

ПОГОНИН Василий Александрович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ РОБОТОВ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тамбов 2003

Работа выполнена на кафедре «Информационные процессы и управление» Тамбовского государственного технического университета.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Матвейкин Валерий Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Решетников Валерий Николаевич

доктор технических наук, профессор
Муромцев Юрий Леонидович

доктор технических наук, профессор
Палюх Борис Васильевич

Ведущая организация: Центральный научно-исследовательский и
опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики

Защита диссертации состоится 11 ноября 2003 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д
212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392000, г. Тамбов, ул.
Советская, 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000,
г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «_____» _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.А. Чуриков

Подписано в печать 03.10.2003
Формат 60 × 84 / 16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем: 1,86 усл. печ. л.; 2,0 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 653

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В течение последних десятилетий усилия научных школ В.В. Кафарова, А.М. Кутепова, А.А. Воронова, Я.З. Цыпкина, С.В. Емельянова, Г.С. Поспелова, Е.И. Юревича, И.М. Макарова, А.В. Тимофеева и другие были направлены на решение задач, связанных с заменой людей автоматическими системами и роботами с целью повышения эффективности современных технологических процессов и производств в различных отраслях промышленности.

Химико-технологические производства обладают всеми чертами, присущими производственным и технико-экономическим системам, функционирующим в современных условиях, характеризующимся частотой меняющейся номенклатурой и объемом выпускаемой продукции, колебаниями качества и цен сырья, вербальным уровнем формализации информации, используемой для решения задач управления и принятия решений.

При решении задач управления химико-технологическими процессами во многих практических случаях исследователи ориентируются на использование детерминированных математических моделей. Последние имеют недостатки, обусловленные невозможностью определения точных значений входящих в них параметров, что определяется влиянием факторов неопределенности.

Действительно, широкому классу химико-технологических процессов (ХТП), продукция которых используется при производстве органических красителей, волоконно-оптических средств связи, медицинской техники, присущ случайный характер изменения параметров, существенно влияющих на изменение характеристик объектов управления, которые тем не менее в детерминированных моделях считаются постоянными.

Чаще всего случайными являются характеристики самого ХТП, к которым относятся физико-химические константы, коэффициенты тепло- и массоотдачи, теплопроводности, скорости химических реакций, концентрации веществ во входных потоках и др. Кроме того, могут изменяться внешние условия (температура среды, составы потоков сырья, производительность и т.д.), которые при их неконтролируемости также можно рассматривать в качестве источников неопределенности.

Неточность задания тех или иных параметров при расчетах с использованием детерминированной математической модели практически не принимается во внимание, и, как правило, с учетом определенных предположений и допущений неточные или неопределенные параметры заменяются их средними значениями.

Такой подход часто оказывается несостоятельным для решения современных задач оптимизации химико-технологическими процессами.

Начиная с конца XX века развитие химических производств характеризуется внедрением прогрессивных технологий, обеспечивающих высокий уровень энерго- и ресурсосбережения, ужесточением требований к качеству выпускаемой продукции и экологической чистоты. Поэтому ошибки в управлении могут приводить к огромным экономическим потерям и способствуют возникновению аварийных ситуаций.

В связи с этим особую важность приобретает необходимость рассмотрения нового класса задач оптимизации, решения которых обеспечивали бы выполнение технологических и технических требований с заданной гарантией.

В работах В.В. Кафарова, В.И. Бодрова, В.Г. Матвейкина предложена концепция и развиты теоретические положения и методы решения задач гарантирующей оптимизации детерминированно-стохастическими химико-технологическими процессами, обеспечивающие выполнение технологических требований с заданной вероятностью.

Разработанные теория и методы позволяют заранее планировать допустимую (в том числе сколь угодно малую) вероятность нарушения технологических требований и гарантировать их выполнение при любых случайных изменениях значений параметров ХТП. Таким образом, гарантирующее управление дает уверенность (гарантию), что технологические требования и условия безопасности будут выполнены, какими бы ни были в данный момент значения технологических параметров и внешних неконтролируемых возмущений.

Однако эти теоретические положения и методы не могут быть применены для большинства современных химико-технологических производств, характеризующихся повышенной опасностью для обслуживающего персонала.

Это объясняется тем, что в химических производствах, в которых используются высокие температура, давление, концентрация веществ и т.п., в жестких условиях обеспечения конкурентоспособности

продукции, экономии средств невозможно или опасно провести достаточное количество экспериментов для получения статистических данных. Например из-за чрезвычайно капиталоемкого производства высокочистых веществ вследствие высокой стоимости сырья или вследствие опасности для обслуживающего персонала применения СВЧ-частот для нагрева реакционных смесей.

Тем более невозможно использовать эти методы для вновь проектируемых химических производств, так как в этом случае в принципе нельзя провести прямые эксперименты.

Очевидно, что в этих условиях встает вопрос об использовании математического аппарата теории нечетких множеств, позволяющего формализовать неопределенность параметров химико-технологических процессов, используя накопленные знания и экспертные оценки.

Однако до настоящего времени нет не только теоретических положений и разработанного специального математического обеспечения, не существует даже концепции решения задач гарантирующей оптимизации для рассматриваемого класса химико-технологических процессов в условиях нечетко заданных значений параметров, а также не сформулировано понятие гарантированного выполнения технологических требований в этих условиях.

Отсутствие концепции и теоретических положений гарантирующей оптимизации в условиях нечетко заданной информации и необходимость решения задач гарантирующего управления современными ХТП делают актуальной целью настоящей работы: сформулировать концепцию, разработать теоретические положения, методологию, специальное математическое и алгоритмическое обеспечение решения задач гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности.

Химическая и смежные с ней отрасли относятся к областям промышленности, характеризующимся экстремальными условиями труда. Все без исключения химические производства опасны для жизни и здоровья людей и различаются лишь степенью опасности.

Требование гибкости химических производств, выпуск большой номенклатуры продукции для удовлетворения индивидуальных потребностей людей приводят к непрерывной перенастраиваемости технологических схем и систем управления, что еще более усугубляет опасность химико-технологических процессов.

Поэтому химические производства стоят в первом ряду производств, требующих принятия решений по минимизации численности персонала или удалению людей из сферы вредного воздействия.

Применение робототехнических систем – очевидный путь решения этих задач. Однако параметрам средств робототехники так же, как и технологическим процессам, присущи факторы неопределенности, к которым относятся конструктивные характеристики роботов (изгибная жесткость, зазор в сочленениях, жесткость на кручение и др.). Маршрут и время перемещения средств робототехники могут быть определены недостаточно точно, что обуславливается особенностями ситуаций, имеющих место на реально функционирующих ХТП. Кроме того, показания сенсорных датчиков роботов, как правило, неточны и позволяют только приблизительно, т.е. на качественном уровне, определить текущую ситуацию. При управлении роботом оператором, при обучении робота, при формировании экспертных оценок используются нечеткие отношения.

В условиях нечеткости информации робототехнические системы должны обеспечивать удовлетворение выполнения технических и технологических требований и условий безопасности функционирования средств робототехники с заданной гарантией.

Поэтому актуальной задачей является синтез роботизированных АСУ (РоАСУ), осуществляющих гарантирующую оптимизацию ХТП в условиях неопределенности.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с координационным планом НИР АН СССР по направлению 2.27 «ТОХТ», планом 2.27.7.15 «Робототехника и микропроцессорные системы управления в химической промышленности», планами Минудобрений и Минхимпрома на 1980–1988 гг., постановлением Правительства РФ от 28.05.96 г. «О приоритетных направлениях развития науки и техники и критических технологий» по направлению «Интеллектуальные системы управления», планом Госкомитета РФ по высшему образованию на 1991–1995 гг., планом Министерства образования РФ на 1995–2000 гг. (госбюджетная тема «Теория, методы, алгоритмы управления динамическими системами, формализованными на нечетких множествах»).

Цель работы: сформулировать концепцию, разработать теоретические положения, методологию, специальное математическое и алгоритмическое обеспечение решения задач гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности; разработать методологию синтеза роботоавтоматизированных систем управления, функционирующих в условиях неопределенности, и применить полученные результаты для решения важных производственных задач управления роботизированными ХТП.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать концепцию решения задач гарантирующей оптимизации и управления ХТП, обладающими свойствами неопределенности;
- на основе концепции разработать теоретические положения и методологию решения задач гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности, при этом необходимо:
 - формализовать условия выполнения технологических требований с заданной гарантией в условиях неопределенности;
 - сформулировать постановки задач гарантирующей оптимизации;
 - теоретически обосновать методы и алгоритмы решения этих задач;
- на основе теоретических положений решения задач гарантирующей оптимизации создать методологию синтеза PoACУ химико-технологическими процессами, при этом необходимо:
 - разработать структуру PoACУ, формализовать расширенные постановки задач управления и принятия решений на различных уровнях PoACУ;
 - разработать теоретически обоснованные методы и алгоритмы решения задач гарантирующей оптимизации планирования работы коллектива роботов в условиях неопределенности;
 - разработать теоретически обоснованные методы и алгоритмы решения задач расчета оптимальных траекторий движения манипулятора в условиях неопределенности, обеспечивающие гарантированность выполнения технологических требований;
- применить предложенную методологию для решения задач гарантирующей оптимизации конкретными роботизированными ХТП.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы научные исследования основывались на методах математического моделирования, современной теории управления и теории нечетких множеств.

Достоверность полученных результатов подтверждается доказательствами сформулированных теорем и утверждений, экспериментальной проверкой на основе имитационных и лабораторных исследований, а также промышленных испытаний.

Научная новизна состоит в предложенной концепции гарантирующей оптимизации химико-технологических процессов, обладающих свойствами неопределенности, формализованных условиях гарантированного выполнения технологических требований и сформулированной задаче гарантирующей оптимизации ХТП в условиях неопределенности; созданных теории и методологии решения задач гарантирующей оптимизации ХТП в условиях неопределенности; разработанных методах и алгоритмах решения задач гарантирующей оптимизации ХТП; созданной методологии синтеза PoACУ химико-технологическими процессами, функционирующими в условиях неопределенности; поставленных задачах гарантирующей оптимизации планирования работы коллектива роботов и разработанных алгоритмах их решения; разработанных методах и алгоритмах решения задач расчета оптимальных траекторий движения манипулятора в условиях неопределенности, обеспечивающих гарантированность выполнения технологических требований.

Практическая ценность работы определяется разработанной методологией решения задач гарантирующей оптимизации ХТП в условиях неопределенности, методикой определения адекватности и коррекции математических моделей с нечеткими параметрами, разработанным алгоритмическим и программным обеспечением для проектирования роботоавтоматизированных систем управления ХТП в условиях неопределенности; построенным алгоритмическим и программным обеспечением, позволяющим синтезировать необходимое математическое описание роботизированных ХТП производства поликристаллических оптических материалов на основе селенида цинка и кислоты Шеффера; алгоритмами решения расширенных задач анализа, оптимизации и управления для рассматриваемых ХТП с учетом особенностей их функционирования.

Разработан и внедрен на кафедре «Информационные процессы и управление» Тамбовского государственного технического университета автоматизированный лабораторный комплекс подсистемы роботов-лаборантов, способный проводить экспресс-анализы сырья и осуществлять коррекцию математических моделей ряда ХТП.

Предложенные методы и алгоритмы синтеза оптимальных программ движения манипуляторов роботов, обеспечивающие гарантированность выполнения технологических требований, могут быть использованы в практике расчета управляющих программ роботов для ХТП.

Реализация научно-технических результатов. Результаты работы были использованы при выполнении научно-исследовательских работ и в виде устройств, систем управления и технической документации переданы для использования предприятиям: п/я X-5382 (Москва, 1983, экономический эффект – 141 тыс. р., НПО «Защита растений»

(Москва),

ОАО «Пигмент» (Тамбов), ФГУП «ТамбовНИХИ», ОАО «НИТС» (Москва), ФГУП «Ассоциация Российского Союза химиков» (Москва).

Действующий макет робота-лаборанта демонстрировался на Всесоюзной выставке «Машиностроительная технология 87».

Материалы диссертации используются в учебных курсах ТГТУ при обучении студентов специальности 21.02.00.

Апробация работы. Основные теоретические и прикладные результаты диссертационной работы изложены в монографии «Роботы в химической промышленности» / Бодров В.И., Калинин В.Ф., Погонин В.А., публикации в научных журналах и тематическом обзоре.

Результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной научной конференции «Автоматизация и роботизация в химической промышленности» (Тамбов, 1986, 1988); Всесоюзной и Международной научных конференциях «Методы кибернетики химико-технологических процессов (КХТП-III-89), (КХТП-IV-94)» (Москва, 1989, 1994); VII Всесоюзной и IX, XV Международных научных конференциях «Математические методы в химии и химической технологии» (Казань, 1991, Тверь, 1995, Тамбов, 2002); IUPAC-91 Congress International Analytical Sciences (Токио, 1991); II Международной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных наук» (Москва, МГТУ им. Баумана, 1994); Всесоюзной конференции «Разработка и внедрение вихревых электромагнитных аппаратов для интенсификации технологических процессов» (Тамбов, 1989); IV Республиканской конференции (С.-Петербург, 1992); X Международной конференции по химии высокочистых веществ (Н.-Новгород, 1995); Международной конференции «Жидкофазные системы и нелинейные процессы в химии и химической технологии» (Иваново, 1999); Международной конференции «Информационные технологии в проектировании микропроцессорных систем» (Тамбов, 2000); II Международной научно-практической конференции (Новочеркасск, 2002).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в одной монографии и более чем в 40 статьях, докладах, авторских свидетельствах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка использованной литературы и приложений. Основная часть диссертации изложена на 314 страницах машинописного текста. Содержит 94 рисунка и 32 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, изложено краткое содержание глав.

В **первой главе** проведен анализ вопросов управления и роботизации ХТП. Показана актуальность решения задач оптимизации ХТП, гарантирующих выполнение технологических требований в условиях неопределенности. Выявлено, что в настоящее время отсутствует формализация гарантии выполнения технологических требований, теория постановок и решения задач гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности.

На основе проведенного литературного обзора поставлена задача создания теории, эффективных методов и алгоритмов решения задач оптимизации в условиях неопределенности. Поставлена также задача создания методологии синтеза систем автоматизации ХТП с подсистемой роботов-лаборантов, работающей в условиях неопределенности.

Во **второй главе** предлагается концепция решения задач гарантирующей оптимизации ХТП, обладающих свойствами неопределенности.

Предлагается считать оптимизацию – гарантирующей оптимизацией, если технологические требования, определяемые соответствующими функциями принадлежности, выполняются с «достаточной убедительностью».

Концепция предполагает:

а) формализацию «достаточной убедительности» выполнения технологического требования по функции принадлежности этого требования;

б) предлагается считать, что система технологических требований выполнена с определенной гарантией, если каждое i -е технологическое требование выполнено с этой гарантией.

Концепция также предполагает: создание математической модели, позволяющей рассчитывать функции принадлежности выходных величин ХТП (определяющей модели), определение нормы целевой функции по ее функции принадлежности, постановку задачи оптимизации нормы целевой функции при гарантированном выполнении технологических требований.

Предлагается считать, что технологическое требование $\varphi \geq a$ выполняется с «достаточной убедительностью», если значение функции принадлежности $\mu(\varphi)$ таково, что $\forall \varphi < a : \mu(\varphi) \leq \varepsilon$ и при этом множество $P = \{ \varphi \mid \mu(\varphi) > \varepsilon \} \neq \emptyset$.

Этот постулат формализуется следующим образом: технологическое требование $\varphi \geq a$ удовлетворяется с заданной гарантией ε , если $\varphi_r \geq a$, где $\varphi_r = \min_E \varphi$, $E = \{ \varphi \mid \mu(\varphi) \geq \varepsilon \}$.

При этом в соответствии с концепцией система технологических требований выполнена с гарантией $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$, если каждое i -е технологическое требование выполнено с гарантией ε_i , $i = \overline{1, n}$, где n – число технологических требований.

На основании разработанной концепции в работе формулируется задача гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности.

Математическая модель ХТП представляется в следующем виде:

$$\mu_{\tilde{Y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u}) = M(\mu_{\tilde{X}}(\mathbf{x}), \mathbf{u}, \mu_{\tilde{B}}(\mathbf{b})), \quad (1)$$

где M – оператор математической модели; $\mu_{\tilde{X}}(\mathbf{x})$, $\mu_{\tilde{B}}(\mathbf{b})$ – соответствующие функции принадлежности элементов подмножеств \tilde{X}, \tilde{B} ; \mathbf{x} – вектор режимных параметров; \mathbf{b} – вектор настроечных параметров модели; $\mu_{\tilde{Y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u})$ – функция принадлежности нечеткого решения.

Функция принадлежности нечеткого решения определяется с использованием (1) и принципа расширения Заде следующим образом:

$$\mu_{\tilde{Y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u}) = \max_{\mathbf{x}, \mathbf{b}} \min(\mu_{\tilde{X}}(\mathbf{x}), \mu_{\tilde{B}}(\mathbf{b})) \mid \mathbf{y} = M(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{b}), \quad (2)$$

где M – детерминированная математическая модель, при выполнении условия $\mu_{\tilde{Y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u}) = 0$, если $\{(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{b}) \mid \mathbf{y} = M(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{b})\} = \emptyset$.

В работе предложено несколько алгоритмов расчета $\mu_{\tilde{Y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u})$ по известной имитационной модели $\mathbf{y} = M(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{b})$. Один из алгоритмов реализации (2) представлен на рис. 1.

Работа алгоритма заключается в переборе выходной величины \mathbf{y} , нахождении для текущего \mathbf{y} всех значений нечетких параметров \mathbf{x} , \mathbf{b} , которые удовлетворяют имитационной модели. Выбор для пары \mathbf{x} , \mathbf{b} минимального значения $a = \min(\mu_{\tilde{X}}(\mathbf{x}), \mu_{\tilde{B}}(\mathbf{b}))$ и затем выбор такой пары \mathbf{x} , \mathbf{b} , для которой значение a максимально. Это значение a принимается в качестве значения функции принадлежности для текущего значения \mathbf{y} .

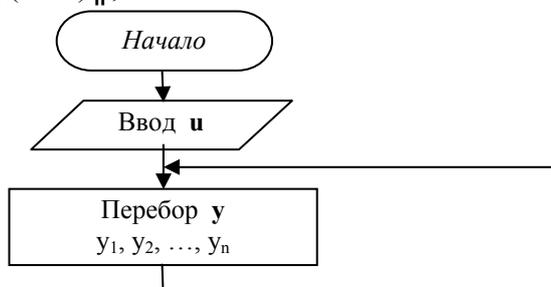
В качестве целевой функции $Q(\mathbf{u})$ принимается одна из введенных в работе норм $\| \mu_{\tilde{J}} \|$ функции принадлежности $\mu_{\tilde{J}}(J \mid \mathbf{u})$ показателя эффективности $J = J(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y})$, рассчитываемой с использованием $\mu_{\tilde{Y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u})$.

При этих обозначениях задача гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности ставится следующим образом:

- необходимо найти $\mathbf{u}^* \in U$, при котором принимает минимальное значение целевая функция $Q(\mathbf{u})$

$$Q^* = Q(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u} \in U} Q(\mathbf{u}), \quad (3)$$

где $Q(\mathbf{u}) = \| \mu_{\tilde{J}}(J \mid \mathbf{u}) \|$,



да

Рис. 1 Блок-схема алгоритма построения функции принадлежности выходных величин

- при гарантированном удовлетворении технологических требований

$$\varphi_i^r(\mathbf{u}) \geq a_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где $\varphi_i^r(\mathbf{u}) = \min_{E_i} \varphi_i$, $E_i = \{ \varphi_i \mid \mu_{\tilde{z}}^i(\varphi_i \mid \mathbf{u}) \geq \varepsilon_i \}$,

$$\mu_{\tilde{z}}^i(\varphi_i \mid \mathbf{u}) = \max_{x, y} \min (\mu_{\tilde{x}}(x), \mu_{\tilde{y}}(y \mid \mathbf{u})) \mid \varphi_i = \varphi_i(x, y, \mathbf{u}) \quad (5)$$

- удовлетворении уравнений математической модели

$$\mu_{\tilde{y}}(y \mid \mathbf{u}) = \max_{x, b} \min (\mu_{\tilde{x}}(x), \mu_{\tilde{b}}(b)) \mid y = M(x, \mathbf{u}, b).$$

Управление \mathbf{u}^* , найденное при решении задачи (3)–(5), называется гарантирующим оптимальным управлением.

В работе предложен ряд формализаций функций $\| \mu_{\tilde{J}} \|$, например

$$Q(\mathbf{u}) = \| \mu_{\tilde{J}}(J \mid \mathbf{u}) \| = \max_{J \in E_J} J,$$

где $E_J = \{ J \mid \mu_{\tilde{J}}(J \mid \mathbf{u}) \geq \mu_3 \}$, μ_3 – заданное значение функции принадлежности.

Множество D допустимых управлений в задаче гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности формализуем следующим образом:

$$D = \{ \mathbf{u} \mid \mathbf{u} \in U \wedge \varphi_i^r(\mathbf{u}) \geq a_i, \quad i = \overline{1, n} \},$$

где $\varphi_i^r(\mathbf{u}) = \min_{E_i} \varphi_i$, $E_i = \{ \varphi_i \mid \mu_{\tilde{z}}^i(\varphi_i \mid \mathbf{u}) \geq \varepsilon_i \}$,

$$\mu_{\bar{X}}^i(\varphi_i | \mathbf{u}) = \max_{x, y} \min(\mu_{\bar{X}}(\mathbf{x}), \mu_{\bar{Y}}(\mathbf{y} | \mathbf{u})) | \varphi_i = \varphi_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}),$$

$$\mu_{\bar{Y}}(\mathbf{y} | \mathbf{u}) = \max_{x, b} \min(\mu_{\bar{X}}(\mathbf{x}), \mu_{\bar{B}}(\mathbf{b})) | y = M(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{b}).$$

Управление $\mathbf{u} \in D$ называется допустимым управлением в задаче гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности.

При этих обозначениях задача (3)–(5) формулируется в следующем упрощенном виде: необходимо найти такое \mathbf{u}^* , при котором принимает минимальное значение целевая функция $Q(\mathbf{u})$

$$Q^* = Q(\mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{u} \in D} Q(\mathbf{u}).$$

Решение задачи гарантирующей оптимизации в форме (3)–(5) сопряжено со значительными трудностями, обусловленными необходимостью расчета функций принадлежности выходных величин и технологических требований с использованием (5).

Поэтому во второй главе рассматриваются вопросы создания теоретически обоснованных методов решения задач гарантирующей оптимизации.

Предлагается декомпозиционный метод оптимизации α -задач (метод α -оптимизации), позволяющий в широком диапазоне изменения технологических режимов найти решение задачи гарантирующей оптимизации за допустимое для практики время.

При этом α -задачей называем следующую задачу оптимизации: необходимо найти вектор $\mathbf{u}^* \in U$ управляющих воздействий, при котором принимает минимальное значение показатель эффективности $J(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y})$

$$J^* = \min_{\mathbf{u} \in U} J(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}),$$

где $\mathbf{y} = M(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{b})$,

- при удовлетворении технологических требований

$$\varphi_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \geq \alpha_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Оптимальное управление \mathbf{u}^* и значение целевой функции J^* , найденные при решении α -задачи, зависят от α . Эти величины обозначаются, соответственно, \mathbf{u}_α^* , $J^*(\alpha)$.

Множество управлений

$$U_\alpha = \{\mathbf{u} | \mathbf{u} \in U \wedge \varphi_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \geq \alpha_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad \mathbf{y} = M(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{b})\}$$

называется множеством α -допустимых управлений.

α -задача формализуется в следующем виде: необходимо найти вектор $\mathbf{u}^* \in U_\alpha$ управляющих воздействий, при котором принимает минимальное значение $J^*(\alpha)$ целевая функция $J(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y})$

$$J^*(\alpha) = \min_{\mathbf{u} \in U_\alpha} J(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}).$$

Задача нахождения оптимального α^* задачи α -оптимизации определяется следующим образом: необходимо найти такое значение $\alpha^* \in \Theta$, при котором принимает минимальное значение целевая функция $J^*(\alpha)$

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha \in \Theta} J^*(\alpha).$$

Область Θ (область гарантированного удовлетворения технологических требований) определяется следующим образом:

$$\Theta = \{ \alpha \mid \varphi_i^\Gamma(\mathbf{u}_\alpha^*) \geq a_i \},$$

где $\varphi_i^\Gamma(\mathbf{u}_\alpha^*) = \min_{E_i} \varphi_i$, $E_i = \{ \varphi_i \mid \mu_{\bar{z}}^i(\varphi_i \mid \mathbf{u}_\alpha^*) \geq \varepsilon_i \}$,

$$\mu_{\bar{z}}^i(\varphi_i \mid \mathbf{u}_\alpha^*) = \max_{x, y} \min(\mu_{\bar{x}}(\mathbf{x}), \mu_{\bar{y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u}_\alpha^*)) \mid \varphi_i = \varphi_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}_\alpha^*),$$

$$\mu_{\bar{y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u}_\alpha^*) = \max_{x, b} \min(\mu_{\bar{x}}(\mathbf{x}), \mu_{\bar{b}}(\mathbf{b})) \mid \mathbf{y} = \mathbf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{u}_\alpha^*, \mathbf{b}).$$

Значение $\alpha \in \Theta$ называем Θ -допустимым значением α .

Оптимальное управление $\mathbf{u}_\alpha^* \in U_\alpha$, соответствующее Θ -допустимому значению α , называем Θ -допустимым оптимальным управлением.

В главе показано, что при правильном выборе детерминированной математической модели $\mathbf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{b})$ и при выполнении ряда условий решение задачи α -оптимизации тождественно решению задачи гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности. Сформулирован и доказан ряд теорем, конкретизирующих необходимые свойства математических моделей, целевых функций и технологических требований.

Эти и другие теоремы положены в основу разработанных алгоритмов решения задач α -оптимизации

В главе также предложено решение задач α -оптимизации с использованием двухмодельного комплекса с имитационной моделью $\mathbf{y} = \mathbf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{b})$ вспомогательной моделью $\mathbf{y} = \mathbf{m}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $\mathbf{y} \in Y$, $\mathbf{u} \in U$ (задачи двухмодельной оптимизации). Введена «вспомогательная» целевая функция $q(\mathbf{u}, \mathbf{y})$ и система операторов $f_i(\mathbf{y}, \mathbf{u})$.

Задача двухмодельной оптимизации формулируется в следующем виде: необходимо найти вектор $\alpha^* = (\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_n^*)$, при котором принимает минимальное значение целевая функция $q^*(\alpha) \triangleq q(\mathbf{u}_\alpha^*, \mathbf{y}_\alpha^*)$

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha} q^*(\alpha)$$

при выполнении условий

$$\varphi_i^\Gamma(\mathbf{u}_\alpha^*) \geq a_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где $\varphi_i^\Gamma(\mathbf{u}_\alpha^*) = \min_{E_i} \varphi_i$, $E_i = \{ \varphi_i \mid \mu_{\bar{z}}^i(\varphi_i \mid \mathbf{u}_\alpha^*) \geq \varepsilon_i \}$,

$$\mu_{\bar{z}}^i(\varphi_i \mid \mathbf{u}_\alpha^*) = \max_{x, y} \min(\mu_{\bar{x}}(\mathbf{x}), \mu_{\bar{y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u}_\alpha^*)) \mid \varphi_i = \varphi_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}_\alpha^*),$$

$$\mu_{\bar{y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u}_\alpha^*) = \max_{x, b} \min(\mu_{\bar{x}}(\mathbf{x}), \mu_{\bar{b}}(\mathbf{b})) \mid \mathbf{y} = \mathbf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{u}_\alpha^*, \mathbf{b}),$$

где \mathbf{u}_α^* определяется алгоритмически решением задачи

$$\mathbf{u}_\alpha^* = \arg \min_{\mathbf{u} \in U_\alpha} q(\mathbf{u}, \mathbf{y}),$$

где $U_\alpha = \{ \mathbf{u} \mid f_i(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \geq \alpha_i, i = \overline{1, n}, \mathbf{y} = \mathbf{m}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \}$.

Сформулирован и доказан ряд теорем, определяющих условия тождественности задачи двухмодельной оптимизации и задачи гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности.

Основными теоремами являются лемма 1, теоремы 1 и 2.

Л е м м а 1. Пусть задача гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности (ЗГОУН) имеет решение и пусть модели $M(x, u, b)$, $m(x, u)$ и функционалы $Q(u)$, $\varphi_i(x, y, u)$, $q(u, y)$, $f_i(y, u)$ таковы, что для любых $u_1, u_2 \in U$ выполняются следующие отношения:

$$\begin{aligned} & [q(u_1, y)|y = m(x, u_1)] > [q(u_2, y)|y = m(x, u_2)] \Rightarrow \\ \Rightarrow & [Q(u_1) = (\min J | \mu_j(J|u_1) > \mu_3)] > [Q(u_2) = (\min J | \mu_j(J|u_2) > \mu_3)], \\ & f_i(y, u_1) \geq f_i(y, u_2) \Rightarrow \varphi_i^r(u_1) \geq \varphi_i^r(u_2); \end{aligned}$$

тогда существует вектор α такой, что решение α -задачи совпадает с решением задачи гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности.

Т е о р е м а 1. Пусть задача гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности имеет решение и пусть модели $M(x, u, b)$, $m(x, u)$ и функционалы $Q(u)$, $\varphi_i(x, y, u)$, $q(u, y)$, $f_i(y, u)$ таковы, что для любых $u_1, u_2 \in U$ выполняются следующие отношения:

$$\begin{aligned} & [q(u_1, y)|y = m(x, u_1)] > [q(u_2, y)|y = m(x, u_2)] \Rightarrow \\ \Rightarrow & [Q(u_1) = (\min J | \mu_j(J|u_1) > \mu_3)] > [Q(u_2) = (\min J | \mu_j(J|u_2) > \mu_3)], \\ & f_i(y, u_1) \geq f_i(y, u_2) \Rightarrow \varphi_i^r(u_1) \geq \varphi_i^r(u_2); \end{aligned}$$

тогда существует решение задачи двухмодельной оптимизации и оно совпадает с решением задачи гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности.

Т е о р е м а 2. Пусть задача двухмодельной оптимизации имеет решение и пусть модели $M(x, u, b)$, $m(x, u)$ и функционалы $Q(u)$, $\varphi_i(x, y, u)$, $q(u, y)$, $f_i(y, u)$ таковы, что для любых $u_1, u_2 \in U$ выполняются следующие отношения:

$$\begin{aligned} & [q(u_1, y)|y = m(x, u_1)] \Leftrightarrow [q(u_2, y)|y = m(x, u_2)] \\ \Leftrightarrow & [Q(u_1) = (\min J | \mu_j(J|u_1) > \mu_3)] > [Q(u_2) = (\min J | \mu_j(J|u_2) > \mu_3)], \\ & f_i(y, u_1) \geq f_i(y, u_2) \Rightarrow \varphi_i^r(u_1) \geq \varphi_i^r(u_2); \end{aligned}$$

тогда существует решение задачи гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности, и это решение совпадает с решением задачи двухмодельной оптимизации.

Алгоритм решения задачи двухмодельной оптимизации показан на рис. 2.

Работа алгоритма заключается в выборе вектора α , нахождении условных оптимальных управлений u_α^* и целевой функции, решении α -задачи и поиске в пространстве α такого значения α^* , при котором целевая функция принимает минимальное значение.

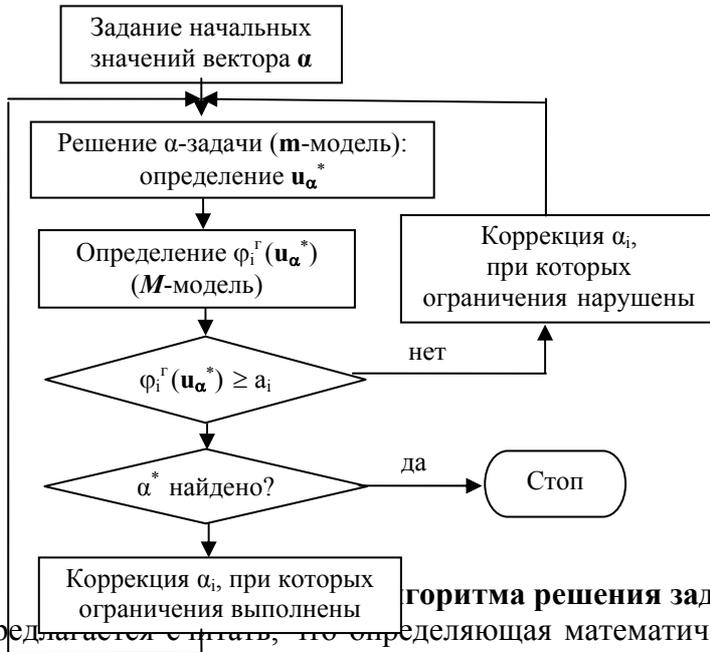
В главе предложена методология решения задачи гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности, которая включает в себя: построение имитационной математической модели $y = M(x, u, b)$, алгоритмическое задание определяющей математической модели M , формализацию нечетких параметров, выбор методов решения задачи гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности, методику оценки адекватности и коррекции определяющей модели.

В работе предлагается считать экспериментальные значения z_i^3 некоторого технологического параметра z_i , удовлетворяющим условиям адекватности, если

$$\left| z_i^3 - \bar{z}_i \right| \leq \frac{\Delta_i}{2}; \quad \bar{z}_i = \frac{z_i + \bar{z}_i}{2}; \quad \Delta_i = \bar{z}_i - z_i, \quad (6)$$

где z_i и \bar{z}_i – границы существенности: $z_i = \min_{G_i} z_i$, $\bar{z}_i = \max_{G_i} z_i$; G_i – область существенности параметра адекватности z_i , $G_i = \{z_i | \mu(z_i) | u \geq \varepsilon_i\}$; ε_i – уровень существенности (постоянная величина).

Методика оценки адекватности заключается в: 1) определении экспериментального значения z_{ij}^3 , где j – номер эксперимента; 2) вычислении по определяющей модели функций принадлежности $\mu_{ij}(z_{ij})$; 3) определении значений Δ_i и \bar{z}_i на основе вычисленной $\mu_{ij}(z_{ij})$; 4) проверке условий адекватности (6).



Алгоритма решения задач двухмодельной оптимизации

Предлагается считать, что определяющая математическая модель адекватна реальному ХТП, если при любых входных воздействиях параметры адекватности удовлетворяют условиям (6).

В тех случаях, когда целевая функция и система ограничений являются линейными, предложена классификация постановок задач принятия решений.

Задача минимизации детерминированной функции на нечетком множестве альтернатив $J \rightarrow \min_u \tilde{J}$, $\mathbf{u} \in \tilde{U} \subset U$.

Задача минимизации нечеткой функции на нечетком множестве альтернатив $\mu_J(J) \rightarrow \min_u \tilde{J}$, $\mathbf{u} \in \tilde{U} \subset U$.

Задача минимизации нечеткой функции на детерминированном множестве альтернатив

$$Q(\mathbf{u}) \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in U}, \quad \varphi^{\Gamma}(\mathbf{u}) \geq \mathbf{a}, \quad \mathbf{u} \in U.$$

На основе сформулированных и доказанных теоретических положений разработаны методы их решения.

В главе сформулирована задача гарантирующей оптимизации динамическими режимами ХТП: необходимо найти вектор-функцию $\mathbf{u}^* \in U$, при котором принимает минимальное значение целевая функция $Q(\mathbf{u})$

$$Q^* = Q(\mathbf{u}^*) = \min_u Q(\mathbf{u}),$$

где
$$Q(\mathbf{u}) = \max_L L | \mu(L | \mathbf{u}) = \max_{z_0(t_k)} z_0(t_k) | \mu(z_0 | \mathbf{u})_{t_k} \geq \mu_z,$$

$$\mu(z(\cdot) | \mathbf{u}) = M(\mu_{\tilde{X}}(\mathbf{x}), \mathbf{u}, \mu_{\tilde{B}}(\mathbf{b})),$$

• гарантированном удовлетворении в каждый момент времени $t \in T$ технологических требований для $i = \overline{1, n}$:

$$\varphi_i^{\Gamma}(\mathbf{u})_t \geq a_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где
$$\varphi_i^{\Gamma}(\mathbf{u})_t = \min_{E_i(t)} \varphi_i, \quad E_i(t) = \{ \varphi_i | \mu_{\tilde{Z}}^i(\varphi_i | \mathbf{u})_t \geq \varepsilon_i \},$$

$$\mu_{\tilde{Z}}^i(\varphi_i | \mathbf{u})_t = \max_{x, y} \min(\mu_{\tilde{X}}(\mathbf{x}), \mu_{\tilde{Y}}(\mathbf{y} | \mathbf{u})_t) | \varphi_i = \varphi_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}),$$

• гарантированном удовлетворении в конечный момент времени $t = t_k$:

$$z_j^r(\mathbf{u})_{tk} \leq l_{j-m}, \quad j = m + 1, \dots, \bar{m},$$

где $z_j^r(\mathbf{u})_{tk} = \max_{G_j(t_k)} z_j(t_k)$, $G_j(t_k) = \{z_j \mid \mu(z_j \mid \mathbf{u})_{tk} \geq \varepsilon_j\}$.

Разработан алгоритм расчета функций принадлежности $\mu(z_j) = \mu_{\tilde{y}}(\mathbf{y} \mid \mathbf{u})_t$.

В третьей главе с использованием теоретических положений главы 2 разработана методология синтеза роботоавтоматизированной системы управления (РоАСУ), разработана принципиально новая многоуровневая система управления ХТП, включающая в себя подсистемы АСУТП, управления коллективом роботов (СУКР), управления роботами (СУР), роботов-лаборантов (СР) (рис. 3).

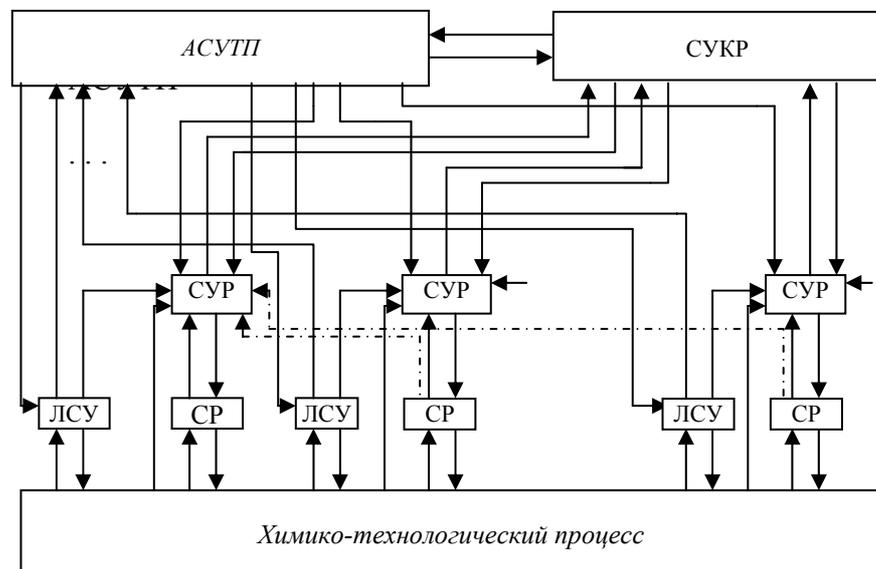


Рис. 3 Структурная схема РоАСУ

На первом уровне действуют локальные системы автоматизации (ЛСУ) и СР, на втором уровне СУР и на верхнем уровне – взаимодействующие подсистемы АСУТП и СУКР.

Такая структура РоАСУ обеспечивает большее быстродействие в процессе распознавания и управления ситуациями, уменьшает объем информации, обрабатываемой верхним уровнем управления, с другой стороны позволяет синхронизировать работу средств робототехники, планировать и координировать распределение работ между ними.

Таким образом, РоАСУ представляет собой объединенную систему АСУТП и подсистем СР, работающих как единая интегрированная система в соответствии с программой, вырабатываемой АСУТП, и текущим состоянием ХТП.

Показано, что для верхнего уровня РоАСУ актуальным является вопрос планирования работы коллективов роботов.

В главе предлагается классификация режимов функционирования ХТП (нормальный, предаварийный и аварийный) и разработаны теоретические основы планирования работы коллективов роботов в условиях неопределенности, т.е. когда нечетко заданы, например, время начала выполнения работ, допустимое время выполнения работ, взаиморасположение СР и др.

Принцип действия РоАСУ основывается на разделении общей задачи, которая должна выполняться РоАСУ, на целый ряд взаимосвязанных локальных задач, решение которых возлагается на СУР. В результате такой декомпозиции решение общей задачи распределяется между автономными комплексами, образующими при необходимости «рабочие бригады».

Для планирования и координации работ, выполняемых СР, формулируется и решается задача оптимизации работ коллектива роботов в условиях неопределенности.

Для решения этой задачи предлагается использовать метод α -оптимизации. Соответствующая α -задача сформулирована следующим образом: пусть имеется N комплексов, состоящих из $\{n_j, j = \overline{1, N}\}$, СР, с помощью которых необходимо на каждом из O объектов выполнить определенную совокупность

$\{m_i\}$, $i = \overline{1, O}$, независимых работ. При этом объект обслуживается одним комплексом, но в случае когда состояние объекта или скорость приближения этого состояния близки к предельно допустимому уровню, для обслуживания такого объекта могут привлекаться СР другого комплекса.

Возможности СР комплексов заданы матрицами вида

$$T = \|t_{ikjd}\|, \quad i = \overline{1, O}, \quad k = \overline{1, m_i}, \quad j = \overline{1, N}, \quad d = \overline{1, n_j}, \quad (7)$$

где t_{ikjd} – временные затраты на производство k -й работы на i -м объекте управления d -м робототехническим средством j -го комплекса.

Предположим, что каждая работа может быть выполнена любым из параллельно работающих СР. Начатая работа не прерывается для передачи другому СР. По завершению всех работ на одном объекте, в случае необходимости, СР комплекса могут перемещаться на другой объект.

Затраты времени на перемещения заданы матрицами вида

$$\tau = \|\tau_{sf}^j\|, \quad j = \overline{1, N}, \quad s = \overline{1, O}, \quad f = \overline{1, O}, \quad (8)$$

где τ_{sf}^j – время перемещения СР j -го комплекса от s -го к f -му объекту управления.

Согласно технологическому регламенту, задано время t_{ik}^h начала выполнения СР k -й работы на i -м объекте, время \bar{t}_{ik} выполнения k -й работы на i -м объекте и пусть задано множество допустимого времени работы d -го средства робототехники j -го комплекса.

Тогда время начала k -х работ СР на i -х объектах управления заданы матрицами

$$\bar{t}_h = \|t_{ik}^h\|, \quad i = \overline{1, O}, \quad k = \overline{1, m_i}, \quad (9)$$

время выполнения k -х работ СР на i -х объектах управления заданы матрицами

$$\bar{t} = \|\bar{t}_{ik}\|, \quad i = \overline{1, O}, \quad k = \overline{1, m_i}, \quad (10)$$

а допустимое время работы d -х СР j -х комплексов заданы матрицами

$$\bar{D} = \|D_{jd}\|, \quad j = \overline{1, N}, \quad d = \overline{1, n_j}. \quad (11)$$

Так как весь спектр химических анализов сырья и продуктов весьма широк, то будем считать, что задано множество Π_{jd} работ, которые d -е СР j -го комплекса может выполнить, т.е. каждому d -му СР j -го комплекса ставится в соответствие множество $\Pi_{jd} = \{(i, k)^*\}$ k -работ, которое это СР может выполнить на i -м объекте, и пусть задано множество $G_{jd} = \{(i)^*\}$ объектов управления $(i)^*$, на которых d -е СР j -го комплекса может выполнить определенные работы.

Тогда

$$\Pi = \|\Pi_{jd}\|, \quad G = \|G_{jd}\|, \quad j = \overline{1, N}, \quad d = \overline{1, n_j}. \quad (12)$$

Будем считать, что перед выполнением всей совокупности работ все СР комплексов находятся в исходном положении. Тогда множество I начальных расположений СР комплексов определим следующим образом:

$$I = \{(i_{jd}^0, t_{jd}^0)\}, \quad (13)$$

где i_{jd}^0 – начальное расположение d -го СР j -го комплекса; t_{jd}^0 – время начального расположения d -го СР j -го комплекса.

Тогда задача распределения ресурсов может быть сформулирована следующим образом: для заданных (7)–(13) и для d -го СР j -го комплекса найти последовательность P_{jd} объектов управления и независимых работ

$$P_{jd} = \{i_{jd}^r, k_{jd}^r\}, \quad j = \overline{1, N}, \quad d = \overline{1, n_j}, \quad r = \overline{1, r_{jd}}, \quad (14)$$

где r_{jd} – номер в последовательности работ, выполняемых d -м СР j -го комплекса, при которой выполняются следующие условия:

$$t_{ikjd} \leq \bar{t}_{ik}, \quad \sum_{k=1}^{m_i} \sum_{j=1}^N \sum_{d=1}^{n_j} t_{ikjd} = p_i, \quad \sum_{(i,k) \in R_{jd}} t_{ikjd} + \sum_{s \in L_{jd}} \sum_{f \in L_{jd}} \tau_{sf}^j \leq D_{jd},$$

$$t_{i_{jd}^{r-1}, k_{jd}^{r-1}} + \tau_{i_{jd}^{r-1}, i_{jd}^r}^j \leq t_{i_{jd}^r, k_{jd}^r}^H, \quad t_{i_{jd}^r, k_{jd}^r}^K = t_{i_{jd}^r, k_{jd}^r}^H + \bar{t}_{i_{jd}^r, k_{jd}^r}^r,$$

где p_i – суммарное время работ на i -м объекте управления; $t_{i_{jd}^r, k_{jd}^r}^H$, $t_{i_{jd}^r, k_{jd}^r}^K$ – соответственно, начало и окончание выполнения d -м СР j -го комплекса k -й работы (с r -м номером в последовательности работ) на i -м объекте управления; в качестве составляющих вектора α в α -задаче используются следующие величины: \bar{t}_{ik} , D_{jd} , $t_{i_{jd}^r, k_{jd}^r}^H$.

Рассматривается задача координации взаимодействия различных уровней РoАСУ, для решения которой также используется метод α -оптимизации. Для ряда частных случаев предложены эффективные алгоритмы решения этих задач.

Для случая аварийного режима функционирования ХТП разработан алгоритм диспетчерского управления, обеспечивающий решение важнейшей задачи – удаление обслуживающего персонала из опасной для их жизни и здоровья сферы производства.

В четвертой главе рассматриваются вопросы построения оптимальных траекторий движения манипулятора. Проводится классификация и формализация задач нахождения оптимальных траекторий в условиях неопределенности, гарантирующих выполнение технологических и технических требований в условиях неопределенности (табл. 1).

Приведем в качестве примера постановку задачи \tilde{A} : необходимо для заданной на $[t_0, t_k]$ вектор-функции $Y_3(t) \in Y \subset R^3$ найти вектор-функцию u^* , определенную на $[t_0, t_k]$, при которой в каждый момент времени t выполняется условие реализации траектории с заданной гарантией

$$\rho^r(Y_3(t), F(Q(t))) < \delta,$$

где δ – постоянная величина; ρ^r – граница существенности, определяемая

$$\rho^r(Y_3(t), F(Q(t))) = \min_{E_\rho} \rho,$$

где $E_\rho = \{\rho \mid \mu(\rho \mid t) \geq \varepsilon_\rho\}$, $\mu(\rho \mid t) = \max_{F(Q(t)) \in E_\rho} \mu(F(Q(t)))$,

$$F_\rho = \{F(Q(t)) \mid \rho = \omega(Y_3(t), F(Q(t)))\},$$

и удовлетворяются:

- условия отсутствия столкновений с препятствиями и самостолкновения

$$\forall x \in L(t) : \rho_n^r(x, L_n(t)) \geq r_{кр}, \quad \forall (x, z) \in K(t) : \rho^r(x, z) \geq r_{\min},$$

где $\rho_n^r(x, L_n(t)) = \min_{E_\rho} \rho_n(x, L_n(t))$,

$$E_\rho = \{\rho_n \mid \mu(\rho_n \mid t) \geq \varepsilon_\rho\}, \quad \mu(\rho_n \mid t) = \max_{(x, z^*) \in S_n(\rho_n)} \min [\mu_{\tilde{X}}(x \mid t), \mu_{\tilde{X}}(z^* \mid t)],$$

Γ_{\min} – минимальная допустимая «зона надежности»,

$$\rho^{\Gamma}(x, z) = \min_{E_{\rho}} \rho(x, z), \quad E_{\rho} = \{\rho \mid \mu(\rho \mid t) \geq \varepsilon_{\rho}\},$$

$$\mu(\rho \mid t) = \max_{(x, z) \in \omega(\rho)} \min(\mu_{\tilde{X}}(x), \mu_{\tilde{X}}(z)),$$

где $\omega(\rho) = \{(x, z) \mid \rho = \rho(x, z)\}$,

- конструктивные ограничения на обобщенные координаты и управляющие воздействия

$$Q_{\min} \leq \Phi_{\text{H}}^{\Gamma}(Q)_t, \quad \Phi_{\text{B}}^{\Gamma}(Q)_t \leq Q_{\max}, \quad \dot{Q}_{\min} \leq \Phi_{\text{H}}^{\Gamma}(\dot{Q})_t, \quad \Phi_{\text{B}}^{\Gamma}(\dot{Q})_t \leq \dot{Q}_{\max},$$

$$\mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}_{\max},$$

где $\Phi_{\text{H}}^{\Gamma}(Q)_t = \min_{E_{Q(t)}} Q$, $\Phi_{\text{B}}^{\Gamma}(Q)_t = \max_{E_{Q(t)}} Q$, $E_{Q(t)} = \{Q \mid \mu_{\tilde{Q}}(Q \mid \mathbf{u})_t \geq \varepsilon_Q\}$,

- условия начального положения захватного устройства

$$Q(t_0) = Q_0, \quad \dot{Q}(t_0) = \dot{Q}'_0,$$

где Q_0, Q'_0 – заданные величины.

Иначе говоря, в задаче \tilde{A} необходимо отыскать программу изменения управляющих воздействий $\mathbf{u}^*(\cdot)$, при которой захватное устройство, находящееся в момент времени t в состоянии (Q_0, Q'_0) , опишет траекторию, гарантированно отличающуюся от заданной $Y(\cdot)$ не больше, чем на δ , и при этом звенья манипулятора гарантированно не столкнутся между собой и с внешними препятствиями.

Аналогично формулируются задачи $\tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{A}^\lambda, \tilde{B}^\lambda, \tilde{C}^\lambda, \tilde{D}, \tilde{E}, \tilde{D}^k, \tilde{E}^k$ (см. табл.1).

Для решения задач гарантирующей оптимизации траекторий движения манипулятора используется предложенный в главе 2 метод α -оптимизации, в котором α -задача формулируется аналогично соответствующим задачам гарантирующей оптимизации. Так, для задачи \tilde{A} соответствующая задача A_α формулируется следующим образом: необходимо для заданной на $[t_0, t_k]$ функции $Y_3(t) \in Y \subset R^3$ найти вектор-функцию \mathbf{u}^* , определенную на $[t_0, t_k]$, при которой в каждый момент времени t выполняются следующие условия:

$$|Y_3(t) - F(Q(t))| < \alpha_1, \quad \Theta(Q)\ddot{Q} + G(Q, \dot{Q}) = \mathbf{u}(t),$$

где α_1 – постоянная величина, удовлетворяются:

- условия отсутствия столкновений

$$\forall x \in L(t) : \rho_n(x, L_n(t)) - r_{кр} \geq \alpha_2, \quad \forall (x, z) \in K(t) : \rho(x, z) - r_{\min} \geq \alpha_3,$$

где α_2, α_3 – постоянные величины,

- конструктивные ограничения на обобщенные координаты и управляющие воздействия

$$\alpha_4 \leq Q(t) \leq \alpha_5, \quad \alpha_6 \leq \dot{Q}(t) \leq \alpha_7, \quad u_{\min} \leq \mathbf{u}(t) \leq u_{\max},$$

- условия начального положения манипулятора

$$Q(t_0) = Q_0, \quad \dot{Q}(t_0) = Q'_0,$$

где Q_0, Q'_0 – заданные величины.

Аналогично формулируются задачи $B_\alpha, C_\alpha, A_\alpha^\lambda, \dots, E_\alpha^k$, представленные в табл. 1.

Алгоритм решения задачи гарантирующей оптимизации траектории движения манипулятора аналогичен алгоритму рис. 2.

Для решения α -задач построения условно оптимальных программ управления разработан ряд алгоритмов.

Прямые алгоритмы построены на базе принципа максимума Понтрягина и метода динамического программирования. Принцип максимума применим для задач D, E, D^k, E^k ; однако показано, что он неудобен при решении задач $A_\alpha, B_\alpha, C_\alpha, A_\alpha^\lambda, B_\alpha^\lambda, C_\alpha^\lambda$. При сложных многозвенных манипуляторах, конструктивно допускающих столкновение звеньев, при наличии препятствий использование этого метода и соответственно алгоритма затруднительно. Метод динамического программирования применим для всех сформулированных α -задач при малой размерности вектора Q .

В работе построены быстродействующие алгоритмы на основе использования декомпозиционных методов, позволяющих свести решение задачи построения программ управления к решению последовательности более простых задач: нахождение дискретной программной траектории, аппроксимации ее непрерывной траектории и определение по ней программ управления. В диссертации рассмотрены алгоритмы решения всех этих задач.

Разработанный метод оптимистического направления позволяет эффективно учитывать наличие препятствий при поиске конфигурации манипулятора на очередном шаге. Этот метод заключается в том, что окрестность последней найденной точки охватывается n -мерной решеткой с небольшим шагом, после чего дви-

жение к искомой точке производится по углам этой решетки с использованием оценочной функции, ранжирующей точки и алгоритма искусственного интеллекта, осуществляющего поиск на дереве состояний.

При наличии препятствий, в том числе подвижных, конструктивных ограничений, возможности самопересечения звеньев манипулятора, нами предлагается метод планирования каркаса программной траектории (КТП), позволяющий эффективно строить «дальнозоркую» стратегию построения КТП и являющийся весьма эффективным при наличии помех.

В работе предлагается также метод оптимального пути, использующий идеи искусственного интеллекта и обладающий свойством «дальнозоркости», высокой надежностью выбора оптимального пути, возможностью оптимизации траектории при наличии препятствий произвольной конфигурации. Приведено доказательство оптимальности траектории движения манипулятора, найденной этим методом.

В соответствии с методом декомпозиции в работе предлагаются методы построения непрерывной программной траектории (НПТ) по известной КТП, основанные на использовании интерполяционных полиномов и сплайнов.

Предлагается также итерационный алгоритм нахождения непрерывной и имеющей непрерывные первые производные траектории движения манипулятора. Доказаны теоремы тождественности итерационного алгоритма и задачи нахождения НПТ.

Ставится и решается задача нахождения программы управления по НПТ.

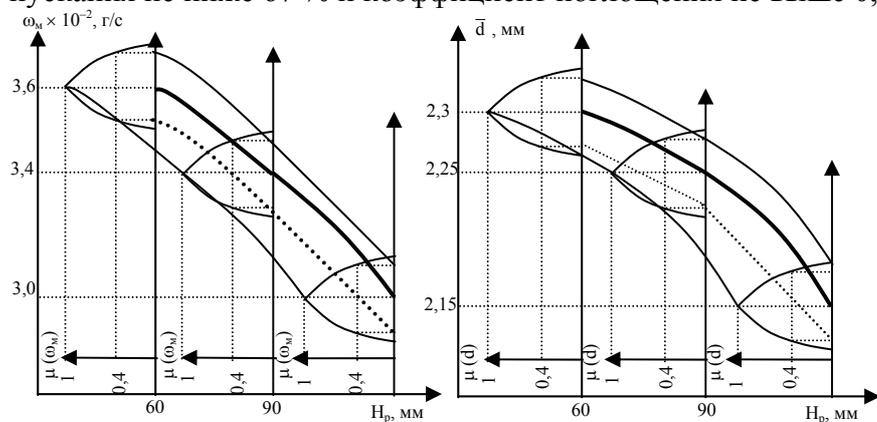
В **пятой главе** в соответствии с разработанной методологией построена имитационная математическая модель процесса производства поликристаллических оптических материалов на основе селенида цинка с целью выбора рационального режима проведения данного технологического процесса, которая использует формализованные факторы неопределенности, выявленные для данного производства, которыми являются, например, величины скорости роста, эффективности использования и коэффициента поглощения селенида цинка, пористости и коэффициента теплопроводности подложки и др.

Общая модель разбивается на внешнюю (позволяющую определить тепловые потоки на наружной поверхности реактора при нагревании его излучателем в вакууме при адиабатических условиях) и внутреннюю. Последняя состоит из сопряженной задачи теплопереноса и задачи массопереноса газовой смеси во внутренних камерах реактора. Результат решения внешней модели является исходным для внутренней.

Для решения связанной задачи тепло-, массопереноса был разработан алгоритм, позволяющий произвести расчет выходных переменных процесса при заданных значениях функций принадлежности μ_i .

На рисунке 4 приведен фрагмент результатов имитационного исследования, которые позволили определить область изменения управляющих воздействий, обеспечивающих выполнение рациональных режимов ведения технологического процесса.

Под рациональным будем понимать режим, соответствующий современным требованиям: при выбранных значениях управляющих воздействий должны гарантированно выполняться технологические требования (скорость роста поликристаллического материала должна быть не ниже $3 \cdot 10^{-2}$ г/с, эффективность использования селенида цинка не ниже 70 %, средний размер зерна осаждаемого материала не выше 2,3 мкм) и оптические характеристики готового продукта (коэффициент пропускания не ниже 67 % и коэффициент поглощения не выше $0,0035 \text{ см}^{-1}$).



а)

б)

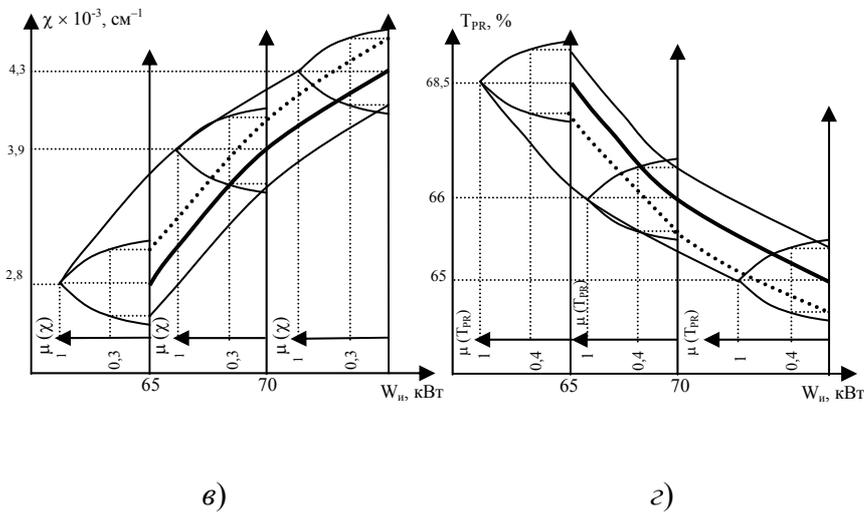


Рис. 4 Зависимость моды при $\lambda_n = 90 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$:
 а – скорости роста селенида цинка; б – среднего размера зерна;
 в – коэффициента поглощения; г – коэффициента пропускания

Задача гарантирующей оптимизации процесса производства поликристаллических оптических материалов на основе селенида цинка относится к классу нелинейных экстремальных задач с тремя варьируемыми переменными и ограничениями различных типов.

Задача гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности сведена к взаимодействию двух задач – внешней (задача α -оптимизации) и внутренней (α -задача). Во внешней задаче находится оптимальное значение α , а внутренняя задача решает детерминированную задачу оптимизации процесса производства оптических материалов на основе селенида цинка для найденного оптимального значения α .

Сформулируем α -задачу оптимизации процесса производства оптических материалов на основе селенида цинка: необходимо найти вектор $\mathbf{u} \in U$ управляющих воздействий, при котором принимает минимальное значение время процесса осаждения $t_{ц}(\mathbf{u}, \mathbf{x})$, т.е.

$$\mathbf{u} = \arg \min_{\mathbf{u} \in U} t_{ц},$$

при удовлетворении:

- соотношений, определяемых математической моделью

$$\mathbf{y} = M(\mathbf{u}, \mathbf{x}),$$

где $\mathbf{u} (W, H, G_b)$; W – мощность теплового источника; H – положение реактора относительно теплового источника; G_b – расход охлаждающей воды; $\mathbf{x} (\lambda_n, \Pi, P_2)$; λ_n – коэффициент теплопроводности подложки; Π – пористость подложки; P_2 – давление в верхней камере реактора; $\mathbf{y} (\omega_m, \beta, \bar{d}, T_{PR}, \chi)$; ω_m – скорость роста селенида цинка по массе; β – эффективность использования селенида цинка; \bar{d} – средний по объему размер зерна; T_{PR} – коэффициент пропускания селенида цинка; χ – коэффициент поглощения селенида цинка,

- ограничений и выполнения в каждый момент времени условий физической реализуемости технологического процесса:

$$\underline{\alpha}_{\omega_m} \leq \omega_m, \quad \omega_m \leq \bar{\alpha}_{\omega_m}, \quad \beta_k \geq \alpha_{\beta_k}, \quad T_{\Phi} \geq \alpha_{T_{\Phi}}, \quad \bar{d} \leq \alpha_{\bar{d}}, \quad T_{PR} \geq \alpha_{T_{PR}},$$

$$\chi \leq \alpha_{\chi}, \quad W^{\min} \leq W \leq W^{\max}, \quad H^{\min} \leq H \leq H^{\max}, \quad G_b^{\min} \leq G_b \leq G_b^{\max}.$$

Разработан алгоритм решения α -задачи, основанный на выявленных особенностях оптимальных режимов. Полученные результаты использованы в подсистеме управления технологическим процессом производства поликристаллических оптических материалов.

На основе разработанной методологии синтеза RoACУ предложена структура роботоавтоматизированной системы управления процессом производства поликристаллических оптических материалов с подсистемой роботов-лаборантов.

В главе поставлена и решена задача нахождения оптимальных маршрутов движения роботов-лаборантов на основе использования теоретических результатов, полученных в главе 3.

В шестой главе изучается процесс производства кислоты Шеффера в СВЧ-реакторе непрерывного действия и решается задача построения RoACУ этим производством в соответствии с разработанной методологией и с использованием методов математического моделирования и экспериментальных исследований.

Представлены результаты анализа производства кислоты Шеффера, выявлены и формализованы факторы неопределенности (величина степени превращения 2-нафтола в кислоту Шеффера, содержание смол и сульфонов, гранулометрический состав сырья и др.), используемые в качестве параметров математической модели процесса сульфирования 2-нафтола в кислоту Шеффера.

На рисунке 5 приведен фрагмент результатов имитационного исследования процесса производства кислоты Шеффера в СВЧ-реакторе непрерывного действия, которые позволили определить область изменения управляющих воздействий.

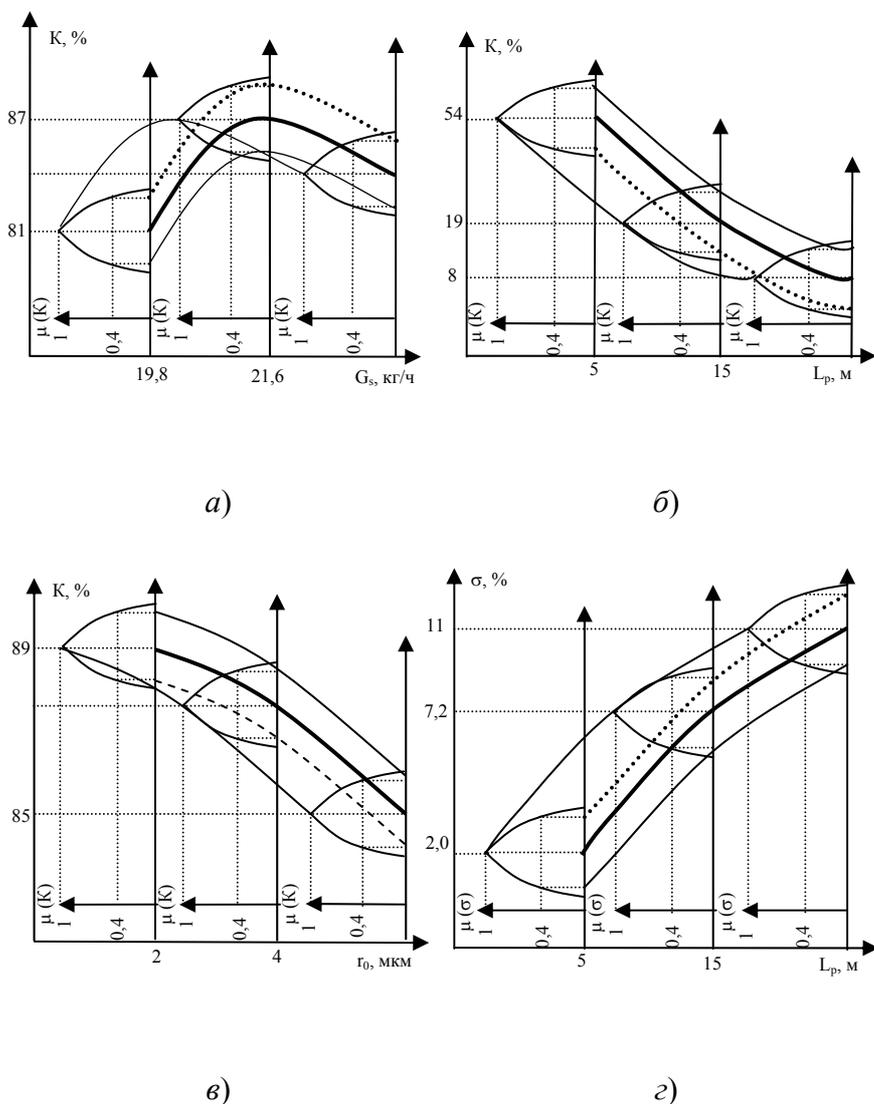


Рис. 5 Зависимость моды при:

a, б – при $C_0 = 80 \%$; *в, з* – $G_{cm} = 0,022 \text{ м}^3/\text{г}$;

a, б, в – степени превращения 2-нафтола в кислоту Шеффера;

з – содержание побочных веществ и сульфонов в готовом продукте

Поставлена и решена задача гарантирующей оптимизации для данного технологического процесса в условиях неопределенности и исследованы свойства оптимальных режимов для построения областей допустимых управлений.

Задача гарантирующей оптимизации процесса получения кислоты Шеффера в микроволновом реакторе сформулирована в следующем виде: для заданного гранулометрического состава 2-нафтола $\varphi(r)$, вступающего в химическую реакцию, необходимо найти расход G_s и концентрацию C_0 серной кислоты на входе в микроволновый реактор, при которых степень превращения 2-нафтола в кислоту Шеффера K достигает максимального значения, т.е.

$$Q(\mathbf{u}^*) = \max_{\mathbf{u} \in U} Q(\mathbf{u}),$$

- при удовлетворении соотношений, определяемых математической моделью процесса производства кислоты Шеффера,
- при гарантированном выполнении технологических требований

$$\sigma \leq \underline{\sigma}^r,$$

где $Q(\mathbf{u}) = \min_K K \mid \mu_{\bar{K}}(K \mid \mathbf{u}) \geq \mu_3$; μ_3 – заданное значение функции принадлежности степени превращения 2-нафтола в кислоту Шеффера; $\underline{\sigma}^r$ – граница существенности содержания побочных веществ и сульфонов в готовом продукте, определяемая по формуле

$$\underline{\sigma}^r = \min_{E_\sigma} \sigma,$$

где $E_\sigma = \{\sigma \mid \mu(\sigma \mid \mathbf{u}) \geq \varepsilon_\sigma\}$ – область существенности; ε_σ – уровень существенности содержания побочных веществ и сульфонов в готовом продукте.

Область U определяется следующими ограничениями:

$$C_0^{\min} \leq C_0 \leq C_0^{\max}, \quad G_s^{\min} \leq G_s \leq G_s^{\max}.$$

Результаты комплекса физико-химических и технологических исследований показали, что меняющиеся гранулометрический состав 2-нафтола и качество сырья требуют новых технологических режимов процесса производства кислоты Шеффера. С этих позиций большое значение приобретает создание РoACУ, позволяющей в автоматическом режиме без присутствия персонала в опасных зонах воздействия СВЧ-излучений анализировать сырье и оперативно устанавливать оптимальные режимы.

В главе предлагается РoACУ, осуществляющая оптимизацию технологических режимов процесса с учетом гранулометрического состава сырья. При этом подсистема робот-лаборант осуществляет оперативную идентификацию сырья, позволяющую проводить коррекцию математической модели при изменении состава сырья.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Предложена концепция гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности, в соответствии с которой формализованы условия гарантированного выполнения технологических требований и сформулирована соответствующая задача гарантирующей оптимизации.

2 Разработана теория решения задач гарантирующей оптимизации ХТП в условиях неопределенности, включающая в себя методы и алгоритмы α -оптимизации и двухмодельной оптимизации, доказательства тождественности решения задач α -оптимизации и двухмодельной оптимизации решению задачи гарантирующей оптимизации ХТП, сформулирована и решена динамическая задача гарантирующей оптимизации ХТП в условиях неопределенности.

3 На основе теоретических положений создана методология синтеза математического обеспечения решения задачи гарантирующей оптимизации ХТП в условиях неопределенности, в том числе представлен алгоритм выбора метода решения задачи гарантирующей оптимизации, разработан алгоритм синтеза обобщенной математической модели, введено понятие адекватности определяющей математической модели и разработаны алгоритмы ее оценки и коррекции.

4 Предложена методология синтеза роботоавтоматизированной системы управления ХТП, функционирующим в условиях неопределенности.

5 Сформулированы задачи объемного и календарного планирования работы коллектива роботов-лаборантов в условиях неопределенности и предложены алгоритмы их решения с использованием метода α -оптимизации.

6 Разработаны и теоретически обоснованы методы и алгоритмы расчета оптимальных траекторий движения манипуляторов, обеспечивающих гарантированность выполнения технологических условий, в том числе метод оптимального пути для оптимизации траекторий при наличии препятствий произвольной конфигурации; методы интерполяционных полиномов и сплайнов для нахождения траектории движения манипулятора по известному каркасу программной траектории; итерационный метод для нахождения гладкой и непрерывной траектории, учитывающий инерционные свойства манипуляционной системы.

7 Разработанная теория и методология решения задач гарантирующей оптимизации и синтеза РoАСУ в условиях неопределенности применены для создания роботоавтоматизированной системы управления технологическим процессом производства поликристаллических оптических материалов на основе селенида цинка (при этом создана адекватная процессу определяющая математическая модель, рассчитаны функции принадлежности выходных величин процесса в зависимости от возмущающих воздействий (пористости и коэффициента теплопроводности подложки), построена область допустимых управлений, обеспечивающих гарантию выполнения технологических требований и рассчитаны оптимальные режимы в зависимости от возмущающих воздействий, поставлена и решена задача распределения времени занятости коллектива роботов-лаборантов, обслуживающих технологические реакторы для производства поликристаллических оптических материалов).

8 Разработана оптимальная система управления непрерывным процессом производства кислоты Шеффера в микроволновом реакторе с подсистемой роботов-лаборантов (рассчитаны функции принадлежности выходных величин процесса в зависимости от гранулометрического состава 2-нафтола, начальной температуры реакционной смеси, сформулированы требования к роботу-лаборанту, предназначенному для оперативного определения концентрации серной кислоты, содержания смол и сульфонов и контроля гранулометрического состава 2-нафтола, разработаны алгоритм коррекции модели процесса производства кислоты Шеффера и алгоритм оперативной идентификации сырья с помощью робота-лаборанта).

9 Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены или переданы в различные научно-исследовательские и промышленные организации в виде устройств, систем управления и технической документации. Оригинальные разработки признаны изобретениями.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1 Бодров В.И. Роботы в химической промышленности / В.И. Бодров, В.Ф. Калинин, В.А. Погонин. М.: Химия, 1989. 136 с.

2 Бодров В.И. Применение роботов в отраслях-потребителях химического и нефтяного машиностроения / В.И. Бодров, В.А. Погонин, Ю.Я. Марголин. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1987. Сер. ХМ-2. 36 с.

3 Бодров В.И. Химическое производство как объект роботизации / В.И. Бодров, В.Ф. Калинин, В.А. Погонин // Автоматизация и роботизация в химической промышленности: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Тамбов, 1986. С. 21–23.

4 Погонин В.А. Информационно-управляющее устройство на базе микроконтроллера К1-20 / В.А. Погонин, А.В. Косарев // Приборы и системы управления. 1988. № 8. С. 21–22.

5 Погонин В.А. Робот-лаборант – элемент гибких производственных систем / В.А. Погонин, В.В. Козадаев // Автоматизация и роботизация в химической промышленности: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Тамбов, 1988. С. 123.

6 Погонин В.А. Математическая модель движения манипуляционной системы робота с переменными упругими и геометрическими характеристиками / В.А. Погонин, В.И. Галаев // Автоматизация и роботизация в химической промышленности: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Тамбов, 1988. С. 24–25.

7 Погонин В.А. Динамика манипуляционной системы робота химических производств / В.А. Погонин, В.И. Галаев, В.В. Козадаев // Минвуз. сб. науч. трудов / МИХМ. М., 1989. С. 94–98.

8 Погонин В.А. Принципы построения роботизированных лабораторных комплексов / В.А. Погонин, В.В. Козадаев // Методы кибернетики химико-технологических процессов: Тез. докл. III Всесоюз. конф. М., 1989. С. 159–160.

9 Калинин В.Ф. Проектирование оптимальных автоматизированных роботизированных химико-технологических комплексов / В.Ф. Калинин, В.А. Погонин // Динамика процессов и аппаратов химической технологии: Тез. докл. III Всесоюз. конф. Воронеж, 1989. С. 74–75.

10 Погонин В.А. Микропроцессорный комплекс для автоматизации экспериментальных исследований / В.А. Погонин, В.В. Косарев // Приборы и техника эксперимента. 1990. № 1. С. 11.

11 Bodrov V.I. Robotic can System for Cemical Industry / V.I. Bodrov, V.F. Kalinin, V.A. Pogonin // International Congress: Analitical Schiences. Tokyo, 1991.

12 Погонин В.А. Математическое моделирование манипуляторов с упругими звеньями / В.А. Погонин, В.И. Галаев // Методы кибернетики химико-технологических процессов: Тез. докл. Всесоюз. конф. М., 1991. С. 63–69.

13 Бодров В.И. Проектирование автоматизированных роботизированных химико-технологических комплексов / В.И. Бодров, В.Ф. Калинин, В.А. Погонин // Тез. докл. IV Респуб. конф. СПб., 1992. С. 62–68.

14 Бодров В.И. Планирование работы коллектива роботов на химических производствах / В.И. Бодров, В.Ф. Калинин, В.А. Погонин // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Тез. докл. II Междунар. конф. / МГТУ им. Баумана. М., 1994. С. 68–72.

15 Погонин В.А. Оптимизация процесса производства оптических материалов на основе селенида цинка / В.А. Погонин, С.М. Дзюба, А.В. Гредитов // Математические методы в химии и химической технологии: Тез. докл. IX Междунар. конф. Тверь, 1995. С. 72–73.

16 Бодров В.И. Математическое моделирование процесса производства поликристаллических оптических материалов на основе селенида цинка / В.И. Бодров, В.А. Погонин, А.В. Гредитов // Математические методы в химии и химической технологии: Тез. докл. IX Междунар. конф. Тверь, 1995. С. 130–132.

17 Бодров В.И. Интенсификация процесса производства оптических материалов на основе селенида цинка / В.И. Бодров, В.А. Погонин, А.В. Гредитов // X Междунар. конф. по химии высокочистых веществ. Н.-Новгород, 1995. С. 43.

18 Бодров В.И. Интенсификация процесса производства поликристаллических оптических материалов на основе селенида цинка / В.И. Бодров, В.А. Погонин, А.В. Гредитов // Высокочистые вещества. 1996. Т. 3. С. 55–61.

19 Бодров В.И. Моделирование процесса получения оптических материалов на основе цинка / В.И. Бодров, В.А. Погонин, А.В. Гредитов // ТОХТ. 1997. Т. 31, № 3. С. 296–301.

20 Калинин В.Ф. Модель кинетики процесса гетерогенного сульфирования 2-нафтола серной кислотой / В.Ф. Калинин, В.А. Погонин, Э.В. Щинов // Вестник ТГТУ. 1998. Т. 4, № 1. С. 64–69.

21 Калинин В.Ф. Получение кислоты Шеффера в СВЧ-реакторах / В.Ф. Калинин, В.А. Погонин, Э.В. Щинов // Жидкофазные системы и нелинейные процессы в химии и хим. технологии: Тез. докл. Междунар. конф. Иваново, 1999. С. 64–69.

22 Погонин В.А. Разработка микропроцессорных систем управления робототехническими комплексами, работающими в условиях неопределенности / В.А. Погонин, Ю.Ю. Громов // Информационные технологии в проектировании микропроцессорных систем ИТ ПМПС-2000: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Тамбов, 2000. С. 60–61.

23 Калинин В.Ф. Математическое моделирование процесса получения кислоты Шеффера / В.Ф. Калинин, В.А. Погонин, Э.В. Щинов // ТОХТ. 2000. Т. 34, № 6. С. 644–648.

24 Калинин В.Ф. Микропроцессорная система управления СВЧ-реактором непрерывного действия / В.Ф. Калинин, В.А. Погонин, Э.В. Щинов // Информационные технологии в проектировании микропроцессорных систем ИТ ПМПС-2000: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Тамбов, 2000. С. 39–40.

25 Бодров В.И. Решение задач управления в условиях неопределенности / В.И. Бодров, В.А. Погонин // Вестник ТГТУ. 2001. Т. 73, № 4. С. 534–540.

- 26 Погонин В.А. Планирование действий роботов при неполной информации о среде / В.А. Погонин // VI-научная конференция ТГТУ. Тамбов, 2001. С. 201.
- 27 Погонин В.А. Построение программы управления роботом в условиях неопределенности / В.А. Погонин // Математические методы в технике и технологиях: 15 Междунар. науч. конф. Тамбов, 2002. Т. 2. Секция 2. С. 148–150.
- 28 Погонин В.А. Задача гарантированной оптимизации в условиях неопределенности / В.А. Погонин // Математические методы в технике и технологиях: 15 Междунар. науч. конф.: Сб. тр. Тамбов. 2002. Т. 2. Секция 2. С. 150–152.
- 29 Погонин В.А. Алгоритм построения функции принадлежности решения уравнений математической модели / В.А. Погонин, В.А. Шиганцов // Математические методы в технике и технологиях: 15 Междунар. науч. конф. Тамбов, 2002. Т. 6. Секция 11. С. 200–201.
- 30 Погонин В.А. Постановка задачи гарантированного управления процессом получения поликристаллических оптических материалов на основе селенида цинка / В.А. Погонин, В.А. Шиганцов // 2 Междунар. науч.-практ. конф.: Сб. тр. Новочеркасск, 2002. Ч. 2. С. 53–55.
- 31 Бодров В.И. Постановка и методы решения задач принятия решений в условиях неопределенности / В.И. Бодров, Ю.Ю. Громов, В.А. Погонин // Инженерная физика. 2002. № 3. С. 55–60.
- 32 Погонин В.А. Оптимизация процесса производства оптических материалов на основе селенида цинка / В.А. Погонин, А.В. Гредитов, В.А. Шиганцов // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8, № 3. С. 426–430.
- 33 Бодров В.И. Постановка и методы решения задач принятия решений в условиях неопределенности / В.И. Бодров, Ю.Ю. Громов, В.А. Погонин // Инженерная физика. 2002. № 3. С. 55–60.
- 34 Громов Ю.Ю. Построение решений динамических роботизированных объектов в условиях неопределенности / Ю.Ю. Громов, В.А. Погонин // Инженерная физика. 2002. № 4. С. 7–10.
- 35 Погонин В.А. Управление ХТС в условиях неопределенности / В.А. Погонин // VIII научн. конф. ТГТУ: Сб. тр. 2003. С. 29–34.
- 36 Бодров В.И. Решение задач гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности / В.И. Бодров, Ю.Ю. Громов, В.А. Погонин // Инженерная физика. 2003. № 2. С. 46–48.
- 37 А.С. 1196595 СССР, МКИ 4F16K31/02. Термический клапан / Л.С. Артюхин, В.И. Бодров, Н.В. Ерохина, В.А. Погонин // Б.И. № 45. 1985. 2 с.
- 38 А.С. 770811 СССР, МКИ B29B1/06. Способ управления смесителем периодического действия / Г.М. Иванов, В.А. Погонин, Ю.Я. Марголин // Б.И. № 38. 1980. 3 с.
- 39 А.С. 964937 СССР, МКИ H02P5/06. Устройство для регулирования скорости электропривода постоянного тока / В.И. Бодров, А.В. Мищенко, В.А. Погонин, Л.Б. Иванов // Б.И. № 37. 1982. 2 с.

1 Классификация задач оптимизации траекторий

Задачи	Задание траекторий	Траектория Y движения схвата задана в пространстве R^3	Траектория \tilde{Y} движения схвата задана в пространстве R^6	Траектория Y движения схвата задана в пространстве R^3 , положение схвата $Y(t_k)$ задано в R^6	Положение $Y(t_k)$ схвата в конечный момент времени задано в R^3	Положение $Y(t_k)$ схвата в конечный момент времени задано в R^6
Задачи гарантирующего управления	Траектория задана во времени	\tilde{A}	\tilde{B}	\tilde{C}		
	Траектория задана параметрически	\tilde{A}^λ	\tilde{B}^λ	\tilde{C}^λ		

	Конечный момент времени задан				\tilde{D}	\tilde{E}
	Конечный момент времени не задан				\tilde{D}^k	\tilde{E}^k
α-задачи	Траектория задана во времени	A_α	B_α	C_α		
	Траектория задана параметрически	A_α^λ	B_α^λ	C_α^λ		
	Конечный момент времени задан				D_α	E_α
	Конечный момент времени не задан				D_α^k	E_α^k