

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 669.04-5-048.34

РАДЖУХ
Маеин Ахмад

**МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫМИ УСТАНОВКАМИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Минск, 2010

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель	Ковалевский Викентий Болеславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Белорусского национального технического университета
Официальные оппоненты:	Хина Борис Борисович, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Физико-технического института НАН Беларуси; Марков Александр Владимирович кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой систем управления Учреждения образования «Белорус- ский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Оппонирующая организация	Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится 3 февраля 2011 г. в 16 часов на заседании совета по защите диссертаций К 02 .05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости 65, тел. (017) 293-95-64, E-mail: gurski2010@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « ____ » декабря 2010 г
Ученый секретарь совета по защите диссертаций
канд. техн. наук, доцент

Н.Н. Гурский

© Раджух М.А., 2010
© БНТУ, 2010

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Термообработка стали является одной из важнейших технологических операций литейно-прокатного производства. В то же время процессы термообработки являются весьма энергоёмкими. Современная ситуация в энергетике, а также прогнозы её развития позволяют сделать вывод о том, что доля стоимости энергоресурсов в себестоимости продукции будет расти. В связи с этим разработка энергосберегающих технологий нагрева металла в печах является весьма актуальной задачей.

Одним из способов решения этой задачи является разработка оптимальных режимов нагрева металла в промышленных печах по критериям энергосбережения и качества слитков. Печные участки термообрабатывающих цехов металлургических предприятий следует рассматривать в качестве автоматизированных теплотехнических комплексов, в состав которых входят: собственно печное оборудование, используемая теплотехнология, автоматизированное управление процессом нагрева.

Проблема автоматизации управления тепловыми режимами занимает особое место, так как высокие технико-экономические показатели могут быть достигнуты только при автоматизации и оптимизации тепловых режимов. Повышение общей экономической эффективности металлургического производства может быть достигнуто только путем оптимизации теплотехнологий обработки металла. Именно поэтому актуальной является задача оптимального управления теплотехнологиями обработки металла. Решение этой задачи позволяет сократить потери энергии, материалов, а также ведет к снижению себестоимости продукции.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» в рамках следующих научно-исследовательских тем:

1. Задание 1171 «Разработать и внедрить в учебный процесс алгоритмическое и программное обеспечение для расчёта оптимальных режимов работы теплотехнических агрегатов». ФНИР «Машиностроение и металлургия»: 1996 г., № РК 19961171.

2. Решение задач аналитического конструирования оптимальных регуляторов на основе задачи Коши для уравнения Гамильтона – Якоби применительно к вопросам ресурсов и энергосбережения: отчёт о НИР / БГПА; ГР № 19971126; срок выполнения 1997–1999 г.

3. Исследование закономерностей оптимального нагрева металла: отчет о НИР / БГПА; Г.Р.19981099 . Срок выполнения 1998–1999 г.

4. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для построения энерго- и ресурсосберегающих технологий работы нагревательных печей: отчет о НИР / БГПА; ГР №19991167. Срок выполнения 1999–2000 г.

5. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для построения энерго- и ресурсосберегающих технологий работы нагревательных печей. Этапы: Разработка теоретических аспектов решения задачи АКОР. Разработка программного обеспечения решения задачи рассогласования температуры: отчет о НИР / БГПА. Срок выполнения 2000–2001 г.

6. Разработка теоретических аспектов метода магистральной оптимизации с приложениями к проблеме энергосбережения: отчет о НИР / БНТУ; ГР №20011377. Срок выполнения 2002–2003 г.

Цель и задачи исследований

Цель данной работы состоит в разработке теоретических положений и практических рекомендаций, направленных на создание энерго- и ресурсосберегающих систем управления установками нагрева металла в промышленных печах.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи исследования:

1. Разработать новые методики решения задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) динамических систем и применить полученные результаты к решению задач нагрева металла для качественного улучшения функционирования нагревательных устройств машиностроительного и металлургического производства.

2. Построить математические модели нагрева, окалинообразования и обезуглероживания металла и провести их параметрическую идентификацию на основании промышленных экспериментов.

3. Разработать методики и алгоритмы, реализующее управление рациональными режимами нагрева стали, позволяющие сэкономить расход газа и разработать программное обеспечение, реализующее записанные математические модели нагрева.

Объектом исследования являются системы управления нагревательными печами машиностроительного и металлургического производства.

Предметом исследования являются параметры технологических режимов работы нагревательных печей (температура и расход газа, температура заготовки).

Положения, выносимые на защиту

1. Методика решения задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов, управляющих нагревом металла, для получения необходимого температурного режима с минимальным расходом топлива при нагреве тела от фиксированной начальной температуры до требуемой.

2. Методика идентификации математической модели процесса нагрева металла, оптимизации окалинообразования и обезуглероживания, рационализации топливопотребления, позволяющая производить анализ результатов математического моделирования и сопоставление их с реальными тепловыми процессами для обеспечения адекватности математической модели с процессом нагрева.

3. Алгоритмы решения задачи оптимизации управления нагревом металла при различных начальных и граничных условиях теплового режима работы печи для выбора оптимального режима её работы.

4. Методика расчета расхода топлива по заданному температурному режиму работы нагревательной печи, позволяющая в каждой конкретной ситуации выбрать оптимальные условия нагрева металла и греющей среды.

Личный вклад соискателя

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены лично автором. Научный руководитель принимал участие в постановке задач, определении возможных путей их решения, предварительном анализе, обсуждении результатов исследований, проведенных автором. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками диссертационной работы

Автор самостоятельно получил основные результаты диссертационной работы. Общая концепция исследований и отдельные теоретические методы разработаны совместно с научным руководителем.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались на Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2009 г. Беларусь», а также на 8-й Международной Научно-технической конференции «Наука, образование, производство, экономика 2010г.», посвящённой 90-летию со дня образования БНТУ, г. Минск, а также на семинарах кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Белорусского национального технического университета.

Результаты диссертации приведены в отчете о научно-исследовательской работе «Изучение возможностей повышения температур рабочего пространства колодцев контролируемого охлаждения с целью снижения расхода топлива и обеспечения качественной термообработки инструментальной стали».

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 10 научных статей в рецензируемых журналах согласно перечню ВАК Республики Беларусь общим объёмом 2,44 авторских листа и 2 тезиса докладов на научных конференциях. Количество и объём публикаций по теме диссертации соответствуют пункту 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Во введении определена область научных исследований, обоснована актуальность диссертационной работы, кратко проанализировано общее состояние научной задачи и основные пути её решения. В первой главе диссертации проведён анализ научных исследований режимов работы нагревательных устройств, рассмотрены задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов нагревательных устройств, сделана постановка задачи диссертационного исследования. Во второй главе диссертации приведено применение теоретических разработок к решению практических теплотехнических задач, решены задачи идентификации и построены математические модели нагрева металла. В третьей главе разработаны промышленные алгоритмы оптимального нагрева металла, позволяющие экономить расход газа, окалину и обезуглероженный слой.

Общий объём диссертации составляет 130 страниц. В том числе: 88 страниц основного текста, 24 рисунка, расположенных в тексте диссертации, список использованных источников, насчитывающий 151 наименование и список публикаций автора по теме диссертации на 14 страницах, а также приложения на 16 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, обоснована необходимость проведения работы по созданию новых ресурсосберегающих технологий применительно к нагревательным устройствам, показана практическая значимость работы.

В первой главе рассматривается современное состояние изучаемого вопроса, проводится анализ экспериментальных исследований различных режимов работы нагревательных устройств. Анализ литературных данных и производственный опыт по исследованию технологических режимов нагрева и охлаждения показывает, что сложность тепловых явлений и процессов требует привлечения, наряду с экспериментальными и опытно-промышленными исследованиями, методов математического и компьютерного моделирования. Чтобы

получить наиболее точный рациональный режим на основе выбранных математических моделей, необходимо применить теорию оптимального управления.

Проведён анализ основных методов оптимизации режимов работы нагревательных устройств. Обоснована возможность применения аналитических методов оптимального управления для систем с распределёнными параметрами, к которым относятся математические модели нагревательных устройств. При этом имеется возможность декомпозиции задачи оптимального управления (изменение фазовых координат происходит на достаточно большом интервале времени). Это позволяет аналитически решать задачи управления нагревом стержня пластины с квадратичным критерием качества.

Обосновано применение асимптотического метода, который открывает перспективу нового подхода к аналитическому синтезу алгоритмов оптимальных и квазиоптимальных регуляторов на основании выделения магистрального режима и решения задач выхода на магистраль и спуска с магистрали. Постановка задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) нагревательных устройств рассматривается при условии, что конечное состояние системы не является фиксированным вектором, а принадлежит некоторому компактному многообразию, которое определяется заданными вектор-функциями. При решении такой задачи соответствующие условия трансверсальности системы нелинейных дифференциальных уравнений Риккати заменяются на поиск минимума функции Кротова при фиксированном времени.

Таким образом в первой главе обосновано использование приближенных аналитических решений сложных нелинейных краевых задач противоточного нагрева термически массивных тел (для тел классической формы), учитывающих нелинейности первого и второго рода (зависимость теплофизических свойств от температуры и лучисто-конвективный теплообмен) и обеспечивающих достаточно высокий уровень точности решений ряда прикладных теплотехнических задач.

На основе использования предложенного профессором Ковалевским В.Б. подхода разработан метод оптимизации режима для управляемой линейной системы с закрепленным правым и свободным левым концом траектории, при ограничениях на многообразии, с фиксированными граничными условиями, что позволяет разработать и программно реализовать алгоритм решения задачи АКОР для линейно-квадратичного функционала с заданными граничными условиями. Программная реализация алгоритма показала свою работоспособность и хорошую сходимость результатов.

Во второй главе рассмотрены вопросы оптимизации управления нагревом металла в промышленных печах. При этом модель процесса нагрева термически тонких тел представлена в виде

$$\frac{dT_2}{dt} = A_1 B(t) + A_2 T(t) + A_3 T_2(t); \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \mu(T_2 - T); \quad (2)$$

$$T_2(0) = T_{r_0}; \quad T(0) = T_0; \quad T_{(t_k)} = T_k,$$

где $T_2(t)$, $T(t)$ – температура греющей среды и нагреваемого металла в момент времени t соответственно; $B(t)$ – расход газа в момент времени t ; t_k – время окончания процесса нагрева; T_{r_0} , T_0 , T_k – начальная температура греющей среды, нагреваемого металла и конечная температура металла соответственно; μ , A_1 – A_3 – константы, характеризующие динамику процесса нагрева.

Процесс нагрева металла посредством радиации и конвекции опишем дифференциальным уравнением с начальными и граничными условиями [10-А], [12-А]:

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (3)$$

$$0 \leq x \leq R_1, \quad 0 \leq y \leq R_2, \quad 0 \leq t \leq t_k,$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(y, R_1, t)}{\partial x} = \alpha(T_{\text{пч}}(t) - T(y, R_1, t)) + \sigma(T_{\text{пч}}^4(t) - T^4(y, R_1, t)), \quad (4)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(x, R_2, t)}{\partial y} = \alpha(T_{\text{пч}}(t) - T(x, R_2, t)) + \sigma(T_{\text{пч}}^4(t) - T^4(x, R_2, t)), \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T(0, x, t)}{\partial y} = 0, \quad T(x, y, 0) = T_0, \quad (6)$$

где R_1 , R_2 – половина длины и ширины узкой грани призмы, м; x , y – текущие координаты узкой грани примы, отсчитываемые от центра, м; $T_{\text{пч}}(t)$ – температура печи в момент времени t , °С; α – коэффициент теплообмена конвекцией, Вт/(м²·°С); σ – коэффициент теплообмена радиацией, Вт/(м²·°С⁴); $\lambda(T)$ – теплопроводность, Дж/(м·ч·°С); $C(T)$ – теплоёмкость, Дж/(кг·°С); ρ – плотность материала, кг/м³; T_0 – начальное равномерное распределение температуры в призме, °С; $T(x, y, t)$ – температура в точке (x, y) в момент времени t , °С.

На Минском автомобильном заводе был проведен промышленный эксперимент по нагреву стальной заготовки. Задача идентификации математической модели процесса нагрева заключается в подборе таких значений коэффициентов, при которых значения температур металла и печи, полученные как решение уравнений (3)–(6), наименее отличаются от тех же величин, но полученных экспериментальным путем. За меру отклонения данных параметров принята величина

$$\delta = \int_0^{t_y} \sum_{i=1}^K (T(x_i, y_i, t) - T_y(x_i, y_i, t))^2 dt, \quad (7)$$

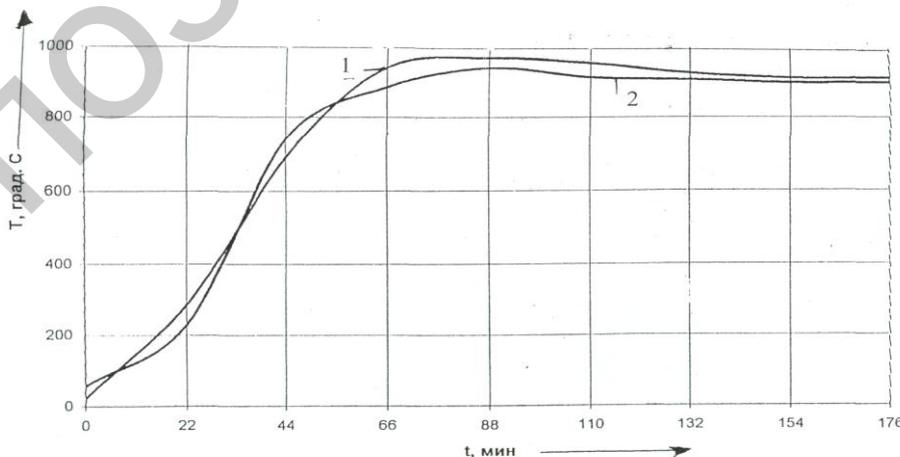
где t_y – время, за которое проводились измерения экспериментальных значений (время идентификации), ч; x_i, y_i – координаты точки заготовки, в которой определялись значения температур, м; K – количество экспериментальных точек; $T_y(x_i, y_i, t), T(x_i, y_i, t)$ – значения температур в точке (x_i, y_i) заготовки, полученные опытным и расчетным путем, °С.

При использовании разработанного математического и программного обеспечения были получены следующие значения коэффициентов: $\alpha^* = 25,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$, $\sigma^* = 3,1 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}^4)$. На рисунках 1, 2 приведены результаты расчетов и экспериментальные значения температур поверхности и центра заготовки соответственно.



1 – температура заготовки, полученная опытным путем, °С;
2 – температура заготовки, полученная с помощью ЭВМ, °С

Рисунок 1 – Результаты идентификации математической модели (поверхность заготовки)



1 – температура заготовки, полученная опытным путем, °С;
2 – температура заготовки, полученная с помощью ЭВМ, °С

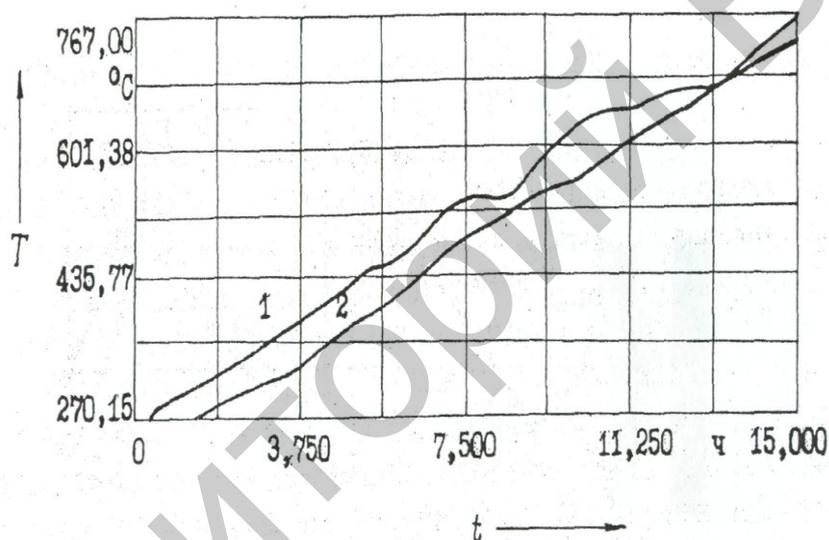
Рисунок 2 – Результаты идентификации математической модели (центр заготовки)

При этом среднее отклонение экспериментальных температур от расчетной в контрольных точках не превышает 30 °С, что при данных размерах сечения заготовки является удовлетворительным.

Таким образом, по данным промышленного эксперимента, в результате расчетов на ЭВМ были получены реальные значения параметров α , σ для модели нагрева металла.

Предлагается методика определения расхода топлива на основе теплового баланса для печей камерного типа, позволяющая получить уравнения для расчета мгновенного расхода топлива в любой момент времени. В отличие от других подходов данный способ решения этой задачи учитывает не начальную и конечную температуры металла, а распределение температуры в текущий момент времени, что существенно повышает точность расчетов.

Результаты моделирования на ЭВМ уравнений процесса нагрева заготовки приведены на рисунке 3.



1 – температура печи; 2 – температура заготовки

Рисунок 3 – График изменения температуры

Путём математического моделирования на ЭВМ решена задача оптимального управления нагревом с минимумом расхода газа в реальном времени и для условий нагрева, близких к реальным. Процесс изменения температуры греющей среды и нагреваемого металла описывается уравнениями (1), (2).

Расход газа зададим в виде

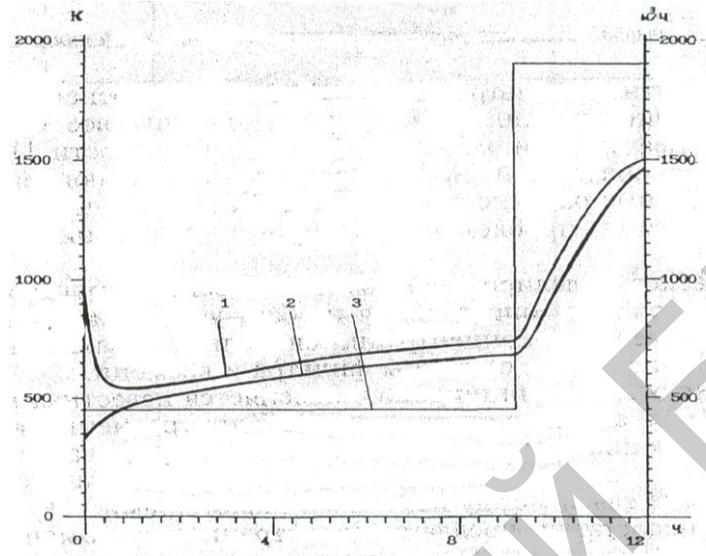
$$I = \int_0^{t_{\hat{e}}} B(t) dt, \quad (8)$$

при ограничениях

$$t_{\hat{e}} > t_{\min}; \quad \beta_1 \leq \beta(t) \leq \beta_2, \quad (9)$$

где β_1 , β_2 – минимальный и максимальный расходы газа; t_{\min} – минимальное время нагрева металла до температуры T_k .

Для иллюстрации данного подхода была составлена программа для ПЭВМ. Исходные данные равны следующим значениям: $\mu = 0,65$ л/ч; $A_1 = 6,11$ К/м³; $A_2 = 3,45$ л/ч; $A_3 = -4,088$ л/ч; $t_k = 12$ ч; $T_0 = 300$ К; $T_k = 1500$ К; $T_{2_0} = 1050$ К; $\beta_1 = 450$ м³/ч; $\beta_2 = 1850$ м³/ч. Оптимальный режим нагрева приведен на рисунке 4. Расход газа составил 870 м³.



1 – температура греющей среды; 2 – температура металла; 3 – расход газа

Рисунок 4 – Оптимальный режим нагрева металла

Для минимизации окалинообразования необходимо обеспечить оптимальный нагрев металла с минимальным окислением. Этого можно добиться управляя подачей газа через горелочные устройства.

Расход окалины зададим в виде

$$I = \int_0^{t_k} \chi T^{-1} e^{-\beta/T}, \quad (10)$$

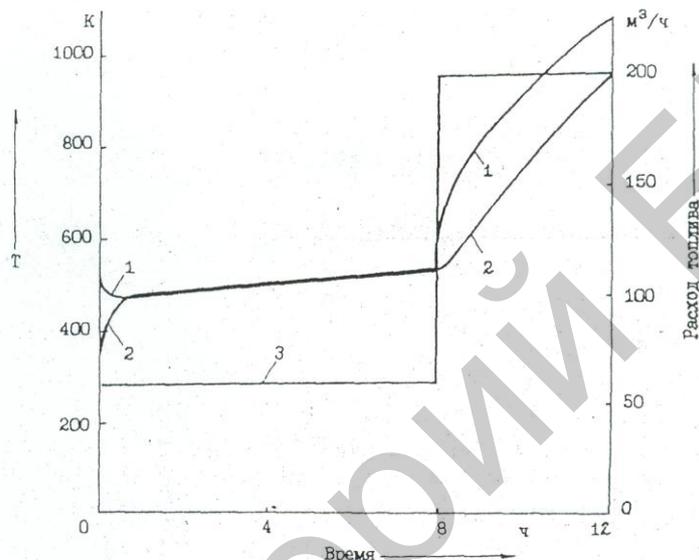
где χ и β – константы, характеризующие динамику процесса окисления металла. Обычно они определяются экспериментальным путем.

Предполагаем, что $t_k > t_{\min}$, тогда $B_1 \leq B(t) \leq B_2$, где B_1 , B_2 – минимальный и максимальный расход газа на горелочные устройства; t_{\min} – минимальное время нагрева до температуры T_k .

Задача оптимального управления решается выбором режима расхода газа $B(t)$ ($0 \leq t \leq t_k$) в виде кусочно-непрерывной функции, которая доставляет минимальное значение функционалу (10). На основе использования принципа максимума в задаче максимума оптимального управления в форме Лагранжа с фиксированной длительностью процесса получены оптимальные законы изменения $T_2(t)$ и $T(t)$. Результаты расчетов при $\beta = 3 \cdot 10^3$, $\chi = 0,141 \cdot 10^5$ показывают, что величина окалины составила 0,6 кг/м.

Таким образом показано, что оптимальный температурный режим характеризуется минимальным и максимальным расходом газа через горелочные устройства.

Оптимальный режим нагрева по комплексному критерию качества, учитывающему как топливопотребление, так и окисление металла, характеризуется двухступенчатым способом подачи газа через горелочные устройства: до какого-то момента времени расход газа является минимальным, а затем становится максимальным. При этом в процессе нагрева должны обеспечиваться основные технологические ограничения. Пример оптимальной технологии приведен на рисунке 5.



1 – температура греющей среды; 2 – температура металла; 3 – расход газа

Рисунок 5 – Оптимальная технология

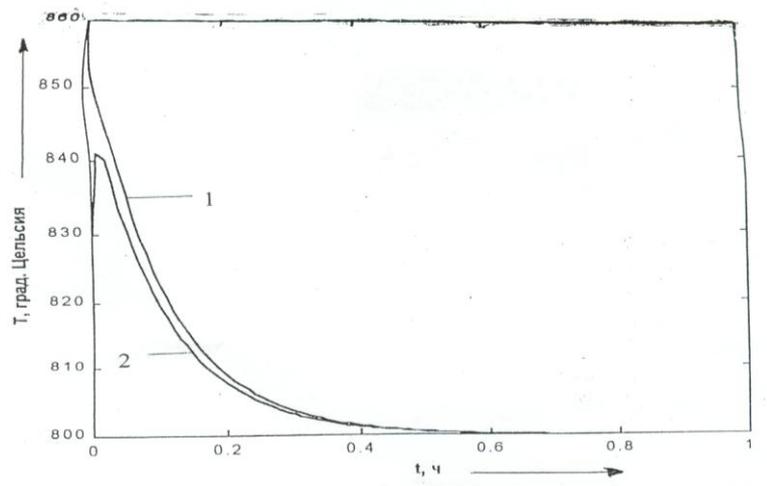
При проведении расчётов были выбраны следующие исходные данные: $K_1 = 500$ руб/кг; $K_2 = 25$ руб/м³.

Третья глава посвящена практическому использованию описанных в предыдущих главах методик решения задач аналитического конструирования оптимальных регуляторов применительно к конкретным задачам теплотехники.

При выдержке металла в печи с фиксированной температурой необходимо решать задачу построения регулятора нагрева до температуры выдержки, если имеются отклонения температур заготовки и греющей среды от заданной. Для этого было разработано программное обеспечение в среде Delphi.

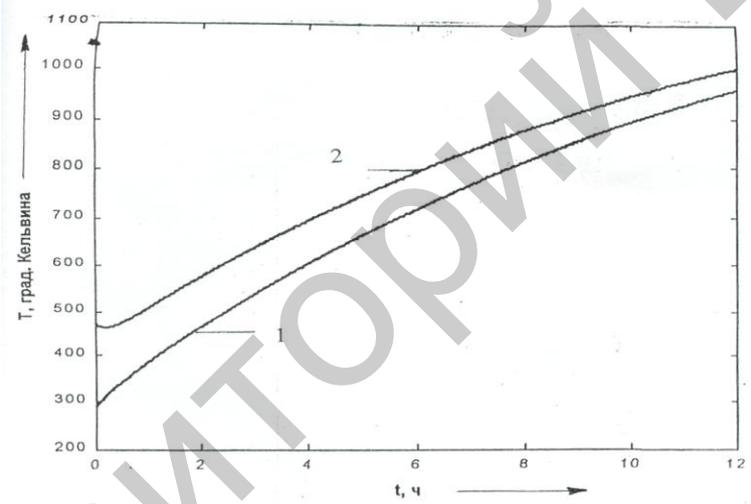
График оптимального режима нагрева металла при выдержке в камерной печи показан на рисунке 6.

Задача построения регулятора нагрева с фиксированными граничными условиями (температуры заготовки и греющей среды в начальный и конечный моменты времени нагрева) при нагреве металла в камерной печи от начальной температуры до заданной решена расчётным путём. Оптимальный режим нагрева металла от начальной температуры до заданной приведен на рисунке 7. Экономия газа при этом составила 60 м³/ч.



1 – температура печи, °С;
2 – температура металла, °С

Рисунок 6 – Оптимальные температуры металла и печи



1 – температура металла, К; 2 – температура печи, К

Рисунок 7 – Нагрев металла от начальной температуры до заданной

Решение задачи определения оптимальных условий термообработки металла в закалочнo-отпускных устройствах кузнечного производства машиностроительных предприятий с целью управления формированием его структуры и свойств, а также снижения окалинообразования, обезуглероживания и топливопотребления проводилось на основе асимптотической магистральной оптимизации. Критерий минимума окисления стальных заготовок имеет вид [9-А]:

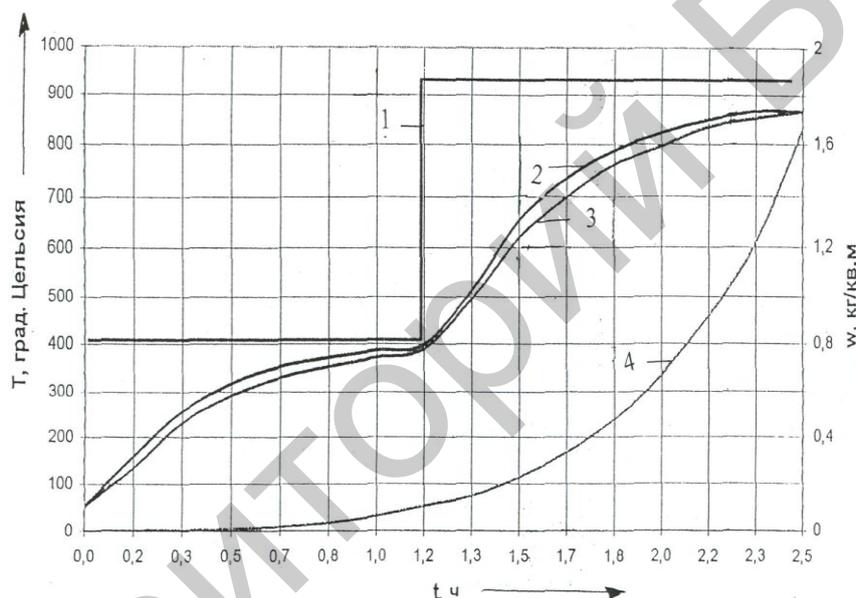
$$\omega_1(t_k) = \int_0^{t_k} \frac{\partial b_1}{T(R_1, R_2, t)} \exp \left\{ \frac{-\beta_1}{T(R_1, R_2, t)} \right\} dt \rightarrow \min, \quad (11)$$

$T_{\min} \leq T_i = (t) \leq T_{\max}$

$$\omega_2(t_k) = \int_0^{t_k} \partial b_2 \exp \left\{ \frac{-\beta_2}{T(R_1, R_2, t)} \right\} dt \rightarrow \min, \quad (12)$$

где T_{\max} , T_{\min} – максимальная и минимальная температуры печи, определяемые из технологических соображений, °С; ∂b_1 , β_1 – положительные постоянные, характеризующие величину роста окалины; $\omega_1(t_k)$ – величина окалины, кг/м²; ∂b_2 , β_2 – положительные постоянные, характеризующие величину роста толщины обезуглероженного слоя; $\omega_2(t_k)$ – толщина обезуглероженного слоя, м.

По данным промышленного эксперимента в кузнечном цеху Минского автомобильного завода был разработан новый ресурсосберегающий технологический режим нагрева изделий в закалочной печи. Результаты данной разработки представлены на рисунке 8.



1 – температура печи, °С; 2 – температура поверхности, °С;
3 – температура центра, °С; 4 – толщина окалины, кг/м²

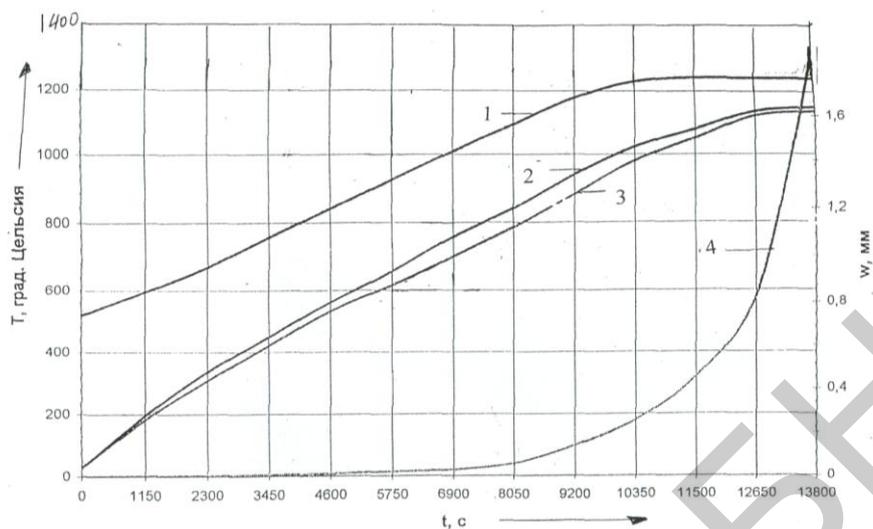
Рисунок 8 – Графики оптимального процесса нагрева

Предложенный режим нагрева металла при выполнении операций закалки и отпуска металла позволяет снизить расход условного топлива на 1–1,5 %, а также улучшить качество нагреваемых изделий.

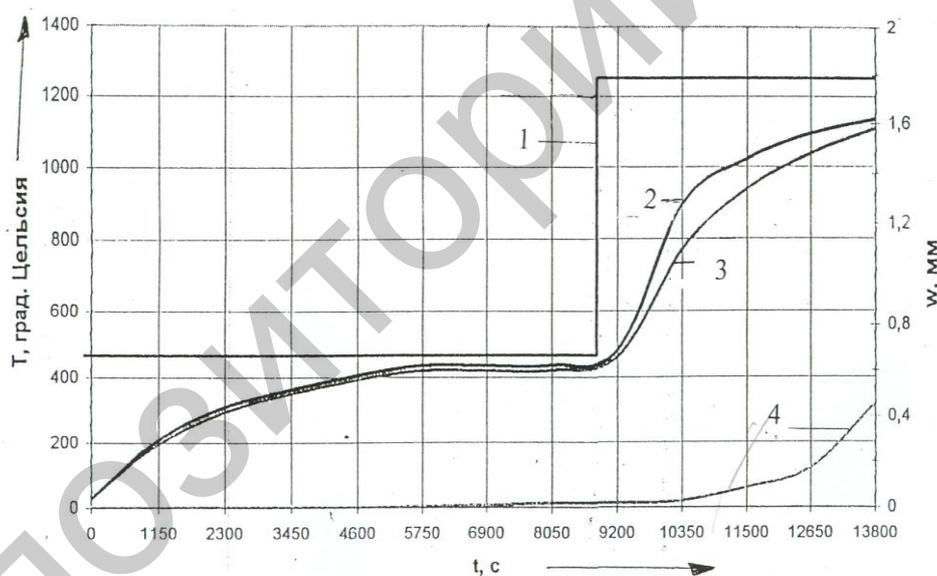
По результатам промышленного эксперимента (рисунок 9) была проведена параметрическая идентификация математической модели, определены коэффициенты теплообмена конвекцией $a = 30$ Вт/м²·°С и радиацией $\sigma = 2,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·°С⁴.

Поиск рациональной теплотехнологии проводился по критерию минимизации окалинообразования и обезуглероживания. По результатам расчетов был определен момент переключения подачи газа. Обезуглероженный слой в конце процесса нагрева составил 1,228 мм. Динамика изменения температуры в ха-

рактрных точек сечения призмы и рост толщины обезуглероженного слоя в процессе нагрева приведены на рисунке 10.



1 – температура печи, °С; 2 – температура поверхности, °С;
3 – температура центра, °С; 4 – толщина обезуглероженного слоя, мм
Рисунок 9 – Графики хода промышленного эксперимента



1 – температура печи, °С; 2 – температура поверхности, °С;
3 – температура центра, °С; 4 – толщина обезуглероженного слоя, мм
Рисунок 10 – Графики оптимального режима нагрева

Суммарный расход газа при этом составил 1085 м^3 . При использовании предложенной технологии нагрева достигнуто уменьшение обезуглероженного слоя в 1,5 раза, а суммарный расчетный расход газа снижен на 1,4 %.

Проведенные эксперименты, разработанные теоретические аспекты послужили основой для создания и внедрения новой ресурсосберегающей технологии нагрева в печи стана 850 Белорусского металлургического завода (рисунок 11).

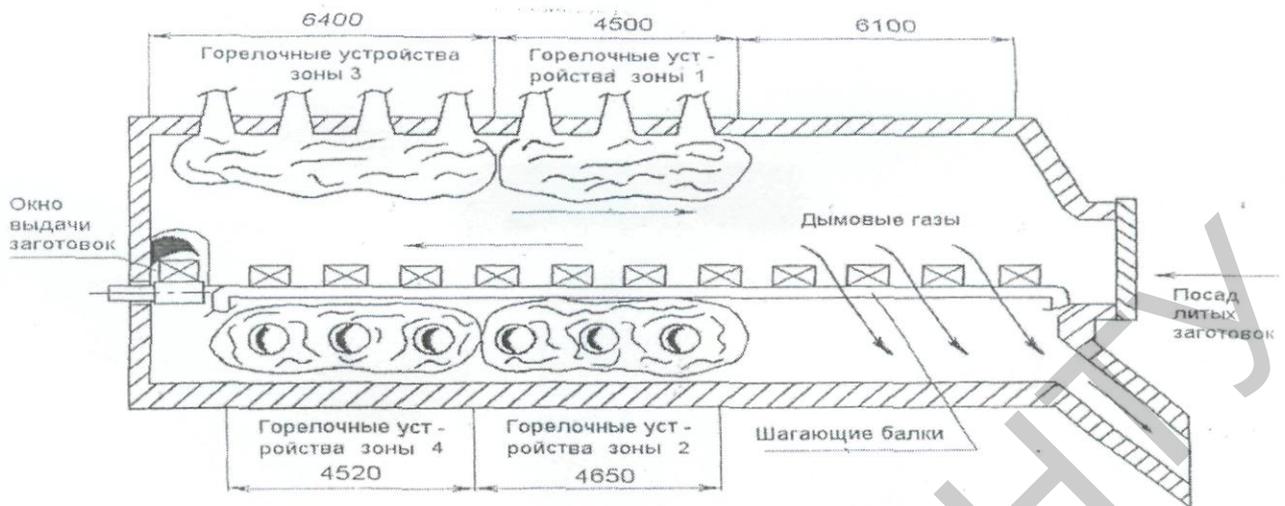
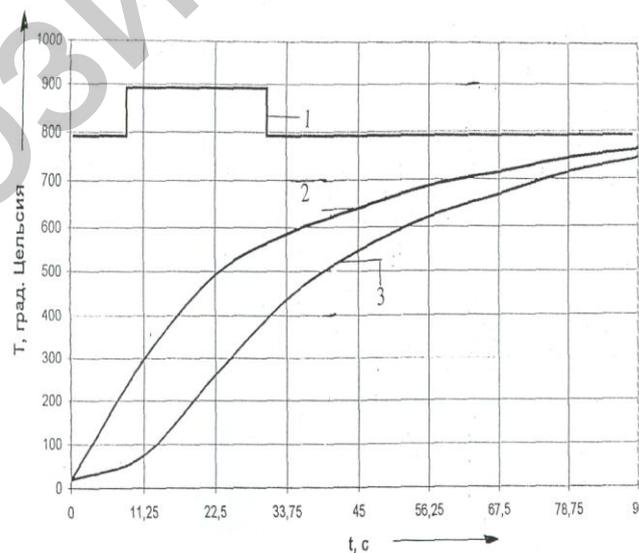


Рисунок 11 – Схема подогревательной печи стана 850 БМЗ

В результате исследований процесса нагрева металла было установлено, что математическая модель нагрева может быть представлена в виде (3)–(6). Описанная математическая модель существенно нелинейная. Поэтому ее решение осуществлялось численным методом. Решение конечно-разностной аппроксимации исходной системы осуществлялось методом прогонки.

На основе построенной математической модели решалась задача оптимизации нагрева призмы в условиях радиационно-конвективного теплообмена с учетом ограничений на температуру печи по критерию минимизации окалинообразования и обезуглероживания. На рисунке 12 представлены рациональные режимы нагрева непрерывнолитых заготовок, рассчитанные по предложенной методике. На основании расчетов была разработана и внедрена технологическая инструкция.



1 – температура печи, °С; 2 – температура поверхности, °С;
3 – температура центра, °С

Рисунок 12 – Рациональные режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в подогревательной печи стана 850

Результаты расчетов подтвердили экономическую эффективность предложенной методики и показали, что удельный расход топлива снизился на 1,4 процента.

Предлагаемая методика определения расхода топлива была апробирована на Белорусском металлургическом заводе в Жлобине. Результаты эксперимента подтвердили соответствующую точность расчетов. Заданный температурный режим работы печи, а также рассчитанный с использованием полученного уравнения расход топлива приведены на рисунке 12. Суммарный расход газа при этом составил $1100 \text{ м}^3/\text{ч}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Для управляемых процессов, описываемых системой линейных уравнений, разработана новая методика аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) для различных граничных условий. Предлагаемая методика решения задачи АКОР основана на построении специальной функции Кротова, что позволяет избавиться от необходимости решения двухточечной граничной задачи или нелинейного уравнения Беллмана в частных производных.

Обосновано применение предложенного подхода для решения конкретных задач управления нагревом металла [11-А].

2. На основе предложенной методики разработаны алгоритмы решения теплотехнических задач, имеющих как теоретическое, так и практическое значение.

Разработан алгоритм определения расхода топлива на основе теплового баланса для печей непрерывного действия [2-А].

Численно решена задача нагрева массивной призмы по критериям минимизации окалинообразования и обезуглероживания, рационализации топливопотребления [4-А, 6-А, 7-А, 8-А, 12-А].

3. Разработана методика идентификации математической модели процесса нагрева металла, оптимизации окалинообразования и обезуглероживания, рационализации топливопотребления, позволяющая производить анализ результатов математического моделирования и сопоставление их с реальными тепловыми процессами для обеспечения адекватности математической модели с процессом нагрева [1-А, 10-А].

4. Проведен комплексный экспериментально-теоретический анализ процессов нагрева непрерывно-литых заготовок в печах с механизированным подом с целью снижения расхода топлива и обеспечения качественного нагрева

металла [3-А, 9-А]. При этом проведены экспериментальные измерения распределения температур в характерных точках сечения непрерывно-литой заготовки в процессе нагрева по действующей технологии [10-А]. На основе анализа данных промышленного эксперимента и расчетных данных предложен новый технологический режим нагрева заготовок в подогревательной печи стана 850, позволяющий:

- снизить общее теплосодержание заготовок, что привело к значительному снижению расхода природного газа и достижения разности температур между центром и поверхностью заготовки 25–30 °С [10-А];

- обеспечить допустимое снижение температуры поверхности металла во время передачи из подогревательной в нагревательную печь, что позволило избежать двукратного перепада критической точки, что в целом привело к улучшению качества металла.

5. Разработана математическая модель процессов нагрева металла в подогревательной печи стана 850 и проведена ее параметрическая идентификация [7-А, 8-А], позволяющая разработать и внедрить рациональную технологию нагрева заготовок в подогревательной печи стана 850 [8-А].

В результате внедрения нового рационального режима работы печи расчетный удельный расход топлива снижен на 1,4 %, а величина окалины и толщина обезуглероженного слоя уменьшена в 1,5 раза.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученную в данной диссертационной работе совокупность научных результатов можно квалифицировать как возможное направление в области задач аналитического конструирования оптимальных регуляторов, в том числе применительно к решению вопросов теоретической теплотехники, направленных на определение оптимальных режимов нагрева металла по различным критериям качества.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы на предприятиях металлургии и машиностроения а также – в учебном процессе учреждений образования Республики Беларусь и Сирийской Арабской Республики.

Работа выполнена на действующих основных фондах и не требует дополнительных капитальных вложений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1-А. Раджух, М.А. Решение задачи идентификации модели процесса нагрева металла в камерных печах / В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седяко, М.А. Раджух // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1997. – № 11–12. – С. 56–58.

2-А. Раджух, М.А. Определение расхода топлива на основе теплового баланса для печей камерного типа / В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седяко, М.А. Раджух // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1998. – № 1. – С. 81–85.

3-А. Раджух, М.А. Оптимальный нагрев металла с минимальным расходом газа / В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седяко, М.А. Раджух // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1998. – № 2. – С. 84–88.

4-А. Раджух, М.А. Оптимальный нагрев металла с минимальным окислением / В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седяко, М.А. Раджух // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1998. – № 3. – С. 74–80.

5-А. Раджух, М.А. Экономичные режимы нагрева металла в печах по комплексному критерию качества / В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седяко, М.А. Раджух // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1998. – № 4. – С. 61–63.

6-А. Раджух, М.А. Применение метода магистральной оптимизации для построения ресурсосберегающих технологий нагрева в камерных печах / М.А. Раджух // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1999. – № 2. – С. 80–81.

7-А. Раджух, М.А. Нагрев заготовки в форме призмы по технологическим ограничениям / В.Б. Ковалевский, М.А. Раджух // Вестник БНТУ. – 2009. – № 6. – С. 26–28.

8-А. Раджух, М.А. Оптимизация технологии работы камерной печи / В.Б. Ковалевский, М.А. Раджух // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2009. – № 6. – С. 63–70.

9-А. Раджух, М.А. Оптимизация технологии нагрева металла в печи с целью снижения расхода топлива / В.Б. Ковалевский, М.А. Раджух // Литьё и металлургия. – 2009. – № 4(53). – С. 174–175.

10-А. Раджух, М.А. Идентификация модели процесса нагрева металла в печи / В.Б. Ковалевский, М.А. Раджух // Литьё и металлургия. – 2009. – № 4(53). – С. 176–178.

Тезисы докладов

11-А. Раджух, М.А. К решению задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов с производной в функционале / М.А. Раджух // Материалы Восьмой международной научно-технической конференции БНТУ. – Минск, 2010. – С. 249.

12-А. Раджух, М.А. Математическая модель процесса нагрева массивного тела в промышленных печах / М.А. Раджух // Материалы Восьмой международной научно-технической конференции БНТУ. – Минск, 2010. – С. 250.

РЭЗЮМЭ

Раджух Маеін Ахмад

Методыка аптымізацыі кіравання прамысловымі ўстаноўкамі нагрэву метала

Ключавыя словы: аналітычнае канструяванне, матэматычная мадэль кіравання, устаноўка нагрэву метала.

Мэтай работы з'яўляецца распрацоўка тэарэтычных палажэнняў і практычных рэкамендацый, накіраваных на стварэнне аптымальных сістэм кіравання ўстаноўкамі нагрэву метала ў награвальных печах.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца матэматычныя мадэлі кіравання награвальнымі печамі машынабудаўнічай і металургічнай вытворчасці. Прадметам даследавання з'яўляюцца параметры тэхналагічных рэжымаў работы награвальных печаў.

Распрацаваны новыя методыкі рашэння задачы аналітычнага канструявання аптымальных рэгулятараў нелінейных сістэм пры заданых абмежаваннях, з фіксаванымі гранічнымі ўмовамі. Атрыманыя вынікі прыменены да рашэння задач кіравання сістэмамі нагрэва метала для якаснага паляпшэння функцыянавання награвальных устаткаў машынабудаўнічай і металургічнай вытворчасці.

Пабудаваны матэматычныя мадэлі сістэм кіравання працэсам нагрэву метала, матэматычныя мадэлі змянення тэхналагічных характарыстык метала. Праведзена параметрычная ідэнтыфікацыя гэтых матэматычных мадэляў на аснове прамысловых эксперыментаў.

Распрацаваны методыкі і алгарытмы, якія рэалізуюць аптымальнае кіраванне рэжымамі нагрэву метала, якія дазваляюць эканоміць расход газа і распрацаваць праграмнае забеспячэнне, якое рэалізуе атрыманыя матэматычныя мадэлі і алгарытмы нагрэву.

Атрыманая ў дысертацыйнай рабоце сукупнасць навуковых вынікаў з'яўляецца магчымым накірункам у галіне задач аналітычнага канструявання аптымальных рэгулятараў нелінейных дынамічных сістэм, у прымяненні да рашэння задач тэарэтычнай цеплатэхнікі, накіраваных на вызначэнне аптымальных рэжымаў нагрэву метала ў адпаведнасці з рознымі крытэрыямі якасці.

РЕЗЮМЕ

Раджух Маеин Ахмад

Методика оптимизации управления промышленными установками нагрева металла

Ключевые слова: аналитическое конструирование, математическая модель управления, установка нагрева металла, рациональные режимы.

Целью работы является разработка теоретических положений и практических рекомендаций, направленных на создание оптимальных систем управления установками нагрева металла в нагревательных печах.

Объектом исследования являются математические модели управления нагревательными печами машиностроительного и металлургического производства. Предметом исследования являются параметры технологических режимов работы нагревательных печей.

Разработаны новые методики решения задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов нелинейных систем при заданных ограничениях, с фиксированными граничными условиями. Полученные результаты применены к решению задач управления системами нагрева металла для качественного улучшения функционирования нагревательных устройств машиностроительного и металлургического производства.

Построены математические модели систем управления процессом нагрева металла, математические модели изменения технологических характеристик металла. Проведена параметрическая идентификация этих математических моделей на основании промышленных экспериментов.

Разработаны методики и алгоритмы, реализующее оптимальное управление режимами нагрева металла, позволяющие экономить расход газа и разработать программное обеспечение, реализующее полученные математические модели и алгоритмы нагрева.

Полученная в диссертационной работе совокупность научных результатов является возможным направлением в области задач аналитического конструирования оптимальных регуляторов нелинейных динамических систем, применительно к решению задач теоретической теплотехники, направленных на определение оптимальных режимов нагрева металла в соответствии с различными критериями качества.

SUMMARY

Rajouh Maein Ahmad

Technique of optimisation of management Plants of heating of metal

Keywords: analytical designing, mathematical model of management, installation of heating of metal, rational modes.

The work purpose is working out of theoretical positions and the practical recommendations directed on creation of optimum control systems by installations of heating of metal in heating furnaces.

Object of research are mathematical models of management of heating furnaces of machine-building and metallurgical manufacture. An object of research are parameters of technological operating modes of heating furnaces.

New techniques of the decision of a problem of analytical designing of optimum regulators of nonlinear systems are developed at the set restrictions, with the fixed boundary conditions. The received results are applied to the decision of problems of management by systems of heating of metal to qualitative improvement of functioning of heating devices of machine-building and metallurgical manufacture.

Mathematical models of control systems by process of heating of metal, mathematical models of change of technical characteristics on metal are constructed. Parametrical identification of these mathematical models on the basis of industrial experiments is spent.

Techniques and the algorithms, realising optimum control of modes of heating of the metal are developed, allowing to save the expense of gas and to develop the software realising received mathematical models and algorithms of heating.

The set of scientific results received in dissertational work is a possible direction in the field of problems of analytical designing of optimum regulators of nonlinear dynamic systems, with reference to the decision of problems theoretical the heating engineers, the optimum modes of heating of metal directed on definition according to various criteria of quality.

Научное издание

РАДЖУХ
Маеин Ахмад

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫМИ УСТАНОВКАМИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Редактор Т.Н. Микулик

Подписано в печать 22.12.2010.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Опечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,28. Уч. изд. л. 1,00. Тираж 60. Заказ 1456.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ №02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.