

М133307
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

МАЛАХОВ Н. А.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ
НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

(Специальность 05.254 — Автоматическое управление
и регулирование)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

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 Четвериков В. Н.,

к. т. н., Вальденберг Ю. С.

Ведущее предприятие ТНИИ приборостроения и средств
автоматизации.

Автореферат разослан «...» 1971 г.

Защита диссертации состоится «...» 1971 г.

на заседании Совета ф.
Н. Э. Баумана по адре
дом 5.

С диссертацией мож
им. Н. Э. Баумана.

Отзывы на автореф
му адресу.

Ученый

к. т

М133307

В современном промышленном производстве большой удельный вес имеют непрерывно-дискретные или циклические процессы. Например, в металлургическом, химическом, стекловаренном и других производствах. Они характеризуются наличием циклов непрерывного процесса.

Каждый цикл непрерывно-дискретного процесса представляет собой естественный интервал для оценки качества управления процессом. По его окончании появляется возможность полностью оценить полученный готовый продукт, технико-экономические показатели процесса (его производительность, себестоимость продукции и др.) и принять решение об управлении следующим циклом с целью оптимизации технико-экономических показателей процесса.

Итерационный подход к задаче оптимизации управления производственным процессом объясняется отсутствием математических моделей, пригодных для решения этой задачи, для многих процессов перечисленных ранее производств, наличием возмущений, изменением характеристик процессов во времени и т.п.

Подходящим аппаратом для таких задач представляются широко разрабатываемые сейчас методы адаптивной оптимизации.

Однако при практической разработке алгоритма оптимизации управления конкретным процессом возникает целый ряд проблем, связанных как с вопросами учета особенностей конкретного производства, так и с некоторыми теоретическими вопросами, не решенными еще своего решения.

Целью настоящей работы является разработка и исследование практических алгоритмов решения задачи оптимизации управления непрерывно-дискретными производственными процессами.

Рассмотрение производится на примере оптимизации управления процессом мартеновской плавки по технико-экономическому показателю.

I. Комплексная автоматизация мартеновского производства и задача централизованного автоматизированного управления мартеновской плавкой.

Как показывает анализ мартеновского производства стали, проведенный на металлургических заводах им. Ф.Э.Дзержинского в г. Днепропетровск и им. В.И.Ленина в г. Кривой-Рог (КМЗ),

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1133307

существующее управление характеризуется значительным случайным разбросом: коэффициенты вариации управляющих воздействий достигают 30-40 и более процентов. Большие разбросы имеют и выходные показатели плавки, такие как производительность печи в отдельных плавках, расходы материалов и энергии, а следовательно и себестоимость выплавленной стали и т.д.

Одновременно с этим проведенный анализ показал, что мартеновское производство обладает значительными резервами, которые могут быть реализованы при правильном управлении.

Так, например, если надлежащим управлением обеспечить поддержание производительности мартеновской печи на максимальном уровне, то это будет эквивалентно увеличению производительности на 29 %. Аналогичные запасы имеются и по другим показателям мартеновского процесса.

Однако реализация этих резервов не может быть обеспечена путем создания местных систем управления, разрозненно автоматизирующих отдельные процессы мартеновского производства, а требует разработки единой системы управления для всего мартеновского цеха.

Система комплексной автоматизации мартеновского производства maximизирует показатель прибыли по мартеновскому цеху при соблюдении ограничений, накладываемых смежными звеньями заводской структуры, путем совместного решения трех основных задач управления. Этими задачами являются:

автоматизация управления мартеновскими печами как основными производственными агрегатами;

автоматизация оперативно-организационного управления мартеновским цехом, т.е. управления совокупностью мартеновских печей, обслуживаемых ограниченным числом механизмов;

автоматизация инженерно-управленческого труда и финансово-экономической отчетности.

Задачи управления внутрицеховыми системами должны формулироваться, исходя из требования максимизации показателя прибыли по цеху и условий их взаимодействия между собой.

Остановимся на системе, решающей первую задачу. Для нее с помощью анализа внутренних связей мартеновского цеха были определены показатель качества управления и ограничения. Их соблюдение гарантирует нормальную работу мартеновских печей и отсутствие экономических потерь на других участках мартенов-

ского цеха.

Система управления плавкой обеспечивает на каждой печи минимальную удельную себестоимость стали при соблюдении ограничений на ее качество (химический состав, температуру и др.), на условия нормального функционирования мартеновских печей, ресурсы материалов, энергии и др., а также при соблюдении заданной длительности плавки:

$$C^* = C(\bar{u}; \bar{x}^*) = \min_{\bar{x} \in \Delta} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N c_k(\bar{u}; \bar{x}) \quad (I)$$

$$\Delta = \left\{ \bar{x} : \bar{g}_{\min} \leq \bar{g}(\bar{x}; \bar{u}) \leq \bar{g}_{\max}; \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T_k(\bar{u}; \bar{x}) = T_{\text{нл}}; \bar{x}_{\min} \leq \bar{x} \leq \bar{x}_{\max} \right\}$$

где $c_k(\bar{u}; \bar{x})$ - удельная себестоимость выплавляемой в K -ю плавку стали;

$T_k(\bar{u}; \bar{x})$ - фактическая длительность K -ой плавки;

$\bar{g} = (g_1, g_2, \dots)$ - вектор выходных ограничиваемых параметров плавки;

$\bar{u} = (u_1, u_2, \dots)$ - вектор контролируемых возмущений;

$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots)$ - вектор управляющих параметров;

$\bar{g}_{\min}, \bar{g}_{\max}, \bar{x}_{\min}, \bar{x}_{\max}$ - соответственно заданные минимальные и максимальные значения выходных и управляющих параметров; $T_{\text{нл}}$ - заданная длительность плавки; N - число плавков в серии.

Кроме задачи (I) для части печей в цехе может быть предложена задача:

$$T^* = T(\bar{u}; \bar{x}^*) = \min_{\bar{x} \in \Delta} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T_k(\bar{u}; \bar{x}) \quad (2)$$

$$\Delta = \left\{ \bar{x} : \bar{g}_{\min} \leq \bar{g}(\bar{u}; \bar{x}) \leq \bar{g}_{\max}; \bar{x}_{\min} \leq \bar{x} \leq \bar{x}_{\max} \right\}$$

т.е. обеспечение минимальной длительности мартеновской плавки при ограничениях на выходные и управляющие параметры.

Структурно система управления процессом мартеновской плавки состоит из трех подсистем, образующих три уровня управления. Сформулированные ранее задачи управления плавкой (I) или (2) решаются системой верхнего уровня, которая опирается

на две других системы: систему "Сталевар", осуществляющую управление технологическим процессом мартеновской плавки, и местную систему автоматизации мартеновской печи (САМП), осуществляющую управление тепловым процессом.

Две последних системы разработаны Институтом автоматики (г. Киев) и внедряются на КМЗ. Их назначение состоит в регламентации и стабилизации мартеновского процесса с помощью значительного расширения объема контролируемых параметров процесса и переработки этой информации управляющей вычислительной машиной (УВМ).

Система управления третьего уровня решает задачу путем определения и задания на систему "Сталевар" таких уставок, которые соответствуют пошаговому решению задач (1) или (2), а она по этим уставкам рассчитывает регулирующие воздействия на мартеновскую плавку, реализуемые локальной системой САМП и персоналом цеха. Аппаратурно система оптимизации управления мартеновской плавкой по технико-экономическому показателю реализуется с помощью той же УВМ, что и система "Сталевар", и поэтому ее внедрение не требует новых капитальных затрат.

Решение задачи оптимизации управления плавкой (1) или (2) требует решения двух подзадач: идентификации и оптимизации. При этом должны быть разработаны практические алгоритмы решения этих подзадач, учитывающие специфику мартеновского процесса.

II. Математическая модель мартеновской плавки.

Оператор мартеновской плавки $\bar{g}(\bar{x}; \bar{u}; \bar{f}; t)$ сопоставляет комбинациям независимых переменных $\bar{x}, \bar{u}, \bar{f}, t$ (соответственно управляющих параметров, контролируемых возмущений, неконтролируемых возмущений и времени) определенные значения зависимых или выходных переменных процесса g_i , $i = 0, 1, 2, \dots$; причем $g_0 = e$ — технико-экономический показатель:

$$\bar{g} = \bar{g}(\bar{x}; \bar{u}; \bar{f}; t) \quad (3)$$

Задача идентификации состоит в отыскании оператора $\bar{g}^m(\bar{x}; \bar{u}; t)$, аппроксимирующего (3), т.е.

$$\bar{g} \approx \bar{g}^m(\bar{x}; \bar{u}; t) \quad (4)$$

Особенность этой задачи в настоящей работе состоит в том, что точность модели должна быть достаточной для проведения

очередного шага оптимизации в соответствии с применяемой оптимизирующей процедурой. Как показали проведенные исследования на первом этапе достаточно ограничиться линейным приближением оператора процесса. Они также показали, что упрощение модели за счет исключения из нее контролируемых возмущений (характеристики сырых и вспомогательных материалов и др.) не желательно, т.к. при этом затрудняется выявление эффектов от управляющих параметров и становится невозможным достаточно точно выдерживать ограничения.

Для определения размерности пространства независимых переменных были проанализированы алгоритмы работы двух нижних уровней системы управления мартеновской плавкой и из всей совокупности параметров, описывающих мартеновскую плавку (около 255 параметров) были выделены 33 переменных, воздействуя на которые можно решать задачу оптимизации управления (1) или (2). Дальнейшее сокращение размерности было достигнуто путем выбора из этих параметров доминирующих, наиболее тесно связанных с показателем технико-экономической эффективности и заданными ограничениями.

Основным методом получения математической модели процесса является регрессионный анализ наблюдений зависимых и независимых переменных мартеновской плавки в режиме нормальной эксплуатации (пассивный эксперимент). Применение активного эксперимента в настоящее время затрудняется существующими условиями мартеновского цеха завода, а также необходимостью включения в модель неуправляемых контролируемых возмущений $\bar{U}$.

Для нахождения математической модели процесса в УМВ производится накопление двух матриц: X - значений независимых переменных и G - значений зависимых переменных в n плавках.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & u_{11} & u_{12} & \dots & t_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & u_{n1} & u_{n2} & \dots & t_n \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} g_{10} & g_{11} & \dots & g_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{n0} & g_{n1} & \dots & g_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Столбцы $\bar{x}_j$ и $\bar{g}_k$ матриц X и G представляют собой те значения, которые принимали соответственно j -ая независимая и k -ая зависимая переменные мартеновского процесса в плавках.

Математической моделью плавки являются зависимости:

$$q_k = \sum_{j=1}^p S_{kj} x_j; \quad k = 0, 1, 2, \dots, m,$$

где q_k — k -ая зависимая ограничиваемая переменная, $q_0 = e$; x_j — j -ая независимая переменная; S_{kj} — неизвестные коэффициенты, подлежащие определению.

Для определения оценок искомых коэффициентов модели, например вектора-столбца $\hat{S}_k = (\hat{S}_{k1}, \hat{S}_{k2}, \dots, \hat{S}_{kp})'$, составляется система так называемых нормальных уравнений для k -ой зависимой переменной

$$X'X\hat{S}_k = X'\bar{q}_k; \quad X'X = A; \quad X'\bar{q}_k = \bar{f}. \quad (6)$$

Неособенность и величина обусловленности матрицы A имеют решающее значение для выбора вычислительного метода решения системы (6). Большинство из современных методов не применимы, если матрица A особенная и требуют различных преобразований (масштабирование и др.), если она плохо обусловлена.

Как показывают исследования, проведенные в мартеновском цехе КМЗ, матрица A практически всегда плохо обусловлена и может оказаться особенной. Причиной этого является сильная корреляция между некоторыми независимыми переменными, в результате чего некоторые столбцы матрицы A оказываются линейно зависимыми или "почти линейно зависимыми".

В этих условиях для решения (6) необходима либо ортогонализация наблюдений, либо исключение из матрицы X тех переменных, которые вызывают особенность A .

В первом случае приходится вводить некоторые новые фиктивные независимые переменные, что затемняет физическое существо задачи и затрудняет интерпретацию результатов. А во втором — решать большую комбинаторную задачу, заключающуюся в исключении некоторых сочетаний столбцов матрицы X с целью получения хорошей обусловленности матрицы A для оставшихся.

Поэтому в работе предложено применять для решения системы (6) итерационный алгоритм [9], являющийся модификацией метода наискорейшего спуска и позволяющий отыскивать точный минимум квадратичного функционала за конечное число шагов.

Решение задачи (6) заменяется задачей отыскания минимума функционала

$$\Phi(\bar{S}) = (A\bar{S}, \bar{S}) - 2(\bar{f}, \bar{S}) \quad (7)$$

если A - положительно определена, или функционала

$$F(\bar{S}) = (A' A \bar{S}, \bar{S}) - 2(A \bar{f}, \bar{S}) \quad (8)$$

в общем случае.

Предлагаемый алгоритм определяет точный минимум (?) или (8) за конечное число $2^p - 1$ полных одномерных релаксаций функционалов $\Phi(\bar{S})$ или $F(\bar{S})$, p - размерность матрицы A . Направления релаксации определяются как разности координат частных минимумов соответствующего функционала в подпространствах размерности $1, 2, \dots, p$. В результате получаем единственное решение (6), если A неособенная и одно из бесчисленного множества решений в противном случае.

В конечном счете, появляется возможность достаточно простым способом получить математическую модель плавки такой размерности, которую фактически имели независимые переменные в эксперименте.

С помощью этого алгоритма легко может быть обеспечена регуляризация решения путем выбора такого, которое имеет минимальную норму, или норма отклонения которого от заданной точки минимальна (норма эвклидова).

Влияние ошибок измерения на точность идентификации

Матрица X и вектор выхода $\bar{y}_k$ неизбежно содержат случайную составляющую, вызванную конечной точностью измерения переменных процесса. В результате этого вычисленные значения матрицы и вектора свободных членов системы нормальных уравнений (6) могут отклоняться соответственно на величины ΔA и $\Delta \bar{f}$ от истинных значений A и $\bar{f}$. А следовательно полученное решение будет отличаться от истинного решения $\bar{S}$ на некоторую величину $\Delta \bar{S}$, являющуюся ошибкой модели.

Идентификация только тогда может считаться корректной, если малым отклонениям исходных данных ΔA , $\Delta \bar{f}$ будут соответствовать малые отклонения модели $\Delta \bar{S}$. В работе предложен способ установления корректности идентификации, т.е. определения соотношения ошибок модели и исходных данных.

Будем характеризовать точность исходных данных и точность модели отношением нормы возможного отклонения к норме истинного значения (обозначая норму $\|\cdot\|$). Тогда получим следующие оправданные соотношения:

$$\frac{\|\Delta \vec{S}\|}{\|\vec{S}\|} \leq \|A\| \|A^{-1}\| \frac{\|\Delta \vec{f}\|}{\|\vec{f}\|}, \quad \frac{\|\Delta \vec{S}\|}{\|\vec{S}\|} \leq \frac{\|A\| \|A^{-1}\| \frac{\|\Delta A\|}{\|A\|}}{1 - \|A\| \|A^{-1}\| \frac{\|\Delta A\|}{\|A\|}} \quad (9)$$

если возмущены соответственно свободные члены $\vec{f}$ и матрица A .

Для практического использования соотношений (9) необходимо определить величину $\|A\| \|A^{-1}\| = \frac{\lambda_1}{\lambda_p}$ являющуюся обусловленностью матрицы A (λ_1 - максимальное, λ_p - минимальное собственные числа A). Когда модель процесса является линейной независимые переменные с большим основанием можно считать распределенными по многомерному нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей Σ :

$x_i \in N(0; \Sigma)$. Тогда матрица A будет иметь известное распределение Уишарта $A \in W(\Sigma; n)$, n - число степеней свободы. В этом случае плотность распределения собственных чисел матрицы A оказывается известной (если Σ - единичная), что позволяет определить верхнюю границу $\lambda_1^{\max}$ и нижнюю границу $\lambda_p^{\min}$ соответственно наибольшего и наименьшего собственных чисел A . В результате получаем следующие практические формулы для определения корректности идентификации:

$$\frac{\|\Delta \vec{S}\|}{\|\vec{S}\|} \leq \frac{d_1^2}{d_p^2} \cdot \frac{\lambda_1^{\max}}{\lambda_p^{\min}} \cdot \frac{\|\Delta \vec{f}\|}{\|\vec{f}\|}, \quad \frac{\|\Delta \vec{S}\|}{\|\vec{S}\|} \leq \frac{\frac{d_1^2}{d_p^2} \cdot \frac{\lambda_1^{\max}}{\lambda_p^{\min}} \cdot \frac{\|\Delta A\|}{\|A\|}}{1 - \frac{d_1^2}{d_p^2} \cdot \frac{\lambda_1^{\max}}{\lambda_p^{\min}} \cdot \frac{\|\Delta A\|}{\|A\|}} \quad (10)$$

где d_1 и d_p - соответственно максимальное и минимальное собственные числа матрицы преобразования, приводящего ковариационную матрицу Σ к единичной.

Далее показано, как пользуясь предположением о нормальности распределения переменных процесса и ошибок их измерения можно определить величины ΔA и $\Delta \vec{f}$ и, пользуясь соотношениями (10), получить верхние границы для относительных ошибок модели, что позволяет ответить на вопрос: достаточна ли точность измерения исходных данных для обеспечения заданной точности модели.

Однако рассмотренный способ учета ошибок измерения относительно сложен в вычислительном смысле и требует знания параметров закона распределения переменных.

На практике чаще бывают известны доверительные интервалы для истинных значений переменных процесса. Они легко определяются, т.к. практически всегда бывают известны классы точности

измерительных приборов или первичных датчиков.

Поэтому был предложен второй способ учета ошибок измерения, позволяющий по этим данным построить доверительный интервал для модели процесса. Здесь используются итерационные методы, применяемые, например, в работах Л. Коллатца для оценки точности решения систем линейных уравнений.

Показано как пользуясь известной предельной точностью измерительных устройств привести систему нормальных уравнений (7) к следующему виду:

$$\vec{S} = M \vec{S} + \vec{v} \quad (11)$$

где M — $p \times p$ -мерная матрица, $\vec{v}$ — p -мерный вектор свободных членов; $\vec{S}$ — вектор искомых оценок коэффициентов модели. Причем определяются такие матрицы L и N и векторы $\vec{r}$ и $\vec{t}$, что $L \leq M \leq N$; $\vec{r} \leq \vec{v} \leq \vec{t}$.

Для отыскания интервала $\vec{S}_{min}^* \leq \vec{S}^* \leq \vec{S}_{max}^*$, где заключены все возможные $\vec{S}^*$ решения (11) строится итерационный процесс

$$\begin{aligned} \vec{u}^{n+1} &= L^+ \vec{u}^n + L^- \vec{w}^n + \vec{r}; \\ \vec{w}^{n+1} &= N^+ \vec{w}^n + N^- \vec{u}^n + \vec{t}; \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} L^+ \geq 0, L^- \leq 0, L^+ + L^- = L; N^+ \geq 0, N^- \leq 0, N^+ + N^- = N; \\ \vec{u}^0 \leq \vec{w}^0; \vec{u}^1 \geq \vec{u}^0; \vec{w}^1 \leq \vec{w}^0. \end{aligned}$$

Искомый интервал решений будет ограничен двумя сходящимися к его концам слева и справа последовательностями $\vec{u}^n$ и $\vec{w}^n$:

$$\vec{u}^0 \leq \vec{u}^1 \leq \dots \leq \vec{S}_{min}^* \leq \vec{S}^* \leq \vec{S}_{max}^* \leq \dots \leq \vec{w}^1 \leq \vec{w}^0.$$

Рассмотрены условия сходимости (12) и способы ее обеспечения для любого вида системы нормальных уравнений (6).

Ш. Итерационный алгоритм оптимизации управления процессом мартеновской плавки по технико-экономическому показателю.

Априорное решение задачи оптимального управления мартеновской плавкой по технико-экономическому показателю в настоящее время невозможно. Но эта задача может быть решена итерационным путем в темпе с процессом с помощью прямых методов поиска оптимума на работающем объекте.

Разработанный алгоритм итерационного решения задачи оптимизации управления плавкой (1) или (2) использует метод наискорейшего спуска с проектированием градиента показателя эффектив-

ности на нарушенные ограничения. Он использует результаты решения подзадачи идентификации и обеспечивает отыскание оптимального управления $\bar{X}^*$ как в допустимой области Δ так и на ее границе. Алгоритм оптимизации является сродственным с алгоритмом идентификации и имеет с ним ряд общих блоков машинной программы, что позволяет более экономно расходовать ресурсы УВМ.

Для обеспечения соблюдения ограничений по выходным параметрам мартеновской плавки в алгоритме вводятся допустимые границы, на которых ограничиваемый параметр q_i имеет значение q_i^d с некоторым запасом δ_i относительно его максимального (или минимального) значения. Проектирование градиента производится на допустимую границу.

Алгоритм оптимизации объединяет три алгоритма: а) решение экстремальной задачи, т.е. отыскание внутреннего оптимума; б) решение задачи граничной оптимизации — отыскание оптимума на допустимой границе области; в) переход из оптимума на допустимой границе в оптимум на истинной границе области Δ .

а) Существо алгоритма состоит в том, что из произвольной точки $X^r = (x_1^r, x_2^r, \dots, x_n^r)$ области Δ осуществляется движение по антиградиенту — ∇e показателя технико-экономической эффективности на величину заданного шага h :

$$X^{r+1} = X^r - h \nabla e^r; |\nabla e^r| = 1 \quad \nabla e^r - \text{нормализованный градиент.}$$

При значениях управляющих параметров соответствующих точке X^{r+1} проводится серия плавов, по результатам которой определяются средние значения показателя эффективности e^{r+1} и ограничиваемых параметров q_i^{r+1} , $i = 0, 1, \dots, m$.

Аналогичная серия плавов проводится в точке X^{r+2} при трехкратном шаге из точки X^r . В результате получаем значения e^{r+2} , q_i^{r+2} в этой точке. Строится квадратичные приближения изменения выходных параметров вдоль антиградиента $-\nabla e$, и определяется величина шага h^3 , соответствующая вершине параболы. По аппроксимациям ограничиваемых параметров устанавливается допустимость этого режима и управление плавкой переводится в новую точку $X^3 = X^r - h^3 \nabla e^r$. Далее операции повторяются. Движение прекращается, если $|\nabla e| \leq \varepsilon$, что означает достижение оптимума во внутренней точке области Δ .

Если режим X^3 оказывается недопустимым, то объект переводится в точку, соответствующую допустимым значениям q_i^d ограни-

чиваемых параметров, и управление передается второму алгоритму.

б) Если нарушена только одна i -ая вспомогательная граница, то направление движения $\bar{p}_i$ определяется как

$$\bar{p}_i = \nabla g_i (\nabla e, \nabla g_i) - \nabla e; \quad |\nabla g_i| = |\nabla e| = 1;$$

где ∇e , ∇g_i - соответственно градиенты показателя и нарушенного выходного параметра g_i .

Когда нарушено одновременно несколько границ g_i^d , $i = 1, 2, \dots, q$, то направление движения $\bar{p}$ определяется как проекция на такую границу (или пересечение k границ), что остальные $q - k$ границ не будут нарушены, т.е.

$$(\bar{p}, \nabla g_i) \leq 0; \quad i = 1, 2, \dots, q - k.$$

Движение производится небольшими шагами (не более 3h) и прекращается при выполнении условия $|\bar{p}| \leq \delta_2$, это соответствует достижению точки граничного оптимума в окрестности допустимой границы.

в) При переходе на истинную границу предполагаем, что в пределах принятого запаса δ_1 выходные параметры плавки остаются линейными, тогда искомая точка X^{r+1} определяется следующим образом:

$$X^{r+1} = X^r + \sum_{i=1}^q \Delta_i^* \nabla g_i$$

где X^r - оптимум в окрестности допустимой границы; ∇g_i - градиенты нарушенных границ; Δ_i^* - определяются из системы линейных алгебраических уравнений

$$(\nabla g_j, \sum_{i=1}^q \Delta_i^* \nabla g_i) = g_j^d - g_j^u; \quad j = 1, 2, \dots, q.$$

Здесь g_j^u , g_j^d - соответственно истинное и допустимое значения j -го ограничиваемого выходного параметра.

В более простых случаях в алгоритме оптимизации управления могут присутствовать не обязательно все три части а), б) и в).

Иногда при прямой оптимизации бывает заранее известно, что оптимум достигается в граничной точке области Δ . Для этого случая была разработана методика ускорения процесса оптимизации. Она заключается в своеобразном выборе направления движения $\bar{p}$:

$$\bar{p} = -\nabla e + \lambda (\nabla e, \nabla g) \nabla g; \quad |\nabla e| = |\nabla g| = 1;$$

где ∇e , ∇g - градиенты соответственно показателя эффективности и ограничения; коэффициент λ меняется от нуля до единицы. При этом $\bar{p}$ меняет свое направление от антиградиента до его проекции на ограничение. Выбирая определенным образом закон изменения λ можно уменьшить общее число шагов от начальной точки до

точки оптимума в окрестности допустимой границы. Эффективность методики ускорения была подтверждена на ряде примеров.

IV. Исследование алгоритма оптимизации управления мартеновской плавкой.

Целью исследований разработанного алгоритма оптимизации управления мартеновской плавкой являлись:

1) проверка работоспособности алгоритма до выхода на реальный объект;

2) определение особенностей процесса оптимизации в зависимости от параметров алгоритма и возможных значений параметров объекта;

3) определение характеристик процесса оптимизации (например точности и скорости сходимости к оптимуму) для получения предельных оценок, могущих служить опорными данными при внедрении алгоритма;

4) определение возможностей алгоритма в условиях реального мартеновского цеха и ознакомление с его особенностями персонала, обслуживающего цеховую УВМ.

Три первых задачи решались на модели мартеновского процесса, четвертая — в мартеновском цехе КмЗ.

При моделировании алгоритма проверялись его возможности решать основные задачи: отыскание внутреннего оптимума, оптимума в окрестности допустимой границы и переход с допустимой границы на истинную. Исследованы: влияние отклонений независимых переменных от их средних значений на точность идентификации, а также зависимость величины вычисленных коэффициентов модели S_i при соответствующих переменных от соотношения их отклонений;

влияние начального шага h на точность и скорость оптимизации;

зависимость эффективности одного шага алгоритма оптимизации от параметров объекта и алгоритма: она оказалась достаточно высокой — за один шаг наискорейшего спуска показатель технико-экономической эффективности может быть улучшен на 40-80 % (при наличии ошибок измерения эти цифры снижаются);

способность алгоритма оптимизации соблюдать ограничения типа равенства и неравенства и точность выхода в точки граничного оптимума на допустимой и истинной границах, а также зависимость этих показателей от параметров алгоритма и объекта оптимизации.

На основании всего даны рекомендации для выбора оптималь-

ных значений параметров алгоритма, позволяющих избежать затягивания процесса решения задачи.

Проверка алгоритма оптимизации в условиях мартеновского цеха состояла в том, что исследовались результаты нескольких серий плавов (по 48 в каждой), проведенных при соответствующих значениях управляющих переменных X , выбранных с помощью разработанного алгоритма. Показателем технико-экономической эффективности служила длительность мартеновской плавки, ограничениями — качество металла и расход условного топлива за плавку.

По исходной серии плавов проведена идентификация, вычислены улучшенные режимы и проведены контрольные серии плавов. В результате оказалось, что с помощью разработанного алгоритма может быть обеспечено сокращение длительности мартеновской плавки на 12,2 %, при одновременной экономии 15 % условного топлива за плавку.

Проведенные исследования свидетельствуют об эффективности разработанного алгоритма оптимизации управления мартеновской плавкой, который принят к внедрению в мартеновском цехе Криворожского металлургического завода им. В.И.Ленина.

З а к л ю ч е н и е

1. Поставлена и решена задача оптимизации управления непрерывно-дискретным процессом производства по технико-экономическому показателю на примере процесса мартеновской плавки. Задача оптимизации управления плавкой сформулирована как часть более широкой задачи — комплексной автоматизации управления мартеновским производством.

Предложен путь решения поставленной задачи, который заключается в создании еще одного уровня в иерархической системе централизованного автоматизированного управления мартеновской плавкой применением УВМ.

Анализом межцеховых и внутрицеховых связей мартеновского производства выработана цель управления для системы оптимизации и предложен метод решения, заключающийся в пошаговом улучшении управления плавкой в смысле заданного технико-экономического показателя.

2. Поставлена задача идентификации мартеновского процесса при использовании данных нормальной эксплуатации и предложен метод ее решения, обеспечивающий регуляризацию и надежное определение математической модели даже при сильной взаимной корреляции

ляции независимых переменных.

Разработанный алгоритм идентификации является сродственным с алгоритмом пошаговой оптимизации и позволяет экономить оперативную память УВМ при решении задачи оптимизации управления плавкой.

3. Рассмотрена корректность задачи идентификации, и предложен метод определения относительной ошибки идентификации по относительной ошибке системы нормальных уравнений. Причем показано определение корректности для случая нормального многомерного распределения ошибок измерения, а также для общего вида распределения ошибок измерения. Разработанные методы можно использовать для определения требуемой точности экспериментальных данных, обеспечивающих заданную точность математической модели.

4. Разработан алгоритм оптимизации управления мартеновской плавкой по технико-экономическому показателю, обеспечивающий нахождение оптимума как внутри допустимой области, так и на ее границе при соблюдении ограничений типа равенства и неравенства по выходным параметрам плавки. Предложен способ ускорения сходимости оптимизации к точке граничного оптимума.

5. Проведено исследование алгоритма оптимизации путем моделирования, которое позволило выяснить специфику его работы, а также зависимости предельных точности и скорости сходимости от параметров объекта оптимизации и самого алгоритма. Результаты этих исследований облегчают интерпретацию работы алгоритма в условиях мартеновского цеха.

6. Проведена экспериментальная проверка разработанного алгоритма в мартеновском цехе Криворожского металлургического завода им. В.И.Ленина. В результате четырех шагов оптимизации показана возможность сокращения длительности плавки на 12,2 % и уменьшения расхода условного топлива за плавку на 15 %. Результаты эксперимента свидетельствуют о правильном выборе группы управляющих параметров, работоспособности алгоритма и могут служить его рекомендацией к внедрению в мартеновском цехе.

По теме диссертации были сделаны доклады на 9 всесоюзных и республиканских конференциях.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Малахов Н.А. Метод оптимизации управления мартеновским процессом выплавки стали. сб. "Автоматическое управление и вычислительная техника", № 9, "Машиностроение", 1968.

2. Малахов Н.А. Планирование эксперимента в условиях зна-

чительных отклонений независимых переменных. Сб. "Материалы 2-й Всесоюзной конференции по планированию эксперимента", М., 1968.

3. Малахов Н.А., Дудолодов В.А. Некоторые вопросы оптимизации управления объектами с неизвестным математическим описанием. Сб. "Тезисы докладов и сообщений на Всесоюзном межвузовском симпозиуме по прикладной математике и кибернетике", г. Горький, 1967.

4. Малахов Н.А., Дудолодов В.А. Поисковые алгоритмы оптимального управления мартеновским производством стали. Сб. "Автоматизация производственных процессов", "Наука" Каз.ССР, г. Алма-Ата, 1966.

5. Плотников В.Н., Малахов Н.А. и др. Задачи оптимизации мартеновского процесса. Сб. "Применение средств вычислительной техники для автоматизации производственных процессов", М., 1965.

6. Плотников В.Н., Малахов Н.А. Система оптимального управления технологическим процессом мартеновского производства стали. Сб. "Автоматизация производственных процессов", "Наука" Каз.ССР, г. Алма-Ата, 1966.

7. Плотников В.Н., Малахов Н.А. Некоторые вопросы обработки результатов эксперимента с целью получения математической модели. Сб. "Проблемы нейрокибернетики", г. Ростов-на-Дону, 1967.

8. Плотников В.Н., Малахов Н.А. Методы построения комбинированных самонастраивающихся систем автоматического управления. Сб. "Тезисы докладов 5-го Всесоюзного научно-технического совещания по созданию и внедрению систем управления с применением вычислительной техники", М., 1967.

9. Плотников В.Н., Малахов Н.А. Алгоритмы самонастройки статических режимов объектов управления и их реализация. Сб. "Теория и практика адаптивных систем", ЛДНТП, 1968.

10. Плотников В.Н., Малахов Н.А. Алгоритмы статической оптимизации объектов автоматического управления с неизвестным математическим описанием. Сб. "Вычислительная техника для управления производством", "Машиностроение", 1969.

II. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Малахов Н.А., Коробко М.И., Дзигва Л.В., Пример последовательной оптимизации мартеновского производства. Сб. "Вычислительная техника для управления производством", "Машиностроение", 1969.