

М 259085

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

ОМАРОВ Танатар Фатыхович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ
ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ
НЕПРЕРЫВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА
ПРЯМОШОВНЫХ СВАРНЫХ ТРУБ**

(Специальность 05.13.14 — Автоматическое управление
и регулирование)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



1259085

Омаров Т. Ф. Разработка и

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
к. т. н., доцент Плотников В. Н.

Официальные оппоненты:
д. т. н., профессор Круг Г. К.,
к. т. н. Силаев В. Н.

Ведущее предприятие — ВНИИМЕТМАШ.

Автореферат разослан « » 1974 г.

Защита диссертации состоится « » 1975 г.
на заседании Совета факультета «Приборостроение» МВТУ
имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005 Москва, Б-5, 2-я Бау-
манская ул.

С диссертацией
имени Н.

библиотеке МВТУ

Отзывы
просим направить

по почте, с печатью,

Ученый
к.

Омаров О. Д.)

M 259085

Актуальность проблемы. Проектирование автоматизированной системы управления (АСУ) промышленными производствами выдвигает ряд важных вопросов, к которым, в частности, относится задача алгоритмического обеспечения управляющей вычислительной машины (УВМ). К этой задаче относятся:

создание математических моделей сложных технологических процессов, которые характеризуются многофакторностью, наличием возмущений, недостаточностью информации и т.д.;

разработку алгоритмов идентификации и оптимизации управления (в частности, численных методов для решения на ЦВМ).

Решение вопросов алгоритмического обеспечения УВМ имеет большое народнохозяйственное значение. Стоимость работ по алгоритмическому обеспечению АСУ за последние годы резко возросла. Однако вопросам разработки алгоритмов идентификации и оптимизации (особенно при управлении технологическими процессами) уделяется ещё недостаточное внимание. Поэтому выбранная тема является актуальной.

Целью настоящей работы является разработка и исследование алгоритмов идентификации и оптимизации управления непрерывными технологическими процессами. Рассмотрение производится на примере технологического процесса производства прямошовных сварных труб, что однако не ограничивает общность полученных результатов.

Методы исследования. Управление технологическим процессом производится на основе общих принципов построения АСУ и включает этапы идентификации и оптимизации управления. Для идентификации параметров математической модели используются статистические методы и аппарат функционального анализа, а для оптимизации управления - методы теории оптимального управления.

Научная новизна. Сформулирована и решена задача оптимизации управления непрерывным технологическим процессом для производства прямошовных сварных труб.

Теоретико-экспериментальным способом, использующим основные физические закономерности процесса, и уточняющимся по экспериментальным данным, строится математическая модель процесса радиочастотной сварки. Для статистической оценки параметров математической модели разработаны и исследованы методы идентификации с оценкой погрешности решения при точном и неточном задании входных данных.

Практическая ценность. Результаты работы обеспечивают возможность создания алгоритмического обеспечения, управляющей вычислительной машины АСУ трубозлектросварочного цеха для идентификации и оптимизации управления технологическим процессом производства прямошовных сварных

труб.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены:

- на Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов по вопросам технической кибернетики г.Тбилиси, сентябрь, 1973г.;
- на УП Всесоюзном научно-техническом совещании по созданию и внедрению автоматизированных и автоматических систем управления технологическими процессами и предприятиями г.Минск, октябрь, 1973г.;
- на Всесоюзном научно-техническом семинаре "АСУ технологическими процессами" г.Москва, апрель, 1974г., МДНТИ им.Ф.Э.Дзержинского;
- на Всесоюзном симпозиуме по алгоритмическому обеспечению систем управления производственными процессами г.Алма-Ата, сентябрь, 1974г.

Объем работы. Диссертационная работа содержит 142 страницы машинописного текста, 16 рисунков, 9 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии на 149 наименований.

Глава I. Задачи цеховой автоматизированной системы управления (АСУ) и функции управления технологическим процессом производства прямомшовных сварных труб

Как показывают экспериментальные исследования производства прямомшовных сварных труб, проведенные на трубных заводах гг.Северска, Москвы, Ленинграда, существующее управление характеризуется значительным случайным разбросом. Эти разбросы имеют и выходные показатели производства, такие как производительность отдельных смен, расходы материалов и энергии, а следовательно, и себестоимость выпускаемых труб и т.д.

Проведенный анализ также показал, что производство прямомшовных сварных труб обладает значительными резервами, которые могут быть реализованы при правильном управлении. Так, например, согласно техническому проекту, производительное время работы завода "Амурсталь" составляет лишь 81,0% от календарного. Если исключить 7,3% времени, планируемого на перевалки и настройки с переменной сорта, то простой оборудования все же составляет существенное время - 12% или более 1000 часов в год. Фактические простои превосходят эти цифры.

Однако полное использование резервов невозможно при существующей практике управления, а требует рассмотрения управления трубоэлектросварочным цехом, как сложной системы в различных аспектах, таких, как экономический, организационный, технический и др., т.е. создания цеховой автоматизированной системы управления.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

М В Т У
им. Н. З. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Опыт работ по созданию автоматизированных систем управления непрерывными и непрерывно-дискретными производствами в различных отраслях народного хозяйства в ряде организаций (ЦНИИКА, Киевский институт автоматики, МЭИ, МВТУ имени Н.Э.Баумана и др.) позволил выявить типовые задачи, решаемые на различных уровнях, и структуру цеховых АСУ, основные задачи которой можно объединить в следующие функциональные группы: управление технологией производства; организационное управление производством; контроль качества продукции; технико-экономический учет, контроль, анализ; управление состояния оборудования.

Рассмотрим систему управления технологией производства прямошовных сварных труб. Структурно эта система состоит из трех подсистем, образующих три уровня управления, задачей которых является управление семью основными участками технологического процесса, а именно участками сварки ленты встык, радиочастотной сварки трубной заготовки, порезки сварной трубы на мерные длины, нагрева "бесконечной" трубы перед редуцированием, вытяжки трубы в редуциционном стане, порезки редуцированной трубы на мерные длины и термической нормализации сварного шва.

Основными функциями подсистемы низшего уровня по каждому из вышеперечисленных участков являются контроль и стабилизация режимных параметров при заданных значениях.

Средний уровень, подсистема централизованного управления, реализует следующие функциональные задачи: управление радиочастотной сваркой трубной заготовки; управление редуцированием трубы; управление порезкой редуцированной трубы на мерные длины; обеспечение информации подсистемы верхнего уровня.

Централизованное управление производится по информации о геометрии и массе штрипса. Эта информация поступает в вычислительный комплекс подсистемы централизованного управления, который, используя простейшие алгоритмы, вычисляет и выдает управляющие сигналы в подсистему низшего уровня.

Система управления третьего уровня решает задачу оптимизации управления основными участками технологического процесса и выдает оптимальные управляющие параметры в виде уставок, которые реализуются подсистемами нижних уровней и персоналом цеха. Аппаратурно подсистема оптимизации управления технологическим процессом производства прямошовных сварных труб реализуется с помощью той же УВМ, что и подсистема централизованного управления, и поэтому её внедрение не требует новых капитальных затрат.

В технологическом процессе производства прямошовных сварных труб обследования существующих трубоэлектросварочных цехов и обзор литературы показали, что решение задач оптимизации управления целесообразно проводить по участкам радиочастотной сварки и редуцирования труб, т.к. эти участки являются основными в технологической линии, которые определяют количество и качество выпускаемых труб всего трубоэлектросварочного цеха.

В качестве критерия эффективности для участка радиочастотной сварки выбрана скорость, которая максимизируется, а для участка редуцирования труб – суммарная мощность электроприводов клеток редукционного стана, которая минимизируется. При этом, по участку редуцирования труб, суммарное обжатие и вытяжка должно обеспечивать минимальную толщину стенки трубы, в допускаемых ГОСТом пределах, что используется в качестве ограничения задачи оптимизации.

Решение задач оптимизации управления требует решения двух подзадач: идентификации и оптимизации. Важность разработки алгоритмов идентификации связана с тем, что она является первым этапом на пути оптимизации управления. Поэтому результаты оптимизации управления во многом зависят от идентификации параметров математической модели.

Глава II. Математическое моделирование технологического процесса

Для получения математической модели промышленных объектов управления применяются различные способы, один из которых приводит к синтезу математической модели на основе теоретико-экспериментального метода. В данном методе создается качественная модель, использующая основные физические закономерности процесса, которая уточняется статистическими методами по экспериментальным данным.

Использование данного способа при моделировании технологического процесса производства прямошовных сварных труб позволило получить математическую модель участка радиочастотной сварки. Эту модель трудно получить, используя лишь статистические методы, т.к. они производят грубую аппроксимацию оператора объекта и не вскрывают его физической структуры. Получение работоспособной модели с использованием только теоретического рассмотрения физических законов функционирования объекта, как правило, также невозможно ввиду трудности учета конструктивных и технических особенностей его реализации.

Математическая модель процесса радиочастотной сварки

При радиочастотной сварке к кромкам сформированной трубной заготовки индуктором подводится ток высокой частоты (440 кгц), который,

проходя по кромкам трубной заготовки, разогревает их до требуемой температуры.

Для участка трубной заготовки длиной $d\ell$ вдоль продольной оси, предполагая неизменность физических свойств трубной заготовки и ее геометрических параметров, можно составить однородные дифференциальные уравнения относительно тока и напряжения, решение которых имеют вид:

$$\begin{aligned} U_\ell &= c_1 e^{-\frac{\ell}{L}} + c_2 e^{\frac{\ell}{L}}, \\ I_\ell &= \frac{1}{x_{кр} \cdot L} (c_1 e^{-\frac{\ell}{L}} + c_2 e^{\frac{\ell}{L}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где L - индуктивность сварочной цепи; $x_{кр}$ - полное сопротивление кромок трубной заготовки; ℓ - длина рассматриваемого участка; c_1 и c_2 - постоянные интегрирования.

Мощность, выделяемая в кромках трубной заготовки для участка $d\ell$, определяется формулой:

$$dP_{кр} = |I_\ell|^2 \cdot R \cdot d\ell, \quad (2)$$

где R - активная составляющая сопротивления участка кромок трубной заготовки, отнесенная к единице длины.

Определяя из уравнения (1) $|I|^2$, интегрируя (2) в пределах $\ell_1 - \ell_2$ и преобразуя, имеем:

$$\begin{aligned} P_{кр} &= R \cdot L \cdot \left\{ \frac{e^{\frac{\ell_1}{L}} - e^{\frac{\ell_2}{L}}}{2 \cos \varphi_L} \left[|A_1|^2 e^{-\frac{2 \cos \varphi_L}{|L|}} - |A_2|^2 e^{\frac{2 \cos \varphi_L}{|L|}} \right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{2 |A_1| \cdot |A_2|}{\sin \varphi_L} \cos(\varphi_{A_1} - \varphi_{A_2} + \frac{\ell_1 + \ell_2}{|L|} \sin \varphi_L) \cdot \sin[(\ell_1 - \ell_2) \sin \varphi_L] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $A_1 = c_1 / x_{кр} \cdot L$, $A_2 = -c_2 / x_{кр} \cdot L$, $|L|$ и φ_L - модуль и аргумент комплексной величины L .

Рассмотрим тепловой расчет сварочной цепи. Решение общего уравнения теплопроводности для случая экспоненциального распределения мгновенных источников тепла в кромках трубной заготовки, позволяет найти температуру торцевой поверхности в функции времени нагрева при равномерном тепловыделении, которое имеет вид:

$$T(t) = \frac{\delta_0 \cdot \rho \cdot t}{c_f} g(b), \quad (4)$$

где t - время нагрева; δ_0 - поверхностная плотность тока;

ρ - удельное сопротивление; c_f - объемная теплоемкость;

$g(b)$ - функция, характеризующая сток тепла вглубь тела заготовки вследствие теплопроводности.

Выражая для двух участков трубной заготовки поверхностную плотность тока через соответствующую мощность, выделяемую в кромках трубной заготовки, температуру в точке схода кромок можно выразить в следующем виде:

$$T_{сш} = (\theta_1 P_1 + \theta_2 P_2) / d_1 V_{сш}, \quad (5)$$

где P_1 и P_2 - мощности, выделяемые на первом и втором участках, определяемые формулой (3); θ_1 и θ_2 - коэффициенты эффективности использования данных мощностей, которые определяют отношение приращения температуры в точке сварки к количеству тепла на единицу сварного соединения, расходуемому для получения такого приращения; d_1 - толщина трубной заготовки; $V_{сш}$ - скорость радиочастотной сварки.

Полученная из рассмотрения физики процесса радиочастотной сварки математическая модель позволяет рассчитать температуру в точке схода, а также мощности, выделяемые на участках трубной заготовки при заданных электромагнитных параметрах, таких как активное сопротивление R , индуктивность L , полное сопротивление кромок трубной заготовки $Z_{кр}$ и др.

При этом, действительные значения этих электромагнитных характеристик зависят от выбора настроечных параметров сварочной цепи. Поэтому важно для целей управления данным процессом установить зависимость между электромагнитными характеристиками нагреваемого участка и распределением тока в нем от следующих параметров сварочной цепи: толщины листа d_1 , зазора между кромками d_2 , зазора между кромками и внутренним магнитопроводом d_3 и длин, рассматриваемых участков l_1 и l_2 .

Для этого в формулах R , L , $Z_{кр}$, которые также получены из физики рассматриваемого процесса при идеальном расположении кромок трубной заготовки индуктора, вводятся коэффициенты K_R , K_L , $K_{Z_{кр}}$, K_A , которые зависят от действительных значений настроечных параметров сварочной цепи.

Тогда статистическая часть построения математической модели процесса радиочастотной сварки сводится к задаче идентификации параметров уравнений, аппроксимирующих значения данных коэффициентов в функции от настроечных параметров сварочной цепи.

Таким образом, показано, что задача идентификации может быть сведена к решению операторного уравнения

$$Ax = y, \quad (6)$$

где оператор A и правая часть y определяются по результатам измерения входных и выходных переменных, полученным в ходе нормальной

эксплуатации; $\mathfrak{S}$ - статистические оценки искоемых параметров.

Метод идентификации параметров с оценкой погрешности решения

Решение уравнения (6) можно осуществить различными способами. Однако, в связи с развитием вычислительных машин широкое распространение получили различные итерационные методы.

Актуальным вопросом при этом является оценка погрешности полученного решения, т.к. идентификация параметров объекта управления не самоцель, а определяется потребностью их дальнейшего использования.

Обычно оценка погрешности решения осуществляется в некоторой априорно-заданной норме. Однако, полученная оценка в этой норме не всегда удовлетворительна, т.к. определяя различные нормы, можно получить разные оценки погрешности и они, как правило, завышены и не отражают достоверную область оценки погрешности решения.

В данной работе предлагается один метод идентификации параметров с оценкой погрешности решения. Удобством метода является возможность получения двухсторонней оценки погрешности решения по каждой компоненте и на каждом шаге итерации.

Пусть для решения уравнения (6) образуется итерационный процесс, определяемый следующим рекуррентным соотношением:

$$x_{n+1} = Mx_n + S \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (7)$$

такой, что система $x = Mx + S$ эквивалентна исходному уравнению (6) и пусть области задания и определения линейного оператора M лежат в линейном полуупорядоченном метрическом пространстве K .

Для решения уравнения (7) с двухсторонней оценкой погрешности, можно использовать итерационные процессы:

$$\begin{aligned} u_{n+1} &= H_1[u_n, v_n], \\ v_{n+1} &= H_2[v_n, u_n], \end{aligned} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (8)$$

которые при выполнении условия для начального отрезка $u_0 \leq u_1 \leq v_1 \leq v_0$ сходятся к решению уравнения (7) и дают оценку погрешности решения в виде $u_n \leq x^* \leq v_n$. Здесь функции H_1 и H_2 - конструируются так, чтобы можно было получить монотонно возрастающую и убывающую последовательности u_n и v_n .

Недостатком данного метода является трудность формализованного выбора начального отрезка и ряд неудобств, связанных с определением операторов H_1 и H_2 .

Для устранения этих недостатков, производя эквивалентные преобразования, в силу свойств линейного полуупорядоченного пространства, итерационные процессы (8) можно привести к виду:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= Mx_n + S, \\ z_{n+1} &= Bz_n, \end{aligned} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (9)$$

где $B = |M|$

В данных уравнениях первое уравнение определяет решение уравнения (7), а второе дает оценку погрешности решения в виде $x^* \pm z_n$.

Для итерационных процессов (9) доказываются следующие теоремы.

Теорема 2.2.1. Пусть для векторов x_n и z_n , определенных через (9), выполнены условия

$$\delta_{n+1} = |x_n - x_{n+1}| \leq z_n - z_{n+1} = z_n - Bz_n, \quad z_n \geq 0 \quad (10)$$

Тогда последовательности x_n и z_n сходятся к соответствующим решениям x^* и z^* уравнений (9) и выполняется оценка погрешности решения в виде:

$$|x_n - x^*| \leq z_n$$

Теорема 2.2.2. Пусть матрица B неразложима и определена положительно и, допустим, что максимальный корень $\lambda = \rho(B)$ удовлетворяет условию $\lambda < 1$.

Тогда существует вектор z_n , для которого условие (10) теоремы выполняется.

Теоретическое сравнение полученной оценки погрешности разработанного метода с оценкой погрешности решения метода простой итерации показывает, что оценка погрешности разработанного метода "сильнее", т.е. точнее.

Глава III. Идентификация параметров с оценкой погрешности решения при неточном задании исходных данных

Экспериментальные данные, полученные в ходе нормальной эксплуатации оборудования, являются, как правило, приближенными. Это приводит к тому, что оператор и правая часть уравнения модели, заданы в некоторой области, которая может быть определена, исходя из класса точности измерительных приборов или первичных датчиков.

Неточность исходных данных порождает ошибки в решениях, причем актуальным вопросом, при идентификации параметров объекта управления является оценка полученного решения, исходя из указанной неточности.

Определение области, в которой будет находиться решение, при изменении исходных данных в области, обусловленной точностью их измерения, позволит обосновать требуемую точность измерения входных и выходных параметров объекта управления. Полученное решение позволит определить конечную точность и диапазон, для которого верна математическая модель.

Данная задача формализуется как решение уравнения (7), где линейный оператор M и правая часть S , определенные в линейном полуупорядоченном метрическом пространстве K , заданы в пределах

$$M_n \leq M \leq M_0, \quad S_n \leq S \leq S_0 \quad (II)$$

Для отыскания интервала $x_{min}^* \leq x^* \leq x_{max}^*$, где заключены все возможные решения x^* уравнения (7), при условии (II) можно построить итерационные процессы

$$\begin{aligned} u_{n+1} &= M_n^+ u_n + M_n^- v_n + S_n, \\ v_{n+1} &= M_0^+ v_n + M_0^- u_n + S_0, \end{aligned} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (I2)$$

где $M_n^+ \geq 0, M_n^- \leq 0, M_n^+ + M_n^- = M_n, M_0^+ \geq 0, M_0^- \leq 0, M_0^+ + M_0^- = M_0$

Тогда при выполнении начальных условий $u_0 \leq u_1 \leq v_1 \leq v_0$ доказывается, что итерационные процессы (I2) сходятся к нижнему и верхнему интервалам искомого решения, т.е.

$$u_0 \leq u_1 \leq \dots \leq u_n \leq x_{min}^* \leq x^* \leq x_{max}^* \leq v_n \leq \dots \leq v_1 \leq v_0$$

Однако, ввиду трудности формализованного выбора начального отрезка, а также из-за ряда неудобств, связанных с разложением операторов, дающих монотонные последовательности, итерационные процессы (I2) можно получить в другой, удобной для реализации на вычислительных машинах, форме.

Для этого, проводя эквивалентные преобразования, в силу свойств линейного полуупорядоченного пространства, итерационные процессы (I2) можно перевести к виду:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= M x_n + S + \Delta S x_n, \\ z_{n+1} &= B x_n + \Delta S + \Delta M x_n, \end{aligned} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (I3)$$

где $\Delta S = S_0 - S = S - S_n, \Delta M = M_0 - M = M - M_n, \Delta B = |\Delta M|$.

В данных уравнениях первое определяет одно из решений, лежащее в интервале, исходя из условия (II), а второе - интервал, где находится это решение, т.е. $x^* \pm z_n$

Для данных итерационных процессов доказываются следующие теоремы.

Теорема 3.1.1. Пусть для любого начального приближения, определяемого уравнением $\tilde{x}_{n+1} = M \tilde{x}_n + S$, выполнены условия

$$x_n \geq 0, \quad \delta_{n+1} + \Delta S + \Delta M \tilde{x}_n + (B + \Delta B) z_n \leq x_n \quad (I4)$$

Тогда последовательности векторов, определяемых уравнениями (I3), сходятся, соответственно, к решениям x^*, z^* и для n -го приближения к решению будет выполнена оценка

$$|x_n - x^*| \leq z_n$$

Теорема 3.1.2. Пусть матрица $(B + \Delta B)$ неразложима и определена положительно и, допустим, что максимальный корень $\lambda - \rho(B + \Delta B)$ удовлетворяет условию $\lambda < 1$.

Тогда существует вектор $\bar{x}_n$, для которого условие (14) теоремы выполняется.

Важным вопросом при идентификации параметров объекта управления является вопрос об оценке корректности решения. Это дает нам дополнительную информацию о свойствах решаемых задач и, в случае, если погрешности решения недопустимо велики, то подход к решению таких задач должен быть таким же, как и в случае других некорректных задач.

В главе, исходя из уравнения (13), предлагается способ оценки корректности задач идентификации параметров, аналогичный числам обусловленности матриц, который определяет верхнюю границу отношения относительных погрешностей решения к погрешностям исходных данных. Показано, что данная оценка инвариантна по отношению к ошибкам в задании элементов линейного оператора и вектора правой части.

На основании полученных результатов разработаны алгоритмы идентификации параметров объекта управления с оценкой погрешности решения при точном и неточном задании исходных данных, которые реализованы на ЦВМ.

Экспериментальное исследование этих алгоритмов производилось для определения коэффициентов регрессионных уравнений, аппроксимирующих настроечные параметры математической модели процесса радиочастотной сварки, а также на различных численных примерах решения систем линейных алгебраических уравнений.

В частности, получено, что оценки погрешности по априорным нормам различны, и во всех практических случаях являются завышенными, а оценки погрешности решения разработанных алгоритмов идентификации точнее, т.е. во всех случаях требуемая оценка погрешности решения достигается при меньшем числе итераций, чем рассчитываемая по априорным нормам.

Глава IV. Разработка и исследование алгоритмов оптимизации управления технологическим процессом производства прямошовных сварных труб

Задачей оптимизации управления участком радиочастотной сварки является выбор параметров управления, которые определяют электромагнитные характеристики сварочной цепи, обеспечивающие экстремум критерия эффективности.

Однако, ввиду того, что скорость сварки в математической модели процесса невозможно выразить в явном виде, то задача оптимизации управления радиочастотной сваркой разбита на два последовательных этапа.

На первом этапе для определенной скорости сварки максимизируется температура сварки в точке схода, исходя из заданных ограничений на параметры управления, а затем на втором этапе эта максимальная температура уменьшается до требуемой. При этом увеличивается скорость сварки. Требуемая температура сварки задается для каждого случая, исходя из свойств материала трубной заготовки, толщины штрипса и т.д.

Задачу оптимизации управления процессом радиочастотной сварки, решаемую на первом этапе, можно представить:

$$T_{св}^{**} = \max (\theta_1 P_1 + \theta_2 P_2) / d_s V_{св}, \quad (16)$$

$$D = \left\{ \begin{array}{l} l_{1min} \leq l_1 \leq l_{1max}, \quad l_{2min} \leq l_2 \leq l_{2max}, \\ \theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max}, \quad \varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}, \\ d_{smin} \leq d_s \leq d_{smax}, \quad U_{крmin} \leq U_{кр} \leq U_{крmax} \end{array} \right\},$$

где l_1, l_2 - длины участков прямого и обратного токов; θ - ширина индуктора; φ - угол схода кромок трубной заготовки; d_s - расстояние между ферритовым сердечником и трубной заготовкой; $U_{кр}$ - напряжение, подводимое индуктором к кромкам трубной заготовки.

Решение задачи (16) производится градиентным методом. В целях обеспечения взаимозаменяемости алгоритмов поиска при использовании их совместно с другими алгоритмами в сложных программах, алгоритм оптимизации выполнен в виде процедур с тремя независимыми блоками. Задание значений и определение целевой функции осуществляется процедурой "Модуль". Определение градиента осуществляется процедурой "Градиент". Поиск оптимальных параметров производится процедурой "Оптимум".

Корректировка величины шага в пространстве оптимизирующих параметров осуществляется контролем угла между направлением следующего шага и направлением предыдущего шага, что увеличивает скорость сходимости.

Задача оптимизации управления редукионным станом заключается в том, чтобы для заданных начальных и конечных значений параметров состояния выбрать оптимальную стратегию управляющих параметров, которая дает экстремум критерия эффективности.

Задачу оптимизации управления редукионным станом можно представить в виде:

$$N^* = \min \sum_{k=1}^n N_k = \min \sum_{k=1}^n \pi (d_k - s_k) s_k v_k \epsilon_{sk} [0.342 (1 + e^{w_k}) (1 + m_k - e^{-w_k}) - z_k + z_{k-1}]$$

при ограничениях

$$\sum_{k=1}^n w_k = W_0, \quad \sum_{k=1}^n m_k = M_0,$$

$$0 \leq w_k \leq w_{k\text{доп}}, \quad 0 \leq m_k \leq m_{k\text{доп}},$$

где k - номер клетки; v_k - скорость трубы; ϵ_{sk} - сопротивление деформации; d_k - диаметр трубы; s_k - толщина стенки трубы; w_k - вытяжка; m_k - обжатие; z_k - коэффициент пластического натяжения; W_0 - суммарная вытяжка; M_0 - суммарное обжатие; $w_{k\text{доп}}$ - допустимая вытяжка; $m_{k\text{доп}}$ - допустимое обжатие.

Задача (I7) является нелинейной относительно управляющих параметров вытяжки w_k и обжатия m_k , общее число которых равно 2*ч*.

Из известных методов оптимизации, решение данной задачи целесообразно осуществить методом динамического программирования. При этом мощность электропривода K -ой клетки редукционного стана служит

K -ым этапом рекуррентного соотношения динамического программирования, а оптимизация на каждом этапе производится по двум управляющим параметрам, т.е. вытяжке и обжатию.

Рекуррентные соотношения динамического программирования для данной задачи имеют вид:

$$f_1(M, W) = \min_{0 \leq m_1 \leq m} \min_{0 \leq w_1 \leq W} \left\{ \pi (d_1 - s_1) s_1 v_1 \epsilon_{s1} [0.342 (1 + e^{w_1}) (1 + m_1 - e^{-w_1}) - z_1 + z_0] \right\}$$

для $K = 1$.

$$f_k(M, W) = \min_{0 \leq m_k \leq m} \min_{0 \leq w_k \leq W} \left\{ \pi (d_k - s_k) s_k v_k \epsilon_{sk} [0.342 (1 + e^{w_k}) (1 + m_k - e^{-w_k}) - z_k + z_{k-1}] + f_{k-1}(M - m_k, W - w_k) \right\}$$

для $K = 2, 3, \dots, \text{ч}$.

Для предварительной проверки алгоритмов оптимизации и оценки их возможной эффективности проводились экспериментальные исследования на ЦБМ с использованием данных, полученных в процессе функционирования соответствующих производственных участков в существующих трубоэлектросварочных цехах.

В результате решения задач оптимизации управления получены оптимальные значения настроечных параметров для процесса радиочастотной сварки и оптимальные распределения вытяжек и обжатий в редукционном

стане, при числе клеток 21.

Эти исследования позволяют рекомендовать разработанные алгоритмы к внедрению в трубоэлектросварочном цехе. Полученные результаты позволили сделать вывод о возможном повышении скорости сварки на величину до 10% и уменьшении себестоимости редуцированных труб до 10%.

Выводы

1. Сформулирована и решена задача оптимизации управления непрерывным технологическим процессом на примере производства прямошовных сварных труб. Задача оптимизации управления непрерывным технологическим процессом определена как часть общей задачи автоматизированной системы управления трубоэлектросварочным цехом.
2. На основании анализа существующих трубоэлектросварочных цехов определены участки технологического процесса, в которых целесообразно решать задачи оптимизации управления. Такими участками оказались - радиочастотная сварка и редуцирование труб.

Для этих участков выбраны частные критерии эффективности, которые отражают отдельные стороны общего технико-экономического критерия - прибыли. В качестве частных критериев эффективности по участку радиочастотной сварки выбрана скорость сварки, которая максимизируется, а по участку редуцирования труб взята суммарная мощность электроприводов клеток редуциционного стана, которая минимизируется.

3. Теоретико-экспериментальным способом, использующим основные физические закономерности процесса, и уточняющимся по экспериментальным данным, полученным в ходе нормальной эксплуатации, строится математическая модель процесса радиочастотной сварки.

Для статистической оценки параметров математической модели разработан метод идентификации с оценкой погрешности решения. Производится теоретическое исследование метода идентификации параметров с оценкой погрешности решения, а также показывается, что оценка погрешности, полученная разработанным методом, "сильнее" оценок метода простой итерации.

4. Сформулирована задача идентификации параметров объектов управления при неточном задании исходных данных. Для ее решения разработан и исследован метод идентификации параметров, который позволяет учесть информацию о погрешностях задания входных и выходных переменных при решении задачи. Это дает возможность оценить точность полученной математической модели при известных погрешностях исходных данных.

5. Рассмотрена корректность задач идентификации параметров и предложен метод определения верхней оценки отношения погрешности решения к вариациям исходных данных.

Исходя из полученных теоретических результатов разработаны алгоритмы идентификации с оценкой погрешности решения при точном и неточном задании исходных данных.

Данные алгоритмы реализованы на ЦВМ, их экспериментальные исследования подтверждают полученные теоретические результаты.

6. Произведена экспериментальная проверка алгоритмов оптимизации управления технологическим процессом производства прямошовных сварных труб на математической модели с помощью ЦВМ. Полученные результаты показывают возможность повышения скорости сварки и снижения себестоимости продукции.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Плотников В.Н., Малахов Н.А., Омаров Т.Ф. Управление технологическими процессами в цеховых автоматизированных системах управления. Сб. "УП Всесоюзное совещание по созданию и внедрению автоматизированных и автоматических систем управления технологическими процессами и предприятиями", Москва, 1973.
2. Плотников В.Н., Малахов Н.А., Омаров Т.Ф. Метод идентификации параметров с оценкой погрешности решения. Сб. "Республиканская научно-техническая конференция молодых специалистов по вопросам технической кибернетики", Тбилиси, 1973.
3. Плотников В.Н., Бережной В.Ф., Малахов Н.А., Омаров Т.Ф. Некоторые задачи цеховых АСУ для непрерывного производства и их решение. Сборник трудов МВТУ им.Н.Э.Баумана, № 169, Москва, 1973.
4. Плотников В.Н., Малахов Н.А., Омаров Т.Ф. Система автоматического управления процессом радиочастотной сварки. Сб. МВ и ССО КазССР "Технические науки", вып. IV, Алма-Ата, 1974.
5. Плотников В.Н., Малахов Н.А., Омаров Т.Ф. Оптимизация управления процессом редуцирования труб. Сб. МВ и ССО КазССР "Автоматика и кибернетика", вып. 2, Алма-Ата, 1974.
6. Плотников В.Н., Малахов Н.А., Омаров Т.Ф. Идентификация параметров объектов управления с оценкой погрешности решения. Сб. трудов МВТУ им.Н.Э.Баумана, № 190, Москва, 1974.
7. Плотников В.Н., Малахов Н.А., Омаров Т.Ф. Алгоритмы оптимизации управления технологическими процессами в АСУ трубоэлектросварочного цеха. Сб. "Всесоюзный симпозиум по алгоритмическому обеспечению систем управления производственными процессами", Москва, 1974.