

Спорягин Кирилл Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И  
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ  
ТИПОВЫХ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С  
ЗАПАЗДЫВАНИЕМ**

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена на кафедре «Механика и процессы управления»  
Государственного образовательного учреждения высшего профессионального  
образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель

доктор технических наук  
Яковис Леонид Моисеевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор  
Фрадков Александр Львович

доктор технических наук, профессор  
Фокин Александр Леонидович

Ведущая организация

Учреждение Российской академии наук Институт  
проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_\_\_ час. на заседании  
диссертационного совета Д 212.229.13 при Государственном образовательном  
учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский  
государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул.  
Политехническая д. 29, \_\_\_\_\_ учебный корпус, аудитория \_\_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.13,  
доктор технических наук, профессор

Б.С.Григорьев

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** Для широкого класса систем в природе, технике, экономике, сельском хозяйстве, медицине характерны инерционность и запаздывающая реакция на воздействия внешней среды. Если эти воздействия носят целенаправленный характер, то возникают задачи формирования таких воздействий, которые поддерживают заданное состояние системы в условиях разного рода возмущений, то есть задачи регулирования. В системах регулирования с обратной связью в условиях неконтролируемых возмущений регулирующие воздействия вырабатываются по данным контроля отклонений характеристик системы от заданных значений. При этом наличие запаздывания затрудняет регулирование процессов из-за более или менее длительного отсутствия реакции объекта регулирования на управляющие воздействия. Преодоление этих трудностей, в особенности для сложных многомерных систем с несколькими управляющими и регулируемыми переменными, представляет собой актуальную научно-техническую проблему.

В технике задачи регулирования решаются на пути создания автоматических систем. Методологической основой разработки таких систем является теория автоматического управления (ТАУ). Современная ТАУ добилась многих выдающихся результатов, вместе с тем они крайне слабо применяются на практике как при создании, так и при наладке систем с запаздыванием. Одна из главных причин состоит в том, что в силу ряда особенностей производственных процессов как объектов многосвязного управления основные методы современной теории управления плохо приспособлены для непосредственного применения на практике, а в силу сложности они с трудом поддаются модификациям, учитывающим конкретные особенности объектов управления.

Практический опыт показывает: чтобы методы настройки регуляторов были востребованы проектировщиками и наладчиками систем управления, важно, чтобы они удовлетворяли совокупности следующих условий, которые можно объединить, введенным в работе термином «комплекс инженерных требований»:

- Простота расчетных формул или максимально автоматизированная вычислительная процедура, которая может быть реализована на компьютере;
- Отсутствие большого числа настроечных параметров с неясным способом их получения;
- Гарантия устойчивости замкнутой системы;
- Учет ограничений как на вид переходной характеристики (перерегулирование, степень затухания колебаний), так и на величину управляющих воздействий;
- Возможность оптимизации свойств системы по различным (инженерным) показателям качества;
- Обеспечение высокого качества регулирования в широком диапазоне соотношений параметров объекта.

В основу диссертации положена математическая модель многомерного типового регулятора, полученная обобщением широко применяемых на практике одномерных типовых законов регулирования. Предлагаемый в диссертации подход к решению проблем настройки регуляторов для одномерных инерционных объектов с запаздыванием, а также для многомерных динамических объектов с различным запаздыванием в каналах управления в отличие от большинства методов, нацеленных на приближенные аналитические решения, в качестве основных инструментов наряду с аналитикой использует алгоритмы численного поиска наилучших вариантов настроек в процессе компьютерного имитационного моделирования. Это позволяет рассчитывать системы по любым принятым в инженерной практике показателям качества независимо от того, годятся ли они для получения решений в формульном виде. Малое число свободных параметров и применение в качестве начального приближения аналитически определяемых настроек обеспечивают высокое быстродействие расчетов. Простота использования результатов предложенных численных схем для многомерных объектов достигается благодаря применению программного комплекса (ПК), поддерживающего разработанные решения.

**Цель работы.** Математическое моделирование, разработка и исследование методов и численных процедур расчета параметров типовых регуляторов одномерных и многомерных динамических систем с запаздыванием на основе сформулированного «комплекса инженерных требований»; создание специализированного ПК, реализующего разработанные методы.

Для достижения поставленной цели в диссертации решались следующие **основные задачи:**

1. Формирование системы динамических моделей, ориентированных на исследование непрерывных многомерных процессов с запаздыванием, управляемых в соответствии с «комплексом инженерных требований»;
2. Развитие и исследование компенсационного метода расчета параметров одномерных типовых регуляторов;
3. Развитие и исследование комбинированного метода расчета параметров многомерных типовых регуляторов;
4. Разработка ПК для расчета настроек многомерного типового регулятора и имитационного моделирования замкнутых динамических систем произвольной размерности с различным запаздыванием в каналах передачи управляющих воздействий.

**Методы исследований.** В работе применяются методы математического моделирования, анализа и синтеза одномерных и многомерных динамических систем с обратной связью, численные методы оптимизации, цифровое имитационное моделирование в программной среде MATLAB & Simulink, методы объектно-ориентированного программирования.

**Научную новизну работы** составляют:

1. Обоснование применения комплекса математических моделей, описывающих функционирование замкнутых динамических систем, включающих многосвязные устойчивые динамические объекты с запаздыванием и многомерные ПИ- и ПИД-регуляторы;

2. Метод расчета субоптимальных параметров одномерных типовых регуляторов по различным инженерным показателям качества управления, основанный на комплексном применении аналитических расчетов и имитационного моделирования;

3. Аналитический метод приближенного учета ограничений на управляющие воздействия ПИ-регулятора, «идеального» и «реального» ПИД-регуляторов для одномерных и многомерных динамических систем с запаздыванием;

4. Соотношения и численные процедуры, реализующие аналитическую, частично-аналитическую и поисковую модификацию комбинированного метода расчета субоптимальных параметров многомерного типового регулятора по различным инженерным показателям качества управления;

5. Обоснование свойств структурной устойчивости и грубости к неточностям модели объекта управления поисковой модификации комбинированного метода расчета параметров многомерных типовых регуляторов для многосвязных объектов управления с запаздыванием.

**Достоверность результатов и выводов** подтверждается обоснованностью исходных положений, корректным применением математического аппарата и результатами имитационного моделирования.

**Практическая ценность** работы заключается в создании эффективных методов и алгоритмов настройки типовых регуляторов для одномерных и многомерных динамических систем с различными запаздываниями по каналам передачи управляющих воздействий, удовлетворяющих «комплексу инженерных требований», и реализация данных методов и алгоритмов в виде ПК. Результаты работы в части методики автоматизированного синтеза и настройки многомерных типовых регуляторов использованы при разработке системы управления процессом приготовления цементных сырьевых смесей, а также – в процессе выполнения бакалаврских работ студентами СПбГПУ и при формировании курса по идентификации моделей управляемых процессов химических производств СПбГТИ(ТУ).

**На защиту выносятся:**

1. Комплекс математических моделей для анализа и оптимизации замкнутых динамических систем с обратной связью, включающий матричные передаточные функции многомерных управляемых процессов с перекрестными связями и различными запаздываниями по каналам передачи управляющих воздействий, а также матричные передаточные функции типовых законов регулирования;

2. Аналитические соотношения компенсационного метода для расчета субоптимальных по различным инженерным показателям качества управления

параметров одномерных ПИ- и ПИД-регуляторов применительно к устойчивым динамическим объектам первого и второго порядка с запаздыванием;

3. Результаты сравнения компенсационного метода с двумя известными методами расчета параметров типовых регуляторов (Ротач В.Я., 2004 г., Загарий Г.И., Шубладзе А.М., 1988 г.), а также оптимальными настройками, полученными численными методами;

4. Аналитические соотношения и результаты исследования эффективности метода учета ограничений на управляющие воздействия регулятора в одномерном и многомерном вариантах;

5. Разработка и результаты сравнения различных модификаций комбинированного метода с известным методом расчета параметров децентрализованного типового регулятора (Wang Q.-G. и другие, 2008 г.);

6. ПК для расчета настроек многомерного типового регулятора и имитационного моделирования замкнутых динамических систем произвольной размерности;

7. Обоснование возможности обеспечения устойчивости и грубости замкнутой системы управления при использовании поисковой модификации комбинированного метода настройки.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: вторая научная конференция «Автоматизация в промышленности», Москва, 2008 г.; пятая научная конференция «Управление и информационные технологии» (УИТ-2008), Санкт-Петербург, 2008 г.; всероссийская межвузовская научная конференция студентов и аспирантов «XXXVII Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, 2008 г. (Первая премия); третья научная конференция «Автоматизация в промышленности», Москва, 2009 г.; XXXVIII международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, 2009 г. (Первая премия). В 2009 году диссертационная работа была поддержана грантом правительства Санкт-Петербурга для студентов и аспирантов ВУЗов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (номер гранта 3.11/04-05/107).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 3 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК, и 8 докладов в трудах научных конференций.

**Структура и объем.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 75 наименований, и шести приложений. Основная часть работы изложена на 186 страницах машинописного текста. Работа содержит 53 рисунка, 14 таблиц.

#### **Краткое содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации и изложено краткое содержание работы.

**Первая глава** посвящена вопросам математического описания динамических систем с запаздыванием в каналах передачи управляющих воздействий и обзору основных подходов к управлению такого рода объектами. Выяснено, что описание в пространстве

состояний теряет свои преимущества при наличии разных запаздываний по различным каналам управления, т.к. основные результаты теории оптимизации теряют силу для подобных объектов. Показано, что для технических объектов наиболее удобным способом описания являются матричные передаточные функции, каждый элемент которых дает модель соответствующего канала управления в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом

$$\mathbf{H}(p) = \{h_{ij}\} = \{\tilde{h}_{ij}(p)e^{-p\tau_{ij}}\}, \quad i = 1, \dots, l, j = 1, \dots, m, m \leq l, \quad (1)$$

где  $p$  – оператор Лапласа,  $\tilde{h}_{ij}(p)$  – правильная устойчивая дробно-рациональная функция  $p$ , а  $\tau_{ij}$  - запаздывание по каналу влияния  $j$ -го управляющего воздействия на  $i$ -ю выходную переменную.

Другой составляющей комплекса моделей управляемых динамических систем является модель регулятора. Анализ литературы показал, что наиболее востребованы в технических приложениях так называемые типовые законы регулирования, сочетающие простоту реализации с высокой эффективностью. Это послужило основанием для формирования в качестве основной модели многомерного типового регулятора передаточной матрицы вида

$$\mathbf{W}(p) = \mathbf{A} + \mathbf{B} / p + \mathbf{C}p, \quad (2)$$

где  $\mathbf{A} = [a_{ji}]$ ,  $\mathbf{B} = [b_{ji}]$ ,  $\mathbf{C} = [c_{ji}]$  - матрицы параметров П, И и Д-составляющих, причем для ПИ-регулятора  $\mathbf{C} = \mathbf{0}$ .

Регулятор (2), полученный путем обобщения применяемых на практике одномерных типовых структур, в совокупности с объектом (1) задают рассматриваемый в работе комплекс математических моделей замкнутых многомерных управляемых систем с запаздыванием.

Параметрическая оптимизация типовых регуляторов представляет собой серьезную проблему, обсуждению и решению которой посвящены сотни зарубежных и отечественных публикаций. Систематизированный анализ ряда монографий и статей по данной тематике показал, что, несмотря на значимые результаты по методам настройки типовых регуляторов, данная актуальная проблема не может считаться решенной ни для одномерного, ни тем более для многомерного варианта. Дело в том, что, удовлетворяя отдельным критериям, ни один из известных методов не удовлетворяет комплексу сформулированных выше инженерных требований.

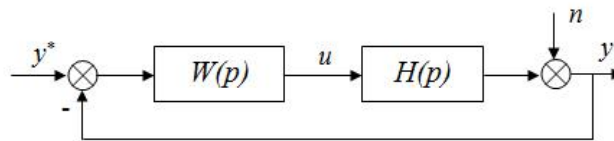
Обзор универсальных и специализированных программных систем для расчета регуляторов показал, что и здесь сделано далеко не все возможное и необходимое - автоматизируя процесс настройки типовых регуляторов одним из известных методов, имеющиеся на рынке программы, как и те методы, на реализацию которых они нацелены, не удовлетворяют «комплексу инженерных требований», и это тормозит их внедрение.

В итоге сформулированы основные задачи работы – развитие методов настройки параметров  $a_{ji}$ ,  $b_{ji}$ ,  $c_{ji}$  регулятора (2) для объекта (1), а также создание ПК для реализации

этих методов, позволяющих получить систему, удовлетворяющую «комплексу инженерных требований».

Во **второй главе** развит и исследован компенсационный метод настройки типовых регуляторов для одномерных динамических объектов с запаздыванием, идея которого была первоначально предложена научным руководителем диссертанта. Суть метода состоит в расчете таких параметров настройки регулятора, которые обеспечивают идентичность поведения замкнутой системы определенному эталонному образцу, который, в свою очередь, выбирается в зависимости от структуры модели объекта, заданного типа регулятора и заданного вида критерия оценки качества управления.

В системе управления с отрицательной обратной связью, показанной на рис. 1,



**Рис. 1** Структурная схема одноконтурной системы

выходная переменная  $y(t)$  связана с задающим воздействием  $y^*(t)$  и приведенным к выходу возмущающим воздействием  $n(t)$  известным соотношением

$$y = H_3(p)y^* + (1 - H_3(p))n,$$

где передаточная функция замкнутой системы  $H_3(p)$  выражается через передаточные функции объекта управления  $H(p)$  и регулятора  $W(p)$  в виде

$$H_3(p) = H(p)W(p) / (1 + H(p)W(p)).$$

Отсюда можно заключить, что вид переходных процессов отработки возмущающих и задающих воздействий в замкнутой системе управления полностью определяется произведением передаточных функций объекта и регулятора. Следовательно, чтобы обеспечить заданное поведение некоторого управляемого объекта, идентичное поведению выбранного по тем или иным соображениям эталонного объекта  $H^m(p)$  при подаче на него управляющих воздействий от выбранного по тем или иным соображениям эталонного регулятора  $W^m(p)$ , достаточно рассчитать передаточную функцию регулятора по формуле

$$W(p) = H^m(p)W^m(p) / H(p).$$

В соответствии с рассмотренной схемой компенсационного метода получены соотношения для расчета параметров типовых регуляторов для четырех распространенных структур систем управления. Данные структуры, соотношения для расчета параметров регулятора и вид эталонной системы представлены в таблице 1.

Рассмотрим, для примера, вывод соотношений компенсационного метода для случая 4, когда модель управляемого объекта задается последовательным соединением двух инерционных звеньев и звена запаздывания. В этом случае в соответствии с таблицей



$$H(p)W(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1p+1)(T_2p+1)} \left( \frac{k_u^{\text{эм}}(T_1+T_2)}{k\tau} + \frac{k_u^{\text{эм}}}{k\tau p} + \frac{k_u^{\text{эм}}T_1T_2}{k\tau} p \right) =$$

$$= \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1p+1)(T_2p+1)} \frac{k_u^{\text{эм}}}{k\tau p} (T_1T_2p^2 + (T_1+T_2)p + 1) = \frac{k_u^{\text{эм}}e^{-p\tau}}{\tau p}.$$

**Таблица 1.** Соотношения компенсационного метода

№	Объект $H(p)$	Тип рег.	Эталонная система		Рекомендуемый регулятор		
			$H^{\text{эм}}(p)$	$W^{\text{эм}}(p)$	$k_n$	$k_u$	$k_d$
1	$\frac{ke^{-p\tau}}{Tp+1}$	ПИ	$e^{-p}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}}{p}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}T}{k \cdot \tau}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}}{k \cdot \tau}$	-
2	$\frac{ke^{-p\tau}}{Tp+1}$	ПИД	$e^{-p}$	$k_n^{\text{эм}} + \frac{k_u^{\text{эм}}}{p}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}T + k_n^{\text{эм}}\tau}{k \cdot \tau}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}}{k \cdot \tau}$	$\frac{k_n^{\text{эм}}T}{k}$
3	$\frac{ke^{-p\tau}}{p(Tp+1)}$	ПД	$e^{-p}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}}{p}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}}{k \cdot \tau}$	-	$\frac{k_u^{\text{эм}}T}{k \cdot \tau}$
4	$\frac{ke^{-p\tau}}{(T_1p+1)(T_2p+1)}$ $T_1 > 0, T_2 > 0$	ПИД	$e^{-p}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}}{p}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}(T_1+T_2)}{k \cdot \tau}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}}{k \cdot \tau}$	$\frac{k_u^{\text{эм}}T_1T_2}{k \cdot \tau}$

Таким образом, показано, что исходный объект с параметрами  $k, T_1, T_2, \tau$  при замыкании регулятором, настроенным по компенсационному методу, ведет себя так же, как объект с «чистым» запаздыванием  $\bar{H}(p) = e^{-p\tau}$ , замкнутый И-регулятором с передаточной функцией  $\bar{W}(p) = k_u^{\text{эм}} / (\tau p)$ . Следовательно, если коэффициент усиления И-регулятора  $k_u^{\text{эм}} / \tau$  обеспечивает эталонное поведение для безынерционного объекта с единичным коэффициентом усиления  $\{1, \tau\}$ , то такое же поведение обеспечит «компенсационный» регулятор для исходного инерционного объекта  $\{k, T_1, T_2, \tau\}$ . Рассмотрим теперь безынерционный объект, имеющий единичный коэффициент усиления и единичное запаздывание, то есть объект с передаточной функцией  $\tilde{H}(p) = e^{-p}$ . Замкнем этот элементарный объект И-регулятором с коэффициентом усиления  $k_u^{\text{эм}}$ , имеющим передаточную функцию  $\tilde{W}(p) = k_u^{\text{эм}} / p$ . Переходные процессы в двух рассматриваемых замкнутых системах с «чистым» запаздыванием идентичны с точностью до растяжения по оси  $t$ . Это, в свою очередь, означает, что если оптимизировать коэффициент усиления регулятора  $k_u^{\text{эм}}$  по любому из критериев, связанных с поведением выходной переменной в переходном процессе, то одни и те же значения этого коэффициента будут получены в обеих рассматриваемых системах. Таким образом, один раз настроив соответствующий

регулятор для элементарного эталонного объекта с единичным запаздыванием по заданному критерию качества управления и «запомнив» оптимальное значение настроечного коэффициента  $k_u^{эм}$ , можно в дальнейшем рассчитать субоптимальный регулятор компенсационным методом по простейшим формулам таблицы 1 для любого объекта с параметрами  $k, T_1, T_2, \tau$ .

Итак, численные значения коэффициентов регуляторов  $k_n^{эм}$  и  $k_u^{эм}$  для эталонной системы могут быть рассчитаны **однократно** путем оптимизации того или иного критерия качества управления. Поскольку аналитические расчеты систем с запаздыванием затруднены, наиболее естественный путь оптимизации эталонных систем заключается в их имитационном компьютерном моделировании и сравнении данных имитации при различных настройках регулятора по выбранным критериям. В соответствии с общепринятым инженерным подходом оптимизация настроек регуляторов производится при действии на выход объекта наиболее сложных для компенсации ступенчатых возмущений. Для пяти наиболее употребительных критериев качества управления такая поисковая минимизация была выполнена с использованием программной среды MATLAB & Simulink. Численные значения оптимальных коэффициентов эталонных регуляторов приведены в таблице 2.

При значительной инерционности регулируемых процессов для ее преодоления могут требоваться слишком сильные воздействия со стороны регулятора, причем могут быть нарушены ограничения на отклонения управлений от режимных значений

$$|\Delta u(t)| \leq \Delta U. \quad (3)$$

Предложен учет ограничений на управляющие воздействия для структуры 1 и 2 таблицы 1. Рассмотрим, например, учет ограничений для структуры 1 таблицы 1. Будем рассматривать наиболее сложные для компенсации приведенные к выходу ступенчатые возмущающие воздействия  $n(t)$ , полагая  $n(t) = N$  при  $t > 0$ . Тогда согласно формулам структуры 1 таблицы 1 на интервале времени  $0 < t \leq \tau$  управляющее воздействие изменяется по линейному закону, достигая к моменту  $t = \tau$  значения

$$\Delta u(\tau) = -\frac{k_u^{эм}}{k} \left( \frac{T}{\tau} + 1 \right) N.$$

В правильно настроенной системе управления спустя время запаздывания начинает действовать обратная связь, способствующая скорейшему уменьшению отклонений выходной переменной, а значит и снижению до нуля пропорциональной составляющей, а также переходу на новый установившийся уровень интегральной составляющей. Можно предполагать (и это подтверждают результаты моделирования), что управляющее воздействие к моменту  $t = \tau$  достигает близкого к максимальному по абсолютной величине значения за время переходного процесса. Полагая далее, что максимальное значение управлений не должно превосходить допустимой величины, приходим к ограничению

$$\frac{k_u^{эм}}{k} \left( \frac{T}{\tau} + 1 \right) N \leq \Delta U,$$

которое должно учитываться при выборе коэффициента эталонного регулятора  $k_u^{эм}$  в формулах таблицы 1 для структуры 1. В расчете на максимальные возмущения  $N^{\max}$  это ограничение приобретает вид

$$k_u^{эм} \leq k_u^{эм, \max} = L\tau / (T + \tau), \quad (4)$$

где величина  $L = k\Delta U / N^{\max}$  может быть названа запасом по управлению.

**Таблица 2.** Коэффициенты эталонных регуляторов

Критерий качества управления	Условное обозначение	№ структуры	Коэффициенты эталонного регулятора	
			$k_n^{эм}$	$k_u^{эм}$
Интегральный квадратичный	ИКК	1, 3, 4	—	0.739
		2	0.453	0.796
Интегральный квадратичный при ограничениях	ИККогр	1, 3, 4	—	0.635
		2	0.44	0.74
Интегральный линейный при ограничениях	ИЛКогр	1, 3, 4	—	0.635
		2	0.47	0.745
Интегральный модульный	ИМК	1, 3, 4	—	0.589
		2	0.328	0.751
Время переходного процесса при ступенчатых воздействиях	Трег	1, 3, 4	—	0.507
		2	0.281	0.743

*Примечание:* в таблице принято, что ограничения на перерегулирование и степень затухания колебаний составляют соответственно не более 15% и не менее 90%.

Итак, для учета ограничений (3) при выборе коэффициента  $k_u^{эм}$  в соотношениях таблицы 1 для структуры 1 следует брать рекомендуемое в таблице 2 значение  $k_u^{эм}$ , если оно не превосходит  $k_u^{эм, \max}$ , и значение  $k_u^{эм, \max}$  в противном случае.

В «реальном» ПИД-регуляторе при отработке ступенчатого возмущения необходимо учитывать ограничения на управляющие воздействия в начальный момент времени  $t = 0$ . Действуя аналогично схеме учета ограничений для ПИ-регулятора, и, принимая во внимание ограничения в начальный момент времени, приходим к системе неравенств, накладывающей ограничения на выбор значений коэффициентов эталонных регуляторов для структуры 2 таблицы 1. Понятно также, что, действуя согласно данной схеме, можно получить соотношения для учета ограничений при выборе эталонных коэффициентов для структур 3 и 4.

На имитационной модели в программной среде MATLAB & Simulink выполнено сравнение компенсационного метода с оптимальным (в рамках типовой структуры) по всем пяти рассмотренным в таблице 2 критериям качества управления для ПИ- и ПД-

регулятора. По результатам сравнения для ПИ-регулятора максимальные относительные потери качества управления при использовании компенсационного метода по сравнению с оптимальным не превосходят 25-60%. Вместе с тем, в широкой области возможных соотношений параметров динамического объекта  $0.5 \leq T/\tau \leq 10$  показатель относительных потерь оптимальности не превосходит 30%, а в диапазоне  $2 \leq T/\tau \leq 10$  не выходит за пределы 15%. Для ПД-регулятора максимальные потери качества управления не превосходят 37%. Вместе с тем, в широкой области возможных соотношений параметров объекта  $1 \leq T/\tau \leq 10$  показатель относительных потерь не превосходит 20%.

Применительно к инерционному объекту первого порядка с запаздыванием выполнено сравнение компенсационного метода с двумя известными способами настройки регуляторов (Ротач В.Я., 2004 г., Загарий Г.И., Шубладзе А.М., 1988 г.). Сравнение показало, что в широкой области параметров объекта ( $0.5 \leq T/\tau \leq 10$ ) компенсационный метод дает лучшие результаты по всем пяти рассмотренным в таблице 2 критериям качества переходного процесса.

Для проверки предложенного метода учета ограничений в программной среде MATLAB & Simulink выполнена большая серия имитационных экспериментов. Анализ всей совокупности полученных данных показал, что предложенный метод позволяет практически точно учесть ограничения на управляющие воздействия. Относительные потери качества управления при использовании данного метода по сравнению с оптимальным не превосходят 16% для ПИ-регулятора и 18% для ПИД-регулятора.

В **третьей главе** исследован и подвергнут дальнейшей разработке комбинированный метод настройки многомерных типовых регуляторов, идея которого была первоначально предложена научным руководителем диссертанта.

Многомерная система по-прежнему может быть изображена структурной схемой на рис. 1, если принять

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^*(p) &= \{y_i^*(p)\}, \mathbf{y}(p) = \{y_i(p)\}, \mathbf{n}(p) = \{n_i(p)\}, \mathbf{u}(p) = \{u_j(p)\}, \\ \mathbf{H}(p) &= \{h_{ij}(p)\}, \mathbf{W}(p) = \{w_{ji}(p)\}, \quad i=1, \dots, l, j=1, \dots, m, m \leq l. \end{aligned}$$

Идея метода настройки матричных коэффициентов  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  регулятора (2) для объекта (1) с квадратной передаточной матрицей ( $l = m$ ) заключается в линейной комбинации типовых регуляторов, «обслуживающих» два вспомогательных объекта управления, каждый из которых получен определенным упрощением исходного управляемого процесса.

В соответствии с идеей метода сформируем закон управления в виде

$$\mathbf{W}(p) = \rho \mathbf{W}^{(1)}(p) + (1 - \rho) \mathbf{W}^{(2)}(p), \quad (5)$$

где  $\mathbf{W}^{(1)}(p)$  и  $\mathbf{W}^{(2)}(p)$  – передаточные матрицы вспомогательных типовых регуляторов, имеющие ту же структуру, что и передаточная матрица (2), а  $\rho$  – подлежащий выбору весовой коэффициент, причем  $\rho \in [0, 1]$ .

Диагональная передаточная матрица  $W^{(1)}(p)$  призвана стабилизировать объект  $H^{(1)}(p)$ , полученный из исходного пренебрежением перекрестными связями. Она составляется из передаточных функций автономных типовых регуляторов

$$W^{(1)}(p) = \text{diag}\{w_{ii}^{(1)}(p)\}, \quad w_{ii}^{(1)}(p) = a_{ii}^{(1)} + b_{ii}^{(1)} / p + c_{ii}^{(1)} p, \quad i = 1, \dots, l. \quad (6)$$

Передаточная матрица  $W^{(2)}(p)$  предназначена для стабилизации объекта, имеющего ту же матрицу статических коэффициентов усиления, что исходный объект (1), но единую динамику по всем каналам управления, то есть

$$H^{(2)}(p) = H(0)\tilde{h}^{(2)}(p)e^{-p\tau^{(2)}}. \quad (7)$$

Расчет параметров многомерного типового регулятора  $W^{(2)}(p)$  для объекта  $H^{(2)}(p)$  по методу динамической компенсации приводит к соотношениям

$$W^{(2)}(p) = [H(0)]^{-1}(a^{(2)} + b^{(2)} / p + c^{(2)} p), \quad (8)$$

где «свободные» скалярные параметры  $a^{(2)}$ ,  $b^{(2)}$ ,  $c^{(2)}$  для ПИД-регулятора или параметры  $a^{(2)}$ ,  $b^{(2)}$  для ПИ-регулятора подлежат определению тем или иным способом.

Предложен ряд модификаций комбинированного метода. В полностью аналитической модификации параметры вспомогательных регуляторов рассчитываются на основе компенсационного метода, разработанного в главе 2, а весовой коэффициент, определяющий вклад каждого из вспомогательных регуляторов в комбинированную структуру, рассчитывается в зависимости от степени связности многомерного объекта управления, для определения которой используется матрица Бристоля. Такой метод получил название КМБ метода настройки. Параметры первого вспомогательного регулятора могут быть определены с учетом перекрестных связей в объекте на основании так называемого *dRI*-анализа (Wang Q.-G. и другие, 2008 г.). Такая модификация комбинированного метода получила название КДОБ метода настройки.

В частично-аналитических модификациях параметры вспомогательных регуляторов рассчитываются аналогично полностью аналитическим модификациям комбинированного метода, а весовой коэффициент определяется с использованием имитационной модели управляемого процесса в результате поисковой минимизации целевой функции. Предложенные частично-аналитические методы получили названия КМП и КДОП, соответственно аналитическим вариантам КМБ и КДОБ.

Поисковая модификация комбинированного метода предполагает поиск в процессе имитации как оптимальных значений настраиваемых параметров вспомогательных регуляторов, так и весового коэффициента. Предложенный поисковый метод получил название КО.

Эффективность первого вспомогательного регулятора может существенно зависеть от выбора пар «управление – выход». В работе аналитически доказано, что предлагаемые современной теорией статические методы составления пар при определенных

динамических параметрах объекта могут приводить к неоптимальному выбору. Показано, что для методов, базирующихся на имитационном моделировании, наиболее рациональным представляется осуществлять выбор пар на предварительной стадии расчета параметров комбинированного регулятора с использованием экспрессных способов сравнения различных возможных пар «управление – выход».

В многомерной системе качество управления зависит от комбинации знаков возмущений по разным каналам. На основе минимаксного подхода разработаны упрощенные алгоритмы выбора наиболее «трудных» комбинаций ступенчатых возмущающих воздействий.

Предложена приближенная процедура учета ограничений на управляющие воздействия

$$|\Delta u_i(t)| \leq \Delta U_i, \quad i = 1, \dots, l \quad (9)$$

для аналитических и частично-аналитических модификаций комбинированного метода. Рассмотрим ее на примере многомерного ПИ-регулятора.

Пусть передаточные функции многомерного объекта (1) задаются инерционными звеньями первого порядка с запаздыванием, так что

$$\tilde{h}_{ij}(p) = \frac{k_{ij}}{T_{ij}p + 1}, \quad i, j = 1, \dots, l.$$

Согласно (7) сформируем второй вспомогательный объект с единой динамикой в виде

$$\mathbf{H}^{(2)}(p) = \mathbf{H}(0) \frac{1}{T^{(2)}p + 1} e^{-p\tau^{(2)}}, \quad (10)$$

где динамические показатели определяются в духе робастного подхода по правилу

$$T^{(2)} = \min_{i,j} \{T_{ij}\}, \quad \tau^{(2)} = \max_{i,j} \{\tau_{ij}\}, \quad i, j = 1, \dots, l.$$

Так как управляющие воздействия для комбинированного регулятора (5) определяются суммой управляющих воздействий вспомогательных регуляторов  $\mathbf{W}^{(1)}(p)$  и  $\mathbf{W}^{(2)}(p)$ , то для соблюдения ограничений (9) достаточно, чтобы соблюдались ограничения для первого и второго вспомогательного регулятора.

Для учета ограничений на управляющие воздействия первого вспомогательного регулятора (6) необходимо учесть ограничения для  $l$  одноконтурных систем, т.е. следует аналогично (4) при расчете параметров  $a_{ii}^{(1)}$  и  $b_{ii}^{(1)}$  регулятора  $w_{ii}^{(1)}$  компенсационным методом выбирать коэффициенты эталонных регуляторов из таблицы 2, если они не превосходят значения

$$k_{u,ii}^{эм,макс} = L_{ii}\tau_{ii} / (T_{ii} + \tau_{ii}), \quad L_{ii} = k_{ii}\Delta U_i / N_i^{макс},$$

и значение  $k_{u,ii}^{эм,макс}$  в противном случае.

Учтем ограничения для второго вспомогательного регулятора  $\mathbf{W}^{(2)}(p)$ . Пусть к выходу объекта приложены ступенчатые возмущения  $\mathbf{n}(t) = N \cdot \mathbf{1}(t)$ , тогда  $i$ -е управляющее

воздействие регулятора  $W^{(2)}(p)$  в момент времени  $\tau^{(2)}$  в силу (8), (10) и соотношений компенсационного метода может быть рассчитано по формуле

$$\Delta u_i^{(2)}(\tau^{(2)}) = -k_u^{эм} \left( \frac{T^{(2)}}{\tau^{(2)}} + 1 \right) \mathbf{d}_i \mathbf{N}, \text{ где } \mathbf{d}_i = [d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{il}] - i\text{-строка матрицы } \mathbf{D} = [\mathbf{H}(0)]^{-1}.$$

Предполагая, что близкое к максимальному по модулю значение управляющих воздействий достигается при  $t = \tau^{(2)}$ , из условия (9) приходим к ограничению на выбор коэффициента эталонного регулятора

$$k_u^{эм} \leq \frac{\Delta U_i}{\sum_{j=1}^l |d_{ij}| N_j^{\max}} \cdot \frac{1}{\frac{T^{(2)}}{\tau^{(2)}} + 1}, \quad i = 1, \dots, l, \text{ откуда } k_u^{эм, \max} = \min_{i=1, \dots, l} \left\{ \frac{\Delta U_i}{\sum_{j=1}^l |d_{ij}| N_j^{\max}} \cdot \frac{1}{\frac{T^{(2)}}{\tau^{(2)}} + 1} \right\}.$$

В итоге, при определении по компенсационному методу параметров  $a^{(2)}$ ,  $b^{(2)}$  матричной передаточной функции регулятора  $W^{(2)}(p)$ , определяемой соотношением (8), необходимо при выборе коэффициента эталонного регулятора брать рекомендуемое в таблице 2 значение, если оно не превосходит  $k_u^{эм, \max}$  и значение  $k_u^{эм, \max}$  в противном случае. Если учесть таким образом ограничения на управляющие воздействия вспомогательных регуляторов  $W^{(1)}(p)$  и  $W^{(2)}(p)$ , то будут соблюдены ограничения и на их линейную комбинацию (5). Подобным же способом рассмотрен учет ограничений на управления для многомерного комбинированного ПИД-регулятора.

Обосновано свойство структурной устойчивости и грубости комбинированного метода. Показано, что из общих результатов работы Маркечко М.И. и Рыбашова М.В. (1987 г.) следует, что существует такое  $b_0 > 0$ , что замкнутая система с объектом (1) и регулятором

$$W(p) = [\mathbf{H}(0)]^{-1} b / p \quad (11)$$

будет устойчивой и грубой к погрешностям модели при  $0 < b < b_0$ . Поскольку (11) представляет собой частный случай более общей конструкции (8), то, следовательно, рациональным выбором параметров комбинированного регулятора (5) всегда можно добиться устойчивости и грубости замкнутой системы управления.

Рассмотрена модификация комбинированного метода для объектов с прямоугольной передаточной матрицей ( $l > m$ ). В этом варианте в (5)  $\rho = 0$  и в (8) обращение матрицы заменяется псевдообращением.

В **четвертой главе** описан разработанный ПК «ММО Master». ПК предназначен для расчета параметров регулятора (2) применительно к многомерным динамическим объектам произвольной размерности с различными запаздываниями в каналах передачи управляющих воздействий. Алгоритмическим ядром ПК служит комбинированный метод настройки многомерных типовых регуляторов. В качестве среды разработки ПК

используется стандартное средство анализа и моделирования динамических систем MATLAB & Simulink. К основным функциям ПК относятся:

1. *Формирование динамической модели объекта управления.* Динамика многосвязного объекта управления задается элементами передаточной матрицы (1). Передаточная матрица может иметь произвольную размерность и быть квадратной или прямоугольной;

2. *Формирование исходных данных для расчетов.* Пользователь выбирает тип многомерного регулятора (ПИ- или ПИД-регулятор), показатель качества управления (или их комбинацию), ограничения на величину управляющих воздействий по разным каналам, указывает физически возможные комбинации знаков возмущающих воздействий по каналам или выбирает режим перебора всех возможных комбинаций знаков возмущений;

3. *Расчет параметров многомерных типовых регуляторов.* Пользователю доступны аналитические, частично-аналитические и поисковая процедуры комбинированного метода. Для поиска свободных параметров многомерного комбинированного регулятора используются вычислительные методы пакета MATLAB: General Pattern Search (GPS), представляющий собой разновидность симплексного метода, и генетический алгоритм (GA). В ПК реализован так называемый ДР-ИМС метод настройки децентрализованных многомерных регуляторов (Wang Q.-G. и другие, 2008 г.). Методы GPS и GA используются также для поиска оптимальных параметров многомерного типового регулятора при решении задачи настройки параметров «в лоб», что необходимо для сравнительной оценки различных реализованных способов расчета;

4. *Имитационное моделирование.* ПК предусматривает функции имитационного моделирования. Выполнив процедуры по пп. 1-3, пользователь имеет возможность изменить характеристики возмущающих воздействий, объекта и регулятора, и с помощью развитых средств мониторинга проверить работу системы в самых разных условиях;

5. *Архивация результатов.* Полученные результаты сохраняются в файл Excel. Архивируются такие данные, как параметры объекта, метод расчета, настройки регулятора и т.п.

В **пятой главе** с использованием ПК «MIMO Master» проведено исследование комбинированного метода расчета параметров многомерных типовых регуляторов: подтверждены свойства устойчивости и слабой чувствительности к расстройкам модели регулируемого объекта; проведено сравнение комбинированного метода настройки с методом ДР-ИМС на объектах размерности 2x2, 3x3, 4x4, взятых из литературы; подтверждена эффективность метода учета ограничений на управляющие воздействия комбинированного регулятора.

#### **Основные выводы**

1. Сформированный в работе комплекс универсальных динамических моделей многосвязных линейных динамических систем, управляемых с применением многомерных ПИ- и ПИД-регуляторов, позволяет ставить и решать задачи управления



широким классом сложных промышленных объектов, характеризующихся взаимовлиянием различных показателей и запаздывающей реакцией на регулирующие воздействия. Благодаря выбранной структуре моделей управления удастся использовать лишь непосредственно контролируемые данные, а не оцениваемые с большой погрешностью производные высокого порядка от контролируемых сигналов;

2. Разработанный компенсационный метод расчета параметров типовых регуляторов для одномерных динамических объектов с запаздыванием позволяет рассчитывать субоптимальные параметры регулятора по различным инженерным критериям качества управления, включая ограничения как на вид переходного процесса, так и на величину управляющих воздействий. Анализ компенсационного метода, выполненный на имитационной модели в среде MATLAB & Simulink, показал, что данный метод расчета параметров регулятора дает высокое качество регулирования при любых соотношениях параметров объекта. Вся совокупность результатов позволяет утверждать, что разработанный компенсационный метод удовлетворяет «комплексу инженерных требований» и может быть рекомендован для настройки промышленных регуляторов одномерных объектов;

3. Разработанные модификации комбинированного метода настройки типовых регуляторов для многомерных динамических объектов с запаздыванием позволяют определять субоптимальные параметры регулятора по различным инженерным критериям качества управления, включая ограничения как на вид переходного процесса, так и на величину управляющих воздействий. При этом гарантируется устойчивость замкнутой системы регулирования и ее грубость по отношению к погрешностям модели объекта управления;

4. Разработанный ПК «MIMO Master» является универсальным инструментом для исследования и настройки регуляторов многосвязных управляемых процессов произвольной размерности с различными запаздываниями по каналам передачи управляющих воздействий. В основу ПК положены алгоритмы комбинированного метода расчета параметров многомерных типовых регуляторов. Успешная апробация методами имитационного моделирования на характерных для химической технологии объектах  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  и  $4 \times 4$ , позволяет рассчитывать на то, что данный ПК может найти широкое применение как средство исследования и автоматизированного проектирования промышленных систем управления с запаздыванием.

#### **Опубликованные научные работы по теме диссертации:**

1. **Спорягин К.В. Программный комплекс настройки типовых регуляторов для многосвязных объектов управления произвольной размерности** [Текст] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – №2. – С. 92 – 99.

2. **Яковис Л.М. Настройка типовых регуляторов для многосвязных объектов управления** [Текст] / Яковис Л.М., Спорягин К.В. // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2009. – №6. – С. 55 – 63.

3. Яковис Л.М. Расчет регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием [Текст] / Яковис Л.М., Спорягин К.В. // Автоматизация в промышленности. – 2009. – №12. – С. 21 – 25.

4. Спорягин К.В. Настройка регуляторов для астатических объектов управления [Текст] / Спорягин К.В., Яковис Л.М. // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. – Ч. V – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С.77 – 78.

5. Спорягин К.В. Программный комплекс настройки типовых регуляторов для многосвязных объектов управления [Текст] / Спорягин К.В., Панов В.С., Яковис Л.М. // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. – Ч. V – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С. 79 – 80.

6. Спорягин К.В. Универсальный метод расчета типовых регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием [Текст] // 3-я научная конференция Автоматизация в промышленности (4-5 июня 2009 года): доклады конференции, компакт-диск. – М.: Институт проблем управления. – 2009. – ISBN 978-5-91450-030-3. - С. 6 – 18.

7. Спорягин К.В. Учет ограничений на управляющие воздействия при расчете многосвязных инерционных объектов с запаздыванием [Текст] / Спорягин К.В., Яковис Л.М. // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. – Ч. V. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2008. – С. 80 – 81.

8. Спорягин К.В. Сравнение методов расчета пропорционально-интегральных регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием [Текст] / Спорягин К.В., Яковис Л.М. // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. – Ч. V. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2008. – С. 82 – 83.

9. Яковис Л.М. Как настраивать типовые регуляторы для многосвязных объектов промышленной автоматизации [Текст] / Яковис Л.М., Спорягин К.В. // Управление и информационные технологии (УИТ-2008): Доклады 5-й научной конференции, Санкт-Петербург, 14-16 окт. 2008 г./СПбГЭТУ "ЛЭТИ", СПб. – 2008. – В 2-х т. – Т.2. – С. 81 – 87.

10. Яковис Л.М. Учет ограничений на управляющие воздействия при расчете типовых регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием [Текст] / Яковис Л.М., Спорягин К.В., Перовский И.С. // Вторая научная конференция Автоматизация в промышленности (14 апреля 2008 года): Доклады, компакт-диск. – М.: Институт проблем управления. – 2008. – ISBN 978-5-91450-008-2. – С. 182 - 193.

11. Спорягин К.В. Учет ограничений на управляющие воздействия при расчете регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием [Текст] / Спорягин К.В., Яковис Л.М. // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Ч. IV. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2007. – С. 92 – 93.