На правах рукописи

Нгуен Фу Данг

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ, ОПИСЫВАЕМЫМИ ИРРАЦИОНАЛЬНЫМИ И ТРАНСЦЕНДЕНТНЫМИ ПЕРЕДАТОЧНЫМИ ФУНКЦИЯМИ

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность).

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2011

Работа выполнена на кафедре интегрированных компьютерных систем управления в Томском политехническом университете (ТПУ)

Научный руководитель – Доктор технических наук, профессор **Гончаров Валерий Иванович**

Официальные оппоненты – Доктор технических наук, профессор **Кочегуров Владимир Александрович**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО "Научно-производственный центр "Полюс" **Белицкая Лилия Анатольевна.**

Ведущая организация – **Кемеровский государственный университет**

Зашита диссертации состоится «25» октября 2011 г. в 15:00 час. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06 при ФГБОУ ВПО «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84/3, Институт кибернетики.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «22» сентября 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите
докторских и кандидатских
диссертаций Д 212.269.06,

кандидат технических наук, доцент М.А. Сонькин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Объекты с распределенными параметрами (РП) характеризуются определенной протяженностью в пространстве, что является их принципиальным отличием от объектов, параметры которых считаются сосредоточенными. Вследствие этого объекты с РП имеют отличия в формах математического описания – они представляются дифференциальными уравнениями в частных производных, интегральными, интегродифференциальными уравнениями и другими математическими формами, котрые оказываются намного сложнее математических описаний объектов с сосредоточенными параметрами.

Имеются основополагающие результаты, полученные Бутковским А.Г., Сиразетдиновым Т.К., Шевяковым А.А. и Яковлевой Р.В., Рапопортом Э.Я., Першиным И.М., Реем У. и другими. Предложенные методы и подходы позволяют на определенных уровнях точности и сложности получаемых решений достигать цели – синтезировать регуляторы систем автоматического управления (САУ) с РП, моделировать и исследовать их.

В то же время задачи управления объектами с РП весьма разнообразны, глубоки по своему содержанию и специфике, требуют привлечения сложного математического аппарата, максимально полного учета основных свойств объекта управления. Возникающие при этом трудности оказываются столь значительными, что приходиться использовать существенные допущения и приближения в постановке задач и их решении. Очевидный и распространенный подход - представление объекта с РП какой-либо моделью, применяемой для описания объектов с сосредоточенными параметрами. Недостатки и ограниченность такого пути также очевидны. Прежде всего – возможная потеря существенных свойств объекта и, в итоге, получение неудовлетворительных показателей синтезированной системы управления.

В то же время для определенного класса объектов с РП, в частности, для одномерных по пространственной координате, существует компромиссный вариант расчета, который сохраняет особенности объекта с РП, устанавливая связь «вход-выход» между заданными точками параметрического пространства, и в то же время снижает трудоемкость работ. В литературе он известен как метод завершающей дискретизации ([*]). Этот вариант при всей своей привлекательности имеет определенные трудности реализации - получаемые модели, например, в форме передаточных функций, могут содержать не только дробно-рациональные выражения, но и иррациональные и трансцендентные составляющие. Поэтому и в этом случае расчет САУ объектами с РП остается непростым, так как непосредственное применение методов теории автоматического управления затруднительно, а во многих случаях невозможно.

Таким образом, разработка новых путей и соответствующих технических средств, позволяющих выполнять расчет систем такого класса и при этом частично снижать уровень затруднений, является актуальной задачей. В работе в качестве направления исследований, которое позволяет добиться прогресса в этом отношении, рассматривается численный подход в решении указанных задач, базирующийся на вещественном интерполяционном методе (ВИМ).

Объектом исследования являются системы автоматического управления объектами с РП, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями.

Цель диссертационной работы заключается в разработке алгоритмов синтеза регуляторов САУ, во-первых, в рамках развития традиционного аппроксимационного подхода, и, во-вторых, на основе непосредственного использования исходной передаточной функции, содержащей иррациональные и трансцендентные составляющие.

(*) Рей У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей / Переводчик А.М. Шафира, под ред. С.А. Малого. –М.: Мир,1983. – 366с.

Для достижения поставленной цели необходимо поставить и решать следующие задачи:

1. Выявить особенности применения вещественного интерполяционного метода к задачам аппроксимации сложных передаточных функций, содержащих иррациональные и трансцендентные выражения, разработать алгоритм приближения таких функций рациональными дробями.

2. Распространить алгоритмы аппроксимации сложных передаточных функций на задачу синтеза регуляторов САУ объектами, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями.

3. Исследовать возможность повышения точности решения задач аппроксимации передаточных функций и синтеза регуляторов САУ с РП за счет процедур дискретизации исходных передаточных функций и их интерполяционного восстановления.

4. Разработать способ оценивания точности решения приближенных задач вещественным интерполяционным методом в области изображений и на этой основе создать алгоритм приближения к наилучшему равномерному решению.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: метод конечной дискретизации У. Рея для систем с распределенными параметрами, вещественный интерполяционный метод, аппарат полиномов Чебышева I-ого рода, наименее уклоняющихся от нуля, метод Е.Я. Ремеза приближения к наилучшему решению в равномерной метрике, компьютерные инструменты исследований моделей и алгоритмов.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Применен вещественный интерполяционный метод для аппроксимации сложных передаточных функций, содержащих иррациональные и трансцендентные составляющие.

2. Предложен способ синтеза регуляторов САУ объектами, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями, не использующий этап аппроксимации сложной передаточной функции объекта управления, обеспечивающий за счет этого повышение точности решения приближенных задач.

3. Разработан способ оценивания точности решения задач синтеза регуляторов и аппроксимации сложных передаточных функций в области изображений, приводящий к снижению объема вычислений по сравнению с привлечением динамических временных или частотных характеристик.

4. Предложены и исследованы способы повышения точности решения приближенных задач вещественным интерполяционным методом на основе распределения интерполяционных узлов по нулям полиномов Чебышева I-ого рода, а также привлечения метода Ремеза приближения к наилучшему чебышевскому решению.

5. Предложены, исследованы и введены в алгоритмы решения задач аппроксимации передаточных функций и синтеза регуляторов инструментальные переменные, позволяющие корректировать свойства синтезируемой системы в отношении перерегулирования, быстродействия и робастности по перерегулированию.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм аппроксимации передаточных функций, которые могут содержать дробно-рациональные выражения высокого порядка, иррациональные и трансцендентные составляющие.

2. Алгоритм синтеза регуляторов САУ объектами с РП, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями.

3. Способ оценивания точности решения приближенных задач синтеза регуляторов и аппроксимации сложных передаточных функций в области вещественных изображений.

4. Алгоритмы повышения точности решения задач аппроксимации и синтеза регуляторов на основе назначения интерполяционных узлов по нулям полиномов Чебышева I-ого рода и привлечения метода Ремеза приближения к наилучшему чебышевскому решению.

Практическая значимость работы состоит в разработке:

- численного способа синтеза регуляторов САУ объектами, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями по прямым показателям качества – перерегулированию и времени установления;

- алгоритмов и программ аппроксимации сложных передаточных функций объектов с РП, которые могут содержать дробно-рациональные выражения высокого порядка, иррациональные и трансцендентные составляющие;

- алгоритма и методики достижения заданного перерегулирования при синтезе САУ объектами с РП с помощью инструментальных переменных – диапазона расположения узлов интерполирования и времени установления;

- способов и алгоритмов повышения точности решения задач аппроксимации передаточных функций объектов с РП и синтеза регуляторов для систем управления объектами этого класса.

Достоверность результатов работы. Достоверность полученных результатов подтверждается расчетными примерами приближения сложных передаточных функций дробно-рациональными выражениями и синтеза регуляторов САУ объектами, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями, корректным использованием численных оценок точности, проверкой получаемых решений несколькими способами, использованием хорошо зарекомендовавших себя математических инструментов – наименее уклоняющихся от нуля полиномов Чебышева I-ого рода и метода Ремеза приближения к наилучшему равномерному решению.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре интегрированных компьютерных систем автоматического управления при выполнении магистрантами и студентами индивидуальных заданий, применены в разработанном на кафедре приборе для идентификации объектов управления по контракту № 8-13107 с компанией Fastech (Республика Корея).

Алгоритмы и программы синтеза регуляторов САУ объектами, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями переданы в НИИ автоматики и электромеханики Томского университета систем управления и радиоэлектроники для использования в практических задачах.

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях, конкурсах и семинарах:

1. X Международная научно-техническая конференция «Компьютерное моделирование 2009». - Санкт-Петербург, ПУ, 23-24 июня 2009 г.

2. VII Всероссийская научно-практическая конференция «Молодежь и современные информационные технологии»: - Томск, ТПУ, 25 - 27 февраля 2009 г.

3. X Научно-практическая конференция «Средства и системы автоматизации: проблемы и решения». - Томск, ЭлеСи, 19-20 ноября 2009 г.

4. III научно-практическая конференция иностранных студентов, магистрантов и аспирантов, обучающихся в ТПУ. – Томск, ТПУ, 19-21 мая 2010 г.

5. Всероссийская молодёжная научная конференция «Современные проблемы математики и механики». – Томск, ТГУ, 13-15 октября 2010 г.

6. III Российско-корейский научно-технический семинар «Мехатроника: Устройства и управление». - Томск, ТПУ, 15 марта 2011 г.

7. The Junior Scientist Conference 2010. - Vienna University of Technolgy, Vienna, Austria, 7 – 9 April 2010 г.

8. The 10th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'10), - Lisbon, Portugal, 1-2 July 2010 г.

9. XXX Российская школа, посвященная 65-летию победы «Наука и технологии». – Миасс, Екатеринбург: УрО РАН, 15-17 июня 2010 г.

10. XVII международная конференция по автоматическому упралению «Автоматика 2010». – Украина, г. Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

(ХНУРЭ), 27 – 29 сентября 2010 г.

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертационной работы опубликовано 13 статьей и тезисов докладов, из них 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Работа была отмечена диплом I степени на международной научно-технической конференции “Компьютерное моделирование 2009”, г. Санкт-Петербург, ПУ, 2009 г.

Зарегистрировано программное приложение «Аппроксимация передаточных фунций, содержащих иррациональные и трансцендентные выражения» в государственном информационном фонде неопубликованных документов, № 50201150734.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 72 наименований. Основной текст диссертации составляет 163 страниц машинописного текста, включает 6 таблиц и 37 рисунков. В конце каждой главы сформулированы основные выводы и перечислены полученные результаты.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее практическое значение, сформулирована цель, определены задачи исследования, а также выделены основные положения, выдвигаемые на защиту.

В первой главе представлены особенности задач управления системами с РП, приведен краткий обзор существующих методов исследования и построения регуляторов систем указанного класса. Обоснован выбор базового метода - ВИМ, привлекаемого к расчету САУ с РП, приведены его основные особенности и возможности, а также используемые непрерывные и дискретные математические модели объектов.

Объекты с распределенными параметрами характеризуются определенной протяженностью в пространстве, что является их принципиальным отличием от объектов, параметры которых считаются сосредоточенными. Вследствие этого их математические описания оказываются намного сложнее математических описаний объектов с сосредоточенными параметрами. Передаточные функции объектов с РП могут содержать дробно-рациональные выражения высокого порядка, а также иррациональные и трансцендентные составляющие. В общем случае такие передаточные функции представляются в виде

$$W_{pn}(p) = W(p, \mathrm{e}^{-\frac{C(p)}{D(\mathrm{p})}}, \sqrt{p}, \mathrm{ch}p, \mathrm{sh}\sqrt{\mathrm{a}p^2 + bp + c}, ...) . \tag{1}$$

Повышение точности работы САУ с РП может быть достигнуто лишь на основе учета распределенности параметров объектов управления. Основные способы синтеза таких систем известны.

Аппроксимационный или косвенный подход, когда исходную передаточную функцию (1) заменяют приближенным дробно-рациональным выражением. Достоинство – возможность использовать методы расчета САУ с сосредоточенными параметрами. Недостаток – теряются особенности, вызванные распределенностью параметров.

Метод завершающей дискретизации использует модели с учетом распределенности параметров. Этот метод относится к числу прямых методов. Достоинство – сохраняется специфика объектов с РП вплоть до синтеза регуляторов. Недостаток – трудности выполнения действий над функциями вида (1). Имеются основания для предположения о том, сочетание метода завершающей дискретизации и ВИМ позволит значительно снизить уровень трудностей, возникающих при операциях над функциями вида (1). Такой вывод базируется на главной особенности ВИМ – используемые модели относятся к функциям с вещественным аргументом.

ВИМ базируется на интегральном вещественном преобразовании

$$F(\delta)=\int_0^\infty f(t)e^{-\delta t}dt, \delta\in[C,\infty], C\ge 0, \qquad (2)$$

которое можно рассматривать как частный случай преобразования Лапласа, когда комплексная переменная $p\to\delta+j\omega$ вырождается в вещественную δ при $\omega=0$. Вещественные функции $F(\delta)$ можно получить по формуле прямого δ- преобразования (2), однако в большинстве случаев удобен формальный путь - замена в функции $F(p)$ комплексной переменной p на вещественную δ. Это возможно при выполнении определенных условий, которым должно удовлетворять изображение $F(p)$. Еще один важный для практики шаг - переход от непрерывных моделей $F(\delta)$ к их дискретным представлениям $F(\delta_i), i=\overline{1,\eta}$. Такая форма описания получила название численной характеристики и обозначение $\{F(\delta_i)\}_\eta$. Физический смысл остается прежним – это динамическая характеристика объекта, системы или ее элемента.

В рамках ВИМ имеются разработанные алгоритмы синтеза САУ, сводящие обширную задачу синтеза к более простой постановке - синтезу передаточных функций регуляторов. Для пояснения рассмотрим одноконтурную систему управления объектом с РП, показанную на рис. 1. Передаточная функция объекта $W_{рп}(p)$ представлена выражением (1), а регулятор - функцией

$$W_p(p)=\frac{b_m p^m+b_{m-1}p^{m-1}+...+b_1 p+b_0}{a_n p^n+a_{n-1}p^{n-1}+...+a_1 p+1}, \qquad (3)$$

известной с точностью до коэффициентов. Требуется найти коэффициенты передаточной функции регулятора (3), а также значение $k_{ос}$, при которых синтезированная система удовлетворяет требованию по перерегулированию и быстродействию:

$$\sigma_з-\Delta\sigma_з<\sigma_c<\sigma_з+\Delta\sigma_з; t_y^c\to\min. \qquad (4)$$

В математическом плане задача заключается в составлении и решении одного из уравнений синтеза

$$W_ж^з(p)\cong\frac{W_p(p)W_{рп}(p)}{1+W_p(p)W_{рп}(p)k_{ос}}, W_ж^p(p)\cong W_p(p)W_{рп}(p), \qquad (5)$$

в котором неизвестны лишь коэффициенты передаточной функции регулятора.

Решение задачи в соответствии с ВИМ заключается в преобразовании уравнения (5) в вещественную форму, назначении узлов интерполирования $\delta_i, i=\overline{1,\eta}$ и формировании системы уравнений синтеза в дискретной форме

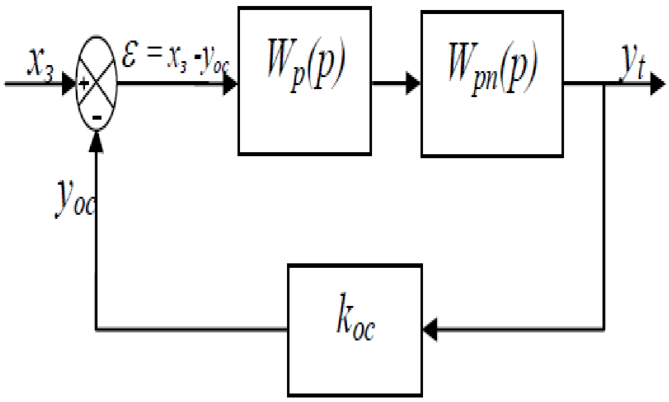

Рис. 1. Схема системы управления объектом с РП

$$W_ж^p(\delta_i)=W_p(\delta_i)W_{рп}(\delta_i), i=\overline{1,\eta}. \qquad (6)$$

Итак, имеется объект управления с РП, описываемый иррациональными и трансцендентными передаточными функциями. Требуется синтезировать стабилизирующий регулятор, придающий системе заданные динамические и статические свойства. Если исходить из известного положения - параметры регулятора зависят от свойств объекта управления, то оно должно относиться и к такой особенности объекта, как распределенность параметров объекта в пространстве. Можно предполагать, каким образом будет проявляться эта особенность, как она может быть учтена при решении задач синтеза. В частности, на при переходе от непрерывной модели к дискретной (этап дискретизации) погрешность решения во многом зависит от выбора узлов интерполирования. Поэтому обобщение ВИМ на системы с РП в главном должны сводиться к поиску таких узлов, которые в наибольшей степени обеспечат близость свойств синтезированной системы и эталонной модели.

Во второй главе представлены результаты изучения возможности применения ВИМ к решению задач приближения сложных передаточных функций, введены критерии близости исходной и приближенной функций, рассмотрены вопросы минимизации погрешности. Приведен итерационный алгоритм приближения к искомому решению, приведены расчетные примеры, иллюстрирующие предложенный подход.

Один из подходов к решению задачи синтеза регуляторов САУ объектами, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями состоит в замене исходной точной передаточной функции объекта $W_{pn}(p)$ ее приближенным обычно дробно-рациональным представлением $W(p)$

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + ... + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + ... + a_1 p + a_0}. \tag{7}$$

В рамках применения ВИМ к аппроксимации сложных передаточных функций формирован алгоритм решения задачи, включающий в себя следующие этапы:

1) Исходная передаточная функция $W_{pn}(p)$ переводится в вещественную форму $W_{pn}(\delta), \delta \in [C, \infty], C \geq 0$.

2) Принимается решение о выборе параметров m, n структуры аппроксимирующей функции $W(p)$ и определяется размерность $\eta = m + n + 1$ численной характеристики $\{W_{pn}(\delta_i)\}_\eta$ объекта управления.

3) Вычисляют значение коэффициента b_0 функции $W(p)$, что понижает число неизвестных коэффициентов на единицу.

4) Находят значения узлов $\delta_i, i = \overline{1,\eta}$ стандартным для ВИМ образом.

5) Вычисляют элементы численной характеристики $\left\{W_{pn}(\delta_i)\right\}_\eta$ объекта управления по известным узлам $\delta_i, i = \overline{1,\eta}$ и вещественной функции $W_{pn}(\delta)$.

6) Составляют и решают систему уравнений

$$W_{pn}(\delta_i) = \frac{b_m \delta_i^m + b_{m-1} \delta_i^{m-1} + ... + b_0}{a_n \delta_i^n + a_{n-1} \delta_i^{n-1} + ... + a_1 \delta_i + 1}, \; i = \overline{1,\eta} \tag{8}$$

относительно неизвестных коэффициентов $b_1, b_2, .., b_m, a_1, .., a_n$ аппроксимирующей функции $W(\delta)$.

7) Переходят от полученной вещественной функции $W(\delta)$ к лапласовой функции $W(p)$, оценивают точность результата по принятому критерию и принимают решение относительно продолжения задачи или ее завершения.

Последний этап является многосложным. Он может включать в себя ряд промежуточных шагов, наличие которых зависит от точности полученного решения. В общем случае развитие этапа 7) и, следовательно, алгоритма представляется следующей схемой.

7.1. Привлечение критерия точности решения задачи на основе временных или частотных характеристик или в области изображений. В работе в силу особенностей объектов с РП, приводящих к трудностям получения временных и частотных характеристик, близость исходной $W_{pn}(p)$ и аппроксимирующей $W(p)$ функций предложено оценивать в области вещественных изображений $W_{pn}(\delta)$ и $W(\delta)$. В условиях ВИМ ошибка приближения может быть представлена простым и наглядным выражением

$\Delta W(\delta) = W_{pn}(\delta) - W(\delta)$, имеющим графическую интерпретацию, а также оценкой

$$\Delta W = \max_{\delta} \left| W_{pn}(\delta) - W(\delta) \right|. \tag{9}$$

7.2. Выполнение итерационной процедуры, направленной на уменьшение величины погрешности ΔW.

7.3. Обеспечение робастности получаемой модели.

В работе рассмотрены теоретические основы задач, направленных на выполнение приведенных этапов, рассмотрены расчетные примеры, иллюстрирующие работоспособность и достоверность предложенных решений.

В качестве примера ниже приведены сведения по задаче аппроксимации передаточной функции кольцевого распределенно – упругого звена, представленного моделью

$$W_{pn}(p) = \frac{q.ch(\lambda.p)}{shp + p\mu_1.chp} = \frac{7.ch(0.4p)}{shp + 11p.chp}. \tag{10}$$

Требуется найти аппроксимирующие выражения вида (7) для различных значений структурных параметров m, n, выяснить зависимость точности аппроксимации от значений параметров m, n и распределений узлов интерполирования $\delta_i, i = \overline{1, \eta}$. Для пояснения особенностей и свойств модели (10) на рис. 2 приведена ЛАЧХ $L_1(\omega)$ объекта.

При решении основной части задачи учтем два обстоятельства. Во-первых, передаточная функция (7) должна иметь полюс в начале координат, отражая наличие в объекте интегрирующего звена. Во-вторых, имеется возможность найти коэффициент b_0 до выполнения основного этапа: $b_0 = 10^{\frac{20*\lg(A(\omega))+20*\lg\omega}{20}} \cong 0.5833$, где $A(\omega) = |W_{pn}(\mathrm{j}.\omega)|$. Кроме того, для упрощения структурной части задачи воспользуемся еще одним источником информации – резонансными частотами, полученными из характеристического уравнения $sh(p) + 11 * p * ch(p) = 0, \omega_1 = 1.626, \omega_2 = 4.731, \omega_3 = 7.866, \omega_4 = 11, \ldots$

С учетом указанного, аппроксимирующая модель, определяемая первыми двумя резонансными частотами, будет иметь форму

$$W(p) = \frac{b_4' p^4 + b_3' p^3 + b_2' p^2 + b_1' p + b_0'}{p(p^2 + \omega_1^2)(p^2 + \omega_2^2)}$$

$$= \frac{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{\frac{1}{\omega_1^2 \omega_2^2} p^5 + \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega_1^2 \omega_2^2} p^3 + p},$$

в которой величины ω_1, ω_2, b_0 известны. Поэтому остается определить лишь четыре коэффициента b_1, b_2, b_3, b_4, что соответствует размерности $\eta = 4$. В данном примере узлы располагаются равномерно $\delta_i = i\delta_1, i = 2,3,4$.

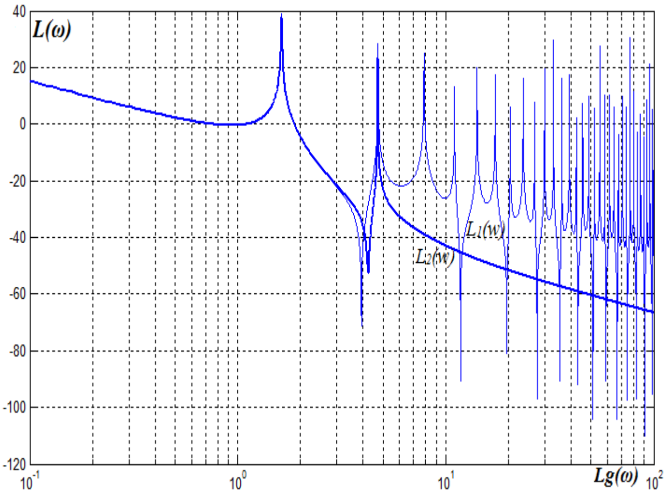

Рис. 2. ЛАЧХ исходной $L_1(\omega)$ и аппроксимирующей $L_2(\omega)$ передаточных функций

Следующие задачи заключаются в получении численной характеристики $\{W_{pn}(\delta_i)\}_\eta$, составлении и решении СЛАУ (8) на основе принятой системы узлов и исходной функции (10).

В результате решения системы (8) в соответствии с узлами $\delta_1 = 0.25, \delta_2 = 0.5, \delta_3 = 0.75, \delta_4 = 1$ были получены: $b_4 = -0.0008, b_3 = -0.00015$, $b_2 = 0.018, b_1 = -7.10^{-6}$. Таким образом, получено решение задачи, представленное аппроксимирующей передаточной функцией (11) и графиком $L_2(\omega)$ на рис. 2.

$$W_{пр}(p)=\frac{-0.0008p^4 - 0.00015p^3+0.018p^2 - 7.10^{-6}p+0.5833}{0.0169p^5+0.423p^3+p}. \qquad (11)$$

Заключительный этап алгоритма аппроксимации заключается в итерационном изменении узлов δ_i до величин $\delta_i^{оп}$, при которой оценка (9) близка к минимальной. Для полученного результата - функции (11) - оценка (9) имеет значение $\Delta W=\max\limits_{\delta}\left|W_{рп}(\delta) - W_{пр}(\delta)\right|=2.7*10^{-3}$. Для наглядности решения и перспектив повышения точности на рис. 3. показан график зависимости $\Delta W=f(\delta_4)$.

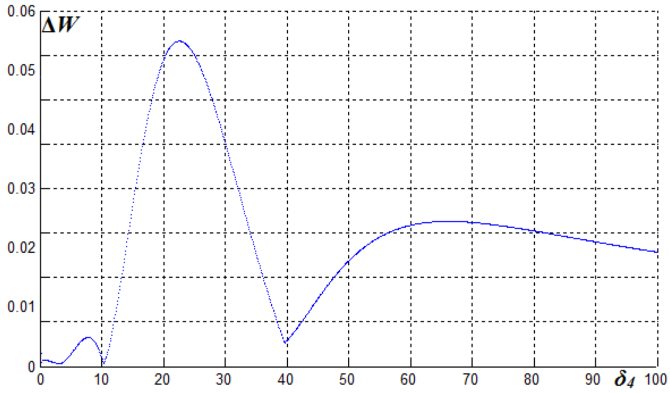

Рис. 3. Зависимость величины ΔW от δ_4

График показывает, что изменение интервала $[\delta_0,\delta_4]$ и связанное с этим изменение значений интерполяционных узлов δ_i приводит к коррекции величины оценки близости (9). В рассматриваемом примере, величина ΔW будет достигать минимума $\min\limits_{\delta}\Delta W$=0.97*10^{-3} при $\delta_4=\delta_4^{оп}=3.34$. Этот результат позволяет рассматривать параметр δ_4 в качестве инструментальной переменной, которую можно использовать для целей повышения точности решения задач приближения сложных передаточных функций.

В работе рассмотрен и другой, более общий вариант синтеза регулятора, в котором не использованы сведения о резонансных частотах. В этом случае алгоритм по-прежнему остается работоспособным.

Третья глава посвящена задаче синтеза регуляторов САУ объектами с РП, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями. Представлены уравнения синтеза, обсуждены вопросы выбора формы уравнения, наиболее удобной для практики, предложен итерационный способ решения уравнения, обеспечивающий приближение к заданному значению перерегулирования, выделены инструментальные переменные для настройки решения на заданные показатели качества.

Реализованный в работе подход позволяет найти регулятор непосредственно по сложной передаточной функции объекта (1), не используя операцию ее приближения рациональной дробью. Решение задачи заключается в формировании и решении уравнения синтеза в дискретной форме (6). Еще один элемент новизны состоит в итерационном изменении значений узлов интерполирования $\delta_i; i=\overline{1,\eta}$ так, чтобы свойства синтезируемой САУ приближались к желаемым.

Содержание предложенного способа синтеза регуляторов САУ объектами, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями и краткие пояснения к нему продемонстрируем на конкретном примере синтеза регулятора для объекта типа кольцевого звена манипулятора, представленного передаточной функцией

$$W_{рп}(p)=\frac{1}{sh(\frac{L}{a}p)+p\frac{L}{a}\mu ch(\frac{L}{a}p)}=\frac{1}{sh(0.25p)+1.25pch(0.25p)}.$$

В трехконтурной системе имеется контур тока, который известен:

$W_{кт}(p) \cong \dfrac{7.53}{0.0002p^2+0.02p+1}$. По заданным параметрам $\sigma_з = 5\%, \Delta\sigma = 0.5\%, t_у^з = 3c$ желаемого контура скорости получена его передаточная функция $W_{ж}^{з}(p) \cong \dfrac{5.5781p+10}{0.5578p^2+1.1156p+1}$, найдена модель разомкнутого контура по принятому коэффициенту обратной связи ($k_{ос} = 0.1$): $W_{ж}^{p}(p) = \dfrac{10p+17.9274}{p^2+p}$. Требуется найти регулятор первого порядка ($m = n = 1$).

В результате составления и решения системы уравнений вида (6) найдена передаточная функция регулятора $W_p(p) = \dfrac{2.425p+3.571}{1.101p+1}$ при $\delta_1 = 0.01$, $\delta_i = \mathrm{i}*\delta_1, i = 2,3$.

Для проверки решения получена передаточная функция синтезированного контура, затем приближенная переходная характеристика и, наконец, величина перерегулирования $\sigma_c \cong 6.4\%$. Она оказалась более заданного значения $\sigma_з \cong 5\%$. Для приближения к нужной нам величине используем итерационную процедуру изменения по переменным δ_i и $t_у^з$. В итоге получили перерегулирование $\sigma_c \cong 4.67\%$ при $\delta_i = \mathrm{i}*\delta_1, \delta_1 = 0.18, i = 2,3$ и $t_у^з = 3.5c$. С учетом допустимой погрешности $\Delta\sigma_з = 0.5\%$ можем считать цель достигнутой. Полученные и промежуточные решения представлены на рис. 4.

Можно видеть, что изменение значений узлов δ_i, а также заданного времени установления $t_у^з$ приводит к коррекции величины перерегулирования. Кроме того, на графике показано существование интервала узлов, при котором значение перерегулирования контура изменяется сравнительно мало, что отражает робастность системы по этому показателю. Другими словами, полученный регулятор не только стабилизирует систему, но является робастным на определенном уровне и обеспечивает быстродействие, близкое к наибольшему в данных условиях.

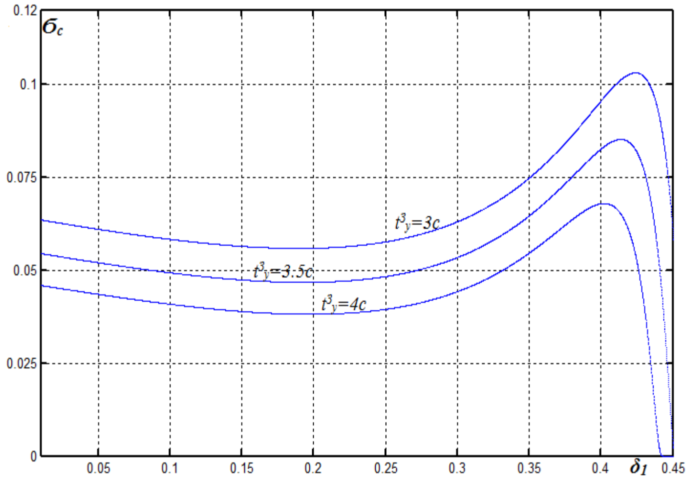

Рис. 4. Зависимости $\sigma_c = f(\delta_1)$ для $t_у^з = 3c, t_у^з = 3.5c$ и $t_у^з = 4c$

Рассмотренная задача синтеза порождает еще одну – разработку рациональных способов достижения заданного перерегулирования. Использованный в расчетном примере подход не является единственным. В работе предложены дополнительные способы, которые могут оказаться в каком-то смысле более эффективными.

1) Достижение заданного перерегулирования путем изменения времени установления.

Способ настройки решения на заданное значение перерегулирования $\sigma_з$, примененный выше, основан на привлечении шага дискретизации/интерполирования, который в условиях равномерной сетки определен параметром δ_1, имеющим смысл инструментальной переменной. Предложение сводится к привлечению второй инструментальной переменной - заданного времени установления $t_у^з$, когда возможности первой переменной исчерпаны. Для предыдущего примера на рис. 5 показана взаимозависимость параметров σ_c и $t_у^з$ в виде графика $\sigma_c = f(t_у^з)$. Он показывает существование указанной зависимости и, следовательно, возможность приближения к требуемому значению $\sigma_з$ путем изменения величины $t_у^з$. Для рассматриваемого примера условие $\sigma_c \cong \sigma_з = 5\%$ обеспечивается при $t_у^з \cong 3.3c$. Результаты, характеризующие влияние параметра $t_y^з$ на перерегулирование σ_c, приведены также в табл.1.

Табл. 1. Значения перерегулирования σ_c синтезированного контура при изменении времени $t_y^з$ для $\delta_1 = 0.18, \delta_2 = 0.36, \delta_3 = 0.54$

Параметр $t_y^з(c)$	Регулятор $W_p(p)$	Перерег. $\sigma_c(\%)$
2	$\frac{4.205p+5.369}{1.083p+1}$	≈ 7.5
3	$\frac{3.39p+3.583}{1.409p+1}$	≈ 5.7
3.3	$\frac{3.272p+3.259}{1.516p+1}$	≈ 5
5	$\frac{2.95p+2.157}{2.172p+1}$	≈ 2.3

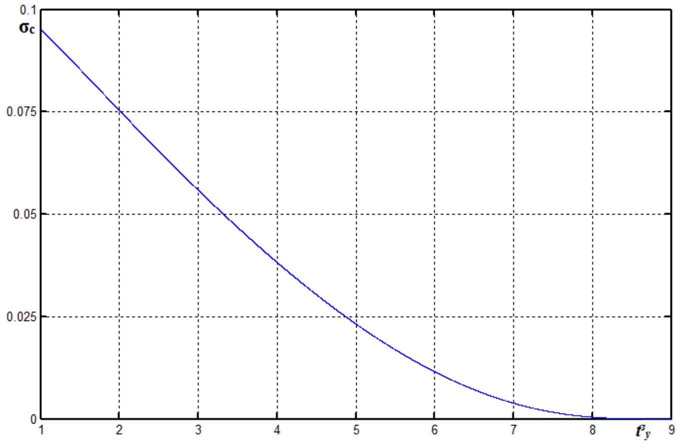

Рис. 5. График функции $\sigma_c = f(t_y^з)$ при $\sigma_з = 5\%$ и $\delta_1 = 0.18, \delta_2 = 0.36, \delta_3 = 0.54$

2) Достижение заданного перерегулирования на основе обобщенных желаемых передаточных функций.

Один из вариантов настройки перерегулирования σ_c состоит в предварительном изменении значения желаемого перерегулирования в окрестности значения $\sigma_з$. Это предложение вытекает непосредственно из анализа зависимости $\sigma_c = f(\delta_1)$, представленной на рис. 4 для фиксированного значения $t_y^з = 3c$. Для подтверждения существования такой связи в табл. 2 представлены результаты расчетов для различных значений заданного перерегулирования $\sigma_з$ при фиксированном параметре $t_y^з = 3c$, а также графическая интерпретация на рис. 6.

Табл. 2. Значения σ_c для параметров $t_y^з = 3c, \delta_1 = 0.18, \delta_2 = 0.36, \delta_3 = 0.54$.

Параметр $\sigma_з(\%)$	Регулятор $W_p(p)$	Перерег. $\sigma_c(\%)$
7.4	$\frac{3.208p+4.195}{1.303p+1}$	≈ 11.9
4.8	$\frac{3.418p+3.527}{1.424p+1}$	≈ 5
4.5	$\frac{3.462p+3.449}{1.446p+1}$	≈ 4.16
3.1	$\frac{3.751p+3.119}{1.591p+1}$	≈ 1

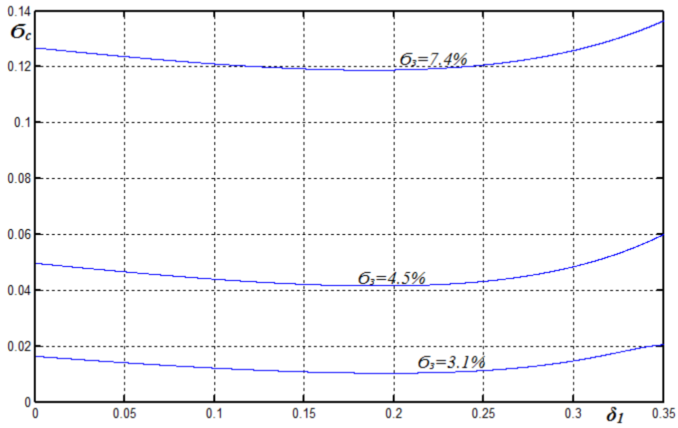

Рис. 6. График зависимости $\sigma_c = f(\delta_1)$ для значений $\sigma_з = 7.4\%, 4.5\%, 3.1\%$ при $t_y^з = 3c$

График показывает, что имеется возможность получить искомое решение путем изменения введения еще одной инструментальной переменной - заданного перерегулирования $\sigma_з$.

3) Получение заданного перерегулирования за счет формирования весовых функций специального вида.

Обратимся к уравнению синтеза (5), которое можно представить в непрерывной и дискретной формах для импульсных переходных характеристик:

$$\int_0^\infty k_{ж}(t)e^{-\delta t}dt \cong \int_0^\infty k_c(t)e^{-\delta t}dt, \int_0^\infty k_{ж}(t)e^{-\delta_i t}dt \cong \int_0^\infty k_c(t)e^{-\delta_i t}dt,\ i = \overline{1,\eta}, \quad (12)$$

Выражение $e^{-\delta_i t}$ в (12) представляет собой весовую функцию, которая влияет на распределение погрешности $\Delta k(t) = k_{ж}(t) - k_c(t)$. Последнее обстоятельство позволяет изменять свойства синтезируемых систем, варьируя значения узлов $\delta_i, i = \overline{1,\eta}$. Напомним, такой способ был уже использован.

Рассмотрим возможность формирования другой весовой функции, такой, что ее «фильтрующие» свойства были бы локализованы и выражены сильнее. Цель состоит в придании большей значимости тем участкам функций $k_{ж}(t), k_c(t)$ или $h_{ж}(t), h_c(t)$, которые определяют перерегулирование. Для локализации участков во времени есть основание полагать, что их центры находятся примерно в окрестности точки $t_\sigma \cong t_y^з/2$. Следовательно, весовая функция должна быть сконструирована таким образом, чтобы ее максимум был расположен в окрестности выделенной точки и это будет условие более сильного сближения функций $h_{ж}(t)$ и $h_c(t)$ в заданной таким образом окрестности. С учетом сказанного выберем весовую функцию в виде

$$w(t) = e^{-\delta t}(1 - e^{-\delta t}) = e^{-\delta t} - e^{-2\delta t}. \qquad (13)$$

Обратим внимание на то обстоятельство, что положением экстремума функции (13) на координате t можно управлять, изменяя величину параметра δ. Это возможность важна, так как мы имеем в распоряжении инструментальную переменную, которая позволит приблизить экстремум функции $w(t)$ к тому моменту времени t_σ, при котором отсчитывается перерегулирование. Как ранее предположили, это момент $\approx t_y^з/2$.

Предложенный вариант формирования и использования функции веса рассмотрен на численном примере и показал положительные результаты. Рассмотренный вариант имеет не только положительные стороны, но и нежелательные. Главная из них - при использовании такой весовой функции теряется связь δ - преобразования с преобразованием Лапласа, что не позволяет осуществлять взаимный переход между двумя изображениями.

Четвертая глава посвящена исследованию способов повышения точности решения задач аппроксимации и синтеза регуляторов САУ объектами с РП, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями. В работе рассмотрены две возможности - привлечение нулей полиномов Чебышева 1-ого рода и метода Ремеза Е.Я. приближения к наилучшему равномерному решению.

При решении указанных задач в условиях фиксированной структуры искомых передаточных функций существует единственный путь снижения величины оценки погрешности $\Delta W(\delta)$ - параметрический. Его использование связано с изменением значений узлов интерполирования. Предыдущие решения были найдены в условиях наиболее простого закона расположения узлов – равномерного. Имеются основания полагать, что неравномерное распределение узлов приведет к повышению точности решения задач.

Интерес к полиномам Чебышева I-ого рода продиктован тем, что они наименее уклоняются от нуля. Поэтому использование их нулей в качестве узлов интерполяции может привести к снижению погрешности.

Полиномы Чебышева I-ого рода определены на интервале $x \in [-1,1]$ соотношениями

$$T_0(x) = 1, T_1(x) = x, T_2(x) = x^2 - \frac{1}{2}, \mathrm{T}_{n+1}(x) = xT_n(x) - \frac{1}{4}T_{n-1}(x). \qquad (14)$$

Обратим внимание на интервал определения полиномов: $x \in [-1,1]$. Между тем, вещественные функции $W_{pn}(\delta), W(\delta), W_p(\delta), ...$ и их дискретные представления заданы на интервале $[0,\infty]$. Начальный шаг в привлечении полиномов Чебышева состоит в согласовании интервалов полиномов, которые определены на интервале $x \in [-1,1]$, и функций $W_{pn}(\delta), W(\delta), W_p(\delta),\ldots,$ заданных на интервале $[0,\infty]$. Для достижения согласования определим полиномы $T_n(x)$ на интервале $[0,\infty]$, для чего введем новую переменную t подстановкой

$$x = 2e^{-at} - 1, \tag{15}$$

где a – некоторый вещественный параметр. В результате полиномы (14) примут вид

$$T_0(t) = 1, T_1(t) = -1 + 2e^{-at}, \mathrm{T}_2(t) = \frac{1}{2} - 4e^{-at} + 4e^{-2at}, \ldots$$

Следующий шаг в процедуре привлечения нулей полиномов Чебышева заключается в согласовании форм представления полиномов и вещественных передаточных функций. Первые из них заданы в области времени, вторые - в области δ- изображений. Поэтому переведем соотношение (15) в область изображений: $\frac{x}{\delta} = \frac{2}{\delta + a} - \frac{1}{\delta}$. Отсюда найдется расчетная формула для произвольного узла:

$$\delta_i = \frac{1 + x_i}{1 - x_i} a. \tag{16}$$

В соотношении (16) x_i- корни уравнения $\mathrm{T}_\eta(x) = 0$, в котором параметр a имеет смысл масштабного множителя времени/вещественной переменной δ. Отметим, что параметр a не определен, поэтому его можно использовать для повышения точности искомого решения.

На основании этого подхода разработан алгоритм расчета интерполяционных узлов, который встраивается в алгоритмы аппроксимации сложных передаточных функций и синтеза регуляторов САУ с РП. В работе приведены расчетные примеры, подтверждающие перспективность предложения. Результаты двух примеров приведены ниже.

В практике создания средств для морских исследований существуют задачи аппроксимации сложных передаточных функций и синтеза регуляторов для объектов типа «буксирный трос - подводный объект». При определенных условиях передаточная функция объекта представлена выражением

$$W_{pn}(p) = \left(ch(\tau_L.r(p)) + \frac{m_{no}p^2 + k_{no}p}{Z_w(p)}.sh(\tau_L.r(p)) \right)^{-1} = \frac{1}{ch(1.2483p) + (0.89p + 0.27).sh(1.2483p)} \tag{17}$$

В задаче приближения с учетом априорной информации о наличии m резонансных частот $\omega_1 = 0.756, \omega_2 = 2.827,\ldots,$ найденных из характеристического уравнения $ch(1.25p) + (0.89p + 0.27).sh(1.25p) = 0$, аппроксимирующая модель объекта принимает форму

$$W(p) = \frac{b'_0(b'_{2m}p^{2m} + b'_{2m-1}p^{2m-1}\ldots + b'_1 p + 1)}{(1+Tp)(p^2+\omega_1^2)(p^2+\omega_2^2)\ldots(p^2+\omega_m^2)} = \frac{b_{2m}p^{2m} + b_{2m-1}p^{2m-1}\ldots + b_1 p + b_0}{(1+Tp)(a_{2m}p^{2m} + a_{2m-2}p^{2m-2} + \ldots + a_2p^2 + 1)},$$

в которой значения параметров $b_0 = 1$ и $T = 0.8944$ могут быть определены из частотной характеристики. Для определенности примем $m = 2$. Это приводит к четырем неизвестным коэффициентам b_1, b_2, b_3, b_4 и, следовательно, к необходимости назначения 4-х узлов δ_i, соответствующих нулям полинома $T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1 = 0$:

$$x_{1,4} = \pm 0.9239, x_{2,3} = \pm 0.3827 \text{ и } \delta_{1\div 4} = 0.0396a, 0.4465a, 2.2398a, 25.2741a.$$

Для минимизации величины оценки ΔW использована итерационная процедура по параметру a. В результате получили $\min\limits_{\delta} \Delta W = 0.0036$ при $\delta_1 = 0.0493$ (или $a = 1.246$), что приводит к аппроксимирующей функции $W(p) = \dfrac{0.002p^4 - 0.073p^3 + 0.077p^2 + 0.541p + 1}{0.196p^5 + 0.22p^4 + 1.68p^3 + 1.87p^2 + 0.89p + 1}$.

Для сравнения: ранее полученный результат в условиях равномерной сетки с учетом резонансных частот привел к величине $\min\limits_{\delta} \Delta W = 0.0041$, что хуже полученного на основе нулей полиномов Чебышева.

При синтезе регулятора для рассматриваемого объекта были приняты показатели качества $\sigma_з = 5\%, \Delta\sigma = 1\%, t_у^з = 3c$, найдена желаемая передаточная функция замкнутой системы $W_{ж}^{з}(p) = \dfrac{5.58p + 10}{0.558p^2 + 1.116p + 1}$, получен коэффициент обратной связи $k_{ос} = 0.02$ и передаточная функция разомкнутой САУ $W_{ж}^{p}(p) = \dfrac{6.976p + 12.5}{0.6976p^2 + 1.256p + 1}$. Задача заключалась в определении коэффициентов передаточной функции регулятора первого порядка (3), при котором синтезированная САУ удовлетворяет условию (4). При этом нужно обеспечить выполнение условия

$$\Delta W = \max_{\delta}\left|W_{ж}^{p}(\delta) - W_{c}^{p}(\delta)\right| \to \min; \delta \in [0, \infty), \tag{18}$$

Решение задачи сводится к вычислению коэффициентов b_0, b_1, a_1 и, следовательно, к назначению трех узлов δ_i, соответствующих нулям $x_i, i = \overline{1,3}$ полинома $T_3(x) = 4x^3 - 3x = 0$. Получены нули $x_{1\div3} = -0.866; 0; 0.866$ и по формуле (16) найдены значения узлов: $\{\delta_i\}_3 = 0.0718a, a, 13.9a$. Следующий шаг состоит в определении значения параметра a, при котором выполняется требование (18). Результаты вычислений: минимальное значение оценки (18) $\min\limits_{\delta}\Delta W = 3.68$ достигается при $a = 0.014$ ($\delta_1 = 0.001, \delta_2 = 0.014, \delta_3 = 0.195$), а передаточная функция регулятора имеет вид $W_p(p) = \dfrac{2070p + 12.51}{166.8p + 1}$. Для сравнения приведем оценку (18) для случая равномерной сетки: $\min\limits_{\delta}\Delta W = 3.71$. Это свидетельствует о целесообразности с позиций критерия (18) назначения узлов в нулях полиномов $T_\eta(x)$ при решении задач синтеза регуляторов САУ объектами с РП, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями.

В работе рассмотрен второй, более общий вариант распределения узлов интерполирования. Дальнейшее повышение точности может быть достигнуто на основе отступления от заранее заданных законов и поиска узлов, обеспечивающих наименьшую погрешность. Задача известна как получение наилучшего равномерного решения. Существование такого решения доказано П.Л. Чебышевым. Методы решения разработаны Ремезом Е.Я.

Идея метода состоит в одновременной настройке узлов $\delta_i, i = \overline{1,\eta}$ так, чтобы погрешности $\Delta W_i = \max\limits_{\delta\in[\delta_{i-1},\delta_i]}\left|W_{pn}(\delta) - W(\delta)\right|$ на интервалах $\delta \in [\delta_{i-1}, \delta_i], i = \overline{1,\eta+1}$ были равны между собой. Общую канву решения задачи синтеза регулятора, следуя Е.Я. Ремезу, можно определить как двухэтапную процедуру. На первом этапе находится приближенная модель $W^1(p)$, например, на основе равномерного распределения узлов. На втором этапе осуществляется направленное смещение каждого узла $\delta_i, i = \overline{1,\eta}$ до величин $\{\delta_i^{оп}\}_\eta$, соответствующих условию $\Delta W_1 = \Delta W_2 = ... = \Delta W_{\eta+1} = \Delta W^{оп}$. Естественно, в практических условиях изменение узлов $\delta_i, i = \overline{1,\eta}$ осуществляется до получения ошибки, не превышающей заранее заданную величину. Сказанное проиллюстрируем рассмотренным ранее примером аппроксимации сложной передаточной функции (17) на основе двух резонансных частот. Это требует получения четырех узлов и определения четырех неизвестных коэффициентов b_1, b_2, b_3, b_4.

На первом этапе были найдены узлы $\delta_1^1 = 0.39, \delta_2^1 = 0.78, \delta_3^1 = 1.17, \delta_4^1 = 1.56$ на основе равномерного распределения и аппроксимирующая функция первой итерации

$W^1(p)=\dfrac{0.017p^4-0.186p^3+0.265p^2+0.47p+1}{0.196p^5+0.219p^5+1.677p^5+1.875p^5+0.894p+1}$. Соответствующая ей оценка (9) достигает минимума 0.0041.

В результате выполнения второго этапа для заданного алгоритма Ремеза Е.Я получена приближенная модель $W^{on}(p)=\dfrac{0.01145p^4-0.1244p^3+0.166p^2+0.507p+1}{0.196p^5+0.219p^5+1.677p^5+1.875p^5+0.8944p+1}$, в соответствии с узлами $\left\{\delta_i^{on}\right\}_4=\left\{0.2, 0.586, 1.343, 2.972\right\}$. При этом по методу Ремеза Е.Я. минимум снижается до величины 0.0015, что намного меньше по сравнению с равномерным распределением узлов. На рис. 7 приведен график функции $\Delta W(\delta)=W_{pn}(\delta)$ - $W^{on}(\delta)$, показывающий достижение искомого чебышевского альтернанса.

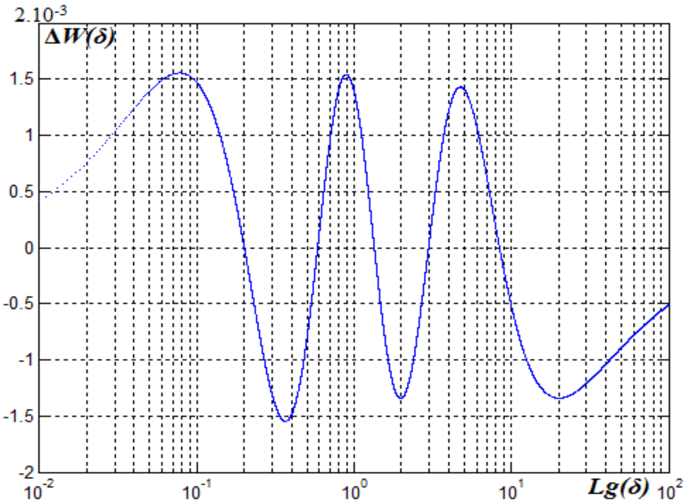

Рис. 7. График функции $\Delta W(\delta)=W_{pn}(\delta)$ - $W^{on}(\delta)$

Вторая задача - синтез регулятора – является развитием варианта, использующего равномерное распределение узлов. Было получено $W_p(p)=\dfrac{407p+12.61}{33.47p+1}$, которому соответствует минимальное значение оценки (9) 3.71.

Дальнейшее решение задачи на основе поиска чебышевского альтернанса. Последующие итерации, направленные на уменьшение погрешности, выполнены по методу Ремеза. Получено решение $W_p^{н}(p)=\dfrac{12.13p+12.5}{0.01p+1}$, которому соответствует оценка (9), равная 2.5, что существенно лучше по отношению к предыдущему. Здесь также достигается приближенно чебышевский альтернанс.

В заключении работы приводятся основные результаты проведенных исследований.

1. Получено обобщение ВИМ на задачи аппроксимации сложных передаточных функций, которые могут содержать дробно-рациональные выражения высокого порядка, а также иррациональные и трансцендентные составляющие.
2. Предложен способ синтеза регуляторов систем автоматического управления объектами с РП, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями, не использующий этап аппроксимации сложной передаточной функции объекта управления.
3. Разработан способ оценивания точности решения приближенных задач синтеза регуляторов и аппроксимации сложных передаточных функций в области изображений, обеспечивающий снижение объема вычислений по сравнению с использованием временных динамических или частотных характеристик.
4. Предложен и исследован способ повышения точности решения приближенных задач за счет распределения интерполяционных узлов по нулям полиномов Чебышева I-ого рода.
5. Рассмотрена возможность привлечения метода Ремеза приближения к наилучшему равномерному решению в задачах аппроксимации сложных передаточных функций и синтеза регуляторов систем автоматического управления объектами, описываемыми иррациональными и трансцендентными передаточными функциями. Получены положительные результаты, на их основе разработан алгоритм поиска таких решений.

6. Предложены, исследованы и введены в алгоритмы решения приближенных задач инструменальные переменные, позволяющие придавать синтезируемой системе заданные свойства по перерегулированию, робастности этого показателя качества и быстродействию.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В журналах, рекомендованных ВАК:

1. Гайворонский С.А., Гончаров В.И., Нгуен Ф.Д. Синтез систем автоматического управления объектами с распределенными параметрами // Наука и технологии: Краткие сообщения XXX Российской школы, посвященной 65-летию победы. - Миасс, Екатеринбург: УрО РАН. - 2010 - Т. 2. - С. 66-68.
2. Гончаров В.И., Нгуен Ф.Д. Интерполяционный синтез регуляторов систем автоматического управления на основе нулей полиномов Чебышева // Доклады ТУСУРа. - Томск: ТУСУР. - 2010 - № 2(22), - Ч. 1. - С. 304–309.
3. Гайворонский С.А., Гончаров В.И., Нгуен Ф.Д. Синтез систем автоматического управления объектами с распределенными параметрами на основе алгоритма Ремеза приближения к наилучшему равномерному решению // Наука и технологии: Сборник научных трудов XXX Российской школы, посвященной 65-летию победы по науке и технологиям. – Миасс: РАН. - 2010. – 10с. (принято к публикации в печати)
4. Александров И.А., Гончаров В.И., Нгуен Ф.Д. Синтез регуляторов систем автоматического управления объектами с распределенными параметрами и оценивание погрешности решения // Проблемы информатики. – Носибирск: НГТУ. - 2011 - № 2(10). - С. 59-67.

В других изданиях:

5. Нгуен Ф.Д. Синтез робастных регуляторов численным методом // Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции. – Томск: ТПУ. - 2009 - Ч. 2. - С. 75-78.
6. Нгуен Ф.Д. Аппроксимация сложных передаточных функций численным методом // Средства и системы автоматизации: проблемы и решения: Сборник трудов X научно-практической конференции. – Томск: компания ЭлеСи. - 2009. - С. 153-158.
7. Нгуен Ф.Д. Интерполяционное приближение сложных передаточных функций на основе неравномерной сетки // Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Томск: ТПУ. – 2010 - Ч. 2. - С. 51-52.
8. Nguyen P.D. Transfer function approximation of distributed parameter systems using numerical method // Proceedings of the Junior Scientist Conference 2010. – Austria, Vienna: Vienna University of Technology. - 2010. - P. 125-127.
9. Нгуен Ф.Д. Синтез регуляторов систем автоматического управления объектами с распределенными параметрами // Компьютерное моделирование 2009: Труды международной научно-технической конференции. - СПб.: Политехн. Ун-та. - 2009. – С. 235-242.
10. Гайворонский С.А., Гончаров В.И., Нгуен Ф.Д. Синтез систем управления объектами с распределенными параметрами на основе равномерного приближения // Автоматика 2010: Сборник трудов 17 международной конференции по автоматическому управлению. – Украина, Харьков: Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ). - 2010. – С.131-133.
11. Нгуен Ф.Д. Оценивание погрешности синтеза регуляторов систем управления объектами с распределенными параметрами в вещественной области // Научная

инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник трудов III всероссийской научно-практической конференции. – Томск: ТПУ. - 2010. - С. 146-151.

12. Нгуен Ф.Д. Применение вещественного интерполяционного метода к синтезу систем управления объектами с распределенными параметрами // Современные проблемы математики и механики: материалы всероссийской молодёжной научной конференции ТГУа. – Томск: Изд-во ТГУ. - 2010. – С. 67.

13. Gajvoronsky S., Goncharov V.I., Nguyen P.D. Application of interpolation method for calculating automatic control systems of objects with the distributed parameters // The 10th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'10). – Portugal, Lisbon: New University of Lisbon. - 2010. – P. 11-16.