром при ТомПУ по заданию организации "Технотрон" (прежнее название - Томский филиал НИИ технологии машиностроения). Результаты зафиксированы в отчете инв. № 02.77.0 058087 по теме "Выбор направлений автоматизированного моделирования исполнительных систем роботов" {№ гос. регистрации 01.86.0 075792), в отчетах инв. № 02.88.0 043089, инв. № 02.8.90 031664, инв. № 0.90.0 029104 по теме "Разработка информационной системы и элементов САПР исполнительных систем промышленных роботов" (№ гос. регистрации 01.8.80 068449). Вещественный интерполяционный Метод и программное обеспечение на его основе были использованы для расчета двух систем автоматического регулирования модуля тростильно-крутильной машины в рамках выполнения договора между Кибернетическим центром ТомПУ и организацией "Технотрон" по теме "Разработка алгоритмов и программ расчета параметров систем стабилизации натяжения нити" (№ гос. регистрации 01.9.00 020532, инв. № 02.9.10 046655).

Некоторые научные результаты работы и решения составили алгоритмическую основу прибора для получения коэффициентов ПФ исследуемых объектов, основное назначение которого заключается в идентификационном диагностировании сложных автоматических систем, например, исполнительных подсистем роботов. Сведения об использовании алгоритмов в приборной реализации подтверждены документом (см. Приложение).

На основе вещественного интерполяционного метода разработаны алгоритм работы и программное обеспечение контура самонастройки адаптивного регулятора с однократными идентификацией объекта, настройкой модели и регулятора. Сведения подтверждены актом. Работа выполнялась организацией "Технотрон" совместно с Кибернетическим центром при ТомПУ в рамках Госконтракта №935 - ТО88/93 от 14.04.94 с Российским Космическим Агентством.

В течение нескольких лет алгоритмы расчета САУ использовались студентами кафедры Робототехнические системы ТомПУ на практических занятиях, при выполнении курсовых и дипломных проектов. Алгоритм понижения порядка ПФ с нескольких десятков до заданного уровня использован для создания программы ЭВМ и решения научных задач на кафедре Электрические станции ТомПУ. Справки прилагаются. Основы вещественного преобразования и отдельные решения на этой основе используются на нескольких кафедрах ТомПУ при проведении различных видов занятий, в том числе лекционных.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и совещаниях:

- Научная конференция по автоматизации производственных процессов, г. Алма-Ата, 1968.

- XX Республиканская конференция по автоматизации производственных процессов, г. Фрунзе, 1970;

- Региональная конференция молодых ученых по радиоэлектронике и управлению, г. Томск. 1974;

- XXXII Всесоюзная научная сессия, посвященная Дню радио (с международным участием), г. Москва, 1977;

- Всесоюзное совещание по автоматизации проектирования систем автоматического и автоматизированного управления, г. Челябинск, 1978;

Всесоюзный научно-технический семинар по использованию распределенных систем управления технологическими процессами и производством, г. Новокузнецк, 1986;

- Краевая научно-техническая конференция по устройствам и системам автоматики автономных объектов, г. Красноярск, 1987;

- I1l Всесоюзная научно-техническая конференция по динамике станочных систем гибких автоматизированных производств, г. Тольятти, 1988;

- Всесоюзная научно-техническая конференция по перспективам развития и применения средств вычислительной техники для моделирования и автоматизированного исследования, г. Москва, 1991;

- Объединенный научный семинар Сибирской аэрокосмической академии, г. Красноярск, 1995;

- Объединенный научный городской семинар н семинар Новосибирского государственного технического университета "Синтез систем управления" г. Новосибирск, 1995.

Публикация результатов работы. Основные результаты работы он у Оли копаны в монографии, учебном пособии l5-и статьях, 7-и тезисах докладов. 5-и отчетах по НИР, защищены двумя авторскими свидетельствами на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списки литературы (165 наименований) и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 316 страниц машинописного текста, в который входят 7 таблиц, 25 рисунков, 16 страниц списки литературы и 4 страницы приложений (акт о внедрении и справка об использовании результатов работы).

Основные научные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся способ перехода в область вещественной переменной ни основе непрерывною и дискретного вещественных преобразований, получение численных математических моделей линеаризованных систем и сигналов, способ матричной записи численных моделей, алгоритмы вещественного интерполяционного метода, а также другие результаты, указанные в разделе "Научная новизна".

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации рассмотрены вопросы получения математических моделей САУ, их элементов и сигналов, которые удовлетворяют одновременно двум требованиям. Во-первых, модели должны представлять собой функции вещественной переменной, обеспечивая возможность привлечения для выполнения действий над ними методов теории функций этого класса, включая численные методы решения задач. Во-вторых, они должны относиться к области изображений, что приводит к значительному упрощению некоторых операций, например, интегрирования и дифференцирования, но сравнению с действиями в области времени. Этим условиям удовлетворяют широко используемые на практике некоторые частотные характеристики - амплитудные, фазовые, вещественные и др. Для их получения необходимо выполнить преобразовании, обеспечивающие замену комплексной $p = \delta + j\omega$ или мнимой $j\omega$ переменной на вещественную ω, Однако такие преобразования могут встречать существенные трудности, а при наличии иррациональных или трансцендентных составляющих в составе исходных выражений они могут оказаться непреодолимыми.

С целью устранения указанного недостатка и самого этапа вспомогательных по своей сути преобразований в работе предлагается прямой путь получения функций вещественной переменной, основанный на использовании преобразования

$$F(\delta) = \int_0^\infty f(t) e^{-\delta t} dt, \quad \delta \in [0, \infty) \tag{1.1}$$

Преобразование (1.1) ставит в соответствие функции времени f(t), принадлежащей определенному классу, изображение $F(\delta)$, которое удовлетворяет обоим отмеченным выше требованиям.

Класс преобразуемых функций f(t) определен сходимостью интеграла в (1.1), поэтому следует полагать, что

а) функция f(t) и все ее производные непрерывны.

б) f(t)=0 для всех t<0,

а также

в) $\int\limits^{\infty} | f(t)|^2\, dt < \infty$ (1.2)

для устойчивых систем, когда можно принять c=0.

Условия существования оригиналов f(t) позволяют распространить интегральное вещественное преобразование (1.1) на устойчивые, нейтральные и неустойчивые системы.

Введенное преобразование имеет тесную связь с преобразованием Лапласа и в определенном смысле может рассматриваться как его частный случай. В частности, это относится к получению δ-изображений на основе лапласовых изображений F(p) путем замени комплексной переменной $p = \delta + j\omega$ на вещественную δ.

Трактовка преобразования (1.1) как частного случая преобразования Лапласа влечет за собой важные практические последствия. Прежде всего становится возможным использовать все имеющееся богатство таблиц соответствия оригиналов и лапласовых изображении, а также способов и приемов получения таких соответствий, накопленных к настоящему времени. В связи с этим отметим, что можно предложить множество различных интегральных преобразований, которые позволяют получать изображения, имеющие вещественную переменную. Однако связь любого из этих преобразований с преобразованием Лапласа будет более опосредованной, следовательно, будет более сложным путь привлечения результатов и методов аппарата преобразования Лапласа.

В работе даны основные свойства δ-преобразования, отмечена одна из его важных в практическом отношении особенностей - изображения F(δ) имеют графическое представление, обеспечивающая наглядность исходных данных и результатов.

Функции F(δ) использованы для описания динамических систем и процессов. Если входной сигнал x(t) системы и ее реакция y(t) удовлетворяют условиям существования оригиналов, то найдутся изображения $X(\delta) \doteq x(t)$, $Y(\delta) \doteq y(t)$, а их отношение

$$W(\delta) = Y(\delta) / X(\delta) \qquad (1.3)$$

по определению будет передаточной функцией системы. Эго позволяет записать уравнение вход-выход систем в терминах вещественных функций:

$$Y(\delta) = W(\delta) \cdot X(\delta)\,. \qquad (1.4)$$

При этом передаточная функция W(δ) может быть найдена как по сигналам x(t), y(t) в соответствии с (1.3), так и по импульсной реакции системы $K(t) \doteq W(\delta)$ по формуле прямого преобразования $W(\delta) = \int_0^\infty K(t) e^{-\delta t} dt,\ \ \delta \in [c, \infty)$.

Можно видеть, что условия а), б) существования оригиналов и их δ-изображений являются достаточно общими, что позволяет распространить уравнение (1.4) практически на все реальные стационарные непрерывные линеаризованные системы и действующие в них сигналы.

Представляет интерес вопрос существования обратного δ-преобразования. Он в большей степени является теоретическим, т.к. практическая сторона дела в полной мере основана на косвенном пути обратного перехода с использованием обращения преобразования Лапласа. Положительный результат в отношении обратного δ-преобразования фактически дан Орурком И.А. при рассмотрении характеристик мнимых частот[1]. Прямое решение задачи непосредственно для δ-преобразования получено Барковским А.Н.[2] .

Для получения вещественных изображений F(δ) при решении практических задач в работе рекомендуется несколько путей: аналитический с непосредственным использованием формулы прямого преобразования (1.1): по лапласовым изображениям на основе замены комплексной переменной p на вещественную $\delta \in [c, \infty)$; численный, связанный с переходом в (1.1) к численному

---

[1] Орурк И.А. Новые методы синтеза линейных и некоторых нелинейных динамических систем. - М.-Л.: Наука. 1965. - 208 с.

[2] Барковский А.Н. Один метод обращения дельта-преобразования // Теория и техника автоматического управления / УНПК "Кибернетика" Томского политехнич. ин-та. - Томск, 1990.-с. 127-131.-Деп. в ВИНИТИ 15.02.91, № 775-В91.

интегрированию в условиях придания переменной δ нескольких фиксированных значений δ_i, i=1,2,...

Для реализации последнего из отмеченных вариантов и использования ЭВМ при выполнении действий над функциями F(δ) вводится понятие численной характеристики (ЧХ) $\{F(\delta_i)\}_\eta$ размерности η, представляющей собой упорядоченную совокупность значений $F(\delta_i)$, $i=\overline{1,\eta}$ на сетке

$$\Delta : 0 \le \delta_1 < \delta_2 < ... < \delta_\eta . \qquad (1.5.)$$

Даны условия однозначного представления дробно-рациональных функций F(δ) их моделями в форме (ЧХ) $\{F(\delta_i)\}_\eta$. В простейшем и наиболее распространенном случае, когда

$$F(\delta) = \frac{b_m\delta^m + b_{m-1}\delta^{m-1} + ... + b_0}{a_n\delta^n + a_{n-1}\delta^{n-1} + ... + 1},$$

условие имеет вид $\eta = m + n + 1$. Показана возможность однозначного обратного перехода. Техника решения обратной задачи сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$F(\delta_i) = \frac{b_m\delta_i^m + b_{m-1}\delta_i^{m-1} + ... + b_0}{a_n\delta_i^n + a_{n-1}\delta_i^{n-1} + ... + 1},\ i=\overline{1,\eta},\ \eta = m+n+1 \qquad (1.6.)$$

Приведены нежесткие условия существования и единственности решения СЛАУ (1.6). Использована матричная запись СЛАУ

$$DC = F , \qquad (1.7.)$$

где $C = [b_m, b_{m-1}, ..., b_0, a_n, a_{n-1}, ..., a_1]^T$, $F = [F(\delta_1), F(\delta_2), ..., F(\delta_\eta)]^T$

Существование взаимно однозначного перехода между функциями $\{F(\delta_i)\}_\eta$ и F(δ) позволяет рассматривать и использовать ЧХ как динамические характеристики систем, их элементов и сигналов. Это приводит, в частности, к численной форме уравнения вход-выход (1 .4):

$$\{Y(\delta_i)\}_\eta = \{W(\delta_i)\}_\eta \{X(\delta_i)\}_\eta .$$

Определены основные действия над ЧХ, позволяющие выполнять структурные преобразования САУ. Они приводят к меньшему числу операций по сравнению с традиционными способами. Так для двух последовательно соединенных звеньев с передаточными функциями $W_1(p) = B_\mu(p)/A_\nu(p)$, $W_2(p) = B_r(p)/A_\gamma(p)$, где μ, ν, r, γ - степени соответствующих полиномов, получение результирующей ЧХ в соответствии с равенством

$$\{W(\delta_i)\}_\eta = \{W_1(\delta_i)\}_\eta \{W_2(\delta_i)\}_\eta$$

сводится к выполнению $\eta = \mu + \nu + r + \gamma + 1$ операций умножения. Распространенный альтернативный путь - полиномиальный - требует выполнения только операций умножения $\mu r + \nu\gamma + \mu + \nu + r + \gamma + 2$, что значительно больше η. Другой альтернативный способ, использующий нули и полюсы функций, имеет специфические особенности и тоже неконкурентоспособен по критерию вычислительных затрат.

Преобразования ЧХ можно выполнять по предложенным правилам и это оказывается удобно для задач малой размерности. В общем случае целесообразно воспользоваться, как предложено в работе, матричной алгеброй, что позволяет привлечь известные алгоритмы и программные реализации. Для перехода к матричной форме можно представлять ЧХ передаточных функций систем и их элементов диагональными матрицами, ЧХ воздействий и реакций - векторами. При этих условиях уравнение вход-выход (1.4) замещается матричным уравнением

$$Y = WX,$$

$$W = diag[W(\delta_1), W(\delta_2), ..., W(\delta_\eta)].$$

Обратим внимание на матрицу W. Вследствие диагонального расположения элементов снята проблема ее обращения. Диагональными матрицами можно представить также ЧХ сигналов. В некоторых задачах, например, при идентификации объектов такое представление даже необходимо.

Введенные в работе ЧХ по своей сути и направленности развивают известные исследований, связанные с использованием значений лапласовых изображений F(p) в точках на вещественной положительной полуоси комплексной плоскости. До появления ключевых в этой области исследований работ Орурка И.А.[1)] и Солодовникова В.В., Дмитриева А.Н., Егупова Н.Д.[2)] рассматривалась исключительно задача обращения преобразования Лапласа по значениям изображения F(p), заданного дискретным рядом точек. Отмеченные работы впервые распространили возможности интерполяционного подхода в комплексной плоскости по вещественным значениям изображения на иные задачи, прежде всего связанные с синтезом систем. Они показали целесообразность и необходимость получения вещественных функций, разработки достаточно общего и удобного для практических целей способа перехода к таким функциям, а также комплекса вопросов, связанных с точностью решения приближенных задач, получением дискретных математических описаний систем на уровне их динамических характеристик, распространением подхода на импульсные системы. Плодотворные идеи указанных и предшествующих работ в этом смысле являются источником развития вещественного интерполяционного подхода, в том числе в рамках данной диссертационной работы.

Характерной чертой подхода является сравнительно малая вычислительная сложность алгоритмов, получаемых на его основе, В пределах уже представленного в автореферате материала эта особенность является следствием мер, реализованных в математическом описании систем и сигналов:

- осуществлен переход от функций комплексной или мнимой переменной к вещественной функции $F(\delta)$;

- введено описание в форме ЧХ, представляющей собой минимально необходимую совокупность чисел, которая в то же время однозначно и полностью характеризует исходное аналитическое дробно-рациональное выражение;

[1)] Орурк И.А. Новые методы синтеза линейных и некоторых нелинейных динамических систем. - М.-Л.: Наука. 1965. - 208 с.

[2)] и Солодовников В.В., Дмитриев А.Н., Егупов Н.Д. Ортогональный метод анализа н синтеза линейных САР на основе понятия моментов // Автоматическое управление и вычислительная техника. Вып. 8. Частотные методы. – М.: Машиностроение 1968. -С.30-86.

- действия над ЧХ требуют малого числа операций по сравнению с традиционными формами математических моделей;

- матрицы САУ и элементов являются диагональными.

Математические модели в форме ЧХ использованы для получения приближенных решений различных задач проектирования САУ. Например, она может относиться к синтезу регуляторов на основе концепции их упрощения. В моделях передаточных функций задача имеет вид

$$W(p) \cong W_{np}(p) = \frac{B(p)}{A(p)}, \tag{1.8}$$

где в параметрической постановке известны показатели m=degB(p), n=degA(p), а коэффициенты a_k, b_j k=1,2,..., j=0,1,... подлежат определению. Соотношение (1.8) заменяется сопоставлением ЧХ точной и приближенной функций:

$$\{W(\delta_i)\}_\eta = \{W_{np}(\delta_i)\}_\eta, \tag{1.9}$$

которое разворачивается в СЛАУ

$$W(\delta_i) = \frac{b_m \delta_i^m + b_{m-1}\delta_i^{m-1} + \ldots + b_0}{a_n \delta_i^n + a_{n-1}\delta_i^{n-1} + \ldots + 1},\ i = \overline{1,\eta},\ \eta = m + n + 1 \tag{1.10}$$

Смысл равенства (1.9) и решения СЛАУ (1.10) отвечает интерполяционному критерию близости в области изображений

$$W(\delta_i) - W_{np}(\delta_i) = 0,\ \ i = \overline{1,\eta} \tag{1.11}$$

имеющему естественную тесную связь с областью времени. Полагая $W(\delta) \risingdotseq K(t)$, $W_{np}(\delta) \risingdotseq K_{np}(t)$, можем получить эту связь в явном виде

$$\Delta W(\delta_i) = \int_0^\infty \Delta K(t) e^{-\delta_i t} dt,\ i = \overline{1,\eta}$$

где $\Delta K(t) = K(t) - K_{np}(t)$, а значение $\Delta W(\delta_i)$ определено функцией $\Delta W(\delta) = W(\delta) - W_{np}(\delta)$.

Погрешность решения оценивается как в области изображений, так и в области времени. В первом случае численные показатели погрешности формируются по правилу

$$L_i = |W(\delta_j)| = \max_{\delta \le \delta \le \delta} |\Delta W(\delta)|, \qquad i = \overline{1,\eta} \tag{1.12}$$

которое отвечает интерполяционному критерию (1.11) и существованию альтернанса Валле-Пуссена. Смысл оценки L_i вытекает из развернутой формы

$$\Delta W(\delta_j) = \int^{\infty} \Delta K(t) e^{-\delta_{ji} t} dt, \qquad j = \overline{1,\eta}$$

где величины $_j$ определяют экстремальные значения функции $\Delta W(\delta)$ на i-ом участке интерполяции. Из соотношения следует, что каждое значение $\Delta W(\delta_j)$ определено интересующей нас функцией $\Delta K(t)$ с учетом веса $\exp(-\delta_j t)$. Это позволяет использовать значения δ_j или L_i как настроечные параметры алгоритма решения задачи. К примеру, изменения этих значений могут быть направлены на выравнивание модуль-максимумов L_i, что соответствует приближению к наилучшему решению в равномерной метрике на основе чебышевского альтернанса. Теоретической основой для получения таких решений служит теорема о наилучшем приближении, доказанная Чебышевым П.Л. непосредственно для дробно-рациональных функций и получившая затем развитие в работах Ахиезера Н.И. для задач на полубесконечном интервале в виде обобщенной теоремы Чебышева[1)].

В связи с отсутствием способов получения наилучших равномерных приближений в классе рассматриваемых функций за конечное число действий в работе использован итерационный способ решения задачи. Для приближения к $\| \Delta W(\delta) \|_c = \min$ использовано направленное изменение узлов интерполирования. Установлено, что возможности такого приближения ограничены и это связано во многом со свойствами САУ. В частности, увеличение колебательности и перерегулирования приводит к ухудшению условий сближения.

Показано существование связи между альтернансом в области изображений и альтернансом в области времени. Это позволило оценивать точность решения приближенных задач по функции $\Delta K(t)$, в том числе в количественной форме

---

1) Ахиезер Н.II. Лекции по теории аппроксимации. -М.-Л.: ОГИЗ, 1947. – 324 с.

$$l_j = \max_{t_j < t < t_{j+1}} |\Delta K(t)|, \quad j = 1,2,... \tag{1.13}$$

Предложенный итерационный процесс для области изображений обобщен на задачу минимизации отклонений $\Delta l = \max_j l_j - \min_j l_l, \quad j = 1,2,...,$ что позволяет получать решения, близкие к наилучшим по критерию $\| \Delta K(t) \|_c$. Способ получения таких решений основан по-прежнему на изменении значений узлов δ_i, а также на свойстве перекрестного соответствия δ-преобразования: начальный или конечный участок функции оригинала определяет в основном поведение функции-изображения соответственно на конечном или начальном его участке. Это означает, что увеличение (или уменьшение) значений функции $\Delta W(\delta)$ на начальном или конечном участке интервала $C \le \delta < \infty$ приводит к увеличению (или уменьшению) значений функции $\Delta K(t)$ соответственно ни конечном или начальном участке интервала $0 \le t < \infty$. Поэтому изменение значений l_j достигается смещением узлов δ_i, что позволяет создавать достаточно простые процедуры.

С вычислительной точки зрения функцию $\Delta K(t)$ целесообразно рассматривать в пределах $0 \le t < t_p$, где t_p - время регулирования. Сам интервал [0, t_p] удобно разбить на три участка [0, t_1], [t_1, t_{II}], [t_{II}, t_p]. В процессе выравнивания отклонений l_j наиболее динамичными оказываются отклонения l_j^I, l_j^{III}, принадлежащие первому и третьему участкам. Поэтому процедура выравнивания почти полностью относится к ним.

Прием выделения трех участков ("зон") предложен и успешно использован Ремезом Е.Я. в алгоритмах приближения к наилучшим равномерным решениям в классе алгебраических многочленов[1)]. В задаче дробно-рационального приближения прием оказался также эффективным. Более того, он используется не только для переменной t, но и для переменной области изображений δ. В последнем случае вновь рассматривается не вся область определения функции $\Delta W(\delta)$, а лишь интервал $0 \le \delta < \delta^*$, верхняя граница которого определена условием

[1)] Ремез Е.Я. Основы численных методов чебышевского приближения. - Киев: Наукова думка, I969. - 624 с.

$$\max_{\delta^*<\delta<\infty} |\Delta W(\delta)| \le d\ ,$$

где d - заданная малая величина. Как и в области времени, интервал [0, δ*] делится на три участка. На основании перекрестного свойства им ставятся в соответствие участки функции $\Delta K(t)$, имеющие определяющую взаимную связь. Это позволяет достаточно просто установить узлы, оказывающие наибольшее влияние на интересующие отклонения l_j^I, l_j^{III}, и приблизиться к желаемому распределению модуль-максимумов l_j, например, равномерному.

<u>Вторая глава</u> диссертации посвящена центральной задаче проектирования САУ - динамическому синтезу систем. Целесообразность рассмотрения связана с наличием в методе передаточных функций ряда привлекательных свойств, которые в сочетании с численными способами достижения цели могут составить эффективный инженерный машинно-ориентированный метод синтеза САУ.

Для одноконтурной системы, имеющей передаточные функции неизменяемой части $W_H(p)$, корректирующего устройства $W_K(p)$ и обратной связи $W_{OC}(p)$, составляется уравнение синтеза

$$W_Ж^З(p) \cong F[W_K(p), W_H(p), W_{OC}(p)], \qquad (2.1)$$

в котором эталонные свойства САУ заданы желаемой передаточной функцией $W_Ж^З(p)$. С целью упрощения уравнения в работе осуществляется переход к эквивалентному уравнению синтеза разомкнутой САУ, использующему традиционные модели

$$W_Ж^P(p) \cong W_K(p) W_H(p), \qquad (2.2)$$

вещественные функции

$$W_Ж^P(\delta) \cong W_K(\delta) W_H(\delta) \qquad (2.3)$$

и численные характеристики

$$\{W_Ж^P(\delta_i)\}_\eta = \{W_K(\delta_i)\}_\eta \{W_H(\delta_i)\}_\eta, \qquad (2.5)$$

Последние два соотношения показывают возможность численного решения задачи. Для его осуществления положим пока, что все передаточные функции, входящие в уравнение (2.1), не имеют нулей в правой полуплоскости и на мнимой оси. Тогда формальная часть решения будет содержать два этапа. На первом определяются элементы $W(\delta_i)$, $i=\overline{1,\eta}$ ЧХ корректирующего устройства, например, в матричной форме

$$W_k = W_H^{-1} W_{ж}^{p} \ .$$

На втором этапе вычисляются коэффициенты искомой передаточной функции

$$W_k(\delta) = \frac{b_m\delta^m + b_{m-1}\delta^{m-1} + \ldots + b_0}{a_n\delta^n + a_{n-1}\delta^{n-1} + \ldots + 1} \qquad (2.6)$$

путем решения СЛАУ вида (1.6)

$$W_k(\delta_i) = \frac{b_m\delta_i^m + b_{m-1}\delta_i^{m-1} + \ldots + b_0}{a_n\delta_i^n + a_{n-1}\delta_i^{n-1} + \ldots + 1}, \ i=\overline{1,\eta}, \ \eta = m+n+1 \qquad (2.7)$$

Привлекая матричную запись СЛАУ, подобную (1.7), $DC = W_k$, можно получить решение

$$C = D^{-1} W_H^{-1} W_{ж}^{p}, \qquad (2.8)$$

определяющее коэффициенты передаточной функции $W_k(\delta)$. Они совпадают с коэффициентами функции $W_k(p)$, а переход $W_k(\delta) \to W_k(p)$ осуществляется формальной заменой переменной 6 на р.

Предложенный алгоритм приводит к точному решению, если оно существует и тогда задача считается в основном решенной. Более сложные ситуации возникают при поиске приближенных решений. Рассмотрению таких задач в работе уделено главное внимание. В основу решения положен итерационный способ достижения цели, возможность изменения отклонений l_j за счет смещения узлов δ_i и результаты разработки алгоритма решения приближенных задач, полученные в первой главе.

Имеющаяся возможность направленного смещения узлов интерполирования $\{\delta_i^\gamma\}$ на шаге γ итерационной процедуры позволяет приблизить импульсную характеристику $K_c^\gamma(t)$ системы к оптимальной $K_c^{опт}(t)$, отвечающей принятому критерию приближения. С этой целью импульсные реакции желаемой $K_{ж}(t)$ и синтезированной $K_c^\gamma(t)$ систем используются для формирования функции

$$\Delta K(t) = K_{ж}(t) - K_c^{\gamma}(t),$$

по которой в соответствии с (1.13) находятся экстремальные значения l_j. Выравнивание этих значений изменением умов δ_i, приближает $K_c^{\gamma}(t)$ к наилучшей в пространстве $C[0, t_p]$ функции $K_c^{опт}(t)$.

О предельной достижимой близости функций $K_c^{\gamma}(t)$ и $K_c^{опт}(t)$ на основе итерационного процесса можно судить по модуль-максимумам l_j функции $K_c^{\gamma}(t)$ при $t \in [t_I, t_{II}]$. Эти значения являются консервативными, слабо зависящими от изменений узлов δ_i. В наибольшей степени это относится к значениям l_j центральной части выделенного участка. Одно из них - наименее подвижное - можно использовать как меру принципиально достижимой близости рассматриваемых функций.

Алгоритм позволяет получать повышенную точность воспроизведения начального или конечного участка временной динамической характеристики на основе рекомендаций главы 1.

Численный алгоритм синтеза САУ имеет важную принципиальную особенность, отличающую ею от известных методов - он распространяется на системы, передаточные функции которых могут содержать одновременно рациональные дроби высокого порядка и различного рода иррациональные и трансцендентные выражения. Существующая техника синтеза таких систем базируется преимущественно на раздельном приближении всех составляющих рациональными дробями низкого порядка с последующим понижением порядка общей дробно-рациональной передаточной функции. Такая последовательность решения задачи, включающая два этапа аппроксимации и собственно синтез регулятора, характеризуется большим объемом вычислений и значительной накопленной погрешностью результата. Предложенный алгоритм относится в обсуждаемом смысле к одноэтапным процедурам и потому не имеет указанных недостатков.

Показана возможность обобщения предложенного пути решения на функциональный подход в задачах синтеза САУ. Такое обобщение формализует постановку задачи, позволяя привлечь к ее решению эффективные методы функций вещественной переменной. Так для класса следящих систем уравнение синтеза $l = W^{з}_{ж}(p)$ может быть представлено в виде

$$l - W^{з}_{ж}(\delta) = 0 \qquad (2.9)$$

Появляющаяся при этом возможность трактовать поиск решения уравнения (2.9) как задачу получения дробно-рациональной функции $W^{з}_{ж}(\delta)$, наименее уклоняющейся от единицы, обеспечивает привлечение идей Чебышева П.Л. для ее решения, а также некоторых результатов ее реализации, полученных в главе I.

Рассмотрены вопросы робастности систем, синтезируемых на основе предложенного алгоритма. Важной в смысле робастности особенностью интерполяционного вещественного подхода является использование непараметрической формы описания динамических систем ЧХ $\{F(\delta_i)\}_\eta$. Переход к параметрической форме, например, передаточной функции, может дать различные результаты в зависимости от принятых значений параметров m, n, хотя размерность η ЧХ остается неизменной. С этих позиций решение уравнений синтеза в терминах ЧХ также соответствует поиску результата в непараметрической форме. Его последующая параметризация заключается в определении коэффициентов передаточной функции $W_k(p)$ корректирующего устройства по полученному из уравнения синтеза решения - ЧХ $\{W_k(\delta_i)\}_\eta$. Важность непараметрического подхода в синтезе систем связана с тем, что при этом обеспечиваются более благоприятные предпосылки получения робастных САУ по сравнению с многими другими. Известно, что к неробастным системам зачастую приводит реализация концепции понижения порядка передаточной функции регулятора на основе передаточных функций, дробей Паде и непрерывных дробей. Подобный недостаток имеет удобный в вычислительном отношении интегральный квадратичный критерий.

С целью разработки интерполяционного метода синтеза, приводящего к робастным системам, выполнен анализ зависимости изменений передаточной функции $W^{з}_{ж}(\delta, \delta_\eta, C)$ от вариаций компонент вектора $C = [b_m, b_{m-1}, ..., b_0, a_n, a_{n-1}, ..., a_1]^T$

и параметра δ_η. Установлено, что приращения $\Delta W^{з}_{ж}(\delta, \delta_\eta, \Delta C)$ при определенных условиях приближенно соответствует

приращениям $\Delta W^{з}_{C}(\delta, \Delta\delta_\eta, C)$. Это позволяет заменить сложные исследования чувствительности передаточной функции $W^{з}_{C}(\delta,$ по компонентам вектора С проверкой вариаций по параметру δ_η. Такая замена использована не только для анализа имеющегося решения, но и, что более существенно, для целей синтеза робастных систем. Установлено, что в общем случае чувствительность передаточной функции $W^{з}_{C}(\delta, \delta_\eta)$ мала в области начальных значений параметра δ_η и непропорционально возрастает с его увеличением, Добавим к этому, что ранее была установлена зависимость показателей качества синтезируемой системы от значений этого параметра. Оба отмеченных фактора, в основном определяющие роль верхней границы интервала расположения узлов интерполирования, позволяют использовать параметр δ_η, как настроечный для алгоритма синтеза.

Для реализации практических шагов при синтезе робастных систем вычисляется несколько значений функции

$$_\eta) = S\prod^{m} b_j \prod^{n} a_k\,, \qquad S = \begin{cases} +1 \forall b \\ -1 если \\ \end{cases} \qquad = 0,1,\dots,m$$

в окрестности выбранной рабочей точки. Полученные значения $R(\delta_\eta)$, $R_1(\delta_\eta + \Delta\delta_\eta)$ и $R_2(\delta_\eta - \Delta\delta_\eta$ должны оставаться положительными (в конечном итоге речь должна идти о $R_2(\cdot)$), что свидетельствует о наличии необходимого запаса по робастности. В то же время большие (по отношению к значению величины $R_1(\cdot)$ и $R_2(\cdot)$ являются признаком имеющейся возможности значительного улучшения показателей качества.

Задача синтеза САУ охватывает в широком смысле не только нахождение решения, но и формирование самого уравнения, в частности, получение всех входящих в уравнение функций. Наиболее существенное значение имеют вопросы синтеза моделей эталонных систем. Особенность вопросов заключается в том, что проектировщику более понятно описание системы в области времени. В то же время существующие частотные, корневые и некоторые другие методы формирования эталонных моделей базируются на решении задачи в области изображений, опираясь на косвенные показатели качества. Для устранения имеющегося несоответствия поставлена и в рамках интерполяционного подхода решена задача разработки способа получения эталонных моделей непосредственно по заданным временным динамическим характеристикам.

Решение дано в форме выполнения двух этапов. На первом вычисляются элементы ЧХ искомой модели, на втором - коэффициенты передаточной функции модели. Алгоритм первого этапа определен численным интегрированием на основе (1.1). Так в случае задания желаемой импульсной реакции $K_Ж(t)$ элементы ЧХ желаемой системы вычисляются по формуле

$$W_Ж(\delta_i) = \sum_{j=1}^{N} K_Ж(t_j) e^{-\delta_i t_j} \Delta t_j , \qquad i = \overline{1,\eta} , \tag{2.10}$$

которая имеет матричную форму записи

$$W_Ж = ITK_Ж .$$

Второй этап заключается в определении матрицы С путем решении уравнения вида (1.7). В конечном итоге вычисляется решение

$$C = D^{-1} ITK_Ж , \tag{2.11}$$

т.е. находятся коэффициенты желаемой передаточной функции $W_Ж(p)$. Заметим, что второй этап будет излишним, если формируемая эталонная модель будет использована в уравнении синтеза - там необходимы модели в форме ЧХ.

Разработаны два способа получения желаемых передаточных функций и ЧХ по переходным характеристикам, рассмотрены особенности синтеза астатических систем и перехода от ЧХ замкнутых систем к моделям в разомкнутом состоянии. Даны рекомендации по выбору узлов интерполирования, обеспечивающие приближение к равномерному или иному заданному распределению модуль-максимумов l_j на $[0, t_p]$.

Рассмотренный комплекс вопросов решения уравнения синтеза и получения функций, входящих в это уравнение, объединены общей задачей, используют единый математический аппарат и составляют основу метода, получившего название вещественного интерполяционного метода (ВИМ). Его основные достоинства, представляющие интерес для инженерной практики, концентрированно сводятся к следующему:

- метод является численным, ориентированным на применение ЭВМ;
- передаточные функции, входящие в уравнение синтеза, могут содержать иррациональные и трансцендентные выражения, не приводя к заметным творческим или вычислительным препятствиям;
- имеется возможность выбирать параметры m, n искомых передаточных функций;
- часть нулей, полюсов и коэффициентов может назначаться;
- возможна приближенная реализация заданного закона распределения погрешностей l_j в области времени;
- используется непараметрическая форма моделей, способствующая получению робастных систем;
- метод распространяется на параметрический и структурный синтез.

Третья глава посвящена обобщению метода на более широкий круг актуальных задач. Рассмотрено применение ВИМ к синтезу многоконтурных САУ и систем управления объектами неминимально-фазового типа, решены задачи параметрической идентификации и расщепления движения линейных систем.

Необходимость совершенствования синтеза многоконтурных систем связана с недостатками существующих путей решения задачи. Наиболее распространенный подход основан на замене общей задачи синтеза САУ последовательностью более простых задач коррекции каждого контура. При этом необходимо предварительно распределить требования, предъявляемые к системе в целом, по каждому внутреннему контуру. Процедура не формализована, выполняется во многом произвольно и потому может приводить к большим погрешностям. В работе по методике ВИМ составляется уравнение синтеза

$$W_{Ж}^{З}(p) \cong F[W_1(p), W_2(p), ..., W_q(p), W_H(p)],$$

содержащее q передаточных функций элементов коррекции, переводится в вещественную область и трансформируется в систему η нелинейных алгебраических уравнений

$$W_{Ж}^{З}(\delta_i) \cong F[W_1(\delta_i), W_2(\delta_i), ..., W_q(\delta_i), W_H(\delta_i)], \qquad i = \overline{1, \eta}, \qquad (3.1)$$

где q - общее число неизвестных коэффициентов. Обсуждается применение метода Ньютона и сходимость процесса. Находится точное решение, если оно существует, или приближенное. В последнем случае по-прежнему сохраняется возможность приближения к заданному распределению погрешности в области времени. Имеется пример расчета параметров корректирующих устройств двухконтурной системы.

Предложено решение задачи синтеза законов управления объектами неминимально-фазового типа. Даны рекомендации по составлению и решению уравнений синтеза, рассмотрен ключевой этап задачи - формирование эталонных моделей с учетом неминимально-фазовых особенностей объекта управления. Принципиальное отличие предложенного варианта ВИМ синтеза от известного, приводящего к передаточным функциям корректирующих устройств $W_K(p) = B_m(p)/A_n(p)$, порядок которых сравним с порядком передаточной функции объекта управления $W_0(p)$, состоит в возможности назначать по условиям точности параметры $m = \deg B_m(p)$, $n = \deg BA_m(p)$, не связывая их непосредственно с аналогичными параметрами функции $W_0(p)$.

Вещественный интерполяционный метод и процедура аппроксимации на ее основе использованы для расщепления движении линейных систем. Для решения таких задач обычно привлекают идею малого параметра, базирующуюся на предположении существования двух или более групп далеко друг от друга расположенных корней. Условие такого размещения выполняется не часто и потому погрешность из-за пренебрежения какой-то их частью корней может быть существенной. Другой подход - аппроксимационный - основанный на степенных усеченных приближениях, приводит к хорошему приближению в малой окрестности точки, но не на интервале. Привлеченный для решения задачи интерполяционный метод базируется на выделении в пределах интервала $[0, t_p]$ малых участков $[0, t_I]$, $[t_{II}, t_p]$, $t_I << t_{II}$. Для которых определяются соответственно быстрые и медленные движения. Получены расчетные соотношения для границ участков размещения узлов δ_i в каждом случае. Техническая сторона решения основана mi формировании ЧХ моделей быстрого и медленного движений с последующим вычислением коэффициентов их передаточных функций путем решения СЛАУ вида (1.6). Предложенный вариант решения обладает основными свойствами ВИМ, в том числе, что особенно важно для практических задач, распространяется на объекты, описываемые иррациональными и трансцендентными передаточными функциями.

Имеется возможность применения полученного решения для реализации известного предложения об управлении по старшим производным, приводящим к локализации всевозможных быстрых отклонений параметров и возмущений. Реализация таких систем управления приводит, в частности, к двухконтурным управляющим устройствам с целью раздельного управления по быстрым и медленным движениям. Полученные на основе ВИМ результаты разделения движений показывают алгоритмический путь получения одноконтурного управляющего устройства, обладающего свойствами двух контуров.

Рассмотрено применение ВИМ к задаче параметрической идентификации объектов при отсутствии помех. Принятый критерий близости объекта и модели

$$F(\delta_i) - F^M(\delta_i) = 0,\ \text{i=1,2,\ldots} \qquad (3.2)$$

соответствует в области изображений совпадению их ЧХ. Смысл критерия в области времени заключается в выполнении системы равенств

$$\int_0^\infty [f(t) - f^M(t)]e^{-\delta_i t}dt = 0, \quad \text{i=1,2,\ldots} \qquad (3.3)$$

где $f(t) \doteq F(\delta)$, $f^M(t) \doteq F^M(\delta)$. Ядро $\exp(-\delta_i t)$ обеспечивает настройку алгоритма идентификации путем формирования интерполяционной матрицы I с элементами $a_{ij} = \exp(-\delta_i t_j)$, $i = \overline{1,\eta}$, $j = \overline{1,N}$, где η - размерность ЧХ, N - число отсчетов $f(t_j)$, используемых в численной реализации системы (3.3). Дана оценка числа длинных операций: $O((N+1)\eta + \eta)$. По числу выполняемых операций алгоритм ВИМ идентификации примерно вдвое экономичнее частотного варианта.

Предложенный ВИМ идентификации обладает сравнительно высоким свойством помехозащищенности - на уровне частотного метода. Имеются также другие достоинства метода: возможна настройка алгоритма на повышенную точность идентификации быстрых или медленных движении; интерполяционный для области изображений критерий (3.2) в необходимых случаях может быть дополнен интерполяционной на $\{ t_j \}$ близостью временных динамических характеристик; открываются перспективы решения сложной задачи идентификации объектов с переменным запаздыванием на основе решения трансцендентных уравнений.

В четвертой главе рассматривается приложение идеи вещественного интерполяционного метода к расчету линеаризованных импульсных автоматических систем. За математическую основу описания систем этого класса принято дискретное вещественное преобразование

$$F^*(\delta) = \sum_{n=0}^{\infty} f(nT_0) e^{-\delta n T_0} , \quad \delta \in [C, \infty), \quad C > 0 \tag{4.1}$$

непосредственно связанное с вещественным интегральным преобразованием (1) и дискретным преобразованием Лапласа, и υ-преобразование

$$F(\upsilon) = \sum_{n=0}^{\infty} f(nT_0) \upsilon^{-n} , \quad \upsilon \in [C, \infty), \quad C \geq 1 , \tag{4.2}$$

которое с определенных позиций можно трактовать как частный случай z-преобразования. Обе формулы, выражающие преобразование решетчатой функции $f(nT_0)$ в изображение $F^*(\delta)$ или $F(\upsilon)$, отвечают двум важным требованиям: они приводят к вещественным изображениям и максимально просто связаны с дискретным преобразованием Лапласа и z-преобразованием. Существенно, что вещественные изображения $F^*(\delta)$, $F(\upsilon)$ имеют графические представления, обеспечивая высокую наглядность рассматриваемых задач.

Из двух функций $F^*(\delta)$, $F(\upsilon)$ в работе предпочтение отдается более простой по аргументу функции $F(\upsilon)$. Предложено три способа получения таких функций: по z-изображениям путем замены комплексной переменной z на вещественную $\upsilon \in [C, \infty)$, по решетчатым функциям $f(nT_0)$ на основе формулы (4.2) либо на основе обобщения понятия ЧХ на изображения $F(\upsilon)$. Первые два способа очевидны, третий является специфическим и в то же время во многих случаях эффективным. Его использование позволяет устранить известный недостаток традиционного перехода от функций времени $f(nT_0)$ к изображениям F(z) по формуле прямого z-преобразования

$$F(z)=\sum_{n=0}^{\infty} f(nT_0)z^{-n} \ . \qquad (4.3)$$

Недостаток заключается в недопустимо высоком порядке функции F(z) при непосредственном использовании отрезка ряда (4.3) и трудностях сворачивания этого отрезка.

Сказанное в полной мере распространяется на формулу перехода (4.2). Однако последняя имеет весомое преимущество перед (4.3), т.к. позволяет сформировать косвенный путь решения задачи. Этот путь содержит два этапа. На первом определяется ЧХ $\{F(\upsilon_i)\}_\eta$ по выражению

$$F(\upsilon_i)=\sum_{n=0}^{\infty} f(nT_0)\upsilon_i^{-n} \ , \qquad \upsilon_i \ge C \ , \qquad i=\overline{1,\eta} \ . \qquad (4.4)$$

На втором осуществляется переход к дробно-рациональной форме

$$F(\upsilon)=\frac{b_m\upsilon^m+b_{m-1}\upsilon^{m-1}+\ldots+b_0}{a_n\upsilon^n+a_{n-1}\upsilon^{n-1}+\ldots+1}, \qquad m\le n \qquad (4.5)$$

путем решения СЛАУ

$$F(\upsilon_i)=\frac{b_m\upsilon_i^m+b_{m-1}\upsilon_i^{m-1}+\ldots+b_0}{a_n\upsilon_i^n+a_{n-1}\upsilon_i^{n-1}+\ldots+1}, \ i=\overline{1,\eta}, \ \eta=m+n+1 \qquad (4.6)$$

Полученные коэффициенты b_j, a_k являются коэффициентами выражения F(z), так что задача, имеющая точное решение в классе рациональных дробей с параметрами m, n, завершена.

Аппарат вещественных функций и ЧХ использован для разработки метода синтеза цифровых корректирующих устройств. За базовое соотношение принято уравнение замкнутой одноконтурной системы

$$W_Ж^З(z)\cong F[W_K(z),W_{н.пр}(z),W_{oc}(z)],$$

в которое входят передаточные функции эталонной системы $W_Ж^З(z)$, корректирующая устройства $W_K(z)$, непрерывной приведенной части $W_{н.пр}(z)$ и обратной связи $W_{oc}(z)$. В параметрической постановке известны все функции, входящие в уравнение, за исключением $W_K(z)$, которая задана выражением вида (4.5) с точностью до коэффициентов. Как и в случае непрерывных систем, исходное уравнение упрощается за счет перехода к сопоставлению математических описаний желаемой и синтезируемой разомкнутых систем в z-формах

$$W_Ж^P(z) \cong W_K(z) W_{н.пр}(z),$$

υ- изображениях

$$W_Ж^P(\upsilon) \cong W_K(\upsilon) W_{н.пр}(\upsilon) \qquad (4.7)$$

и численных характеристиках

$$\{W_Ж^P(\upsilon_i)\}_\eta = \{W_K(\upsilon_i)\}_\eta \{W_{н.пр}(\upsilon_i)\}_\eta \ . \qquad (4.8)$$

Последнее уравнение представлено также в матричной форме

$$W_Ж^P = W_K W_{н.пр}, \qquad (4.9)$$

где все матрицы диагональные, а их элементы $W_Ж^P(\upsilon_i)$, $W_K(\upsilon_i)$, $W_{н.пр}(\upsilon_i)$, $i=\overline{1,\eta}$ являются элементами ЧХ уравнения (4.8). Уравнение (4.9) имеет решение

$$W_K = W_Ж^P W_{н.пр}^{-1}, \qquad (4.10)$$

поиск которого не встречает принципиальных и вычислительных затруднений из-за диагональной формы матриц. Получением матрицы W_K или, что то же самое, характеристики $\{W_K(\upsilon_i)\}_\eta$ из уравнения (4.8) завершается непараметрическая часть, решения задачи синтеза. Параметризация результата заключается в решении СЛАУ вида (4.6), что позволяет найти передаточные функции скорректированной разомкнутой $W_C^P(\upsilon) = W_K(\upsilon) W_{н.пр}(\upsilon)$ и замкнутой $W_C^З(\upsilon)$ систем.

Необходимым элементом синтеза САУ является оценивание точности результат, т.к. в реальных условиях приходится искать приближенные решения. Для этих целей используется функция

$$\Delta W(\upsilon) = W_Ж^З(\upsilon) - W_C^З(\upsilon)$$

и одно или несколько ее экстремальных значений $L_i = \max\limits_{\upsilon_i \le \upsilon \le \upsilon_{i+1}} |\Delta W(\upsilon)|$, i = 1, 2,…

Более существенным является оценивание погрешности в области времени на основе обращения z-преобразования, получения $K_C(nT_0) \doteq W_C^З(z)$ и вычисления погрешности $\varepsilon = \max\limits_n |\Delta K(nT_0)| = \max\limits_n |K_Ж(nT_0) - K_C(nT_0)|$. Для минимизации величины ε привлечен использованный ранее для решения приближенных задач непрерывных САУ механизм модуль-максимумов l_j. Последние определены выражением $l_j = \max\limits_{nT_0 \in [jT_0,(j+1)T_0]} |\Delta K(nT_0)|$, j = 1,2,.... Совокупность l_j, j=1,2,... позволяет найти величину $\Delta l = \max\limits_j l_j - \min\limits_j l_j$ и составить суждение о близости импульсной характеристики $K_C(nT_0)$ к наилучшему в каком-то смысле решению. Изменение величины l_j осуществляется смещением узлов υ_j по методике, разработанной для непрерывных систем.

Несколько отмеченных параллелей в решении задач синтеза непрерывных и импульсных систем создают основу для вывода о существовании значительной общности расчетных схем, алгоритмического и программного обеспечения проектирования систем этих классов. Формальным источником для такого обобщения является аналогия в уравнениях синтеза (2.4) и (4.8), описывающих соответственно непрерывные и импульсные системы. Она еще более заметна при сопоставлении матричных форм (2.5), (4.9) этих уравнений, решения которых ищутся по одинаковым алгоритмам и программам. Совпадающие формы описания непрерывных и импульсных систем и решения их уравнений синтеза явились отражением объективно существующего внутреннего единства этих систем. В практическом плане алгоритмическая близость приводит к значительному сокращению общего объема программного обеспечения синтеза систем указанных классов. Имеющиеся различия в расчетных схемах связаны с нижними границами δ_1, υ_1, расположения узлов δ_i, υ_i, для которых ограничения являются различными: $\delta_1 \ge 0$, $\upsilon_i \ge 1$.

В работе обсуждается и на основании результатов решения подобных задач для непрерывных САУ обосновывается возможность распространения ВИМ синтеза импульсных САУ на многоконтурные структуры и импульсные системы неминимально-фазового типа. По-прежнему сохраняются положительные свойства метода: численный характер решения задачи, задание желаемых значений параметров m, n передаточной функции цифрового корректирующего устройства, непараметрическая форма уравнения синтеза, возможность описания объектов сложными переда точными функциями и т.д.

Эффективность распространения ВИМ на синтез импульсных систем связана с возможностью формирования желаемых передаточных функций, входящих в уравнения синтеза, по заданным временным динамическим характеристикам. Эта задача являемся актуальной и для z-форм, так что ее успешное решение выходит за рамки υ-преобразования. Решение базируется на использовании понятия ЧХ делаемой САУ. Вновь реализуется двухэтапная процедура, в которой не первом этапе находятся элементы ЧХ $\{W^{З}_{Ж}(\upsilon_i)\}_{\eta}$, на втором - коэффициенты желаемой передаточной функции $W^{З}_{Ж}(\upsilon)$.

В случае задания желаемой импульсной характеристики $K_{Ж}(nT_0)$ и значений параметров m, n искомой дробно-рациональной функции $W^{З}_{Ж}(\upsilon)$ вида (4.5) можем найти в соответствии с (4.4) элементы

$$W^{З}_{Ж}(\upsilon_i)=\sum_{n=0}^{N}K_{Ж}(nT_0)\upsilon_i^{-n}\ ,\quad \upsilon_i>C\,,\ i=\overline{1,\eta}\,,\ \eta=m+n+1\,. \qquad (4.11)$$

Это позволяет путем решения СЛАУ вида (4.6) определить коэффициенты функции $W^{З}_{Ж}(\upsilon)$. Исходная функция $K_{Ж}(nT_0)$ может быть задана таблицей, графиком или аналитическим выражением. Показана возможность обеспечения повышенной точности воспроизведения желаемой импульсной характеристики при малых или больших значениях дискретного времени $nT_0\in[0,t^{*}_{p}]$.

Расчетная формула (4.11) используемся в матричной форме

$$W^{З}_{Ж}=IK_{Ж}\,, \qquad (4.12)$$

где матрицы $W_Ж^з$, $K_Ж$ имеют элементы соответственно $W_Ж^з(\upsilon_i)$, $i=\overline{1,\eta}$, $K_Ж(nT_0)$, $n=\overline{0,N}$, а интерполяционная $\eta\times(N+1)$ - матрица I – элементы $a_{ij}=\upsilon_i^{j-1}$.

Решена задача получения функции $W_Ж^з(\upsilon)$ по желаемой переходной характеристике $h_Ж(nT_0)$. Показано влияние выбора начального υ_i и конечного υ_η узлов на условия решения задачи. В частности, неправомерное увеличение или уменьшение их значений приводит к ухудшению обусловленности матрицы I.

Рассмотрены вопросы использования уравнения (4.12) для обращения υ-преобразования на основе решения $K_Ж=I^{-1}W_Ж^з$, а также реализации интерполяционного для области времени критерия близости формируемой и заданной импульсных характеристик, что обеспечивает их совпадение в моменты времени jT_0, $j=\overline{1,r}$, $r<\eta$.

Получено решение наиболее распространенной задачи, возникающей при проектировании цифро-аналоговых САУ, - получение дискретной передаточной функции W(z) по ее непрерывному прототипу W(p). Традиционные решения на основе какой-либо замены $p\rightarrow z$ приводят к высокому порядку функции W(z) либо ее низкой точности. В работе замена переносится с уровня переменных непосредственно на функции, а возможность реализации технической стороны решения достигается переводом задачи в область вещественных функций. Одно из полученных решений дано в виде

$$W(\upsilon)\cong\frac{1}{T_0}W(\delta)+0.5K(0)\,,\ \ \upsilon=\exp(\delta T_0)\,, \tag{4.13}$$

где $W(\delta)\,\dot{=}\,K(t)$ - непрерывная передаточная функция, $W(\upsilon)$ - ее дискретный аналог и $K(0)=\lim\limits_{t\rightarrow 0}K(t)$. Решение (4.13) получено на основе сравнения ЧХ непрерывной $W(\upsilon)$ и дискретной $W(\upsilon)$ передаточных функций, а смысл его раскрывается при использовании в (4.13) развернутых выражений функций $W(\upsilon)$, $W(\delta)$:

$$\frac{b_m e^{\delta m T_0}+b_{m-1}e^{\delta(m-1)T_0}+\ldots+b_0}{a_n e^{\delta n T_0}+a_{n-1}e^{\delta(n-1)T_0}+\ldots+1}\cong\frac{1}{T_0}\frac{\beta_\mu\delta^\mu+\beta_{\mu-1}\delta^{\mu-1}+\ldots+\beta_0}{\alpha_\nu\delta^\nu+\alpha_{\nu-1}\delta^{\nu-1}+\ldots+1}+0.5K(0)\,.$$

Неизвестные коэффициенты b_j, a_k, $j=\overline{0,m}$, $k=\overline{1,n}$ находятся в результате решения СЛАУ, сформированной на базе уравнения (4.13):

$$W(e^{\delta_i T_0}) = \frac{1}{T_0} W(\delta_i) + 0.5K(0), \qquad i = \overline{1,\eta}\,,\ \eta = m + n + 1. \qquad (4.13)$$

Коэффициенты b_j, a_k являются одновременно коэффициентами передаточной функции W(z), так что выполненный переход $W(\delta) \to W(\upsilon)$ соответствует по результату преобразованию $W(p) \to W(z)$.

Преложенный подход и полученные формулы перехода распространенны непосредственно на определение цифровых корректирующих устройств по их непрерывным прототипам. Задача решается на основе сопоставления передаточных функций соответствующих участков дискретной и непрерывной систем. Возможны обобщения вплоть до наиболее полного $W_C^Ж(\upsilon_i) = F[W_C^З(\delta_i)]$, обеспечивающего получение неизвестных коэффициентов функции $W_C(z)$.

В пятой главе диссертации представлены аппаратно-программные применения вещественного интерполяционного метода. Даны сведения о диалоговой программе "Синтез", предназначенной для получения коэффициентов передаточных функций корректирующих устройств непрерывных и импульсных САУ. Алгоритмической основой являются уравнения синтеза (2.4) и (4.9) непрерывных и импульсных систем. Программа обеспечивает последовательное приближение к оптимальной по быстродействию системе при ограничении на допустимое перерегулирование. Программа используется несколько лет в учебном процессе, была применена для расчета коррекции САР натяжения нити и скорости вращения веретена модулей тростильно-крутильных машин. Приведены основные этапы и результаты расчета системы регулирования натяжения нити.

Даны сведения о разработанном алгоритмическом и программном обеспечении адаптивного регулятора непрямого действия. Регулятор содержит идентификатор объекта управления, обеспечивающий получение ЧХ $\{U(\delta_i)\}_\eta$, $\{Y(\delta_i)\}_\eta$ сигналов входа и выхода u(t), y(t) на основе реализации численного интегрирования в (1.1). Полученные модели сигналов позволяют определить текущие значения элементов ЧХ объекта $W_0(\delta_i) = Y(\delta_i)/U(\delta_i)$, $i = \overline{1,\eta}$ и ЧХ $\{W_p(\delta_i)\}_\eta$ регулятора $W_p(\delta_i) = W_Ж^P(\delta_i)/W_0(\delta_i)$, $i = \overline{1,\eta}$, где $W_Ж^P(\delta_i)$ -

известные элементы ЧХ неявной эталонной модели САУ в разомкнутом состоянии. Заключительная процедура связана с получением $\eta = m + n + 1$ текущих значений коэффициентов передаточной функции регулятора и их записью в запоминающее устройство. Из четырех перечисленных процедур первая - получение ЧХ сигналов входа и выхода - является наиболее объемной и сравнима по вычислительной сложности с аналогичными действиями в других методах. Три последующие процедуры требуют выполнения примерно 3η операций деления, что в условиях низкой размерности η приводит к малому объему вычислительных затрат. Рассмотрены некоторые вопросы построения двух модификаций адаптивного регулятора. Один предназначен для работы с нестационарными объектами, второй ориентирован на замену ручной настройки неадаптивного регулятора автоматической в условиях однократной идентификации. Адаптивный регулятор защищен заявкой на патент РФ.

Положительные результаты применения ВИМ в задаче идентификации, включая достижение малых вычислительных затрат, позволили создать портативный прибор, реализующий принципы идентификационной диагностики, направленной на повышение надежности САУ, имеющих постепенные отказы. Технология применения прибора ставит целью обнаружить приближение к отказу на основе сопоставления получаемой текущей математической модели САУ или ее части с начальным, паспортным описанием. Проверке в ходе регламентных работ подлежат наиболее динамичные с позиций надежности участки САУ, а паспортные модели в форме передаточных функций могут быть аппроксимационными, имея второй-третий порядок. Прибор использует отсчеты кривой разгона и позволяет определять до семи коэффициентов.

В работе рассмотрен вопрос совместного применения прибора для определения коэффициентов передаточных функций и программы "Синтез". Комплекс предназначен для настройки регуляторов сложных САУ. На первом этапе определяется индивидуальная текущая передаточная функция неизменяемой части. Она и известная эталонная передаточная функция САУ позволяют сформировать уравнение системы и решить его относительно коэффициентов передаточной функции регулятора с помощью программы "Синтез”. Такая технология получения значений настраиваемых параметров позволяет учесть индивидуальные особенности каждой системы, прежде всего ее силовых элементов. Использование для настройки метода синтеза, а не упрощенной методики, также приводит к повышению точности результата. Перспективы развития технологии связаны с объединением аппаратной и программной частей в одном корпусе специализированного прибора, что обеспечено сравнительно малым объемом программы "Синтез". Предложенная технология настройки распространяется как на эксплуатируемые, так на изготавливаемые САУ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные выводы и результаты работы заключаются в следующем.

1. Предложены интегральное и дискретное вещественные преобразования, позволяющие по временным динамическим характеристикам линеаризованных непрерывных и импульсных систем получить их модели в виде функций-изображений, имеющих вещественный аргумент. Наличие непосредственной связи введенных преобразований с преобразованиями Лапласа и z-преобразованием позволяет находить вещественные изображения функций времени, используя имеющиеся обширные таблицы соответствия оригиналов и их изображений.

2. Для представления в ЭВМ описаний САУ в виде вещественных функций введено понятие численной динамической характеристики, которая представляет собой конечный набор чисел, характеризующий динамические системы, принадлежащие определенному классу. Численная форма описания позволяет создавать машинно-ориентированные модели динамических систем широкого класса, включая устойчивые, астатические и неустойчивые, непрерывные и импульсные. Определены основные действия над численными характеристиками в непосредственной и матричной форме. Предложены уравнения вход-выход в терминах численных характеристик. При этом матрица системы имеет диагональную форму, что снимает проблему ее обращения, приводит к резкому сокращению сложности алгоритмов и вычислительных затрат при их аппаратно-

программной реализации. Определены условия однозначной связи численных характеристик с передаточными функциями и форма этого перехода.

3. Разработан алгоритм решения уравнений САУ в терминах численных характеристик. Определены условия получения приближенных решений и точных, если они существуют. Установлено "перекрестное" свойство оригиналов и вещественных изображений, позволяющее в рамках итерационного процесса на основе альтернанса Балле-Пуссена изменять и перераспределять величину максимальной погрешности решения на интервале в области изображений или времени. Показана возможность получения приближения к чебышевскому альтернансу, определяющего наилучшее решение в равномерной метрике. Предложены выражения для оценивания точности решения в области изображений и времени.

Полученные результаты позволяют решать разнообразные задачи расчета САУ и представлены как вещественный интерполяционный метод (ВИМ).

4. Предложена методика составления и решения уравнений синтеза САУ на основе ВИМ, предусматривающая получение передаточных функций корректирующих устройств и каналов инвариантности численным методом. Разработаны способы получения численных характеристик, входящих в уравнения синтеза. В частности, решена задача получения желаемой численной характеристики заданной размерности по эталонной реакции системы на интересующее входное воздействие. Это позволяет задавать желаемые свойства САУ простой и наиболее понятной форме в области времени, являющейся естественной для пользователя. В силу однозначной связи численных характеристик и передаточных функций результат обобщается на формирование передаточных функций эталонных систем по их временным динамическим характеристикам. Предложены два критерия приближения к эталонной системе в области времени. Первый обеспечивает среднее взвешенное приближение на интервале, второй позволяет учесть требование совпадения эталонной и синтезированной временных характеристик в заданные моменты времени.

5. Обеспечено существование двух важных особенностей ВИМ синтеза. Во-первых, алгоритм синтеза формируется на базе уравнения разомкнутой системы,

которое эквивалентно уравнению синтезируемой САУ, но приводит к меньшей вычислительной сложности. Во-вторых, использование численных характеристик, относящихся к непараметрическим формам описания, создает вследствие этого более благоприятные условия для придания САУ свойства робастности по сравнению с уравнениями синтеза в передаточных функциях. Предложен способ оценивания робастности и итеративный путь достижения заданного уровня этого свойства САУ.

6. Выполнено обобщение ВИМ на синтез двух классов САУ - с многоблочными регуляторами, включая их реализацию в виде многоконтурных структур, и системы управления неминимально-фазовыми объектами. В первом случае получено уравнение синтеза в вещественной области, порождающее систему нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов передаточных функций последовательных корректирующих устройств и обратных связей. Рассмотрена и положительно оценена возможность получения решения и его сходимость к точному на основе метода Ньютона.

Для класса систем с объектами управления неминимально-фазового типа показана необходимость составления уравнений синтеза с учетом фазовых особенностей объекта управления в желаемых передаточных функциях разомкнутых систем. Алгоритм вычисления коэффициентов передаточных функций корректирующих устройств по сформированным таким образом уравнениям полностью соответствует решению задачи синтеза минимально-фазовой системы, что позволяет использовать единое программное обеспечение.

7. Показано применение ВИМ для аппроксимации передаточных функций непрерывных систем с контролем точности в области времени. На этой основе метод обобщен на задачу расщепления движения линейной системы. Результат достигается соответствующим выбором узлов интерполирования в рамках стандартного решения уравнения вход-выход системы численным методом.

Предложенные алгоритмы аппроксимации и расщепления движения распространены на широкий класс систем, передаточные функции которых могут содержать дробно-рациональные составляющие высокого порядка, а также иррациональные и трансцендентные выражения.

8. Получены положительные результаты в применении численных характеристик для решения задач параметрической идентификации детерминированных объектов. Предложенный способ обладает рядом важных свойств:

- он приводит к моделям с повышенной робастностью вследствие выполнения основных преобразований в непараметрической форме;

- интегральная связь между исходной информацией об объекте - функциями времени - и вещественными моделями обуславливает существование помехозащищенности на уровне частотных методов;

- при прочих равных условиях можно обеспечить получение моделей с более точным воспроизведением быстрых или медленных движений;

- обеспечивает малые вычислительные затраты.

9. Разработан алгоритм синтеза цифровых регуляторов на основе математического аппарата дискретного вещественного преобразования. С привлечением понятия численных характеристик решены задачи формирования желаемых дискретных передаточных функций заданного порядка по их временным функциям. Показана возможность использования этого решения для ограниченного по числу тактов обращения дискретного преобразования, позволяющего получать значения решетчатой функции в интересующие моменты времени.

10. Установлено свойство вещественного непрерывного и дискретного преобразований, приводящее к такой формализации алгоритмов синтеза непрерывных и дискретных систем, которая позволяет создавать единое программное обеспечение для решения задач коррекции систем указанных классов.

Получена в формульном виде приближенная связь между непрерывными передаточными функциями и их дискретными аналогами. Формула распространяется на передаточные функции приведенной непрерывной части и описания более общих структурных образований, включая разомкнутые и замкнутые системы.

11. Разработано математическое обеспечение портативного прибора для экспериментального определения моделей сложных САУ, предложена методика его использования для идентификационного диагностирования и настройки систем. На основе численных характеристик получен алгоритм работы адаптивного регулятора, использующего текущую идентификацию объекта управления с самонастройкой системы по ее эталонной временной характеристике.

ПУБЛИКАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 38 печатных работ. Основное содержание отражено в следующих публикациях.

1. Осипов В.М., Гончаров В.И., Барковский А.Н. Один метод приближения сложных передаточных функций. - М.: 1969. - 9 с. - Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения. АУМ № 8 - 1969, № 22.

2. Осипов В.М., Гончаров В.И. Синтез устройств запаздывания на основе экспоненциальных разложений. - М.: 1969. - 8 с. - Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения. АУМ №8- 1969, №20.

3. Гончаров В.И., Осипов В.М. Некоторые вопросы моделирования запаздывания // Труды Республиканской конференции по автоматизации производственных процессов: Тезисы докладов. - Алма-Ата: 1970.

4. Осипов В.М., Гончаров В.И. Приближение некоторых трансцендентных и иррациональных передаточных функций // Приборостроение. - 1970. - № 2.

5 А.с. 249077 СССР, 42 $т^4$, 7/48. Устройство для воспроизведения запаздывания // В.М. Осипов, В.И. Гончаров. - 4 с.

6 А.с. 272678 СССР, 42 $т^4$, 7/32. Устройство для моделирования объектов, описываемых трансцендентными и иррациональными передаточными функциями // В.М. Осипов, В.И. Гончаров. -4с.

7. Гончаров В.И. Моделирование запаздывания с использованием полиномов Лежандра // Известия ТПИ / Томский политехнический институт. – 1972.- Т. 225.

8. Осипов В.М., Гончаров В.И. Синтез одной трансцендентной передаточной функции с помощью пассивных цепей и операционных усилителей // Известия ТПИ / Томский политехнический институт.- 1972. - т. 225.

9. Гончаров В.И., КомагороваЛ.В., Пушкарев Г.Ф. О приближении сложных передаточных функций методом интерполирования // Радиоэлектроника и управление: Тезисы докл. региональной конференции молодых ученых. - Томск: 1974.

10. Баторов А.Р., Гончаров В.И. Синтез линейных динамических систем методом интерполирования // Радиоэлектроника и управление: Тезисы докл. региональной конференции молодых ученых.- Томск: 1974.

11. Гончаров В.И. Численный метод исследования линейных систем //Техническая кибернетика /Фрунзенский политехнический институт. - 1975. - Вып. 86.

12. Гончаров В.И. Анализ и синтез линейных электрических цепей при помощи ЭЦВМ // XXXII Всесоюзная научная сессия, посвященная Дню радио: Тезисы докладов. - М.: 1977.

13. Гончаров В.И. Расщепление движения линейной системы на основе δ-преобразования // Автоматизация управления и АСУ ТП / Межвуз. научно-техн. сборник.- Томск: 1977.

14. Гончаров В.И., Петерс Д.П. Алгоритмы расчета линейных стационарных систем методом дельта-преобразования // Системы управления и их элементы / Межвуз. научно-техн. сборник. - Томск: 1980.

15. Вадутова Ф.А., Гончаров В.И., Петерс Д. П. Алгоритмы автоматизированного расчета импульсных систем на основе дельта-преобразования // Теория и техника автоматического управления / Межвуз. научно-техн. сборник. - Томск: 1981.

16. Вадутова Ф.А., Гончаров В.И. Использование δ-преобразования для анализа САУ // Моделирование процессов и систем / Межвуз. научно-техн. сборник.- Томск: 1982.

17. Вадутова Ф.А., Гончаров В.И., Поздняков В.Ю. К синтезу передаточных функций линейных систем / Межвуз. научно-техн. сборник -Томск: 1983.

18. Вадутова Ф.А., Гончаров В.И. Преобразование передаточных функций и сигналов на основе их численных характеристик // Межвуз. научно-техн. сборник.- Новосибирск: 1984.

19. Вылегжанин О.Н., Вадутова Ф.А., Гончаров В.И. Численное представление импульсных сигналов рациональной функцией // Межвуз. научно-техн. сборник.- Томск: 1986.

20. Вадутова Ф.А., Гончаров В.И. Применение интегрального вещественного преобразования к расчету систем с распределенными параметрами. // Опыт использования распределенных систем управления технологическими процессами н производствами: Тезисы докладов Всесоюзного научно-практического семинара. 1-3 декабря 1986 г.

21. Выбор направлений автоматизированного моделирования исполнительных систем роботов: Отчет о НИР / Кибернетический центр при Томск. политехн. ин-те. № гос. рег. 01860075792, инв. № 02770058087. -Томск, 1986.

22. Вадутова Ф.А., Гончаров В.И. Получение и использование вещественных функций-изображений при исследовании динамических систем // Электромеханика. - 1987. -№ 8.

23. Разработка информационной системы и элементов САПР исполнительных систем промышленных роботов: Отчет о НИР / Кибернетический центр при Томск. политехн. ин-те. - № гос. рег. 01860075792, инв. № 02880043П89. - Томск, 1987.

24. Синтез исполнительных систем управления роботов на основе вещественного преобразования: Отчет о НИР / Кибернетический центр при Томск, политехн. ин-те. - № гос. рег. 01860075792, инв. № 02890031664. - Томск, 1988.

25. Анисимов В.Т., Вадутова Ф.А., Гончаров В.И. Моделирование цифровых динамических систем, обеспечивающее малые вычислительные затраты // Динамика станочных систем гибких автоматизированных производств: Тезисы докладов 3-й Всесоюзной научно-технической конференции, 24-26 мая 1988 г.- Тольятти, 1988.

26. Разработка элементов САПР исполнительных систем промышленных роботов: Отчего НИР/ Кибернетический центр при Томск. политехн. ин-те. - N гос. рег. 01880068449, инв. N 0900029104. - Томск, 1988.

27. Гончаров В.И., Петерс Д.П., Вадутова ФА. Проектирование исполнительных систем роботов: Учебное пособие по курсовому проектированию / В.И. Гончаров, Д.П. Петерс, Ф.А. Вадутова. - Томский политехн. ин-т, 1989.

28. Разработка алгоритмов и программ расчета параметров систем стабилизации натяжения нити: Отчет о НИР / Кибернетический центр при Томск, политехн. ии-те. - № гос. рег. 01900020532, инв. № 02910046655. - Томск, 1991.

29. Анисимов В.Г., Гончаров В.И., Мельник А.И. Получение математической модели исполнительной системы робота для целей адаптации // Автоматизация, математические методы и управление народным хозяйством. - Томск: Изд-во Томского госуниверситета, 1990. – с. 126-129.

30. Гончаров В.И., Лавришенкова В.А. Получение дискретных передаточных функций непрерывно-дискретных систем автоматического управления // Теория и техника автоматического управления / УНПК "Кибернетика" при Томском политехническом институте. - Томск: 1990. Деп. в ВИНИТИ 19.02.91, № 773-В9I.

31 Гончаров В.И. Численные модели систем, имеющих элементы с распре-деленными параметрами // Перспективы развития и применения средств вычислительной техники для моделирования и автоматизированного исследования: Тезисы докладов Всесоюзной конференции, 16-18 октября 1991 г. - М., 1991.

32. Гончаров В.И. Вещественный интерполяционный метод синтеза систем автоматического управления. - Томск: изд-во ТПУ, 1995. - 108 с.

33. Гончаров В.И., Яковлева Е.М. Синтез передаточных функций эталонных систем по их временным динамическим характеристикам. // Электромеханика.-1995.- № 5-6 (в печати).