

ГАБИТОВ Руслан Фаритович

**МНОГОМЕРНОЕ МОДЕЛЬНО-ПРЕДИКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ПРОКАЛКОЙ КАТАЛИЗАТОРОВ КРЕКИНГА, ОСНОВАННОЕ
НА АЛГОРИТМЕ С ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ**

**Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (в промышленности)**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2012

Работа выполнена на кафедре автоматизированных технологических и информационных систем филиала ФГБОУ ВПО УГНТУ в г. Стерлитамаке

- Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент,
Муравьева Елена Александровна
кафедра автоматизированных технологических и информационных систем филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке
- Официальные оппоненты: д-р техн. наук, профессор,
Лютов Алексей Германович
зав. кафедрой автоматизации технологических процессов Уфимского государственного авиационного технического университета
- канд. техн. наук, доцент,
Колязов Константин Александрович
кафедра систем управления филиала Московского государственного университета технологий и управления в г. Мелеузе
- Ведущая организация: Государственное унитарное предприятие
«Институт нефтехимпереработки
Республики Башкортостан»

Защита диссертации состоится “22” мая 2012 г., в 10 часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.03 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу: 450000, г. Уфа-центр, ул. К. Маркса, д. 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан “16” апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.

В.В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы. Современные тенденции на рынке микросферических катализаторов крекинга требуют новых подходов к управлению процессами, ответственными за эксплуатационные параметры катализаторов. Ключевым звеном в формировании данных свойств товарного катализатора является стадия прокалики, основные физико-химические процессы которой протекают во вращающихся барабанных печах. Теоретические и экспериментальные исследования ведущих специалистов в области катализа, таких как Б. И. Кутепов, С. И. Спивак, О. В. Крылов, С. Н. Хаджиев, У. М. Джемилев, Ю. Б. Монаков, L. A. Pine, P. J. Maher, D. W. Breck, E. M. Flanigan, S. C. Eastwood, C. J. Plank, P. V. Weiss, H. U. Andreasson, Upson L.L. и др. показывают, что такие качества катализатора как стойкость к истиранию, удельная поверхность, насыпная плотность и влагосодержание в значительной мере определяются тепловым режимом на всех этапах прокаливания микросферы.

Без поддержания определенных значений скорости нагрева частиц на разных стадиях процесса, максимальной и минимальной температуры прокалики невозможно получение стабильно высоких характеристик продукта, определяющих время жизни катализатора и частоту его замены в промышленной установке крекинга, а также максимального использования возможностей активных центров ультрастабильного цеолита по обеспечению высокого выхода полезных продуктов крекинга. Тем не менее, большинство установок прокалики на предприятиях по производству сорбентов и катализаторов, в частности, на Ишимбайском специализированном химическом заводе катализаторов, спроектированы под производство устаревших типов катализаторов с матрицей-носителем на основе силикагеля и алюмозолевого связующего. В то же время современные марки имеют в качестве связующей основы псевдобемит и оксихлорид алюминия, гораздо более чувствительные к отклонениям от оптимального теплового режима прокалики.

Для катализатора крекинга сегодняшнего дня становится стандартом содержание ультрастабильного цеолита на уровне 70 %, тогда как еще 10 лет назад данный показатель обычно не превышал 35–40 %. Тем самым произошло двукратное снижение доли матрицы, играющей роль своеобразного каркаса жесткости, а требования по обеспечению прочности на истирание, напротив, возросли.

В свете отмеченного ужесточения норм по качеству продукта необходим коренной пересмотр требований по эффективности управления процессом прокалики, что означает контроль над течением физико-химических процессов на всех стадиях прокаливания микросферы катализатора. Применительно ко вращающейся печи прокалики это предполагает способность системы управления к целенаправленному влиянию на распределение температуры по всей длине печи, то есть появилась необходимость в управлении температурным профилем прокалочного аппарата.

Поскольку существующие системы управления позволяют лишь регулировать температуру на выходе печи, разработка эффективной многомерной системы

управления печью прокалики является актуальной научной задачей, решение которой позволит повысить качество катализаторов крекинга и их конкурентоспособность на рынке.

Цель диссертационной работы состоит в повышении экономических показателей крекинга в кипящем слое за счет улучшения основных характеристик катализатора посредством многомерной системы управления печью прокалики микросферических катализаторов на основе модельно-предикторного управления, использующего алгоритм с интервальной неопределенностью.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Составить схему причинно-следственных связей влияния оптимального температурного режима прокалики на эксплуатационные и каталитические показатели катализатора и воздействия последних на экономическую эффективность целевого (финишного) процесса – крекинга.

2. Построить адекватную имитационную модель вращающейся печи прокалики катализаторов крекинга с возможностью получения данных о распределении массы и температуры прокаливаемого слоя во времени и по длине печи, позволяющую более полно учесть влияние возмущающих факторов и параметров, характеризующих состояние объекта управления.

3. Разработать метод определения комбинации регулирующих воздействий многомерной системы управления, обеспечивающих наименьшее отклонение температурного профиля при различных значениях возмущающих факторов.

4. Для печи прокалики катализаторов крекинга как многосвязного инерционного объекта управления построить устойчиво функционирующие управляющие алгоритмы, обеспечивающие минимальные время отклика и погрешность регулирования.

5. Внедрить предложенные модели и алгоритмы в систему управления процессом прокалики катализаторов крекинга с прямым измерением температуры прокаливаемого слоя в точках, удаленных от торцов вращающейся печи, и необходимым набором интуитивно понятных и дружественных по отношению к пользователю экранных интерфейсов, содержащих наряду с технологическими параметрами, информацию об экономической эффективности производимого катализатора при его использовании в технологическом процессе крекинга.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы и модели теории управления, имитационного моделирования, горения и теплопереноса в промышленных печах, нейронных сетей, модельно-предикторного управления (МПУ) и логических регуляторов с интервальной неопределенностью.

Основные научные результаты, полученные автором и выносимые им на защиту:

1. Схема причинно-следственных связей влияния температурного режима на всех стадиях прокалики на эксплуатационные и каталитические показатели катализатора

и воздействия последних на экономическую эффективность целевого (финишного) процесса – крекинга с критерием оптимальности, инвариантным к физической природе используемых в нем факторов.

2. Адекватная и достоверная имитационная модель вращающейся печи прокали, воспроизводящая отклик реального объекта на единичный скачок с относительной погрешностью $4\pm 5\%$, с возможностью получения данных о распределении массы и температуры прокаливаемого слоя во времени и по длине печи, позволяющая более полно учесть влияние на объект управления возмущающих факторов и параметров, характеризующих его состояние.

3. Метод определения комбинации управляющих воздействий многомерной системы управления, обеспечивающей наименьшее отклонение температурного профиля при различных значениях возмущающих воздействий. Для рассматриваемой печи прокали катализаторов крекинга наилучшая возможность компенсации возмущений имеет место при следующей комбинации управляющих параметров: температура сырья, расход газа и воздуха.

4. Многомерная модельно-предикторная система управления печью прокали, с двухкритериальным алгоритмом снижения времени отклика и погрешности регулирования, в котором соответствие текущего состояния объекта управления одному из упомянутых критериев производится с помощью логического алгоритма с интервальной неопределенностью.

5. Система управления процессом прокали катализаторов крекинга, построенная на основе предложенных моделей и алгоритмов с непосредственным измерением температуры прокаливаемого слоя в точках, удаленных от торцов вращающейся печи, а также с необходимым набором интуитивно понятных и дружественных по отношению к пользователю экранных интерфейсов, содержащих наряду с технологическими параметрами информацию об экономической эффективности производимого катализатора при его использовании в технологическом процессе крекинга.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Новизна схемы причинно-следственных связей влияния оптимального температурного режима на всех стадиях прокали на эксплуатационные и каталитические показатели катализатора и воздействия последних на экономическую эффективность крекинга, как целевого (финишного) процесса, заключается в объединении отличающихся по своей физической природе факторов в единую целевую функцию оптимизации с экономической природой.

2. Новизна имитационной модели вращающейся печи состоит в интерпретации моделируемых процессов в виде двух взаимосвязанных частей: диффузионного адиабатического факела, а также секционного тепло- и массопереноса по длине барабанной печи, представленных для различных фазовых состояний в виде совокупности заданного числа элементарных звеньев.

3. Новизна метода определения набора регулирующих воздействий для многомерных систем управления вращающимися печами, обеспечивающих мини-

мальное отклонение температурного профиля при различных значениях возмущающих воздействий, заключается в имитационном моделировании характера перемещения объекта управления в пространстве состояний при изменении тестируемого управляющего воздействия с одновременным включением остальных воздействий в контур абстрактного идеального регулятора.

4. Новизна многомерного управления с адаптивным алгоритмом оптимизации заключается в использовании логического регулятора с интервальной неопределенностью для выбора приоритета в двухкритериальной оптимизации вектора управления с целью минимизации времени отклика системы на возмущающие воздействия и снижения погрешности регулирования при сохранении устойчивости системы.

5. Новизна программно реализованной системы управления процессом прокалики катализаторов крекинга состоит в использовании алгоритма с интервальной неопределенностью, непосредственном измерении температуры прокаливаемого слоя в удаленных от торцов вращающегося барабана точках с помощью термоэлектрического датчика температуры с беспроводным преобразователем, а также в индикации на экранных интерфейсах наряду с технологической информацией показателей экономической эффективности производимого катализатора при его использовании в технологическом процессе крекинга.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются допустимым ($2,3 \div 3,7$) % расхождением результатов экспериментальных исследований, проведенных непосредственно на печи прокалики катализаторов крекинга и вычислительных экспериментов на её имитационной модели, а также корректным использованием методов и моделей теорий имитационного моделирования, горения и теплопередачи, автоматического управления и линейной алгебры.

Практическая ценность результатов диссертационной работы:

1. Разработанный математический метод определения оптимального теплового режима прокалики по известным зависимостям показателей качества каталитического крекинга от параметров теплового режима прокалики катализатора с использованием сравнительно небольшого объема лабораторных анализов работы пилотной установки крекинга в кипящем слое, а также эксплуатационных характеристик прокалочной печи, позволил сформулировать задание для построения многомерной системы управления температурным профилем печи.

2. Многомерная модельно-предикторная система управления печью прокалики по результатам имитационного моделирования позволила повысить экономическую эффективность целевого процесса крекинга на 5,56 % по сравнению с использованием катализатора, прошедшего стадию прокалики с существующей системой управления. Экономический эффект от внедрения составил 625 (шестьсот двадцать пять) рублей в год на одну тонну производительности установки крекинга.

3. Внедрение предложенных моделей и алгоритмов позволило провести реализацию многомерной системы управления для прокалики катализаторов крекинга с минимальными финансовыми и трудовыми затратами и без снижения её надежности.

Реализация результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы внедрены в:

– систему управления стадией прокалики производства катализаторов Ишимбайского специализированного химического завода катализаторов (Россия, Республика Башкортостан, г. Ишимбай).

– курс лабораторных занятий по учебной дисциплине "Интегрированные системы проектирования и управления" в филиале ФГБОУ ВПО "Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ)" в г. Стерлитамаке (Республика Башкортостан, Россия).

Апробация диссертационной работы. Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на следующих конференциях и семинарах:

– Всероссийской научно-технической конференции "Нейроинформатика-2011" (Москва, 2011 г.);

– Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи "Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения" (Уфа, 2010 г.);

– Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами» (Уфа, 2011 г.);

– Научно-практической конференции "Наукоёмкие технологии в машиностроении" (Ишимбай, 2011 г.);

– Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств" (Уфа, 2010 г.).

Публикации. В рамках диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ: 8 научных статей (из них 5 – в рецензируемых журналах из списка ВАК); 7 – в виде тезисов докладов в сборниках материалов конференций; 2 свидетельства Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (Роспатент) о государственной регистрации программ для ЭВМ и один патент РФ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа изложена на 189 страницах машинописного текста, и включает в себя введение, пять глав, 60 рисунков, 9 таблиц, библиографический список из 116 наименований на 11 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, приведены результаты, имеющие научную новизну и практическую ценность, сведения о внедрении результатов, апробация работы и публикации, представлена информация о структуре и объеме работы.

В первой главе произведено описание печи прокатки как объекта управления, проанализирована позиция прокаточного аппарата в технологической цепи производства катализаторов в целом и показана его ключевая роль в формировании эксплуатационных характеристик катализатора. Для рассматриваемого объекта выявлены проблемы аналитического описания и разработки управляющих алгоритмов в рамках классической теории управления. Проанализированы существующие схемы управления процессом прокатки катализаторов крекинга и выявлены их недостатки, устранение которых в рамках используемых концепций управления не представляется возможным.

Рассмотрены основные варианты построения многосвязного регулирования, известные в практике внедрения в системы управления вращающимися печами прокатки катализаторной промышленности. Их детальное рассмотрение выявило ряд недостатков, для преодоления которых необходимо использование концепций «продвинутого» управления (АРС). Обозначены ключевые проблемы, препятствующие внедрению АРС в системах управления вращающихся печей прокатки катализаторов, на основании которых сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе произведен анализ закономерностей процессов термообработки цеолитсодержащих катализаторов крекинга. Среди них выделены следующие основные физико-химические превращения: выделение остаточной воды из микропор катализатора, деалюминация кристаллов цеолитов, аморфизация каолина. Показан качественный характер влияния данных процессов на основные эксплуатационные показатели – стойкость к истиранию, удельная поверхность, селективность. По результатам анализа выделены 4 стадии прокаливания микросферы катализатора, в соответствии с которыми выделены группы параметров катализатора, испытывающих существенное влияние со стороны условий протекания соответствующего этапа термообработки.

Предложен метод определения оптимальных значений параметров температурного режима прокатки с точки зрения экономической эффективности каталитического крекинга, как целевого (финишного) процесса. Влияние каждого из параметров температурного режима на экономическую эффективность процесса крекинга (ЭЭПК) отражено на схеме причинно-следственных связей (рисунок 1). Для каждой из ветвей этой схемы рассмотрены эмпирические зависимости «температурный профиль печи – условия течения физико-химических превращений прокаливаемой микросферы – показатели качества катализатора – удельный выход и фракционный состав продуктов крекинга – экономическая эффективность процесса крекинга». Произведена аппроксимация и математический анализ полученных выражений. В результате получен температурный профиль печи в координатах «Время – температура» и «Положение по длине печи – температура», обеспечивающий максимальную экономическую отдачу установки крекинга в кипящем слое как целевого потребителя производимого катализатора.

Проанализированы технологические и возмущающие факторы, существенно влияющие на температурный профиль печи. В числе технологических факторов выделены следующие показатели: расход топливного газа (F_T); расход воздуха на разбавление (F_P); температура воздуха на разбавление (T_P); температура прокаливаемого сырья на входе в печь (T_C). Из возмущающих факторов выделены температура ок-

ружающего воздуха (T_B) и влажность сырья, поступающего на прокалку (L_C). В качестве параметров состояния печи прокалики катализаторов крекинга выбраны температура газовой фазы холодного торца печи ($T_{Г3}$), температура катализатора в точках, отстоящих на следующих расстояниях от точки загрузки сырья в печь: 1,85 м (T_{K1}); 4 м (T_{K2}); 16,8 м (T_{K3}).

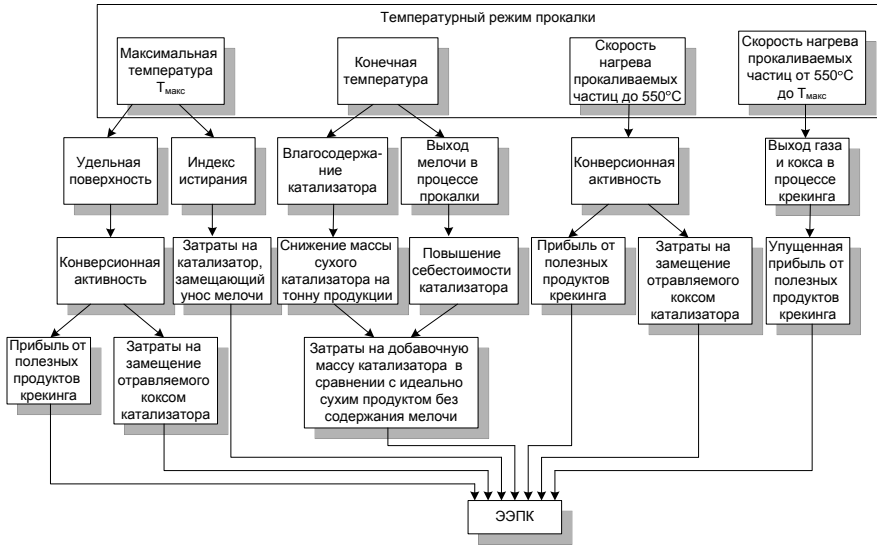


Рисунок 1 – Влияние температурного режима прокалики катализатора на ЭЭПК

По результатам анализа построена концептуальная модель печи прокалики микросферических катализаторов (рисунок 2, а).

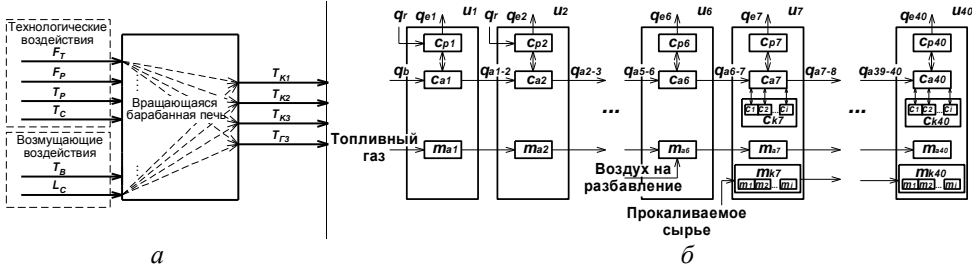


Рисунок 2 – Общая концептуальная модель (а) и схема математической модели (б) тепло- и массопереноса по длине прокалочной печи

В соответствии с концептуальной моделью установлено влияние входных сигналов расхода топливного газа (F_T), расхода (F_P) и температуры (T_P) воздуха на разбавление, температуры (T_C) и влажности (L_C) сырья на прокалку, температуры окружающей среды (T_B) на промежуточные параметры (показатели адиабатического

диффузионного факела, переменные теплового состояния газовой фазы, конструктивных составляющих и прокаливаемого сыпучего компонента по длине печи), а также влияние входных сигналов и промежуточных параметров на температуру в контрольных точках (T_{Kl+3}) температурного профиля печи прокалики катализаторов крекинга.

Для более полного учета особенностей, связанных с микросферическим строением прокаливаемых частиц и попутным движением последних с потоком дымовых газов, известная из практики моделирования тепловых процессов во вращающихся печах модель адиабатического диффузионного факела дополнена секционной моделью тепло- и массопереноса по длине печи (рисунок 2,б). Входными элементами для массопереноса газовой фазы являются горелка топки (u_1) и точка ввода воздуха на разбавление (u_6). Приток тепла в систему осуществляется за счет теплоты сгорания, передаваемой с дымовыми газами (q_b), а также тепловой энергии излучения факела (q_{ei}). Далее тепло последовательно передается между звеньями (q_{ai-j}), накапливаясь в тепловых емкостях стенок (c_{pi}) и газовых составляющих (c_{ai}). Для учета потерь введены потоки рассеяния тепла в окружающую среду от наружных стенок каждого звена (q_{ei}). Масса газовой составляющей (m_a) пересчитывается с учетом изменения её температуры в каждом звене. В процессы тепло- и массопереноса звеньев u_7 - u_{40} включается сыпучий компонент – прокаливаемое сырье, представленное стеками массы (m_{ki}) и теплоемкости (c_{ki}).

По результатам математического описания в среде MATLAB построена имитационная модель печи прокалики, достоверность и адекватность которой установлена экспериментально на физической модели. Расхождение результатов эксперимента и имитационного моделирования по отклику температуры холодного конца печи на ступенчатое изменение расхода и температуры подаваемого воздуха составили 2,3 % и 2,5 % соответственно. Кроме того, адекватность имитационной модели подтверждена результатами анализа полученных кривых распределения температуры корпуса печи, газовой фазы и прокаливаемого слоя по длине печи, а также сравнением данных отклика температуры холодного торца печи на ступенчатый сигнал расхода топливного газа для реального объекта и имитационной модели. Среднеквадратичное отклонение результатов моделирования от экспериментальных составило 3,7 %.

В третьей главе разработан метод оценки комбинации управляющих воздействий по интегральной величине значений минимально достижимой ошибки регулирования при изменении возмущающего параметра внутри заданного диапазона. Она определяется в результате включения тестируемого набора управляющих воздействий в контур абстрактного идеального регулятора. В качестве базисной точки в пространстве состояний, относительно которой необходимо оценивать отклонение многосвязного объекта, применительно к рассматриваемой печи принят технологический режим и совокупность возмущающих воздействий, при которых устанавливается оптимальный температурный профиль печи по прокаливаемому продукту. Параметры такого режима прокалики представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Оптимальные значения входных параметров моделируемого технологического процесса прокалики катализаторов крекинга

Параметр	Значение
Расход топливного газа	200 м ³ /ч
Расход воздуха на разбавление	2200 м ³ /ч
Температура воздуха на разбавление	20 °С
Начальная температура прокаливаемого продукта	120 °С
Температура наружного воздуха	20 °С
Влажность сырья на прокалику	15 %

Предложенным методом проанализированы различные комбинации выделенных в главе 2 технологических воздействий, осуществляющих регулирование выходов многосвязной печи прокалики катализаторов крекинга с минимальным взаимовлиянием. Показана несостоятельность целенаправленной коррекции температурного профиля средствами существующей одномерной системы управления, а также недостаточность применения комбинации двух управляющих воздействий (расход топливного газа, расход воздуха на разбавление).

На имитационной модели печи прокалики катализаторов крекинга установлено, что температура воздуха на разбавление в комбинации с расходом топливного газа и расходом воздуха на разбавление не влияет на качество стабилизации температурного профиля. По этой причине управляющий параметр «Температура воздуха на разбавление» исключен из рассмотрения. Для оставшейся тройки управляющих воздействий (расход топливного газа, расход воздуха на разбавление, влажность сырья на прокалику) показана теоретическая возможность эффективного воздействия на температуру прокаливаемого слоя в контрольных точках профиля печи как на выходы многосвязного объекта с минимальным взаимным влиянием.

В четвертой главе рассмотрены различные концепции управления печью прокалики катализаторов крекинга как многосвязным технологическим объектом. С учетом специфики рассматриваемой печи прокалики выбрана парадигма модельно-предикторного управления. В качестве модели объекта предложена нейросетевая динамическая структура по нелинейной авторегрессионной схеме (рисунок 3). Выбраны количество слоев, распределение нейронов по слоям, а также методы обучения и адаптации нейронной сети.

Входной сигнал, в качестве которого выступает очередной трехмерный элемент управляющего вектора, обрабатывается входным слоем, состоящим из 5 нейронов. Динамические свойства нейронной сети (НС) определяются линиями единичных задержек как на входе рекуррентной НС (TDL_{in}), так и в петле обратной связи (TDL_{fb}). Обучение и адаптация НС производится подстройкой порогов b_{ij} и весовых коэффициентов методом обратного распространения ошибки по алгоритму оптимизации Левенберга–Марккарта между элементами: TDL_{in} и входным слоем ($IW(a)_{bc}$, где a – номер элемента TDL, b – номер входа, c – номер нейрона входного слоя); входного и выходного слоев ($LW_{f,g}^{d,e}$, где d, e – номера слоев, f, g – номера нейронов во входном и выходном слоях соответственно); TDL_{fb} и входным слоем (

$LW^{d,e} \left(\begin{matrix} \curvearrowright \\ j_{ki} \end{matrix} \right)$, где h – номер выхода НС, i – номер элемента TDL_{fb} , j – номер нейрона входного слоя).

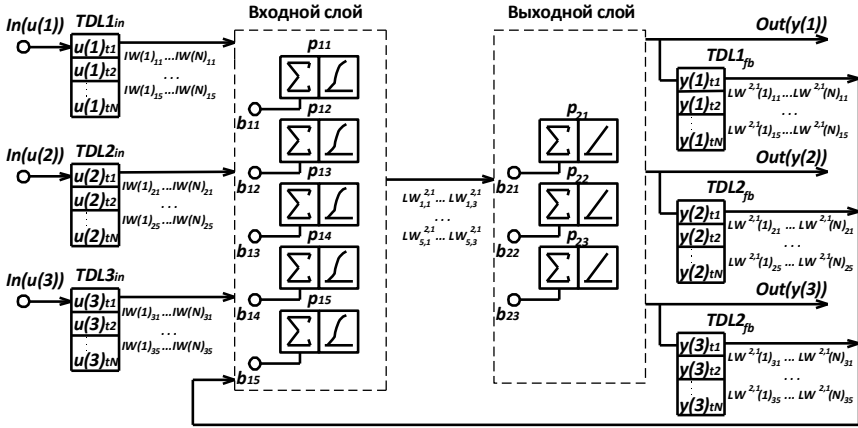


Рисунок 3 – Нейросетевая динамическая модель печи прокатки

Произведен выбор базовых параметров модельно-предикторной системы управления, в том числе размеры горизонта управления N_u и предикации N_y в единицах времени, величина шага дискретизации по управлению Δt_{su} , горизонт управления в шагах предикации. В качестве целевой функции задачи оптимизации последовательности управляющих воздействий (u_m) выбрано отклонение последовательности прогнозируемых значений y_m температуры от заданных значений y_p :

$$\sum_{k=1}^3 \left(\sum_{i=1}^{N_u-1} (y_{pki} - y_{mki})^2 \right) = f(u_m) \rightarrow \min; u_m \in (u_{min}, u_{max}). \quad (1)$$

Полученный начальный вариант управляющей системы подвергнут исследованию с имитационной моделью печи прокатки, которые выявили неустойчивость замкнутой системы «Имитационная модель печи – многомерный модельно-предикторный регулятор», построенной по классической методологии модельно-предикторного управления. На основе вышеизложенного сделан вывод о необходимости регуляризации оптимизируемой функции с тем, чтобы сделать ее более монотонной и тем самым уменьшить плотность распределения точек локального минимума. Для этого применено известное из классической теории МПУ добавление к минимизируемой квадратичной сумме отклонений девиации управляющих воздействий, после чего минимизируемая функция в задаче оптимизации алгоритма МПУ приобрела следующий вид:

$$f(u_m) = k_e \sum_{k=1}^3 \left(\sum_{i=1}^{N_u-1} (y_{pki} - y_{mki})^2 \right) + k_u \sum_{k=1}^3 \left(\sum_{i=1}^{N_u-1} (u_{mk(i+1)} - u_{mki})^2 \right), \quad (2)$$

где k_e, k_u – весовые коэффициенты приоритета задачи оптимизации по отклонению и девиации соответственно.

В результате перехода на двухкритериальную оптимизацию обеспечена устойчивость системы, однако побочным эффектом явился существенный рост времени отклика на возмущение. Поиск путей адаптивного ослабления приоритета оптимизации по девиации вектора управления привел к построению метода грубого определения интенсивности компенсирующих приращений управляющих воздействий для возврата объекта в стационарную точку пространства состояний.

С этой целью рассмотрено семейство зависимостей «Вход-выход» для каждого регулируемого параметра печи прокалки катализаторов крекинга в автономном режиме. Тем самым получена матрица коэффициентов передачи K , которая после операции обращения позволяет осуществить оценку необходимого компенсирующего управляющего воздействия U_K по величине текущего отклонения объекта T :

$$U_K = -K^{-1} \cdot T, \quad (3)$$

где знак минус перед правой частью выражения (3) введен для вычисления компенсирующих воздействий.

Значения, полученные с помощью данного «многомерного статического компенсатора» (МСК) можно использовать для идентификации зон регулирования с различным значением приоритета минимизации девиации в алгоритме оптимизации МПУ. Для этого минимизируемая функция (2) приведена к виду:

$$f(u_m) = k_e \sum_{k=1}^3 \left(\sum_{i=1}^{N_u-1} (y_{pki} - y_{ki})^2 \right) + \sum_{k=1}^3 \left(k_{uk} \sum_{i=1}^{N_u-1} (u_{mk(i+1)} - u_{mki})^2 \right), \quad (4)$$

то есть для каждого управляющего воздействия в задаче оптимизации введен отдельный коэффициент (k_{uk}), минимизирующий значение девиации.

Для управления коэффициентами приоритета двухкритериальной оптимизации по выходу МСК рассмотрены существующие концепции непрерывного и логического вывода. После выявления автоколебаний в результате применения непрерывных функций к обработке выходов МСК, протестированы два алгоритма вывода: бинарный и с интервальной неопределенностью. Последний отличается особенностью идентификации величины выхода МСК (Δu_k) совокупностью терм-множеств, описываемых функциями принадлежности прямоугольной формы (рисунок 4).

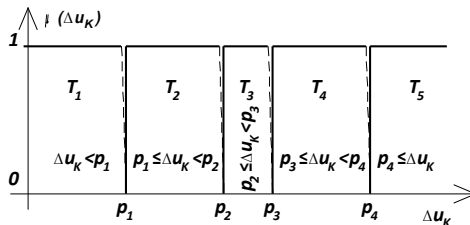


Рисунок 4 – Размещение термов на оси параметра u_k

Каждому терму ($T_1 \dots T_5$) на этой шкале отводится отдельный участок, который не перекрывается соседними термами. Такие ограничения позволяют каждое значение непрерывной физической величины представить одним из термов, который имеет прямоугольную форму функции принадлежности. Благодаря такому распределению термов алгоритм с интервальной неопределенностью объединяет в себе быстроедействие алгоритмов на основе двузначной логики с функциональностью нечетких регуляторов, обеспечивая при этом меньшую погрешность при операциях фаззификации и дефаззификации.

Результат моделирования различных вариантов замкнутой системы при подаче ступенчатого воздействия на вход канала возмущения показал, что алгоритм бинарного выделения зон регулирования по выходу МСК снизил среднеквадратичное отклонение при обработке реакции на возмущение на $(32 \div 76) \%$, тогда как алгоритм с интервальной неопределенностью – на $(65 \div 82) \%$.

Оценка эффективности вариантов разработанной системы МПУ с классической двухкритериальной оптимизацией вектора управления (МПУ1), дифференцированной двухкритериальной оптимизацией по выходу «многомерного статического компенсатора», логическим алгоритмом с интервальной неопределенностью (МПУ2), а также существующей одномерной ПИД-системы (ПИД) произведена по величине общих потерь каталитического крекинга в кипящем слое как целевого процесса (рисунок 5).

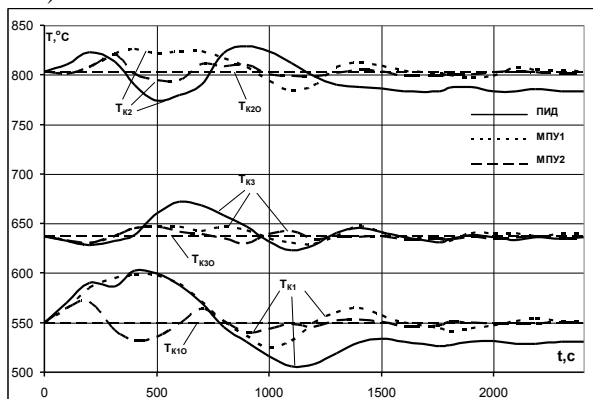


Рисунок 5 – Результаты моделирования температуры прокаливаемого слоя в контрольных точках печи при ступенчатом возмущающем воздействии

Из кривых переходного процесса на рисунке 5 следует, что вариант системы с МПУ2 возвращает объект к заданному состоянию за меньший интервал времени, чем с МПУ1. Приведенный в таблице 2 анализ результатов функционирования упомянутых вариантов показывает, что среднеквадратичная ошибка управления в режиме МПУ2 ниже, чем с МПУ1 на 3,68 %, а в сравнении с ПИД-управлением – на 37,3 %. Это означает, что более качественное регулирование имеет место при использовании алгоритма МПУ2. Также произведена оценка экономических потерь целевого

процесса крекинга в результате смещения температурных показателей в зонах 1 и 2 при использовании стандартного ПИД-регулирования. Расчет приведенных потерь осуществлен по аппроксимирующим функциям соответствующих эмпирических зависимостей. В числе составляющих учтены упущенная прибыль от смещения состава продуктов крекинга, увеличение затрат на замещение отравляемого коксом катализатора, рост затрат на замещение уноса мелочи вследствие снижения стойкости к истиранию, повышение себестоимости в результате повышения выхода мелочи в процессе прокалики. Сумма данных потерь составила 710 руб. на тонну производительности установки крекинга, что составляет 6,32 % от общей прибыли.

Таблица 2 – Сводные результаты тестирования вариантов системы управления печи прокалики катализаторов крекинга

Параметры	ПИД			МПУ1			МПУ2		
	T_{K1}	T_{K2}	T_{K3}	T_{K1}	T_{K2}	T_{K3}	T_{K1}	T_{K2}	T_{K3}
Среднеквадратичное отклонение, °С	17,85	16,68	15,92	10,61	11,32	11,43	9,34	9,73	10,91
Отклонение равновесной температуры после возмущения, °С	-26,8	-28,2	0,74	-0,31	0,45	0,69	0,4	-0,15	0,69
Отклонение равновесной температуры после возмущения, %	-4,9	-3,5	0,12	-0,056	0,056	0,11	0,072	-0,019	0,11
Влияние смещения равновесной температуры на общую прибыль процесса крекинга, тыс.руб./т	-0,676	-0,03	-0,005	-0,003	-0,004	-0,001	-0,004	-0,002	-0,001
Влияние смещения равновесной температуры на общую прибыль процесса крекинга, %	-5,95	-0,28	-0,045	-0,028	-0,032	-0,009	-0,032	-0,016	-0,008
Общие экономические потери, %	6,32			0,069			0,056		

Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод о высокой эффективности модельно-предикторного регулирования, использующего алгоритм с интервальной неопределенностью для выбора критерия оптимизации в системе управления вращающейся печи прокалики катализаторов крекинга.

В пятой главе решены проблемы практической реализации предлагаемой многомерной системы управления вращающейся печи прокалики производства катализаторов крекинга. Предложено съём информации о состоянии вращающейся печи прокалики производить комбинацией средств прямого измерения инфракрасными пирометрами соотношения и термопары с беспроводным термопреобразователем. Неотъемлемой компонентой данной системы является программный анализ, позволяющий совместить результаты измерений вращающегося вместе с барабаном печи преобразователя термо-ЭДС и неподвижных наружных пирометров.

Для программной реализации МПУ печи прокалики выбрана инструментальная среда инженерных вычислений MATLAB. В графическом интерфейсе раз-

рабочего пакета пользователя создан набор экранных форм, обеспечивающих удобный доступ специалиста-настройщика системы к основным параметрам алгоритмов оптимизации, нейросетевой модели и функции адаптивного снижения инерционности на основе МСК и инструмента принятия решений на основе алгоритма с интервальной неопределенностью. Разработанное программное обеспечение содержит средства отображения прогнозируемых параметров катализатора, а также технологическую информацию и показатели экономической эффективности производимого катализатора при его использовании в технологическом процессе крекинга.

Архитектура взаимодействия интеллектуальной надстройки со SCADA-системой по технологии OPC со свободно распространяемым OPC DA сервером Gray-Simulator с расположением на отдельном ПК позволяет интегрировать разработанный программный компонент с наименьшими потерями по надежности и без существенного увеличения процессорного времени.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Составлена схема причинно-следственных связей влияния оптимального температурного режима на основные показатели катализатора и воздействия последних на экономическую эффективность крекинга, как целевого (финишного) технологического процесса, в которой различные по своей физической сущности факторы объединены в единую целевую функцию оптимизации с экономической природой.

2. Построена имитационная модель вращающейся печи прокали катализаторов крекинга, воспроизводящая отклик реального объекта на единичный скачок задания с относительной погрешностью $4 \div 5$ %, и позволяющая получить данные о распределении массы и температуры прокаливаемого слоя во времени и по длине печи, с учетом влияния возмущающих факторов и параметров, характеризующих состояние объекта управления.

3. Предложен метод определения комбинации регулирующих воздействий многомерной системы управления, обеспечивающих наименьшее отклонение регулируемых параметров при различных значениях возмущающих воздействий. Для рассматриваемой печи прокали катализаторов крекинга как объекта управления такими параметрами являются: температура сырья, расход газа и воздуха.

4. Разработана многомерная модельно-предикторная система управления печью прокали с двухкритериальным алгоритмом оптимизации с интервальной неопределенностью, позволившая повысить эксплуатационные и каталитические свойства продукта. Экономический эффект целевого технологического процесса (каталитического крекинга) от внедрения предложенных моделей и алгоритмов по сравнению с использованием катализатора, прошедшего стадию прокали с существующей системой управления, составил 6,32 %.

5. На основе разработанных моделей и алгоритмов построена система управления процессом прокали катализаторов крекинга, в которой экраны интерфейсы, наряду с технологическими параметрами, содержат информацию об экономической эффективности производимого катализатора при его использовании в

технологическом процессе крекинга, а непосредственное измерение температуры прокаливаемого слоя в удаленных от торцов точках вращающейся печи осуществляется термопарой, укомплектованной беспроводным преобразователем.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. SCADA-система на основе многомерного четкого логического регулятора для управления цементной печью / А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2010. Т. 14, – №4(39). – С. 119–126.

2. Управление печью прокалики цеолитсодержащих катализаторов крекинга нефтепродуктов методом плавающего горизонта с использованием нейросетевой модели / Р. Ф. Габитов, А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010. – №12. – С. 12–20.

3. Оптимизация температурного режима прокалики катализаторов крекинга по экономическим показателям технологического процесса / А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов // Башкирский химический журнал. 2011. – Т.18, – №2. – С. 106–110.

4. Авторегрессионная нейронная сеть для модельно-предикторного управления печью прокалики катализаторов крекинга / М. Б. Гузаиров, Р. Ф. Габитов, А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева// Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2011. – Т. 20, – №3. – С. 216–223 (Статья на англ. яз.).

5. Обоснование размерности регулятора для печи прокалики микросферических катализаторов крекинга / А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2011. – №10. – С. 12-20.

В прочих изданиях

6. Моделирование конверсионной активности катализаторов крекинга нефтепродуктов на основе полиномиальной аппроксимирующей нейронной сети / А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов // Интеллектуальные системы управления / под ред. акад. С. Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2010. – с.236–240.

7. Многомерные логические регуляторы с переменными, идентифицированными совокупностью бинарных аргументов / А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов // Интеллектуальные системы управления / под ред. акад. С. Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2010. – С. 310–314.

8. Основы построения многомерных четких логических регуляторов / А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов // Интеллектуальные системы: Труды Девятого международного симпозиума / Под ред. К. А. Пупкова. М.: РУСАКИ, 2010. – 773с., С. 41-45.

9. SCADA-система приготовления цеолитной суспензии, использующая многомерный нечеткий логический регулятор / Р. Ф. Габитов, А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева // CSIT'2010: Материалы 12-й Международной конференции по компьютерным нау-

кам и информационным технологиям / Россия, Москва – Санкт-Петербург, 13-19 сентября 2010. – 243с., С. 42-46 (Статья на англ. яз.).

10. Нейросетевое модельно-предикативное управление печью прокалики цеолитсодержащих катализаторов крекинга нефтепродуктов / Р. Ф. Габитов, А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева // Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, 21-22 октября 2010. Уфа: УГНТУ, 2010. – 426с., С. 43-50.

11. Метод плавающего горизонта с многомерной нейросетевой моделью в управлении печью прокалики катализаторов / Р. Ф. Габитов // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с элементами научной школы для молодежи. Уфа: УГАТУ, 2010. – 259с., С.26-28.

12. Концепция четкого логического управления стохастическими процессами с неопределенностями / Р. Ф. Габитов // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб.тр. в 5 т. Т. 2. Уфа: УГАТУ, 2010. – 352с., С. 241–243.

13. Закономерности процессов термообработки цеолитсодержащих катализаторов крекинга / А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов // Развитие научной деятельности в малых городах на основе сотрудничества с предприятиями и участниками Болонского процесса: Материалы Международной научно-практической конференции (г. Мелеуз, 22-23 марта 2011г.). Уфа: Вагант, 2011. – 484 с., С. 52–58.

14. Оптимизация температурного режима прокалики катализаторов крекинга по экономическим показателям процесса крекинга / Р. Ф. Габитов // Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа: УГАТУ, 2011. – 326с., С. 77–83.

15. Моделирование прокалики цеолитсодержащих катализаторов в среде Simulink / Р. Ф. Габитов // Научные технологии в машиностроении: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (г.Ишимбай, 12-14 мая 2011 г.). Уфа: УГАТУ, 2011. – 145 с., С. 46–48.

16. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2010612542. Программа преобразования экспериментальных данных о катализаторе крекинга нефтепродуктов в набор обучающих выборок искусственных нейронных сетей / Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов, А. И. Каяшев (RU). М. : Роспатент, 15.02.2010.

17. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2010617761. Программа имитационного моделирования системы «Печь прокалики катализаторов крекинга – многомерный гибридный нейросетевой предикативный регулятор» / Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов, А. И. Каяшев (RU). М. : Роспатент, 23.11.2010г.

18. Патент РФ №2445669. Е. А. Муравьева, А. И. Каяшев, Р. Ф. Габитов Четкий логический регулятор для управления технологическими процессами. М.: Роспатент, 20.03.2012г.

Диссертант



Р. Ф. Габитов

ГАБИТОВ Руслан Фаритович

МНОГОМЕРНОЕ МОДЕЛЬНО-ПРЕДИКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОКАЛКОЙ
КАТАЛИЗАТОРОВ КРЕКИНГА, ОСНОВАННОЕ НА АЛГОРИТМЕ
С ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ

Специальность 05.13.06
«Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(в промышленности)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 11.04.2012. Формат 60X84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр. – отт. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 712.

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12