

6
А-29

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ

На правах рукописи

В. Н. ТОПЧИЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА
ОБЖИГА РТУТНЫХ РУД ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

№ 254 — автоматическое управление и регулирование

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ФРУНЗЕ 1968

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ

На правах рукописи

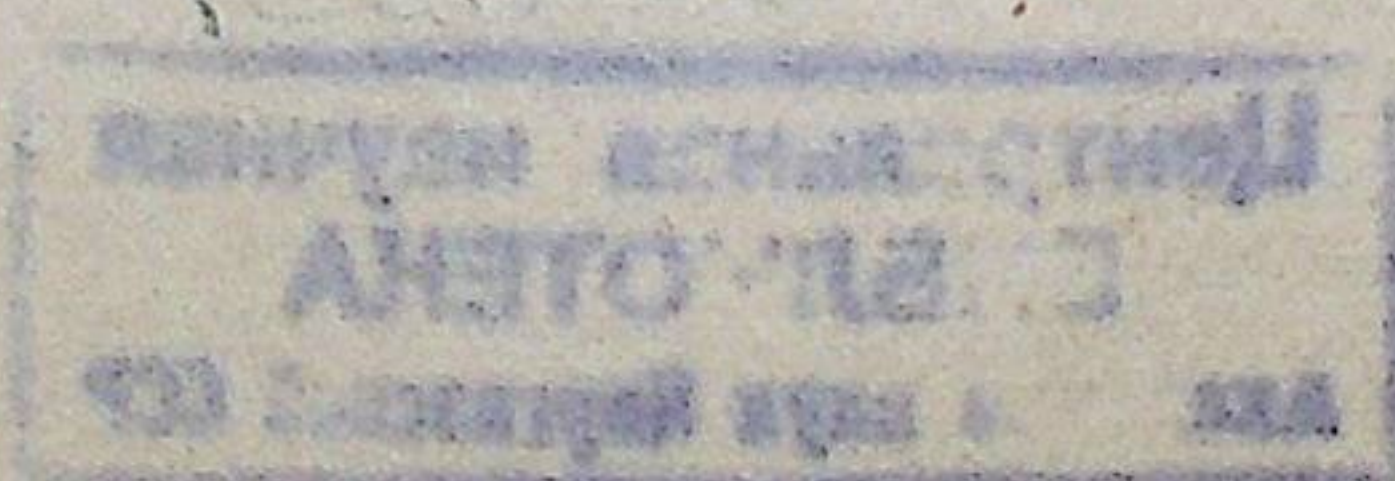
В. Н. ТОПЧИЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА
ОБЖИГА РТУТНЫХ РУД ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

№ 254 — автоматическое управление и регулирование

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук


ФРУНЗЕ 1968

Введение

Основным технологическим аппаратом ртутного производства является вращающаяся печь, которая предназначена для обжига ртутных руд. В процессе обжига возникает следующая технологическая задача: в аппарате необходимо поддерживать такой тепловой режим, при котором за время обжига руды (время пребывания ее в агрегате) происходило бы полное извлечение из нее ртути. Вследствие отсутствия датчиков автоматически контролируемых изменение содержания ртути в обжигаемой руде, управление процессом обжига приходится осуществлять по косвенным параметрам.

Вопросу автоматизации процесса обжига ртутных руд во вращающихся печах уделяется большое внимание. Актуальность этой задачи вызывается тем, что существующий уровень автоматизации объекта не обеспечивает поддержания основных технологических показателей в заданных пределах и не создает необходимых санитарных условий труда. Поэтому разработка и внедрение рациональной (более совершенной) системы автоматического управления (САУ) позволит существенно улучшить технико-экономические показатели работы аппарата. Для синтеза системы управления необходимо знать математическое описание процесса, располагать данными о характере и величинах возмущающих воздействий, приложенных к объекту, а также данными о технологических требованиях к системе управления, т. е. данными о цели управления.

Управление процессом обжига будем считать оптимальным, если динамические отклонения регулируемых величин и время их регулирования не будут превышать заданных значений.

Получение математического описания для вращающихся печей встречает серьезные трудности, которые обуславливаются многими причинами, в частности, сложностью и недостаточной изученностью процессов, отсутствием необходимых

датчиков при экспериментальных исследованиях и т. д. Вследствие чего рассматриваемый технологический аппарат является недостаточно изученным с точки зрения автоматизации объектом.

Попытки построения САУ вращающимися печами, применяемыми в ртутном производстве, основанные на недостаточно обоснованных исходных данных (не подкрепленных объективными исследованиями), не давали желаемых результатов, так как такие системы оказывались недостаточно эффективными, а иногда и не работоспособными.

Задачи поддержания с высокой точностью выходных величин объектов, аналогичные вышеизложенной, довольно часто встречаются при автоматизации других процессов цветной металлургии, а также в алюминиевой, цементной и других отраслях промышленности, т. е. данная задача имеет распространенный характер. Однако для многих этих процессов вопросы математического описания являются также недостаточно разработанными. Поэтому задачи построения математических моделей сложных технологических аппаратов являются актуальными и первоочередными, так как отсутствие таких моделей сдерживает проведение работ по автоматизации этих объектов.

Реферируемая работа посвящена построению математической модели процесса обжига ртутных руд во вращающихся печах, синтезу системы автоматического управления и экспериментальной ее проверке.

I. Анализ процесса обжига ртутных руд и существующего уровня автоматизации объекта

При описании технологического процесса особое внимание было обращено на анализ процессов, происходящих в объекте, а также данных технологических показателей работы печи. По технологическим требованиям при этом предусматривается, чтобы рядовая руда (с содержанием ценного металла в среднем 1,0) после обжига содержала ртути не более 0,08. В основе процесса обжига ртутных руд лежит реакция восстановления ртути из киновари (HgS) за счет окисления связанной с ней серы кислородом воздуха при температуре $750 \div 850^\circ\text{C}$. Тепло для обжига руды получается за счет сжигания топлива (мазута) в топочной камере и в пространстве нижней части барабана печи.

Проведенный анализ процессов показал, что вращающаяся печь представляет собой сложный промышленный объект, в

котором одновременно протекают различные взаимосвязанные между собой физические и химические процессы. При этом наиболее важными, определяющими являются тепловые процессы и процессы горения. Анализ этих процессов позволил сделать вывод, что основное влияние на качество обжига оказывает температурный режим печи. Поэтому при исследовании процесса обжига было обращено особое внимание на выяснение степени зависимости восстановления ртути от температуры в печи. Так, например, в работе Мельникова С. М. показано, что при определенном температурном режиме кривая падения содержания ртути в руде по мере ее продвижения в печи от верхнего, загрузочного, конца до нижнего, разгрузочного, падает до нуля. В нашей работе приводятся данные по температурному режиму, который следует поддерживать в агрегате, чтобы достичь желаемого результата.

В работе дается оценка технического состояния объекта и степени его готовности к автоматизации, рассматриваются и анализируются основные причины отрицательно влияющие на технико-экономические показатели процесса обжига, обусловленные в основном низким уровнем автоматизации объекта и несовершенством отдельных технологических операций.

В диссертации приводится краткий обзор работ, посвященных автоматизации вращающихся печей. В этих работах в качестве метода управления, в основном использовался широко распространенный на практике метод регулирования по отклонению. Сам объект при этом рассматривался либо как одномерный с запаздыванием, либо как многомерный, но без учета взаимосвязей между регулируемыми величинами через процесс.

Дальнейшие исследования (гл. III) и результаты обзора показали, что такой подход к вопросу автоматизации этого агрегата является недостаточно рациональным, так как не учитывает некоторые его существенные реальные динамические свойства (например, многосвязность) и приложенные к нему возмущения.

II. Математическое описание объекта регулирования

Для получения математического описания процесса в работе были использованы аналитические и экспериментальные методы.

При аналитическом исследовании динамики объекта были использованы методы математического описания процессов, происходящих в аналогичных технологических аппаратах (из-

ложенных, например, в работах Ходорова Е. И., Ицковича Э. Л. и др.).

Полученная при таком подходе математическая модель объекта оказалась очень сложной и представляет собой систему десяти нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с частными производными. В виду сложности этой системы, аналитическое решение ее оказывается невозможным. Однако полученная математическая модель является полезной, так как позволяет произвести качественный анализ процесса обжига, а также при определенных допущениях получить различные более простые модели.

Для построения более простой модели в работе считалось, что теплопередача в аппарате осуществляется в основном за счет теплового излучения и конвекции, и что теплопроводность тел очень мала. Явления массопереноса при этом не учитывались.

В результате этих (и некоторых других) допущений была построена упрощенная математическая модель объекта в виде системы четырех дифференциальных уравнений с частными производными первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_p}{\partial t} + W_p \frac{\partial T_p}{\partial x} &= x^p_1 T_2 - x^p_2 T_p + I^1, \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} - W_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} &= x^2_1 T_p - x^2_2 T_2 + Q^1, \\ \frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} - W_2 \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x} &= -K_{O_2} C_{O_2} C_T, \\ \frac{\partial C_T}{\partial t} - W_T \frac{\partial C_T}{\partial x} &= -K_{O_2} C_{O_2} C_T \end{aligned} \quad (1)$$

с некоторыми граничными условиями, где T_p, T_2 — соответственно температуры руды и газов в печи,

W_p, W_2 — соответственно скорости руды и газов вдоль оси x (вдоль оси печи),

$x^p_1, x^p_2, x^2_1, x^2_2$ — коэффициенты, характеризующие теплопередачу между газом и рудой,

Q^1 — количество тепла, выделяющееся в газовом потоке в единицу времени за счет внутреннего источника тепла,

J^1 — тепло, расходуемое на химические процессы в единицу времени,

K_{O_2} — константа скорости реакции,

C_{O_2}, C_T — концентрации соответственно кислорода и топлива в газах,

W_T — скорость потока топлива.

Входные воздействия, такие как расход, температура и влажность руды, расход топлива и изменение его состава, расход воздуха и т. д., приводят к изменению параметров $x^p_1, x^p_2, x^2_1, x^2_2, W_2, W_p$ и т. д. и граничных условий в уравнениях (1).

Использование методов, изложенных в работе Девяткова Б. Н., позволило динамические характеристики объекта по каждому каналу приближенно (с достаточной для практики точностью) описать последовательно соединенными звеньями с чистым запаздыванием и апериодическим (при небольших отклонениях от номинального режима)

$$W_i(p) = \frac{K_i}{T_i p + 1} e^{-p \tau_i} \quad (2)$$

где $W_i(p)$ — передаточная функция объекта по i -му каналу, K_i, T_i, τ_i — соответственно коэффициент усиления, постоянная времени и время запаздывания i -го канала

В виду того, что аналитическое определение коэффициентов (K_i, T_i и τ_i), входящих в эти уравнения, встречает значительные трудности, численные их значения находились по данным экспериментальных исследований объекта.

Аналитические исследования позволили установить, что в качестве выходных величин объекта можно рассматривать: температуру обжигаемой руды (огарков) на выходе из агрегата x_1 , содержание свободного кислорода в отходящих газах печи x_2 и разрежение газов в пылевой камере x_3 . Анализ уравнений динамики показал, что выходные величины x_1, x_2 и x_3 взаимосвязаны между собой через процесс и, следовательно, вращающаяся печь относится к классу многосвязных объектов регулирования.

Данные этих исследований позволили также выявить и оценить основные возмущающие факторы, оказывающие влияние на выходные величины объекта (представленных в виде ряда равенств, выражающих определенные требования к процессу). В работе рассмотрен и предложен метод стабилизации найденных возмущающих факторов для вращающейся печи, работающей на жидком топливе. При этом было отмечено, что выполнение этих требований практически может быть достигнуто лишь частично, причем, как путем построения от-

дельных систем автоматической стабилизации входных величин объекта (например, системы стабилизации температуры топлива), так и использованием некоторых технологических методов (например, точное весовое дозирование руды, качественная мазутоподготовка и т. п.).

Для проверки результатов аналитических исследований и построения математической модели объекта были проведены экспериментальные исследования его методом активных экспериментов.

В виду того, что объект не был готов к проведению таких исследований (отсутствовал контроль за изменением основных выходных и входных величин x_1, x_2, y_1, y_2 и f_1) на нем были предварительно осуществлены специальные подготовительные работы. После завершения этих работ были проведены необходимые экспериментальные исследования промышленной вращающейся печи.

Результаты экспериментальных исследований показали, что вращающаяся печь как объект регулирования характеризуется следующими динамическими свойствами:

1. Многомерностью и многосвязностью.
2. Наличием двухсторонних и односторонних взаимосвязей между двумя различными выходными величинами, причем некоторые из этих связей являются сильными, другие — слабыми.
3. Значительным самовыравниванием по всем выходным величинам.
4. Большим запаздыванием по температуре огарков, несколько меньшим — по содержанию кислорода в отходящих газах, отсутствием запаздывания по разрежению.
5. Большим быстродействием по разрежению, несколько меньшим по содержанию кислорода, значительной инерционностью по температуре огарков.
6. Переменностью параметров объекта по различным каналам, обусловленной в основном нестабильностью характеристик сырья и топлива.
7. Линейностью одних каналов и нелинейностью других, а в целом (с учетом ограниченности допустимых состояний объекта и его линеаризации) печь можно считать линейным объектом.

8. Наличием значительных возмущений, поступающих в объект по различным входам, особенно по входам «подача руды» и «подача топлива».

В работе приводится анализ возмущающих воздействий, приложенных к объекту регулирования. Данные этого анализа позволили сделать вывод, что наиболее существенное

влияние на изменение выходной величины x_1 оказывают возмущения по расходам руды f_1 и топлива y_1 , а на изменение выходной величины x_2 — возмущения по расходам топлива y_1 и вторичного воздуха y_2 . При этом было отмечено, что входную величину «расход руды» f_1 нерационально брать в качестве регулирующего воздействия как вследствие значительных возмущений, поступающих в объект по этому входу, так и вследствие более худших динамических характеристик объекта по этому входу (по сравнению с другими).

Далее в работе приводятся данные о характере и численных значениях возмущающих воздействий, приложенных к объекту.

Таким образом, проведенные исследования показали, что процесс обжига можно характеризовать тремя взаимосвязанными выходными величинами и двумя внешними возмущениями. Дальнейшие исследования позволили существенно упростить структурную схему объекта и представить ее в виде схемы с двумя взаимосвязанными выходными величинами и одним внешним возмущением.

В качестве регулирующих воздействий при этом были приняты:

1. Для регулирования температуры огарков — расход топлива.
2. Для регулирования содержания кислорода в отходящих газах — расход вторичного воздуха.

Уравнения динамики объекта, выраженные через передаточные функции, были представлены в виде:

$$x_i(p) = \sum_{j=1}^m W_{ji}(p)y_j(p) + \sum_{q=1}^r V_{qi}(p)f_q(p) \quad (3)$$

при $i=1,2, m=2, r=1$, где $x_i(p), y_j(p), f_q(p)$ — изображения по Лапласу соответственно регулируемых величин, регулирующих и возмущающих воздействий при нулевых начальных условиях,

$W_{ji}(p)$ — передаточные функции объекта по прямым (при $i=j$) и перекрестным (при $i \neq j$) каналам,

$V_{qi}(p)$ — передаточные функции объекта по каналам внешних возмущающих воздействий.

Аппроксимация динамических характеристик объекта по каждому каналу (с учетом результатов аналитических и экспериментальных исследований) производилась аperiodическим звеном первого порядка и звеном чистого запаздывания.

В работе приводятся средние значения параметров объекта по различным каналам и возможные пределы их изменения.

Полученные уравнения динамики раскрывают наиболее существенные и важные взаимосвязи между выходными, входными (управляющими) и возмущающими величинами объекта и поэтому были приняты в качестве его математической модели. Эта модель была использована для синтеза системы автоматического управления процессом обжига.

При синтезе систем управления такими объектами возникает ряд трудностей, обусловленных в основном многосвязностью объектов и подверженностью их воздействию значительных возмущений.

В связи с этим, в работе предложен метод управления, который предусматривает:

- 1) частичное подавление возмущающих воздействий до их поступления в объект управления,
- 2) автоматическое регулирование выходных величин объекта с компенсацией влияния внутренних взаимосвязей и внешних возмущающих воздействий на качество регулирования.

III. Построение и исследование системы несвязанного регулирования объекта

Анализ некоторых работ (например, Ходорова Е. И., Шашурина С. А. и Нагния В. А., Тимоховича П. П. и др.), показал, что при синтезе САУ вращающимися печами недостаточно внимания уделялось выявлению и учету всех наиболее существенных динамических свойств объекта (например, его внутренних взаимосвязей и действующих на него реальных возмущений). Такой подход не обеспечивал требуемых показателей качества и приводил к снижению эффективности автоматизации.

В данной работе сделана попытка при синтезе САУ по возможности учесть все наиболее существенные динамические свойства объекта.

Синтез системы управления производился на основе полученной математической модели процесса обжига и предложенного метода управления.

В соответствии с предложенным методом решение задачи синтеза системы управления следует искать в классе комбинированных многосвязных систем.

Учитывая сложность этой задачи ее решение было осуществлено в несколько (три) этапов:

1. На первом этапе решалась задача синтеза САУ объектом без учета его внутренних взаимосвязей (влиянием их пренебрегли).

2. На втором этапе исследовалось влияние внутренних взаимосвязей объекта W_{12} и W_{21} и действующих на него возмущений на качество регулирования и проверялась возможность обеспечения системой несвязанного регулирования (СНР) требуемых показателей качества.

3. На третьем этапе решалась задача синтеза многосвязной САУ объектом и рассматривался вопрос ее технической реализации.

Исследование этих систем было осуществлено методом математического моделирования на электронной аналоговой машине.

На входы систем при этом подавались ступенчатые возмущения, как наиболее характерные и опасные для них. Максимальные значения этих возмущений были определены в процессе нормальной эксплуатации и экспериментальных исследований объекта.

В третьей главе рассматривалось решение первых двух этапов задачи синтеза.

При решении первого этапа задачи (в соответствии с динамическими свойствами прямых каналов объекта и заданных критериев качества) были найдены законы управления для двух независимых (несвязанных через процесс) систем регулирования. Уравнения динамики этих систем были представлены в виде:

$$\begin{aligned} [1 - W_{11}(p)R_{11}(p)]x_1(p) &= W_{11}(p)y_1(p) + V_{11}(p)f_1(p), \\ [1 - W_{22}(p)R_{22}(p)]x_2(p) &= W_{22}(p)y_2(p), \end{aligned} \quad (4)$$

где $R_{11}(p)$ и $R_{22}(p)$ — передаточные функции регуляторов соответственно первой (x_1) и второй (x_2) выходных величин объекта. Исследование этих систем на электронной моделирующей машине показало, что первая система (САР температуры огарков) лишь частично удовлетворяет заданным критериям качества (не выполняются они для возмущений по входу f_1), а вторая система (САР содержания кислорода) — удовлетворяет им полностью.

Уравнения динамики системы несвязанного регулирования были получены в виде:

$$[1 - W_{11}(p)R_{11}(p)]x_1(p) - W_{21}(p)R_{22}(p)x_2(p) = W_{11}(p)y_1(p) +$$

$$\begin{aligned}
 & + W_{21}(p)y_2(p) + V_{21}(p)f_1(p), \\
 - W_{12}(p)R_{11}(p)x_1(p) + [1 - W_{22}(p)R_{22}(p)]x_2(p) = \\
 & = W_{12}(p)y_1(p) + W_{22}(p)y_2(p).
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Как видно из выражения (5) учет внутренних перекрестных связей объекта приводит к значительному усложнению уравнений динамики системы.

Исследование этой системы осуществлялось как при подаче возмущающих воздействий на один из трех ее входов, так и при одновременной подаче их на два ее различных входа (один из актуальных и характерных случаев ее работы).

Анализ результатов исследования показал, что:

1. СНР как в первом так и во втором случаях лишь частично удовлетворяет требованиям заданных критериев качества (в основном не обеспечивается заданное время регулирования).

2. Основными причинами, обуславливающими такое поведение системы следует считать многосвязность объекта и подверженность его воздействию значительных возмущений.

3. Для достижения требуемых показателей качества необходимо перейти к построению многосвязной САУ.

4. СНР можно применять для управления процессом обжига, но при этом она будет обеспечивать показатели качества несколько ниже заданных.

IV. Построение и исследование многосвязной системы управления объектом

Для синтеза такой системы были использованы принципы и методы теории многосвязного регулирования и, в частности, теории инвариантности, позволяющие строить высококачественные системы управления для такого класса объектов.

На примере объекта с двумя взаимосвязанными регулируемыми величинами и двумя внешними возмущениями рассмотрены некоторые общие свойства и особенности комбинированных многосвязных систем с запаздыванием построенных на основе принципа инвариантности. При этом было отмечено, что только при одновременном применении принципов автономности и инвариантности достигается существенное упрощение передаточных функций компенсирующих связей (КС) системы и значительное упрощение системы управления в целом.

Кроме того, было отмечено, что при синтезе таких систем наблюдаются случаи полного или частичного совпадения ус-

ловий автономности и инвариантности. Данное обстоятельство является очень важным, так как достижение таких совпадений уменьшает число вводимых в систему компенсирующих связей (или упрощает их) и упрощает структурную схему системы управления. В работе при синтезе многосвязной САУ было частично достигнуто такое совпадение.

Решение задачи синтеза многосвязной системы состоит в определении передаточных функций и оптимальных значений параметров этих функций для всех элементов матрицы управляющего устройства.

При синтезе такой САУ рассматривались лишь структурные схемы управляющих устройств реализованных на серийных (основных) регуляторах соединенных между собой динамическими (компенсирующими) связями. Анализ многосвязных систем показал, что сложность их во многом зависит от способа реализации компенсирующих связей. В связи с этим в работе были рассмотрены два основных способа осуществления компенсирующих связей между регуляторами, позволяющие строить схемы САУ с прямыми (ПКС) и обратными компенсирующими связями (ОКС).

При этом ставилась задача: найти наиболее рациональный способ осуществления компенсирующих связей, который бы позволял строить многосвязные САУ с желаемыми динамическими свойствами сепаратных систем и получать достаточно простые компенсирующие связи удобные с точки зрения технической реализации. В работе с этой целью рассмотрены четыре схемы многосвязного регулирования: три схемы с прямыми и одна схема с обратными компенсирующими связями. Решение этой задачи осуществлялось на основе анализа уравнений динамики сепаратных систем и выражений передаточных функций КС найденных для всех четырех схем. В выражениях передаточных функций КС при этом как правило содержатся звенья с запаздыванием. Проверка возможности физической реализации этих связей производилась на основе анализа их передаточных функций. Были рассмотрены возможные случаи, возникающие при этом. В работе приводятся результаты анализа различных вариантов схем КС с точки зрения простоты и удобства технической реализации комбинированных многосвязных систем с запаздыванием.

Проведенный анализ позволил сделать заключение, что наиболее рациональной в динамическом и техническом отношении является схема САУ с ОКС. Поэтому эта схема и была принята за основу при синтезе окончательного варианта многосвязной САУ процесса обжига.

Уравнения динамики этой системы, преобразованные по Лапласу, при нулевых начальных условиях, получены в виде:

$$\begin{aligned}
 & [1 - R_{11}(p)R_{22}(p)R_{12}(p)R_{21}(p) - W_{11}(p)R_{11}(p) - \\
 & - W_{21}(p)R_{11}(p)R_{22}(p)R_{12}(p)]x_1(p) - [W_{11}(p)R_{22}(p) + \\
 & \pm W_{11}(p)R_{11}(p)R_{22}(p)R_{21}(p)]x_2(p) = \{W_{11}(p)[1 - R_{11}(p)R_{22}(p) \cdot \\
 & \cdot R_{12}(p)R_{21}(p)] + R_{22}(p)R_{12}(p)[W_{11}(p)R_{11}(p)R_{21}(p) + \\
 & + W_{21}(p)]\}y_1(p) + \{W_{21}(p)[1 - R_{11}(p)R_{22}(p)R_{12}(p)R_{21}(p)] + \\
 & \pm R_{11}(p)R_{21}(p)[W_{11}(p) + W_{21}(p)R_{22}(p)R_{12}(p)]\}y_2(p) + \\
 & + \{R_{11}(p)R_{11}^f(p)[W_{11}(p) \pm W_{21}(p)R_{22}(p)R_{12}(p) + \\
 & + V_{11}(p)[1 - R_{11}(p)R_{22}(p)R_{12}(p)R_{21}(p)]]\}f_1(p); \\
 & - \{R_{11}(p)[W_{12}(p) + W_{22}(p)R_{22}(p)R_{12}(p)]\}x_1(p) + \\
 & + \{1 - W_{22}(p)R_{22}(p) - R_{11}(p)R_{22}(p) \cdot \\
 & \cdot R_{21}(p)[R_{12}(p) + W_{12}(p)]\}x_2(p) = \{W_{12}(p)[1 - \\
 & - R_{11}(p)R_{22}(p)R_{12}(p)R_{21}(p) + R_{12}(p)R_{22}(p) \cdot [W_{12}(p)R_{11}(p)R_{21}(p) + \\
 & + W_{22}(p)]y_1(p) + \{W_{22}(p)[1 - R_{11}(p)R_{22}(p)R_{12}(p)R_{21}(p) + \\
 & + R_{11}(p)R_{21}(p)[W_{12}(p) + W_{22}(p)R_{22}(p)R_{12}(p)]\}y_2(p) + \\
 & + R_{11}(p)R_{11}^f(p)[W_{12}(p) + W_{22}(p)R_{22}(p)R_{12}(p)] \cdot f_1(p);
 \end{aligned} \quad (6)$$

где $R_{12}(p), R_{21}(p), R_{11}^f(p)$ — выражения передаточных функций КС соответственно относительно «чужих» управляющих и внешнего возмущающего воздействия.

Из этих уравнений, после подстановки в них условий автономности и инвариантности, были получены уравнения динамики сепаратных систем

$$\begin{aligned}
 & [1 - W_{21}(p)R_{11}(p)]x_1(p) = W_{11}(p)y_1(p), \\
 & [1 - W_{22}(p)R_{22}(p)]x_2(p) = W_{22}(p)y_2(p).
 \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, за счет введения компенсирующих связей сложную многосвязную систему (6) в динамическом отношении можно расчленить на две простые сепаратные системы, уравнения динамики которых по форме совпадают с уравнениями обычных одномерных систем регулирования.

Последнее обстоятельство позволило выбрать в качестве основных регуляторов многосвязной САУ ПИ — регуляторы,

так как они удовлетворяют требованиям заданных критериев качества (гл. III).

Передаточные функции компенсирующих связей определялись соответственно из условий автономности и инвариантности.

Выражения передаточных функций КС относительно «чужих» управляющих воздействий получены в виде:

$$R_{ij}(p) = \frac{K_{ij}T_{ujj}p}{K_{jj}K_{pjj}(T_{ujj}p + 1)} \quad (8)$$

при $i, j = 1, 2; i \neq j$,

где K_{jj} и K_{ij} — коэффициенты усиления соответственно по каналам управляющего и возмущающего воздействий,

K_{pjj} и T_{ujj} — соответственно коэффициент усиления и время изодрома j -го регулятора.

Выражение передаточной функции КС относительно внешнего возмущения f_1 (после некоторого упрощения) было представлено в виде:

$$R_{11}^f(p) = - \frac{T_1 p}{T_2 p + 1} e^{-p(\tau_{f1} - \tau_{11})}, \quad (9)$$

где T_1 и T_2 — постоянные времени КС (определены экспериментально при моделировании),

τ_{11} и τ_{f1} — временные запаздывания соответственно по каналам управляющего и возмущающего воздействия объекта (причем, $\tau_{f1} > \tau_{11}$).

Как видно из уравнений (8) и (9) компенсирующие связи R_{ij} не содержат звена запаздывания (вследствие равенства времен запаздывания по соответствующим прямым и перекрестным каналам), а связь R_{11}^f содержит такое звено, так как $\tau_{f1} > \tau_{11}$.

Исследование поведения многосвязной системы производилось как при подаче ступенчатых возмущений на один из трех ее входов y_1, y_2 или f_1 , так и при одновременной подаче их на два ее различных входа (один из характерных и практически важных случаев ее работы). Анализ полученных результатов показал, что многосвязная система ведет себя в динамике как две независимые сепаратные системы и обеспечивает статическую и динамическую автономность. Показатели качества этой системы удовлетворяют заданным требованиям и по величине совпадают с показателями, обеспечиваемыми отдельными несвязанными через процесс САР (гл. III). Эти

результаты были получены за счет введения компенсирующих связей.

Производилось также исследование поведения данной системы при изменении параметров различных каналов объекта (в пределах $\pm 15\%$ от их средних значений), обусловленного нестабильностью характеристик сырья, топлива и другими причинами. Результаты этих исследований показали, что в многосвязной инвариантной САУ при этом не происходит существенных отклонений регулируемых величин x_1 и x_2 . Нарушение условий инвариантности при этом в существующем для данных систем диапазоне частот не превышает $3 \pm 5\%$, что вполне допустимо. Следовательно, можно сказать, что рассматриваемая система является малочувствительной к изменению параметров объекта (в указанных выше пределах).

Таким образом, результаты исследования разработанной многосвязной САУ позволили сделать вывод, что данная система удовлетворяет требованиям заданных критериев качества и что ее можно рекомендовать в качестве системы, которая сможет обеспечить высококачественное управление вращающимися печами для обжига ртутных руд. Достоинство этой системы состоит также в том, что она имеет простую структуру и может быть легко реализована на серийной регулирующей аппаратуре (например, на регуляторах системы ВТИ или системы ЭАУС-У).

V. Производственные испытания системы автоматического регулирования вращающейся печи

В связи с тем, что объект не был готов к автоматизации, на нем были проведены специальные подготовительные работы. Необходимость выполнения этих работ была обусловлена низким техническим уровнем работы некоторых узлов агрегата, несовершенством отдельных технологических операций, а также низким уровнем его автоматизации.

В частности, были разработаны и внедрены:

1. Система мазутоподготовки с рециркуляционным принципом работы, обеспечивающая автоматическую стабилизацию температуры мазута (на любом уровне в пределах $60 \div 75^\circ\text{C}$) и его давления перед форсункой (любое значение в диапазоне $1,0 \div 2,5 \text{ кг/см}^2$) на заданном уровне, а также осуществляющая необходимую его очистку перед подачей в печь. Производственные испытания показали, что предложенная система является достаточной гибкой, удобной при запуске и эксплуатации и обеспечивает качественную подготовку мазута.

2. Система организованной подачи вторичного (вентиляторного) воздуха в печь, позволяющая осуществлять автоматическое управление расходом воздуха. Производственные испытания этой системы показали положительные результаты.

3. Устройство для непрерывного автоматического контроля температуры обжигаемой руды (огарков) на выходе из агрегата. Данное устройство было использовано для проведения экспериментальных исследований объекта. Производственные испытания показали, что предложенное устройство может быть использовано для автоматического контроля за изменением температуры огарков. В работе отмечается, что это устройство впервые применено для этих целей. Имеется акт о внедрении его на Хайдарканском металлургическом заводе.

После окончания этих работ были проведены производственные испытания опытно-промышленной системы автоматического контроля и регулирования.

Данные этих испытаний указали на работоспособность и эффективность этой системы и в основном подтверждают результаты лабораторных исследований.

Результаты производственных испытаний САУ объектом показали, что:

1. Колебание температуры огарков снизилось в $2,5 \div 3,0$ раза по сравнению с ручным управлением.

2. Увеличилась производительность агрегата примерно на 5% и снизился расход топлива ориентировочно на $4 \div 5\%$.

3. Улучшилось качество обжига.

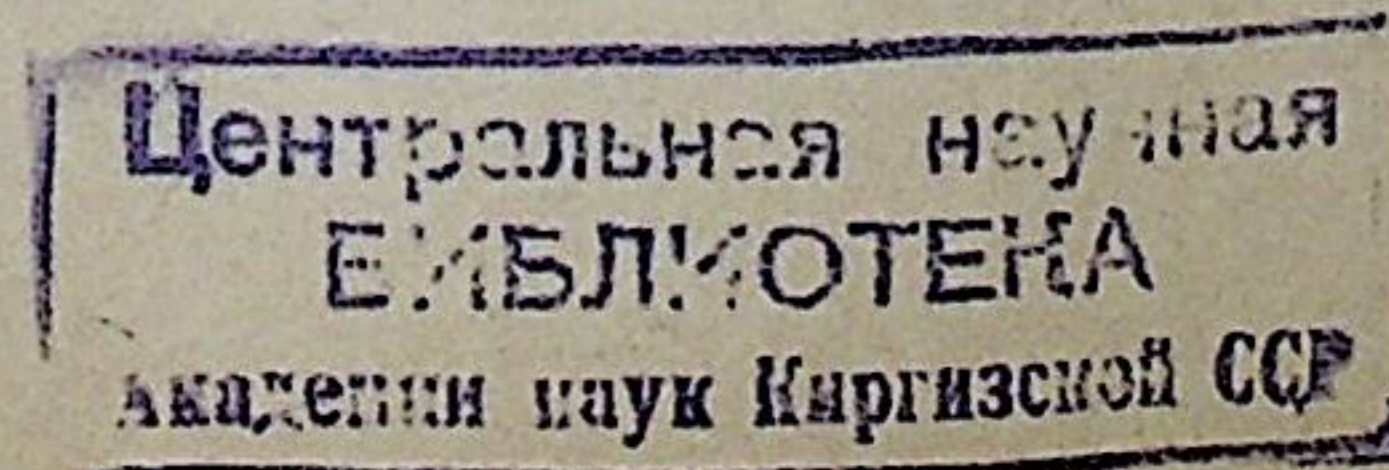
4. Годовой экономический эффект от внедрения этой системы на Хайдарканском металлургическом заводе по ориентировочным расчетам составит примерно 185 тыс. рублей. Результаты, полученные в работе, были использованы Кемеровским филиалом Центрального проектно-конструкторского бюро (ЦПКБ).

Заключение

В итоге проведенных исследований были получены следующие основные результаты:

1. Проведены аналитические и экспериментальные исследования процесса обжига ртутных руд во вращающихся печах, которые позволили построить математическую модель этого процесса. Исследование этой модели дало возможность установить структуру и основные свойства и особенности вращающейся печи как объекта регулирования.

2. Разработано и внедрено устройство для непрерывного



322831

автоматического контроля температуры обжигаемой руды на выходе из агрегата. Получаемая при этом информация используется для управления объектом.

3. Предложен метод управления объектом, предусматривающий частичное подавление возмущающих воздействий до их поступления в объект и компенсацию влияния внутренних взаимосвязей и внешних возмущений на качество регулирования.

4. Рассмотрены некоторые общие свойства и особенности комбинированных многосвязных систем управления сложными объектами с запаздыванием, построенных на принципах автономности и инвариантности. При этом было отмечено, что одновременное применение этих принципов позволяет создавать достаточно простые и высококачественные системы управления для рассматриваемого класса многосвязных объектов с запаздыванием.

5. Исследования показали, что наиболее рациональным способом осуществления компенсирующих связей в многосвязных системах с запаздыванием является способ, основанный на введении условий автономности на схеме с обратными компенсирующими связями.

6. Разработана комбинированная многосвязная система управления сложным объектом с запаздыванием, удовлетворяющая требованиям заданных критериев качества. Показан способ практической ее реализации на серийной регулирующей аппаратуре.

7. Проведены производственные испытания САУ процессом обжига, которые показали, что данная система позволит увеличить производительность агрегата примерно на 5%, снизить расход топлива на 4÷5% и улучшить качество обжига. Экономический эффект от внедрения этой системы по заводу составит примерно 185 тыс. рублей в год.

8. Полученные результаты использованы Кемеровским филиалом ЦПКБ для разработки проекта автоматизации вращающихся печей, применяемых в ртутном производстве.

Изложенный в работе материал представляет определенный интерес и может быть использован при исследовании и проектировании автоматизированных систем управления аналогичными технологическими аппаратами (что отмечено выше).

Основные результаты работы докладывались II и III научно-технических конференциях по автоматическому управлению при Институте автоматики АН Киргиз. ССР (Фрунзе, 1966 и 1967 гг.) и на научно-технической конференции по проблеме

«Автоматизация производственных процессов» при отделении физико-математических наук АН Каз. ССР (Алма-Ата, 1966 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Бусаргин В. М., Крушель Е. Г., Рожнов В. А., Топчиев В. Н. Исследование вращающейся трубчатой печи для обжига ртутной руды как объекта регулирования. Сб. «Автоматизация предприятий цветной металлургии», Техническая информация № 3, Изд-во ИНТИ Киргиз. ССР, Фрунзе, 1962.

2. Бусаргин В. М., Крушель Е. Г., Рожнов В. А., Топчиев В. Н. Экспериментальное определение статических и динамических характеристик вращающихся трубчатых печей, применяемых в ртутной промышленности. Там же.

3. Топчиев В. Н. Трубчатая вращающаяся печь с топочной камерой. Авт. свидетельство № 145357, Бюллетень изобретений, № 5, 1962.

4. Бусаргин В. М., Крушель Е. Г., Топчиев В. Н. Математическое описание процессов, происходящих во вращающейся печи при обжиге ртутных руд. Сб. «Автоматизация процессов производства цветных металлов», Изд-во «Илим», Фрунзе, 1964.

5. Бусаргин В. М., Крушель Е. Г., Топчиев В. Н. Выявление возмущающих факторов, действующих на процессы обжига ртутных руд во вращающейся печи. Там же.

6. Бусаргин В. М., Топчиев В. Н. Выходные параметры вращающейся печи для обжига ртутных руд и методы их регулирования. Там же.

7. Топчиев В. Н. Установка для непрерывного автоматического контроля температуры обжигаемого сыпучего материала во вращающейся печи. Там же.

8. Топчиев В. Н. Исследование вращающейся печи как объекта регулирования с распределенными параметрами. Сб. «Элементы теории автоматического управления и контроля», Изд-во «Илим», Фрунзе, 1965.

9. Топчиев В. Н. Исследование процесса обжига ртутной руды как объекта связанного регулирования. Сб. «Элементы теории и техники автоматического управления», Изд-во «Илим», Фрунзе, 1966.

10. Топчиев В. Н., Цупко А. И. Построение и исследование системы несвязанного регулирования процесса обжига ртутных руд во вращающихся печах. Сб. «Автоматическое управление непрерывными производственными процессами», Изд-во «Илим», Фрунзе, 1967.

11. Топчиев В. Н., Цупко А. И. Автоматическое регулирование процесса обжига ртутных руд во вращающихся печах. Сб. «Автоматизация производственных процессов. Изд-во «Наука», АН Каз. ССР, Алма-Ата, 1968.