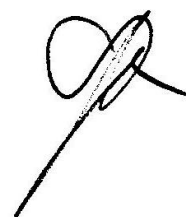


На правах рукописи



ФОМИН АНДРЕЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПЕЧАМИ ОТЖИГА МЕТАЛЛА НА
ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ
РЕГУЛЯТОРОВ**

Специальность 05.13.06. – «Автоматизация и управление технологически-
ми процессами и производствами» (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированных и информационных систем управления» Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель

Еременко Юрий Иванович

почетный работник высшего образования РФ
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Автоматизированных и информационных систем управления,
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСИС

Официальные оппоненты

Салихов Зуфар Гарифуллович,

заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук»

Бажанов Александр Геральдович

кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Защита состоится « 6 » июня 2018 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.13 при ФГАОУ ВПО Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте НИТУ «МИСиС» (<http://misis.ru/science/dissertations/2018/3415/>)

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Лычев Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень ее разработанности. Черная металлургия России является одной из базовых и интенсивно развивающихся отраслей отечественной промышленности. Металлургический комплекс является материало- и энергоемким производством, потребляющим значительное количество ресурсов и топлива.

Одними из основных потребителей энергии являются нагревательные печи, в частности, в составе цехов проката металла. Снижение доли брака по термообработке, с учетом материала и энергии, потраченных на его производство, даже на доли процента может принести существенный экономический эффект. В связи с этим актуальной является задача повышения качества управления подобными объектами.

В подавляющем большинстве случаев для управления ими используются линейные ПИ или ПИД-регуляторы. Однако, нелинейность печи, вызванная различием температурных режимов, масс садки, действия возмущений, таких как, например, работа штор загрузки/выгрузки металла, влиянием соседних зон печи друг на друга, изменение теплотворных свойств газа, приводит к снижению качества регулирования температуры, результатом чего может быть брак продукции. Среди всех нагревательных печей прокатного производства в наибольшей степени указанная нестационарность свойственна печам отжига.

Одним из способов решения данного противоречия между линейностью алгоритма управления и нелинейностью самого объекта является использование оптимальных и адаптивных систем управления. Применению методов оптимального управления посвящены работы В.Н. Афанасьева, С.П. Круглова, А.А. Красовского, А.М. Летова, А.А. Павлова, И.К. Романовой, В.И. Уткина, Н.В. Фалдина, А.А. Колесникова, А.А. Фельдбаума, Н.Н. Карабутова, С.А. Красновой. Методы адаптивного управления отражены в работах В.Я. Ротача, А.Г. Александрова, А.М. Шубладзе.

Однако их применение сопряжено со следующими трудностями: для эффективного использования оптимальных систем необходимо наличие актуальной и адекватной математической модели объекта управления, что требует проведения процедуры идентификации. Сама же идентификация является отдельной сложной задачей и часто практически неосуществима в реалиях действующего непрерывного производства. Применение адаптивных методов настройки, использующих в качестве закона управления алгоритм, отличный от классического ПИ-алгоритма, сопряжено с трудностями, связанными с отсутствием ясного и структурно обоснованного алгоритма работы и результатов промышленных испытаний подобных регуляторов. Кроме того, низкий процент внедрения данного класса систем вызван настороженным отношением реального производства к отказу от ПИ-алгоритма и его замене на регулятор иного типа в сочетании со значительной стоимостью такой модернизации.

В связи с вышеперечисленным, одним из актуальных направлений в построении подобного класса систем является разработка методов адаптации, производящих подстройку параметров действующего на производстве ПИ-

регулятора в реальном масштабе времени.

Подобные методы оперативной адаптации ПИ-регуляторов можно условно выделить два подкласса:

1) классические методы, в основе которых лежит первичная идентификация объекта управления с последующим вычислением параметров регулятора. Разработка и применение классических методов настройки ПИД-регуляторов рассмотрено в работах В.Я. Ротача, Е.Г. Дудникова, В.Л. Бажанова. Основной проблемой данных подходов является сложность построения модели объекта управления в условиях производства. В частности, при использовании тестовых сигналов, подаваемых в канал управления, результаты идентификации могут различаться даже для одинаковых начальных условий эксперимента.

2) интеллектуальные методы: экспертные системы, нечеткая логика, нейронные сети. Вопросам применения интеллектуальных методов в задаче настройки ПИ/ПИД-регулятора посвящены работы Ю.И. Кудинова, Н.Д. Егупова, А.А. Ускова, С. Омату, М.Д. Климовицкого, Л.Д. Певзнера. Перспективность их применения определяется тем фактом, что в реальности инженер АСУ ТП производит настройку регулятора на основе своих знаний и опыта, при этом ему не требуется модель ОУ. Все это может быть в некоторой степени учтено при использовании интеллектуальных методов, позволяющих моделировать поведение человека. Однако решения на базе нечеткой логики и экспертных систем остаются привязанными к динамике конкретного ОУ ввиду отсутствия механизмов оперативного обучения. Нейронные сети обладают механизмами обучения, однако, его не требуется вести постоянно (что определяет проблему выбора моментов для проведения данной процедуры), так как возможны ситуации, когда необходимость настройки коэффициентов отсутствует. Кроме того, существует задача не только обучения нейронной сети, но и необходимости оперативной настройки её параметров.

Исходя из вышеперечисленных особенностей печей отжига и анализа методов настройки ПИ-регуляторов, актуальной является научно-техническая задача повышения качества управления печами отжига металла за счет построения системы автоматической оперативной настройки параметров ПИ-регуляторов на основе интегрирования в единую систему аппарата нейронных сетей (НС) и метода их оперативной настройки.

Целью диссертационной работы является разработка адаптивной системы управления печами отжига, позволяющей повысить качество регулирования температуры, за счет разработки и применения интеллектуальной системы настройки ПИ-регулятора, синтезирующей в себе аппарат нейронных сетей с функцией настройки её параметров.

Задачи исследования. Достижение цели работы требует решения следующих задач:

- анализ теплотехнологических особенностей тепловых объектов управления металлургической промышленности с целью выявления объектов, задача адаптации для которых стоит наиболее остро;

- анализ применимости существующих методов настройки регуляторов на печах отжига с учетом теплотехнологических особенностей их работы;
- разработка подхода к построению системы адаптивного управления печью отжига на основе применения нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора: выбор структуры НС, методов обучения, создание базы правил. Моделирование работы нейросетевого настройщика в режиме переходных процессов на модели печи отжига;
- разработка метода компенсации влияния действующих на печь отжига возмущений с помощью нейросетевого настройщика и их классификация. Реализация в нейросетевом настройщике подсистемы, производящей настройку регулятора на режим возмущений: разработка базы правил, алгоритма определения типа возмущений. Моделирование работы настройщика в данном режиме;
- разработка алгоритма реализации предложенного способа адаптации с применением нейросетевого настройщика;
- программная реализация нейросетевого настройщика на базе контроллеров Siemens Simatic S7-300/400, проведение натурных лабораторных экспериментов.

Научные положения, выносимые на защиту:

- адаптивная система управления печами отжига металла с применением системы настройки параметров ПИ-регуляторов, включающей в себя аппарат нейронных сетей и базу правил с целью улучшения качества переходных процессов;
- база правил для нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора для печи отжига, в формализованном виде описывающая действия инженера-наладчика АСУТП по настройке ПИ-регулятора в режимах нагрева и остывания при ступенчатом изменении задания;
- способ компенсации влияния действующих на печь возмущающих воздействий с использованием нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора для повышения качества управления в установившемся режиме;
- алгоритм функционирования нейросетевой системы адаптации параметров ПИ-регулятора, позволяющий в реальном времени изменять коэффициенты регулятора в соответствии с изменением состояния печи отжига;
- программная реализация нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора на программируемых логических контроллерах на примере семейства контроллеров Siemens Simatic S7 300/400.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- предложен метод автоматической адаптации для системы управления печами отжига, отличающийся применением нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора;
- разработана база правил, обеспечивающая настройку параметров ПИ-регулятора при ступенчатой смене температурных уставок с учетом особенно-

стей режимов нагрева и остывания, формально описывающая действия инженера-наладчика АСУ ТП;

- предложен способ компенсации влияния возмущающих воздействий на печь отжига, основанный на коррекции параметров нейронной сети, в соответствии с динамикой возмущений;

- разработан алгоритм, реализующий функцию динамической коррекции параметров нейронной сети настройщика, обеспечивающий адаптацию коэффициентов ПИ-регулятора;

- предложен программно-технический комплекс, реализующий систему адаптивного управления печью отжига на основе семейства программируемых логических контроллеров Simatic S7 300/400.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке способа адаптации параметров ПИ-регулятора для печи отжига, который не требует в явном виде модели объекта управления и автономного предварительного обучения НС настройщика. Данный подход является развитием общей методологии интеллектуализации систем управления промышленными агрегатами.

Практическая значимость работы. Предложенный в работе нейросетевой настройщик параметров ПИ-регулятора реализован в виде программно-технического комплекса для контроллеров Simatic S7-300/400, что делает возможным его использование инженерами АСУТП, обслуживающими печи отжига без специальной подготовки. Его применение позволит без участия оператора, производить как первоначальную настройку ПИ-регуляторов печи, так и оперативную настройку в процессе работы при изменении её состояния.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы современной теории автоматического управления, интеллектуальные методы, такие как нейронные сети и экспертные системы. Методологическую и теоретическую основу диссертационной работы составили научные труды отечественных и зарубежных авторов в области металлургии, классических методов настройки ПИ-регуляторов, адаптивных и оптимальных систем управления, интеллектуальных систем управления.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается строгостью использования математических методов, результатами моделирования объекта и системы контроля и управления с помощью специализированного ПО Simulink Matlab, совпадением результатов натурных экспериментов на лабораторном оборудовании с результатами математического моделирования.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные практические результаты, полученные при разработке адаптивной системы управления, используются на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат» и рекомендованы к внедрению.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» в дисциплинах «Системы интеллектуального управления» и

«Адаптивные и оптимальные системы управления»

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 19 международных и всероссийских научно-технических конференциях: IV Всероссийская научная конференция молодых ученых с международным участием «Информатика, управление и системный анализ» (Тверь, 2016), International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Астана, 2017), International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Челябинск, Санкт-Петербург, 2016, 2017), Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами», (Волгоград, Самара, Пермь, 2015-2017), Международная научно-практическая конференция «Современные сложные системы управления» (Липецк, 2017), XXVI международный научный симпозиум «Неделя горняка- 2017» (Москва, 2017), Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) AS'2017 «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2017), Международная конференция «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий "ПМТУКТ"» (Воронеж, 2015-2017), Международная научно-практическая конференция «Современная металлургия нового тысячелетия» (Липецк, 2015-2016), Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (Старый Оскол, 2014-2017).

Связь исследований с научными программами: исследования велись в рамках научно-исследовательских работ РФФИ (13-08-00532-а, 15-07-0609215), гранта Президента РФ № 14.У30.15.4865-МК, а также в рамках выполняемой в настоящее время научно-исследовательской работы прикладных научных исследований Министерством образования и науки Российской Федерации, договор № 14.575.21.0133 (RFMEFI57517X0133).

Публикации. Основные результаты (научных исследований) диссертационной работе опубликованы в 26 научных работах, из которых 7 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК, 5 – в материалах публикаций, индексируемых в SCOPUS, 14 – в иных научных сборниках; также получено 5 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 патент на изобретение.

Структура и объемы работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 168 наименований, 2 приложений, содержит 67 рисунков и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы исследования, представлены основные результаты работы, определены их научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведено краткое содержание работы по главам, поставлена цель и обозначены задачи исследования.

В первой главе проведен анализ теплотехнологических особенностей тепловых объектов управления металлургической промышленности с целью выявления процессов, задача адаптации для которых наиболее актуальна. Также сделан вывод о целесообразности применения на данных объектах методов адаптивной настройки параметров ПИ-регуляторов.

Термическая печь – тепловой объект управления, служащий для термообработки различных металлических материалов. Результатом термической обработки является повышение качества изделий или придание обрабатываемому материалу дополнительных свойств. Термической обработке подвергаются все виды проката: листовой и сортовой прокат, бунт, проволока, рельс, труба, швеллер, лента и т.д. Процесс термообработки (отжига) металла характеризуется многократным изменением свойств объекта управления в широком диапазоне уставок и режимов нагрева, межзонными влияниями, действующими в виде возмущений, и, одновременно, высокими требованиями к качеству процесса термообработки, что говорит о необходимости проведения адаптации параметров существующих линейных регуляторов.

Изучены работы ученых в области классического ПИ-регулирования, применения оптимальных и адаптивных систем управления, проанализированы методы интеллектуального управления.

Разработка и применение классических методов настройки ПИД-регуляторов рассмотрено в работах В.Я. Ротача, Е.Г. Дудникова, В.Л. Бажанова. Применение методов оптимального управления предложено в работах В.Н. Афанасьева, С.П. Круглова, А.А. Красовского, А.М. Летова, А.А. Павлова, И.К. Романовой, В.И. Уткина, Н.В. Фалдина, А.А. Колесникова, А.А. Фельдбаума, Методы адаптивного управления отражены в работах В.Я. Ротача, А.Г. Александрова, А.М. Шубладзе, Н.Н. Карабутова, С.А. Красновой.

Вопросам применения интеллектуальных методов в задаче настройки ПИ/ПИД-регулятора посвящены работы Ю.И. Кудинова, Н.Д. Егупова, А.А. Ускова, С. Омату, М.Д. Климовицкого, Л.Д. Певзнера.

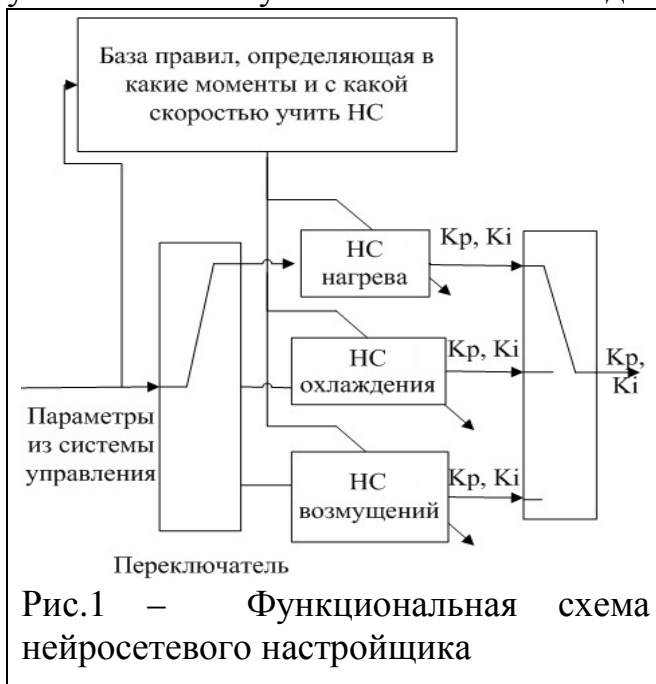
Во время проведения анализа существующих классических, а также адаптивных и оптимальных методов управления выявлены недостатки, приводящие к большой сложности или невозможности использования их на печи отжига. Ключевой недостаток этих методов состоит в необходимости адекватной математической модели для успешного функционирования. Кроме того, часть методов не имеет ясного для понимания технологическим персоналом и структурно обоснованного алгоритма работы. В связи с этим применение данной группы методов на печи отжига на сегодняшний момент не представляется возможным.

В процессе анализа интеллектуальных методов настройки ПИ-регулятора выявлены достоинства и недостатки таких методов как НС, нечеткая логика и ЭС. Выявленные недостатки не позволяют решить задачу настройки регулятора, используя лишь один из методов, поэтому для её решения предлагается использование комбинации из интеллектуальных методов. Предлагается использовать в единой системе аппарат экспертных систем и нейронных сетей. Данное сочетание позволяет учесть особенности функционирования печи отжига (с

помощью ЭС) и актуальное состояние и изменение характеристик печи в оперативном режиме управления (с помощью НС).

Во второй главе синтезирован нейросетевой настройщик параметров ПИ-регулятора. Синтез выполнен в несколько этапов: 1) синтез НС, определение её структуры (на основе подхода, предложенного Глущенко А.И.): количества нейронов, входных и выходных параметров, функций активации, 2) выбор методов обучения нейронной сети – экстремального метода обучения (ELM) для первоначальной инициализации и видоизмененного метода обратного распространения ошибки для обучения в оперативном режиме, 3) построение базы правил для режима переходных процессов. Опыт инженера-наладчика АСУТП формализован в виде условий. Они описывают ситуации, когда необходимо использовать и обучать НС, а следствия – необходимые значения скоростей обучения $\eta_{kp}^{(2)}$, $\eta_{ki}^{(2)}$ выходных нейронов, ответственных за коэффициенты П и И каналов регулятора. Если какое-либо из правил срабатывает, то происходит обучение нейронной сети.

Входами нейронной сети являются задание по температуре, выход ОУ в текущий момент, такт назад, и управляющее воздействие шаг назад. Скрытый слой представлен 12 нейронами. Функцией активации скрытого слоя является нелинейная функция сигмоидального вида. Семейство этих функций представлено широко применяемыми гиперболический тангенсом и сигмоидальной функцией. При этом анализ показал, что сигмоидальная функция активации, в отличие от гиперболического тангенса, позволяет учитывать знак ошибки при обучении сети, за счет отсутствия отрицательной области. Такая реализация позволяет, меняя знак скорости обучения выходного нейрона, соответственно уменьшать или увеличивать его выходной сигнал.



Количество нейронов в выходном слое определяется количеством настраиваемых параметров. Так как в данной работе рассматривается настройка ПИ-регулятора, то на выходе сети находятся два нейрона, ответственных за K_p и K_i коэффициента регулятора. Функция активации выходного слоя – линейная.

В нейронной сети реализовано три набора весовых коэффициентов, что позволяет иметь оптимальные коэффициенты для каждого из тепловых процессов: нагрева, остывания и компенсации возмущающих воздействий.

Необходимость в трех наборах коэффициентов обуславливается различным характером нелинейности объекта управления при нагреве и остывании.

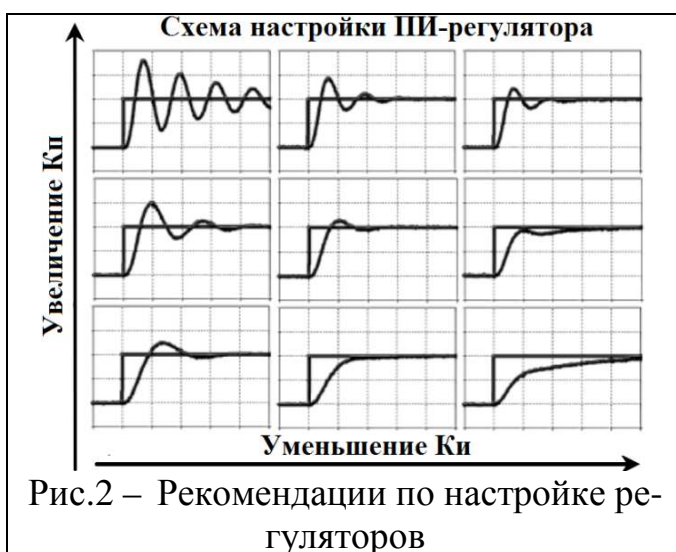
Компенсация возмущающих так же требует отдельного набора коэффициентов. Функциональная схема полученной системы показана на рис. 1.

Исследования показали, что в отличие от классического метода обратного распространения ошибки целесообразно ввести различные скорости обучения выходных нейронов, то есть вместо единой скорости $\eta_k^{(2)}$ для всех нейронов выходного слоя, вводятся две скорости $\eta_{kp}^{(2)}$ и $\eta_{ki}^{(2)}$ ответственные соответственно за скорость обучения первого нейрона (коэффициент K_p регулятора) и скорость обучения второго нейрона (коэффициент K_i регулятора). Данная реализация позволит проводить настройку одного коэффициента регулятора, не затрагивая другой. Необходимость такой реализации вызвана несколькими факторами:

1) порядок значений коэффициентов регулятора различен, что требует учета в виде различного порядка скоростей обучения,

2) оперативный режим работы не предполагает постоянное изменение параметров регулятора, а в некоторые моменты коррекции необходима лишь для одного из коэффициентов.

Ситуации, в которых необходимо изменять состояние регулятора, регламентирует база эмпирических правил. При выполнении одного из условий базы правил происходит обучение нейронной сети. В качестве основы для создания правил использовались классические эмпирические рекомендации по настройке ПИ-регулятора по качеству переходного процесса. На рис 2 показаны типичные рекомендации по настройке ПИ-регулятора. Рекомендации показывают, какой из каналов регулятора необходимо изменить в сторону увеличения или уменьшения для получения более качественного переходного процесса. При этом количественное изменение параметров регулятора остается за специалистом, производящим настройку регулятора. В проектируемой системе ответственной за количественное изменение параметров регулятора, является нейронная сеть, а база правил – логическим описанием эмпирических рекомендаций.



Моделирование с целью сравнить эффективность работы нейросетевого настройщика со статичным ПИ-регулятором проводилось на модели зоны печи отжига с передаточной функцией (1) со следующими особенностями:

$$W(s) = \frac{20.72}{1636s + 1} * \frac{1}{69.4s + 1} * e^{-63.8s} \quad (1)$$

1) Модель печи представляет собой два аperiodических звена первого порядка со звеном запаздывания (1). Идентификация проведена методом наименьших квадратов на основе статистических данных работы печи.

2) Переходный процесс в печи было принято считать завершенным при нахождении температуры $[-4;4]^{\circ}\text{C}$ от уставки в течение 300 секунд без наличия автоколебаний; при завершении переходного процесса производилась смена температурной уставки;

3) Для начального состояния печи экспериментально были подобраны приемлемые параметры ПИ-регулятора: $Kn=0.4$, $Tu=4000$. Они обеспечивают удовлетворительное качество регулирования для незагруженной печи.

4) После трехкратной отработки графика уставок 505-550-630-505 $^{\circ}\text{C}$ на частично загруженной печи производилось изменение параметров модели объекта управления в виде уменьшения коэффициента усиления K на 5% и увеличение постоянной времени T на 50%, что имитирует полную загрузку печи стальными заготовками и изменение массы садки металла. После изменения параметров проводилась повторная отработка графика уставок. После четырехкратной отработки графика уставок с измененными параметрами модель возвращалась к первоначальному состоянию и каскад уставок повторялся еще 4 раза.

Как видно из графиков на рис.3 и рис.4, использование нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора позволяет учитывать изменение параметров объекта управления в процессе эксплуатации, производя настройку ПИ-регулятора в оперативном режиме; уменьшить перерегулирование во время переходных процессов нагрева и остывания, сократить время переходных процессов. Численные сравнительные характеристики показаны в таблице 1.

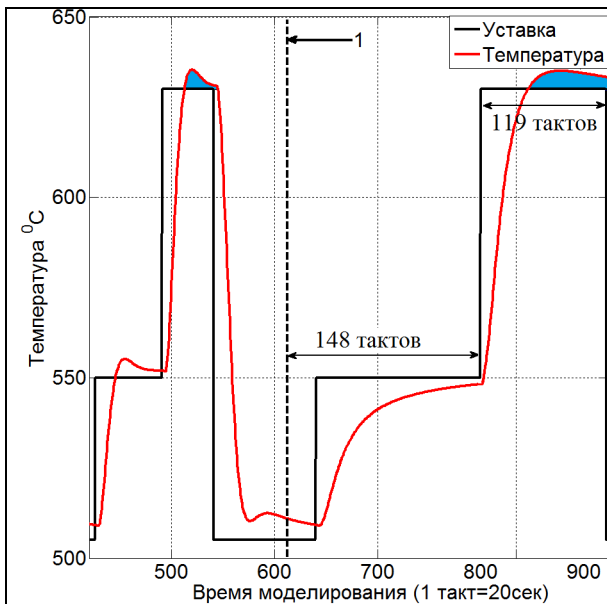


Рис.3 – Результаты для системы с ПИ-регулятором (выборочно, два каскада), 1 – момент «загрузки» модели печи

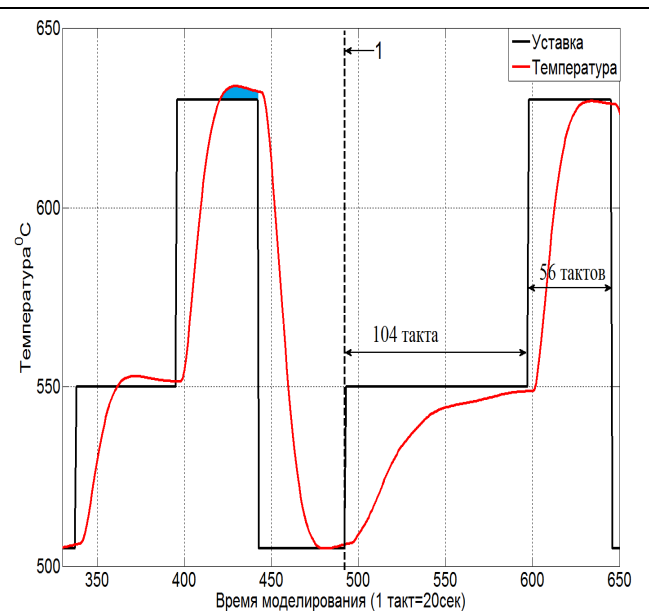


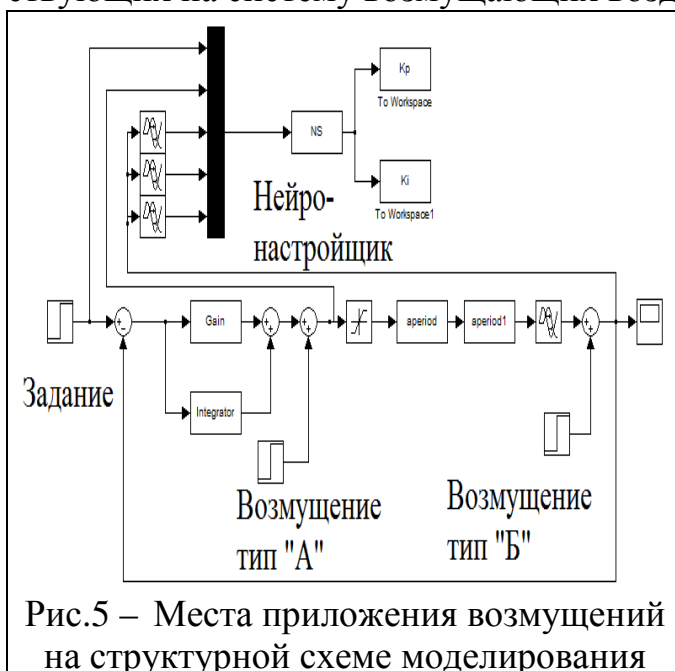
Рис.4 – Результаты для системы с нейросетевым настройщиком (выборочно, два каскада), 1 – момент «загрузки» модели печи

Таблица 1– Сравнительные характеристики использования нейросетевого настройщика с ПИ-регулятором

Критерий оценки	ПИ	ПИ+НС
Время опыта, час	14.83	12.77
Экономия времени, %	0	12.75
Суммарное управляющее воздействие (*100)	8297	6939
Экономия по управляющему воздействию %	0	16.06

В третьей главе в нейронастройщике реализована подсистема для компенсации влияния возмущающих воздействий, действующих на печь отжига. Реализация подсистемы выполнена в несколько этапов: 1) проведены исследования влияния каналов регулятора на компенсацию влияния возмущений разных видов, 2) Предложена классификация возмущений и создан алгоритм их идентификации, 3) Разработана база правил для режима компенсации влияния действующих возмущений, 4) На основе разработок для возмущений модернизирована база правил для переходных процессов, снижающих отрицательный эффект от адаптации для текущего переходного процесса.

Как показали исследования, представленные во 2 главе, использование нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора позволяет достаточно эффективно управлять работой печи отжига во время переходных процессов. Однако совместно с поддержанием оптимальных переходных процессов для системы управления печью стоит задача поддержания необходимого температурного диапазона в зонах печи в течение всего времени термообработки. Данная задача относится к отдельному классу задач по компенсации влияния действующих на систему возмущающих воздействий.



Поэтому для решения этой задачи возникла необходимость дополнить разработанный настройщик функцией настройки регулятора на компенсацию возмущающих воздействий.

Возмущающие воздействия на печь отжига предлагается условно разделить на два класса, схема приложения которых показана на рис.5:

1) возмущение типа «А»: возмущающее воздействие подается в канал управления. Физической интерпретацией данного модельного возмущения на печи отжига явля-

ются: посад холодного металла в печь, изменение теплотворных свойств газа сгорания, выход из строя части горелок печи.

2) возмущение типа «Б»: возмущающее воздействие подается после объекта управления (ОУ). Физический смысл модельного возмущения: потеря тепла ОУ вследствие различных теплотехнологических причин, таких как открытие шторы проходной печи при загрузке/выгрузке (посаде/выдаче) металла.

Для борьбы с влиянием возмущений этого рода в нейронную сеть внесен дополнительный набор весовых коэффициентов и смещений. После идентификации системой возмущающего воздействия, данный набор подставляется в нейронную сеть, и она начинает обучаться. При этом наборы весовых коэффициентов и смещений для отработки переходных процессов сохраняются и будут использованы вновь после окончания компенсации поступившего возмущения.

Был произведен эксперимент, ставившей целью определить какой из коэффициентов регулятора и как необходимо настраивать для компенсации влияния конкретного возмущения. Эксперимент показал, что компенсация влияния возмущения, подаваемого на выход объекта управления (тип «Б»), эффективна настройкой П-составляющей регулятора. Влияние И-канала регулятора минимально, так как возмущающее воздействие действует «быстро», в результате чего И-канал не накапливает управляющее воздействие, необходимое для существенного влияния на скорость компенсации влияния возмущения, но накопленное управление оказывается достаточным для получения перерегулирования.

Компенсация влияния возмущения, подаваемого в канал управления (тип «А»), эффективна одновременной настройкой обоих каналов регулятора. В данной ситуации, так как возмущение действует непосредственно на ОУ, возрастает влияние И-составляющей регулятора, что и приводит к необходимости его настройки. Настройка лишь П-составляющей не дает заметного эффекта, а совместная настройка позволяет ускорить возврат температуры в область уставки.

Однако данный эксперимент проводился в условиях, когда системе было известно о моменте, виде и места приложения возмущающего воздействия, подаваемого на неё. При этом в условиях реального производства такую информацию получить невозможно. В связи с этим возникла необходимость соотнести модельные возмущающие воздействия с реальными и разработать алгоритм их идентификации (рис. 6) в оперативном режиме.

При разработке алгоритма идентификации выделенных возмущений за основу был взят следующий факт: нагревательная печь с открытой шторой (возмущение типа «Б») теряет тепло быстрее, чем закрытая печь при возмущении типа снижения теплотворности топлива (возмущение типа «А»), поскольку печь даже при нулевом управляющем воздействии будет остывать медленнее, чем в открытом состоянии. Для работы данного алгоритма необходима информация о средней скорости остывания печи при нулевом управляющем воздействии. Определить скорость представляется несложным на любом процессе остывания печи, либо получить из архивных её данных работы.

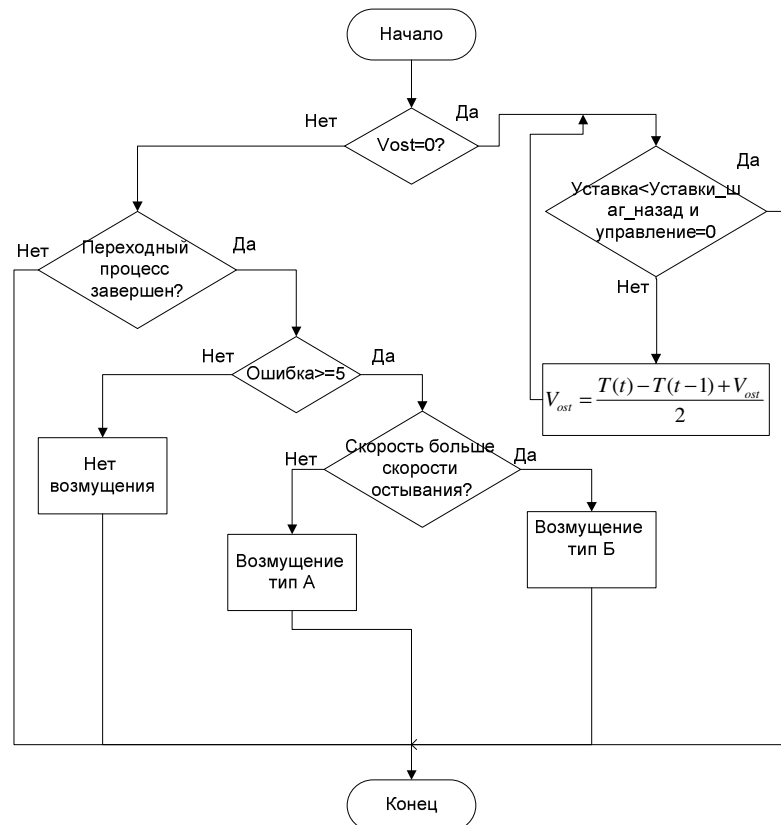


Рис.6 – Алгоритм идентификации типа возмущения

Как видно из графиков на рис.7-8 использование нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора позволяет эффективно компенсировать влияние возмущающих воздействий, уменьшить максимальное отклонение температуры от уставки, уменьшить время возврата системы на уставку. Численные сравнительные характеристики показаны в таблице 2.

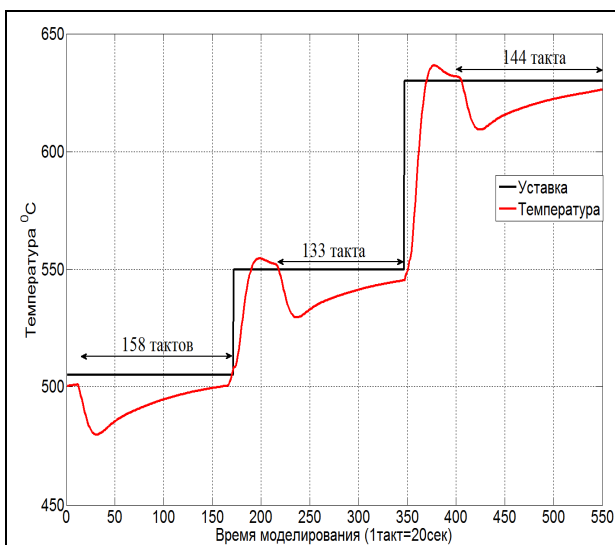


Рис.7 – Компенсация возмущающего воздействия типа «А» на различных уставках ПИ-регулятором

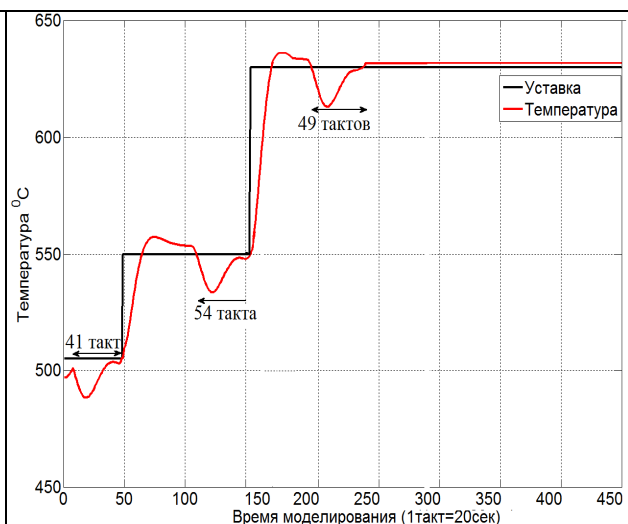


Рис.8 – Компенсация возмущающего воздействия типа «А» на различных уставках нейронастройщиком

Таблица 2 – Сравнительные характеристики использования нейросетевого настройщика и ПИ-регулятора для режима компенсации возмущений

Критерий оценки	Уставка	Возмущение	ПИ+НС	ПИ
Время возврата на уставку, мин	505 ⁰ С	А	40	76
		Б	21	53
	550 ⁰ С	А	33.1	70
		Б	23.3	50
	630 ⁰ С	А	26.6	63.3
		Б	-	-
Максимальное отклонение от уставки, ⁰ С	505 ⁰ С	А	13	22
		Б	21	35
	550 ⁰ С	А	12	21
		Б	18	74
	630 ⁰ С	А	10	28
		Б	-	-

В четвертой главе произведена программная реализация разработанного нейросетевого настройщика в виде программного модуля для контроллера Simatic S7 300/400 для печей отжига. Также в данной главе показаны результаты натурального лабораторного эксперимента на муфельной печи.

Разработанный в предыдущих главах нейросетевой настройщик параметров ПИ-регулятора показал свою эффективность в режимах переходных процессов и отработки возмущений. Однако нейронастройщик был опробован лишь в рамках моделирования, которое проводилось в пакете Matlab, в нем же был реализован настройщик. Но программная реализация в Matlab не позволяет управлять реальными агрегатами в реалиях производства ввиду низкой надежности и высокой стоимости Matlab. В связи для практической реализации возникла необходимость реализации настройщика на базе действующей системы управления без внесения в неё аппаратных изменений, модернизируя лишь программно-алгоритмическую часть.

Для реализации нейросетевого настройщика в контроллере S7-300/400 использовалось программное обеспечение Step7+SCL, позволяющее проводить комплекс работ по созданию и обслуживанию систем автоматизации. Дополнительный пакет SCL содержит в себе структурированный язык управления SCL, являющийся языком программирования высокого уровня для SIMATIC S7.. Использование данного языка в перспективе позволит тиражировать данное решение на контроллеры других производителей.

В качестве ПИ-регулятора используется регулятор, реализованный фирмой

Siemens в виде стандартного готового блока FB58. Данная реализация разработана специально для управления тепловыми объектами. В этот блок происходит запись выхода блока FC500, реализующего настройщик, и в частности, НС, рассчитывающие коэффициенты ПИ-регулятора.

В результате получена программная реализация нейросетевого настройщика с достаточной универсальностью. Единственным требованием к системе управления, в которую будет внедрен нейросетевой настройщик, выступает объем свободной памяти контроллера – для применения настройщика необходимо 26Кб рабочей памяти, что является не критичным для семейства S7-300 и несущественным для семейства S7-400.

Реализация нейросетевого настройщика на базе контроллера Simatic Siemens S7 300/400 сделала возможным проведение натурального эксперимента. Эксперимент было решено провести на лабораторной муфельной печи. Выбор муфельной печи не случаен, так как модель муфельной печи имеет тот же структурный вид, что и модель печи отжига. Для исследования был выбран график уставок 505°C - 550°C - 630°C , соответствующий отжигу хромистых сталей (20X13, 30X13 и др.).

Переходный процесс считался завершенным при нахождении температуры в диапазоне $[-4;4]^{\circ}\text{C}$ в течение 300 секунд. После завершения переходного процесса 550°C - 630°C уставка становилась равной 505°C , и каскад повторялся 11 раз.

Эксперимент с переходными процессами проходил в 2 этапа:

1) Последовательная отработка графика уставок на пустой печи ПИ-регулятором и нейросетевым настройщиком: настройки регулятора подобраны эмпирически и обеспечивают достаточное качество управления (выход на уставку с не более чем 5% перерегулированием без колебательности).

2) Загрузка печи стальной заготовкой и последовательная отработка графика уставок ПИ-регулятором и нейросетевым настройщиком. При этом параметры регулятора остаются равными подобранным для пустой печи.

Как видно из графиков на рис.9-10 использование нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора позволяет сократить время переходного процесса с 5000 тактов (рис.9-10) до 4000 тактов (рис.11-12). Численные сравнительные характеристики показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительные характеристики использования нейросетевого настройщика с ПИ-регулятором на загруженной печи

Критерий оценки	ПИ	ПИ+НС
Время опыта, час	27.1	22.2
Экономия времени, %	0	19
Расход электроэнергии, кВт·ч	2.73	2.28
Экономия по расходу электроэнергии %	0	16.5

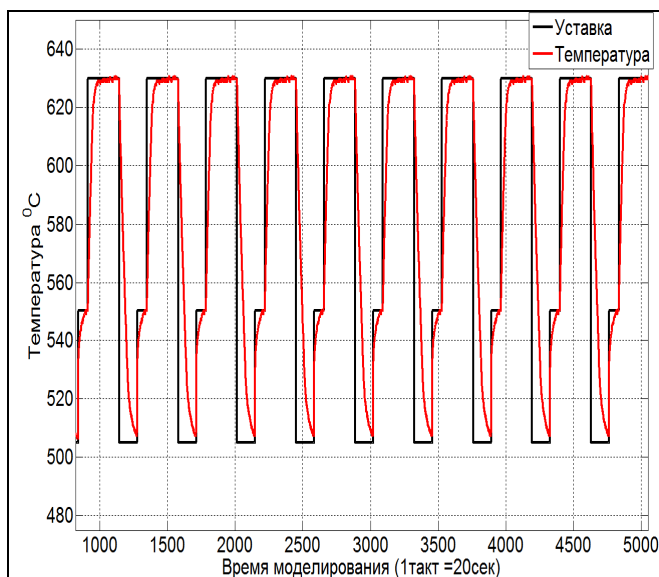


Рис.9– Результаты эксперимента на загруженной печи для системы с ПИ-регулятором (весь эксперимент)

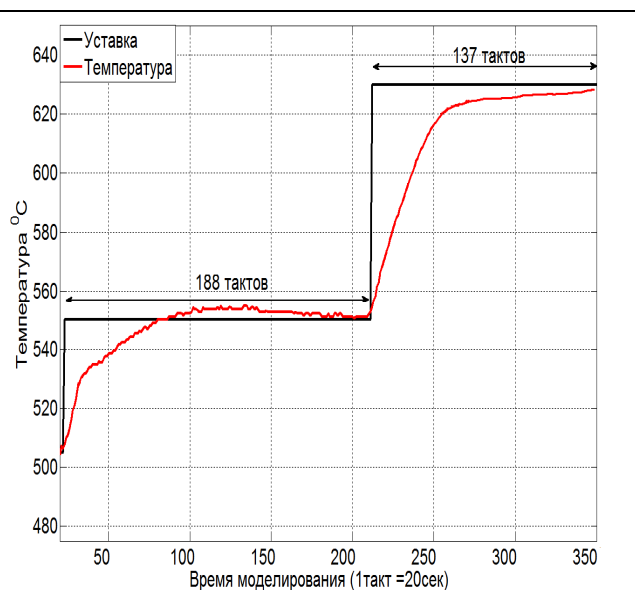


Рис.10 – Результаты эксперимента на загруженной печи для системы с ПИ-регулятором (один каскад)

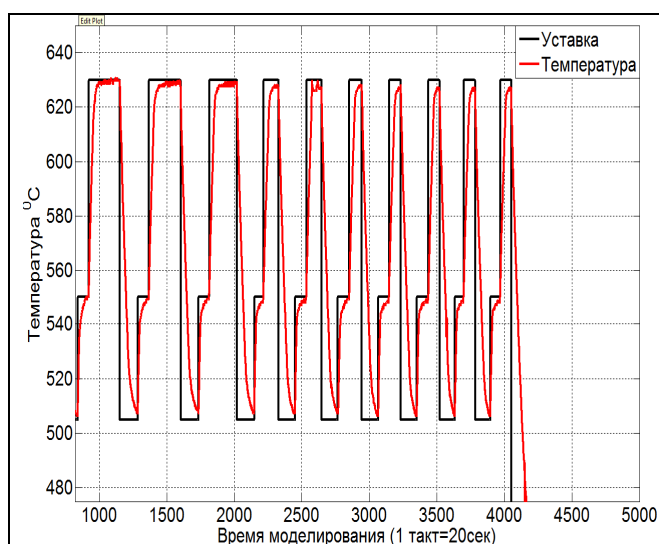


Рис.11– Результаты эксперимента на загруженной печи для нейросетевым настройщиком (весь эксперимент)

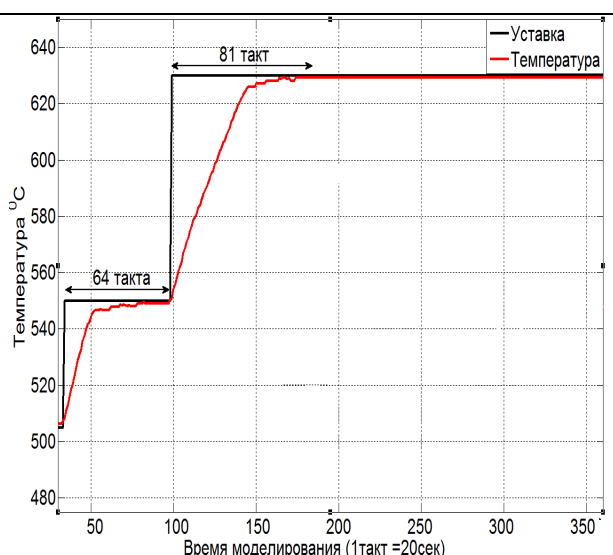


Рис.12 – Результаты эксперимента на загруженной печи для нейросетевым настройщиком (один каскад)

Разработанная система адаптивного управления печами отжига применяется на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат». При этом, данное решение, тиражируемо на тепловые объекты управления подобного класса без внесения существенных изменений в разработанную систему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена решению важной научно-технической задачи повышения качества управления печами отжига металла за счет разработки и применения адаптивной системы управления, синтезирующую в себе

аппарат нейронных сетей с функцией настройки её параметров.

В ходе решения данной задачи автором лично были получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ теплотехнологических особенностей тепловых объектов управления металлургической промышленности, результатом которого является выбор класса печей отжига металла как объекта управления, задача адаптации для которого выражена наиболее остро. Основными причинами необходимости адаптации являются широкие диапазоны массы садки обрабатываемого металла, различные температурные режимы обработки, приводящие к существенному изменению параметров печи отжига как объекта управления

2. Произведен анализ применимости различных методов настройки регулятора к задаче адаптации параметров регулятора печей отжига. Выявлена высокая сложность применения группы оптимальных, адаптивных и классических методов управления, вызванная необходимостью наличия математической модели объекта управления, получение которой в реалиях непрерывного производства затруднительно. Результатом анализа интеллектуальных методов настройки ПИ-регулятора стало решение о применении в единой системе аппарата экспертных систем и нейронных сетей.

3. Предложена система адаптивного управления печью отжига на основе применения нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора, повышающая качество регулирования температуры во время переходных процессов. Предложена структура НС прямого распространения сигнала, в которой, в качестве методов обучения выбраны экстремальный метод обучения для первичной инициализации и видоизмененный метод обратного распространения ошибки для оперативного обучения. Разработана база правил, представляющая собой формализованное описание действий наладчика по настройке регулятора. Результатом сравнительного моделирования нейросетевого настройщика с ПИ-регулятором стал выигрыш в 12% по времени и 16% по суммарному управляющему воздействию на модели печи отжига.

4. Разработан метод компенсации влияния действующих на печь отжига возмущающих воздействий с помощью нейросетевого настройщика, что повышает качество стабилизации температуры. Предложено классифицировать возмущения по месту приложения на структурной схеме, произведено исследование зависимости качества компенсации влияния возмущений от настройки различных параметров регулятора, в результате чего создана база правил нейросетевого настройщика для компенсации влияния возмущений. Разработан алгоритм идентификации типа действующего возмущающего воздействия с использованием скорости естественного остывания печи. Результатом сравнительного моделирования нейросетевого настройщика с ПИ-регулятором стал выигрыш в среднем в 45% по времени компенсации возмущений и 30% по снижению максимального отклонения от уставки.

5. Произведена разработка программно-технического комплекса на базе контроллеров Simatic S7 300/400, позволяющая интегрировать нейросетевой настройщик в действующие контура управления. Программная реализация на

контроллере позволила произвести натурный эксперимент на лабораторной муфельной печи. Результаты сравнительного натурального эксперимента подтверждают работоспособность разработанной системы – применение нейросетевого настройщика позволяет сократить время переходных процессов на 18% и суммарное управляющее воздействие на 16%.

6. Разработанная система адаптивного управления печами отжига применяется на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат» и рекомендована к внедрению. При этом, данное решение, тиражируемо на тепловые объекты управления подобного класса без внесения существенных изменений в разработанную систему.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ

- 1) Фомин А.В. О применении нейросетевого настройщика параметров пирегулятора для отработки возмущающих воздействий для объектов с различной динамикой / Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В., Петров А.В. // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2017. – № 4. – С.83-94.
- 2) Фомин А.В. Сравнение работы адаптивной системы на основе нейронастройщика параметров ПИ-регулятора с системой автонастройки FB58 Simatic S7-300/400 / Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2017. – № 6. – С.1-10.
- 3) Фомин А.В. Лабораторное применение нейросетевого настройщика параметра ПИ-регулятора реализованного в Simatic Siemens S7 300/400 для тепловых объектов в различных режимах работы / Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В // АСУ и контроллеры. – 2017. – №9. – С. 47-54.
- 4) Фомин А.В. О применении нейросетевого настройщика параметров пирегулятора на тепловых объектах горно-металлургической отрасли в режиме отработки возмущений / Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №.12 – С.122-133.
- 5) Фомин А.В. Об оценке применимости различных структур нейронной сети в реализации нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора для управления тепловыми объектами / Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И., Фомин А.В. // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – №3.2(57). – С. 236-241.
- 6) Фомин А.В. Применение нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора нагревательной печи для отработки возмущающих воздействий различных типов / Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – №2(64). – С. 86-91
- 7) Фомин А.В. О влиянии исполнительного механизма на эффективность применения нейросетевого настройщика для управления нагревательными пе-

чами / Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В // Системы управления и информационные технологии. – 2017. – №3(69). – С. 32-37.

Публикации, проиндексированные в SCOPUS и Web of Science

8) Fomin A. V. On PI-Controller neural tuner implementation in programmable logic controller to improve rejection of disturbances effecting heating plant / Eremenko Y. I., Glushchenko A. I., Fomin A. V //Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on. – IEEE, 2017. – С. 1-5.

9) Fomin A. V. On comparison of PI-controller neural tuner and siemens simatic adjustment system for heating furnaces control problem / Eremenko Y. I., Glushchenko A. I., Fomin A. V //Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on. – IEEE, 2017. – С. 1-6.

10) Fomin A. V. PI-controller parameters tuning method to reject disturbances acting on heating furnaces / Eremenko Y. I., Glushchenko A. I., Fomin A. V //Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), International Conference on. – IEEE, 2016. – С. 1-5.

11) Fomin A. V. On development of method to calculate time delay values of neural network input signals to implement PI-controller parameters neural tuner / Eremenko Y. I., Glushchenko A. I., Fomin A. V //Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), International Conference on. – IEEE, 2016. – С. 1-6.

12) Fomin A. Applying a neural tuner of the PI-controller parameters to control gas heating furnaces / Eremenko Y. I., Glushchenko A. I., Fomin A. V // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – №6/2(90). – С. 32-37.

Патенты

13) Фомин А.В. Автоматический нейросетевой настройщик параметров ПИ-регулятора для управления нагревательными объектами / Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Полещенко Д.А., Петров В.А, Фомин А.В // Патент № 2644843 Бюллетень открытий и изобретений №5 от 14.02.2018 г.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

14) Свидетельство об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2015614877 РФ. Нейросетевой оптимизатор параметров ПИ-регулятора для Siemens Simatic // Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И., Фомин А.В. зарег. В реестре программ для ЭВМ; заяв. 16.03.2015; опубл. 29.04.2015..

15) Свидетельство об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2016615445РФ. Нейросетевой настройщик параметров ПИ-регулятора для отработки возмущающих воздействий// Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Полещенко Д.А, Петров В.А., Фомин А.В.; заявл. 30.03.2016; опубл. 20.06.2016..

16) Свидетельство об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2017613001 РФ. Нейросетевой настройщик параметров ПИ-регулятора с одновременной поддержкой режима переходных процессов и режима компенсации возмущений

для контроллера Siemens Simatic S7 300/400 // Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В.; заявл. 07.04.2017; опубл. 06.06.2017..

17) Свидетельство об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2017663031 РФ. Модернизированный нейросетевой настройщик с минимизацией влияния адаптации на качество текущего переходного процесса // Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В.; 11.10.2017; опубл. 23.11.2017.

18) Свидетельство об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2017663396 РФ. Модуль FB для контроллера Siemens Simatic S7 300/400 с реализованным в нем нейросетевым настройщиком параметров ПИ-регулятора // Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В.; заявл. 11.10.2017; опубл. 01.12.2017.

Статьи и материалы конференций (выборочно)

19) Фомин А.В. Об оценке эффективности нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора при управлении нагревательным объектом в условиях действия возмущений / Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В // Информатика, управление и системный анализ: Труды IV Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. – Т. I. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2016. – С. 14-27

20) Фомин А.В. Об использовании нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора для управления нагревательными печами в режиме борьбы с возмущениями / Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Фомин А.В // Материалы XII Всероссийской школы-конференции молодых ученых "Управление большими системами" [Электронный ресурс]. - М.: ИПУ РАН, 2015. – С. 659-670

21) Фомин А.В. О реализации в нейросетевом настройщике параметров пирегулятора функции отработки возмущающих воздействий различных типов / Глущенко А.И., Полещенко Д.А., Фомин А.В // В сборнике: Управление большими системами (УБС'2016) Материалы XIII Всерос. школы-конференции молодых ученых. Под общей редакцией Новикова Д.А., Засканова В.Г.; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова; Самарский ун-т. 2016. С. 81-93.

22) Фомин А.В. Сравнение работы адаптивной системы на основе нейронастройщика параметров ПИ-регулятора с регулятором состояния для нагревательного объекта управления / Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В // В сборнике: Современные Сложные Системы Управления, материалы XII международной научно-практической конференции. 2017. С. 78-82.

23) Фомин А.В. Модернизация нейросетевого настройщика за счет совершенствования базы правил для режима переходных процессов / Глущенко А.И., Фомин А.В // В сборнике: Управление большими системами. УБС-2017 материалы XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Пермь, 2017. С. 439-448.

24) Фомин А.В. К вопросу о применении нейросетевого настройщика на многозонных тепловых печах. / Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды XI Всероссийской научно-практической конференции. Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2017. – С. 189-194.

Личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, состоит в разработке базы правил для нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора при настройке ПИ-регулятора печей отжига на переходном процессе при ступенчатом изменении задания [4,6,7,14,15,16,19,20,23], разработки способа компенсации влияния действующих на печь отжига возмущающих воздействий с применением нейросетевого настройщика [1,3,5,13,16,17,18,20,21,22,24], программно-алгоритмическая реализация нейросетевого настройщика на базе контроллеров Simatic Siemens S7 300/400 для печей отжига [1,2,11,12,22].