

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ГУБЧАТОГО ТИТАНА

Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, С.Л. Краев

Березниковский филиал Пермского государственного технического университета

Рассмотрены особенности построения моделей процессов восстановления и вакуумной сепарации губчатого титана. Предложено описывать динамику процессов дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. Изложены способы идентификации параметров моделей в позиционных системах управления.

ВВЕДЕНИЕ

Основу промышленного производства губчатого титана составляют процессы восстановления тетраоксида титана магнием и последующей вакуумной сепарации, осуществляемые в аппаратах периодического действия, конструкцией которых предусмотрено разделение рабочего объема каждого аппарата на ряд зон нагрева (аппарат сепарации), зон нагрева и зону экзотермической реакции (аппарат восстановления). Характерная особенность таких систем как объектов управления состоит в необходимости поддержания позиционными регуляторами в каждой зоне нагрева (зоне реакции) определенной температуры с требуемой точностью. Температура зон нагрева аппаратов восстановления и сепарации регулируется притоком электрической энергии, поступающей от нагревателей, а температура зоны экзотермической реакции регулируется оттоком тепловой энергии посредством создаваемого вентилятором воздушного потока [1].

Системы позиционного регулирования температуры процессов восстановления и сепарации работают в режиме автоколебаний. Параметры автоколебаний существенно зависят от условий функционирования восстановления и сепарации и изменяются при вариациях нагрузок производства. Вопросы повышения качества позиционного управления температурным режимом данных процессов исследованы недостаточно, что существенно снижает технико-экономические показатели производства. Поэтому совершенствование систем управления температурным режимом процессов представляет собой одну из актуальных задач производства губчатого титана [2].

Такая задача решается в два этапа [3]:

- разработка математических моделей динамики процессов восстановления и вакуумной сепарации;
- синтез на основе моделей динамики оптимальных систем управления.

В настоящей статье рассматриваются вопросы построения моделей динамики технологических процессов (ТП) производства губчатого титана.

1. ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ГУБЧАТОГО ТИТАНА

В общем случае построение математической модели для синтеза управления ТП предполагает решение следующих основных вопросов [4]:

- нахождение компромисса между точной передачей свойств ТП и относительной простотой модели;
- построение многомерных математических моделей при большом числе переменных состояния ТП;
- изучение возможности замены системы уравнений в частных производных, описывающих ТП с распределенными параметрами, системой обыкновенных дифференциальных уравнений;
- описание поведения ТП в условиях неопределенности и нестационарности, обусловленных неполной текущей и априорной информацией о возмущениях, изменением ТП и параметров управления;
- повышение точности описания ТП путем учета нелинейности уравнений модели.

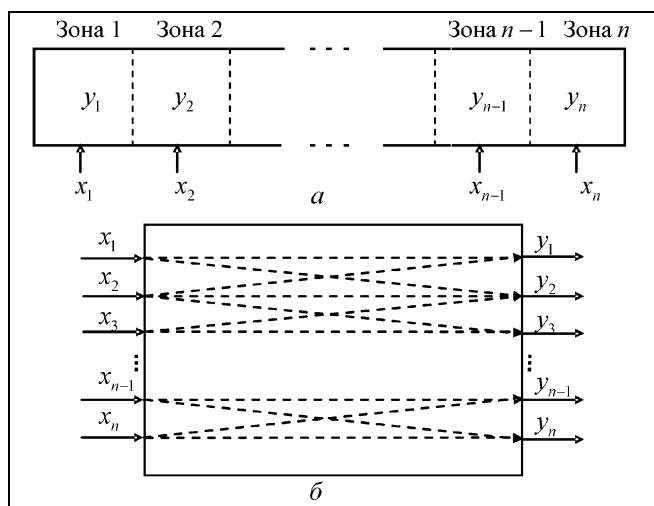


Рис. 1. Упрощенная схема n -зонного аппарата сепарации титана (а) и схема связей между входными и выходными переменными (б)

Установлено, что разработка математической модели занимает от 80 до 90 % усилий, необходимых для построения систем управления.

Рассмотрим в рамках сформулированных вопросов особенности производства губчатого титана, которые необходимо учитывать при математическом описании динамических свойств ТП [5–8].

Изменчивость параметров аппаратов восстановления и сепарации. В процессе эксплуатации реакторы удлиняются, уменьшается толщина их стенок, изнашивается футеровка печей, в условиях агрессивных сред снижается мощность нагревателей.

Нестационарность и нелинейность процессов как объектов управления. На объекты управления действуют неконтролируемые переменные возмущения, вызванные изменением теплофизических характеристик реакционной массы, ее структуры, состава и конфигурации, изменением выделяемого тепла экзотермической реакции восстановления титана при вакуумной очистке губчатого титана от примесей магния и хлорида магния. Статические и динамические характеристики зон нагрева и зоны реакции различны на разных стадиях процессов, характер их изменения не подчиняется какому-либо определенному закону.

Многомерность объектов управления, обусловленная многозонной системой нагрева аппарата сепарации и многозонной системой нагрева и охлаждения аппарата восстановления со значительным числом взаимосвязанных распределенных по временным и пространственным координатам входных и выходных величин. Упрощенную схему n -зонного аппарата сепарации можно представить в виде, показанном на рис. 1 [9, 10]. Здесь $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ — векторы

управления и выходных переменных соответственно, x_i — электрическая мощность nichромовых нагревателей, y_i — измеряемая температура в центральной части i -й зоны нагрева. Каждый вход влияет на несколько выходов и, соответственно, выход зависит от нескольких входов. Аналогично может быть представлена схема многозонного аппарата восстановления.

В динамике, в реальных условиях эксплуатации, *отсутствует априорная информация* о форме и степени связи выходных величин аппаратов с соответствующими входными величинами, которая одновременно учитывала бы влияние на выходные величины тепловых режимов соседних зон и неконтролируемых возмущений.

Нелинейность систем управления. При существующем аппаратном оформлении процессов восстановления и сепарации исполнительными механизмами служат релейные элементы (контакты, пускатели, клапаны, дозаторы и др.) с двумя рабочими положениями (включено/выключено). Это обстоятельство предопределило позиционный принцип управления ТП. Автоматизация осуществлена на базе нелинейных систем управления, в которых заданный температурный режим процессов поддерживают многоканальные двухпозиционные регуляторы. Низкое быстродействие регуляторов вносит дополнительное запаздывание, существенно снижающее качество регулирования температуры. Рабочие режимы регулирования температуры в нелинейных системах — сложные автоколебательные процессы, характеризующиеся асимметрией автоколебаний и остаточной неравномерностью.

В целом можно считать, что процессы восстановления и вакуумной сепарации представляют собой многомерные многосвязные нестационарные нелинейные объекты, а системы управления этими объектами — многомерные многосвязные нестационарные нелинейные системы управления.

На рис. 2 в качестве примера приведена структурная схема управления промышленным аппаратом сепарации с трехзонной системой нагрева.

Температура верхней $y_{в.3}(t)$, средней $y_{с.3}(t)$, нижней $y_{н.3}(t)$ зон аппарата сепарации АС поддерживается на соответствующих заданных уровнях $y_{в.3}^3$,

$y_{с.3}^3$ и $y_{н.3}^3$ многоканальным двухпозиционным регулятором (МДР) путем включения и выключения регулирующих воздействий — мощности нагрева верхней $x_{в.3}(t)$, средней $x_{с.3}(t)$ и нижней $x_{н.3}(t)$ зон. На выходные переменные $y_{в.3}(t)$, $y_{с.3}(t)$ и $y_{н.3}(t)$ оказывают влияние регулирующие воздействия соседних зон и неконтролируемые возмущения $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$.

Изложенные особенности производства губчатого титана свидетельствуют о сложности процес-

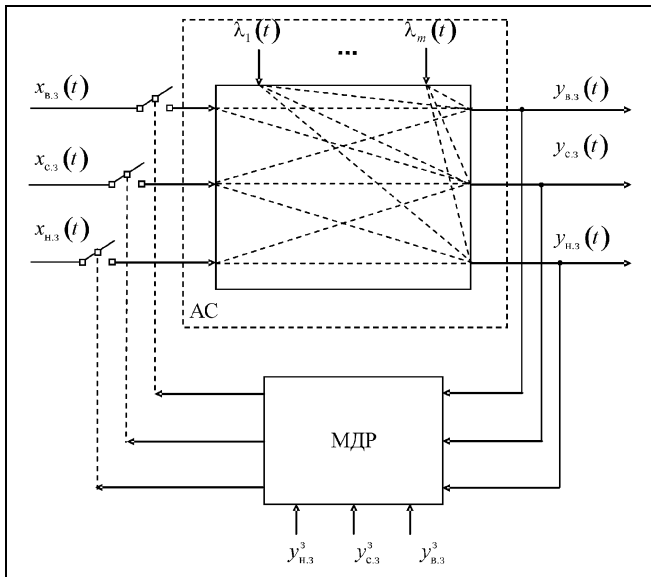


Рис. 2. Схема управления температурой аппарата сепарации титана

сов восстановления и сепарации как объектов управления и в целом характерны для управления и оценки состояния систем в условиях неопределенности и нестационарности [4, 11]. Это существенно затрудняет построение адекватного математического описания динамики процессов. В ранее проведенных исследованиях [5, 7] путем экспериментального определения динамических характеристик не удалось получить математическое описание, которое можно было бы использовать для разработки систем управления процессами производства губчатого титана. Известные математические модели [12, 13] предназначены для совершенствования технологии и аппаратуры.

2. ДЕКОМПОЗИЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Предположим, что система управления процессом восстановления состоит из несвязанных друг с другом (автономных) нестационарных нелинейных систем регулирования температуры зон нагрева и зоны реакции. Управление процессом вакуумной сепарации состоит из несвязанных друг с другом нестационарных нелинейных систем регулирования температуры зон нагрева аппарата сепарации. Такие допущения вполне оправданы, поскольку температурные поля аппаратов достаточно хорошо изучены, и на практике взаимное влияние тепловых режимов устраняется рациональным размещением в рабочем объеме аппаратов восстановления и сепарации термопар и нагревателей зон, выбором оптимальной конструкции системы воздушного охлаждения зоны экзотермической реакции [14–17].

Предположим также, что объекты управления характеризуются сосредоточенными параметрами, динамика изменений которых может быть описана обыкновенными дифференциальными уравнениями. С учетом принятых допущений систему управления процессами восстановления и сепарации можно рассматривать состоящей из ряда типовых нестационарных нелинейных (позиционных) систем регулирования технологических параметров [3].

Каждая из таких систем регулирования состоит из обобщенного нестационарного объекта управления (ОНОУ), на вход которого воздействует неконтролируемое возмущение $z(t)$, и МДР — нелинейного регулятора [18] (рис. 3).

Под ОНОУ подразумевают зону нагрева, зону реакции аппарата восстановления или зону нагрева аппарата сепарации, под $z(t)$ — изменение тепловых потерь зоны нагрева, изменение выделяемого тепла зоны экзотермической реакции аппарата восстановления, изменение потребляемого тепла зоны нагрева аппарата сепарации. Подключением и отключением входной величины $x(t)$ (мощности нагрева зоны или мощности охлаждения зоны реакции) выходная величина $y(t)$ (температура) ОНОУ поддерживается на заданном уровне y_3 в соответствии с алгоритмом:

$$\phi[\bar{y}(t)] = \begin{cases} x(t) & \text{при } \bar{y}(t) < y_3 - \Delta y_0 \text{ и} \\ y_3 - \Delta y_0 \leq \bar{y}(t) \leq y_3 + \Delta y_0, & y'(t) > 0; \\ 0 & \text{при } \bar{y}(t) < y_3 + \Delta y_0 \text{ и} \\ y_3 - \Delta y_0 \leq \bar{y}(t) \leq y_3 + \Delta y_0, & y'(t) < 0; \end{cases}$$

$$\bar{y}(t) = y(\gamma T) \text{ при } \gamma T \leq t < (\gamma + 1)T, (\gamma = 1, 2, \dots),$$

где $\bar{y}(t)$ — квантованная по времени выходная величина ОНОУ, $\phi[\bar{y}(t)]$ — выходная величина МДР, $2\Delta y_0$ — зона нечувствительности МДР, $y'(t)$ — скорость изменения выходной величины, T — интервал квантования по времени.

Таким образом, при подключении $x(t)$ на входе ОНОУ действует разность $x(t) - z(t)$, при отключе-

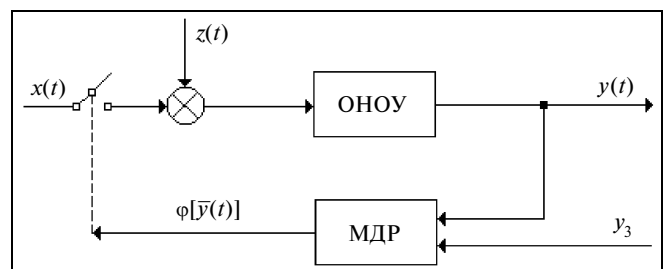


Рис. 3. Типовая структурная схема позиционного регулирования технологического параметра процесса восстановления (сепарации)

нии $x(t)$ поведение ОНОУ определяется возмущающим воздействием $z(t)$. Система регулирования при этом работает в режиме автоколебаний [8].

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ МОДЕЛЕЙ

В общем случае для решения задач управления ТП необходимо математическое описание, устанавливающее связь между входными и выходными переменными. Назначение модели состоит в установлении таких количественных соотношений между входными и выходными переменными, на основании которых может быть выработано управление, обеспечивающее заданную цель функционирования объекта. Такая модель не вскрывает особенностей физических и химических процессов, протекающих в объекте управления. Однако получаемая с ее помощью связь образует совокупность тех сведений о динамических свойствах объекта, которая достаточна для разработки системы управления. Построение моделей динамики технологических объектов осуществляют экспериментальным методом. Результаты измерений служат основой построения математического описания динамики объекта. Для получения наиболее полной модели измерения проводят непосредственно в процессе управления с учетом действующих возмущений и реальных условий функционирования технологического объекта. Под идентификацией технологического объекта управления понимают определение его структуры и параметров по данным «вход-выход» [19]. В нашем случае задача идентификации заключается в определении структуры и параметров ОНОУ — уравнений связи входных и выходных величин и неизвестных коэффициентов этих уравнений [18].

Структуру модели динамики ОНОУ можно задать оператором A , устанавливающим соответствие между выходной $y(t)$ и входными функциями $x(t)$ и $z(t)$: $y(t) = A\{x(t), z(t)\}$. В теории управления ТП отсутствуют методы определения операторов объектов неизвестной структуры. Обычно, основываясь на реализациях входных и выходных величин, высказывают гипотезу о конкретном выражении операторов таких объектов, которую затем проверяют по результатам эксперимента [19].

Для оценки динамических свойств реального ОНОУ его можно с достаточной степенью точности представить эквивалентными нестационарными объектами без самовыравнивания и с самовыравниванием, описываемыми соответствующими дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами [20]:

$$\frac{d[y(t)]}{dt} = K_0(t)\{x[t - \tau(t)] - z(t)\}, \quad (1)$$

$$T_0(t) \frac{d[y(t)]}{dt} + y(t) = K_0(t)\{x[t - \tau(t)] - z(t)\}, \quad (2)$$

где $K_0(t)$ — коэффициент усиления, $T_0(t)$ — постоянная времени объекта с самовыравниванием, $\tau(t)$ — время запаздывания.

Таким образом, считаем, что априорно известны структуры операторов ОНОУ, представленные уравнениями (1) и (2). Нестационарность обусловлена тем, что коэффициенты этих уравнений — неизвестные функции времени в определении которых и состоит задача идентификации.

4. ОПИСАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

Будем считать ОНОУ на интервале идентификации (в течение периода автоколебаний) квазистационарным. Полагаем, что на интервале идентификации динамические свойства ОНОУ остаются постоянными, т. е. $K_0(t) = \text{const}$, $T_0(t) = \text{const}$, $z(t) = \text{const}$ и $\tau(t) = \text{const}$. В этом случае автоколебания температуры описываются системами конечных уравнений [20], устанавливающими взаимосвязь параметров автоколебаний с искомыми коэффициентами дифференциальных уравнений для ОНОУ без самовыравнивания:

$$\Delta y_{(+)} = \Delta y_0 + (\tau_{\text{off}} + \tau_{\text{d.off}})K_0(x - z); \quad (3)$$

$$\Delta y_{(-)} = \Delta y_0 + (\tau_{\text{on}} + \tau_{\text{d.on}})K_0z; \quad (4)$$

$$T_{\text{on}} = \tau_{\text{on}} + \tau_{\text{d.off}} + \frac{2\Delta y_0 + (\tau_{\text{on}} + \tau_{\text{d.on}})K_0z}{K_0(x - z)}; \quad (5)$$

$$T_{\text{off}} = \tau_{\text{off}} + \tau_{\text{d.on}} + \frac{2\Delta y_0 + (\tau_{\text{off}} + \tau_{\text{d.off}})K_0(x - z)}{K_0z} \quad (6)$$

и с самовыравниванием:

$$\Delta y_{(+)} = K_0(x - z) \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_{\text{off}} + \tau_{\text{d.off}}}{T_0}\right) \right] + \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{\text{off}} + \tau_{\text{d.off}}}{T_0}\right); \quad (7)$$

$$\Delta y_{(-)} = K_0z \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_{\text{on}} + \tau_{\text{d.on}}}{T_0}\right) \right] + \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{\text{on}} + \tau_{\text{d.on}}}{T_0}\right); \quad (8)$$

$$T_{\text{on}} = \tau_{\text{on}} + \tau_{\text{d.off}} + T_0 \ln \frac{K_0x - (K_0z - \Delta y_0) \exp\left(-\frac{\tau_{\text{on}} + \tau_{\text{d.on}}}{T_0}\right)}{K_0(x - z) - \Delta y_0}; \quad (9)$$

$$T_{\text{off}} = \tau_{\text{off}} + \tau_{\text{d.on}} + T_0 \ln \frac{K_0x - [K_0(x - z) - \Delta y_0] \exp\left(-\frac{\tau_{\text{off}} + \tau_{\text{d.off}}}{T_0}\right)}{K_0z - \Delta y_0}, \quad (10)$$

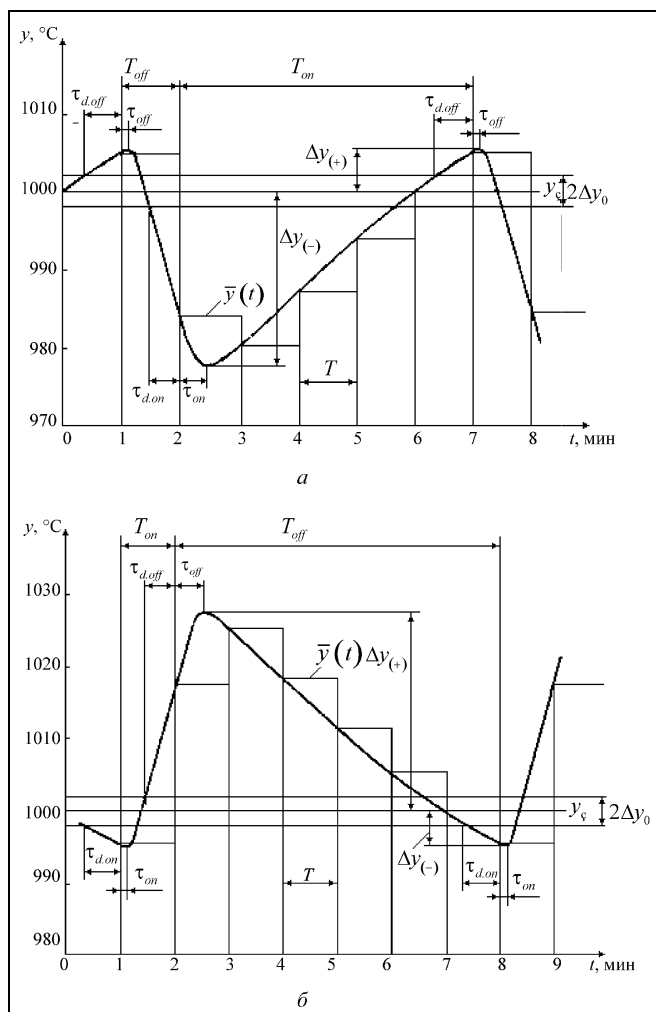


Рис. 4. Автоколебания температуры на интервале идентификации ОНОУ в начале (а) и в конце (б) процесса сепарации титана

где $\Delta y_{(+)}$ и $\Delta y_{(-)}$ — амплитуды положительного и отрицательного отклонений выходной величины от y_3 , T_{on} и T_{off} — время подключения и отключения входной величины, τ_{on} и τ_{off} — время запаздывания объектов при ее подключении и отключении, $\tau_{d.on}$ и $\tau_{d.off}$ — дополнительное время запаздывания МДР при подключении и отключении.

Считаем, что на интервале идентификации ОНОУ параметры автоколебаний могут быть измерены при известных значениях x и Δy_0 (рис. 4).

Тогда задача идентификации ОНОУ без самовыравнивания сводится к определению по соотношениям (3)—(6) и экспериментальным данным автоколебательного процесса неизвестных величин K_0 и z в уравнении (1), а задача идентификации ОНОУ с самовыравниванием — к определению по соотношениям (7)—(10) и экспериментальным данным неизвестных величин K_0 , T_0 и z в уравнении (2).

5. АЛГОРИТМЫ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Для решения задачи необходимо выбрать критерий качества идентификации — функцию потерь, характеризующую различие моделей и объекта, и разработать алгоритмы идентификации, минимизирующие эту функцию [21].

Введем для количественной оценки степени близости моделей (1), (2) и реального ОНОУ функцию потерь, которая зависит от расчетных и измеренных параметров автоколебаний. Наложим на эту функцию требование [18]:

$$\rho = (\Delta y_{(+)}^p - \Delta y_{(+)}^3)^2 / \Delta y_{(+)}^3 + (\Delta y_{(-)}^p - \Delta y_{(-)}^3)^2 / \Delta y_{(-)}^3 + (T_{on}^p - T_{on}^3)^2 / T_{on}^3 + (T_{off}^p - T_{off}^3)^2 / T_{off}^3 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где ρ — функция потерь, индекс «р» относится к расчетным значениям параметров автоколебаний, индекс «э» — к экспериментальным.

Заметим, что системы (3)—(6) и (7)—(10) являются переопределенными (на четыре уравнения (3)—(6) — два неизвестных, на четыре уравнения (7)—(10) — три неизвестных) и для разработки алгоритмов решения систем уравнений (алгоритмов идентификации) целесообразно воспользоваться методами оптимизации [22]. Очевидно, что требование (11) будет выполняться, если значения K_0 и z ОНОУ без самовыравнивания и значения K_0 , T_0 и z ОНОУ с самовыравниванием будут найдены из систем уравнений (3)—(6), (7)—(10) и условия минимума функции потерь ρ , записанной для каждого для этих объектов.

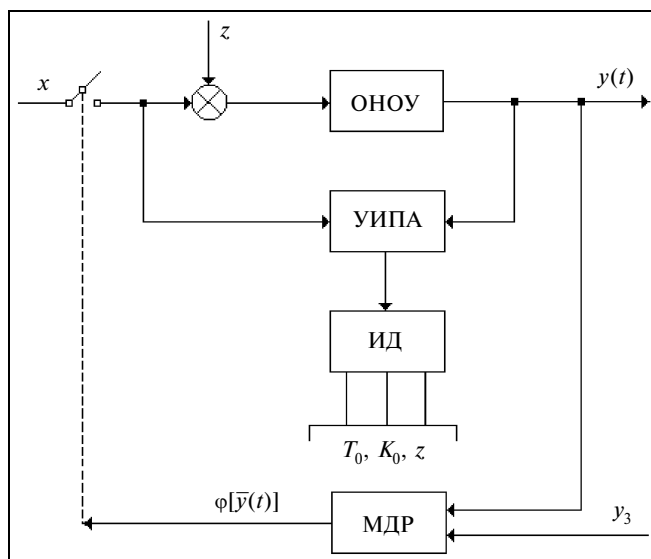


Рис. 5. Структурная схема идентификации ОНОУ в замкнутом контуре позиционного регулирования

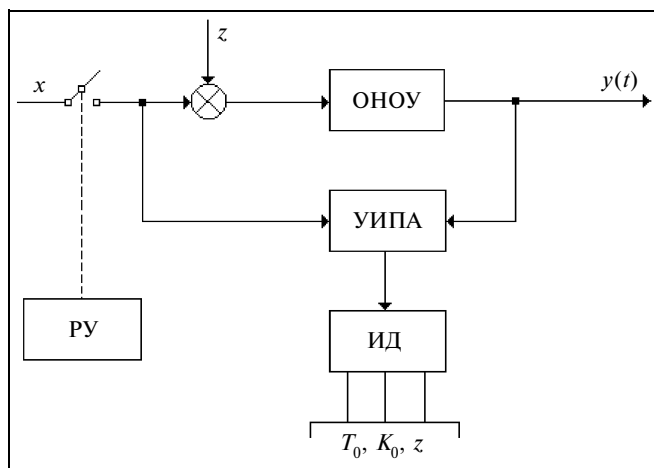


Рис. 6. Структурная схема идентификации ОНОУ в разомкнутом контуре позиционного регулирования

Соответствующие алгоритмы идентификации были реализованы с помощью метода пошаговой многомерной оптимизации с разной точностью [23]. Поиск минимума заканчивается при достижении заданной точности решения задачи, определяемой неравенствами:

$$\begin{aligned} |\Delta y_{(+)}^p - \Delta y_{(+)}^3| < \varepsilon_y, \quad |\Delta y_{(-)}^p - \Delta y_{(-)}^3| < \varepsilon_y, \\ |T_{on}^p - T_{on}^3| < \varepsilon_T \quad \text{и} \quad |T_{off}^p - T_{off}^3| < \varepsilon_T, \end{aligned} \quad (12)$$

где ε_y и ε_T — малые, наперед заданные величины (порядка $10^{-1} \dots 10^{-2}$).

Для решения задачи структурную схему (см. рис. 3) необходимо дополнить устройством измерения параметров автоколебаний УИПА и оценивающим устройством — идентификатором ИД с заложенными в него алгоритмами идентификации (рис. 5).

В процессе функционирования ОНОУ на его входе измеряются параметры автоколебаний T_{on} и T_{off} , а на выходе — параметры автоколебаний $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$ и времена запаздывания τ_{on} , τ_{off} , $\tau_{d.on}$ и $\tau_{d.off}$ (в быстродействующем МДР — микропроцессорном контроллере — можно принять $\tau_{d.on} = \tau_{d.off} = 0$). Идентификатор по результатам измерений вычисляет путем решения систем уравнений (3)–(6), (7)–(10) и минимизации соответствующей функции потерь ρ неизвестные величины K_0 и z ОНОУ без самовыравнивания и K_0 , T_0 и z ОНОУ с самовыравниванием. Задача идентификации ОНОУ в разомкнутом контуре позиционного регулирования (рис. 6) решается аналогично с той лишь разницей, что $y(t)$ поддерживается на уровне y_3 с помощью ручного управления РУ.

Предложенные подходы позволяют автоматизировать процесс идентификации моделей в составе АРМ операторов восстановления и сепарации [23]. Это дает возможность методом пассивного эксперимента непосредственно в рабочем режиме оценивать в реальном времени динамику и возмущения ТП, а также усредненные на интервале функционирования значения их динамических параметров. Существенно снижаются затраты времени на идентификацию и обработку результатов эксперимента.

6. ПРИМЕР

Решение задачи рассмотрим на примере идентификации ОНОУ в начале и в конце процесса сепарации (см. рис. 4).

Требуется определить такие значения K_0 и z ОНОУ без самовыравнивания и значения K_0 , T_0 и z ОНОУ с самовыравниванием, чтобы при из-

Таблица 1

Параметры автоколебаний температуры на интервале идентификации

Стадия процесса сепарации	Значения параметров							
	$\Delta y_{(+)}, ^\circ\text{C}$	$\Delta y_{(-)}, ^\circ\text{C}$	T_{on}, c	T_{off}, c	τ_{on}, c	τ_{off}, c	$\tau_{d.on}, \text{c}$	$\tau_{d.off}, \text{c}$
Начало процесса	5,9	21,1	300	60	25,9	7,5	29,6	34,4
Конец процесса	24,6	5,5	60	360	6,2	28,5	35,6	33,3

Таблица 2

Результаты идентификации

Стадия процесса сепарации	ОНОУ без самовыравнивания		ОНОУ с самовыравниванием		
	$K_0 \cdot 10^{-3}, ^\circ\text{C}/\text{c} \cdot \text{кВт}$	$z, \text{кВт}$	$K_0, ^\circ\text{C}/\text{кВт}$	T_0, c	$z, \text{кВт}$
Начало процесса	3,4	101,5	2,4	708,3	104,3
Конец процесса	3,5	25,7	2,5	700,2	21,1



вестных x , Δu_0 ($x = 130$ кВт, $\Delta u_0 = 2$ °С) и экспериментальным данным автоколебаний температуры (табл. 1) выполнялись условия (12). Результаты решения задачи приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, параметры K_0 и T_0 ОНОУ изменяются в ходе процесса незначительно. Существенно изменяется (снижается) возмущающее воздействие z (тепло, потребляемое ОНОУ на испарение из губчатого титана примесей магния и хлорида магния).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема построения моделей сложных много-связных нестационарных технологических объектов — процессов восстановления и вакуумной сепарации губчатого титана — заменена решением в позиционных системах задач идентификации автономных нестационарных объектов управления. С помощью предложенных моделей синтезирован класс систем управления [24—27], обеспечивающих оптимизацию и интенсификацию процессов восстановления и вакуумной сепарации.

Описанный подход может быть применен для идентификации нестационарных технологических объектов в различных отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов А.В. Металлургия титана. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. — 328 с.
2. Постановки задач оптимизации магнетермической технологии губчатого титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Проблемы и перспективы развития химической технологии на Западном Урале: Сб. науч. тр. — Пермь: ПГТУ, 2001. — С. 148—151.
3. Синтез оптимальных систем управления процессами магнетермического получения губчатого титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-14: Сб. тр. 14-й Междунар. науч. конф. / СФ МЭИ. — Смоленск, 2001. — Т. 2. — С. 89—91.
4. Сергин М.Ю. Современное состояние и возможные пути решения проблем построения систем управления технологическими процессами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2004. — № 1. — С. 2—8.
5. Тимченко Б.С. Экспериментально-статистическая оптимизация, контроль и автоматизация металлотермии. — М.: Цветметинформация, 1968. — 103 с.
6. Влияние различных факторов на срок службы реторт аппаратов магнетермического производства титана / О.А. Путина, А.А. Путин, А.И. Гулякин и др. // Цветные металлы. — 1979. — № 9. — С. 71—73.
7. Локшин Р.Г., Ревуцкий Е.Я. Автоматизация магнетермического процесса восстановления четырехлористого титана // Труды ВАМИ — Л., 1964. — № 52. — С. 128—137.
8. Минимизация длительности процессов сепарации титана в АСУТП / Ю.П. Кирин, А.И. Черепанов, Ю.А. Протасов и др. // Цветные металлы. — 1983. — № 1. — С. 51—54.
9. Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В. Энергосберегающее управление сложными объектами // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2005. — № 11. — С. 24—27.
10. Тюрин И.В., Яшин Е.Н. Оптимальное управление температурным профилем сложных объектов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2006. — № 9. — С. 1—4.
11. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. — М.: Наука, 1977. — 392 с.
12. Иодко Э.А. Термодинамика и теплофизика процесса магнетермического восстановления титана // Изв. АН СССР. Металлы. — 1977. — № 4. — С. 30—35.
13. Иодко Э.А. Испарение группы веществ из пористого тела // Инженерно-физический журнал. — 1979. — Т. 37, № 3. — С. 449—455.
14. Исследование температурных полей аппаратов сепарации различной конструкции / А.Н. Петрунько, А.Е. Андреев, Э.А. Арутюнов и др. // Цветные металлы. — 1969. — № 4. — С. 74—76.
15. Изучение температурных полей аппаратов для получения губчатого титана / А.И. Титаренко, Е.А. Черепанова, В.М. Мальшин и др. // Там же. — 1976. — № 4. — С. 50—51.
16. Температурные поля аппаратов восстановления / Е.А. Черепанова, В.М. Мальшин, А.П. Яценко и др. // Там же. — 1982. — № 3. — С. 51—52.
17. Опыт стабилизации температурного режима сепарации реакционной массы при производстве титана / Е.А. Черепанова, С.В. Мушков, А.И. Гулякин и др. // Там же. — 1983. — № 4. — С. 57—58.
18. Построение моделей динамики в системах управления процессами производства губчатого титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова. — Кострома: КГУ, 2006. — Т. 12. — С. 43—47.
19. Основы управления технологическими процессами / Под ред. Н.С. Райбмана. — М.: Наука, 1978. — 440 с.
20. Идентификация математических моделей нестационарных объектов управления / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-14: Сб. тр. 14-й Междунар. науч. конф. / СФ МЭИ. — Смоленск, 2001. — Т. 2. — С. 92—94.
21. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. — М.: Наука, 1984. — 320 с.
22. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров. — М.: Высшая школа, 1994. — 544 с.
23. Применение методов оптимизации для идентификации объектов в позиционных системах регулирования / А.В. Затонский, Ю.П. Кирин, В.Ф. Беккер и др. // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-18: Сб. тр. 18-й Междунар. науч. конф. / КГТУ. — Казань, 2005. — Т. 10. — С. 67—70.
24. Управление вакуумной сепарацией губчатого титана с применением систем переменной структуры / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-15: Сб. тр. 15-й Междунар. науч. конф. / ТГТУ. — Тамбов, 2002. — Т. 9. — С. 210—214.
25. Адаптивное позиционное регулирование с идентификатором / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-16: Сб. тр. 16-й Междунар. науч. конф. / СПбГТИ (ТУ) — Санкт-Петербург, 2003. — Т. 2. — С. 85—88.
26. Синтез импульсной позиционной системы управления нестационарным объектом / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-18: Сб. тр. 18-й Междунар. науч. конф. / КГТУ. — Казань, 2005. — Т. 10. — С. 44—47.
27. Совместная разработка технологии и системы управления вакуумной сепарацией губчатого титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2007. — № 9. — С. 7—10.

e-mail: zxenon2000@yandex.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Амбарцумяном. □