

УДК 669. 295. 681.5

Ю.П. Кирич, В.В. Кирьянов

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет
(Березниковский филиал)*

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕРВАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ГУБЧАТОГО ТИТАНА

В статье рассмотрены вопросы построения интервальной модели динамики процессов производства губчатого титана для синтеза оптимальных систем управления температурным режимом процессов восстановления и вакуумной сепарации. Для описания динамических свойств зон нагрева и зон экзотермической реакции аппаратов производства губчатого титана введено понятие обобщенного нестационарного объекта управления, функционирующего в условиях неопределенности. Проведена параметрическая и структурная идентификация модели динамики указанного объекта. По результатам идентификации получена адекватная реальному объекту модель динамики. Определены интервальные значения динамических параметров объекта и действующих возмущений. С применением интервальной модели динамики синтезирован новый класс систем управления, обеспечивающий оптимизацию и интенсификацию процессов восстановления и вакуумной сепарации губчатого титана.

Губчатый титан, восстановление и вакуумная сепарация, обобщенный нестационарный объект управления, неопределенность, интервальная модель динамики, идентификация модели динамики.

In article issues of creation of interval model of dynamics of processes of production of the spongy titan for synthesis of optimum control systems of temperature condition of processes of recovering and vacuum separation are considered. For the description of dynamic properties of zones of heating and zones of exothermic reaction of devices of production of the spongy titan the concept of the generalized non-stationary object of the management functioning in the conditions of uncertainty is introduced. Parametrical and structural identification of model of dynamics of the specified object is carried out. According to results of identification dynamics model adequate to real object is received. Interval values of dynamic parameters of object and the operating indignations are defined. The new class of control systems providing optimization and an intensification of processes of recovering and vacuum separation of the spongy titan is synthesized with the use of interval model of dynamics.

Titanium sponge, recovering and vacuum separation, the generalized non-stationary object of management, uncertainty, interval model of dynamics, identification of model of dynamics

Введение

Основу промышленного производства губчатого титана составляют процессы восстановления тетрахлорида 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 поддержании двухпозиционными регуляторами в каждой зоне нагрева (зоне реакции) определенной температуры с требуемой точностью. При этом 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 охлаждения [9].

Системы двухпозиционного регулирования температуры процессов восстановления и сепарации работают в режиме автоколебаний. Параметры автоколебаний существенно зависят от условий функционирования восстановления и сепарации и изме-

няются при вариациях нагрузок производства. Вопросы повышения качества двухпозиционного управления температурным режимом процессов восстановления и вакуумной сепарации исследованы недостаточно, что существенно снижает технико-экономические показатели производства. Поэтому совершенствование систем управления температурным режимом процессов является одной 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, обеспечивающих улучшение качества управления температурным режимом (снижение амплитуд автоколебаний температуры).

Ряд особенностей производства губчатого титана затрудняет решение этой задачи, а именно:

1. 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.
2. 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 тепла экзотермической реакции восстановления тетрахлорида титана магнием и потребляемого тепла при вакуумной очистке губчатого титана от примесей магния и хлорида магния. Статические и динамические характеристики зон нагрева и зоны экзотермической реакции различны на разных стадиях процессов, характер их изменения не подчиняется какому-либо определенному закону.

3. Нелинейность систем управления. При существующем аппаратном оформлении процессов восстановления и сепарации исполнительными механизмами служат релейные элементы (контакты, магнитные пускатели), которые имеют два рабочих положения (включено – выключено). Это обстоятельство предопределило двухпозиционный принцип управления технологическими процессами. Автоматизация процессов осуществлена на базе нелинейных систем управления, в которых заданный температурный режим зон нагрева и экзотермической реакции поддерживают многоканальные двухпозиционные регуляторы. Рабочие режимы регулирования температуры в нелинейных системах – сложные автоколебательные процессы, характеризующиеся асимметрией автоколебаний и остаточной неравномерностью.

В металлургическом цехе одновременно функционируют несколько десятков аппаратов восстановления и вакуумной сепарации. Каждый из аппаратов имеет три и более зон нагрева. Каждый аппарат восстановления, кроме того, имеет зону экзотермической реакции. Отмеченные выше особенности процессов восстановления и сепарации дают основание считать зоны нагрева аппаратов и зоны экзотермической реакции объектами с неопределенными динамическими параметрами, которые в процессе эксплуатации изменяются в некоторых пределах [4]. В условиях действующего производства губчатого титана затруднено математическое описание таких объектов регулирования. Для синтеза оптимальной системы управления температурным режимом процессов целесообразно учитывать возможные области изменения значений динамических параметров зон нагрева, зон экзотермической реакции и возмущений. В этом случае указанные зоны аппаратов можно рассматривать как объекты регулирования с интервально-неопределенными параметрами, а систему многоканального двухпозиционного регулирования температуры процессов восстановления и сепарации – как интервальную систему автоматического регулирования [8], [12].

В теории автоматического управления для исследования интервальных систем применяют робастный подход, предусматривающий анализ их робастной устойчивости (сохранение устойчивости при любых значениях интервальных параметров) и анализ робастного качества для определения наихудших показателей качества системы при изменении интервальных параметров в заданных диапазонах. Актуальна также разработка методов синтеза робастных регуляторов, обеспечивающих гарантированное качество

работы интервальных систем при любых значениях параметров объектов управления из известных интервалов [7], [13]. Для решения указанных задач требуется разработка методов построения интервальных моделей объектов в условиях неопределенности и оценка их адекватности [10].

Основная часть

Для построения интервальной модели динамики процессов производства губчатого титана введем понятие обобщенного нестационарного объекта управления (ОНОУ), под которым подразумевают зону нагрева, зону экзотермической реакции аппарата восстановления или зону нагрева аппарата сепарации. Тогда управление процессами восстановления и сепарации можно рассматривать состоящими из ряда типовых нестационарных нелинейных (двухпозиционных) систем регулирования технологических параметров [3].

Каждая из таких систем регулирования состоит из ОНОУ, на вход которого воздействует неконтролируемое возмущение $z(t)$, и многоканального двухпозиционного регулятора (МДР) (рис. 1).

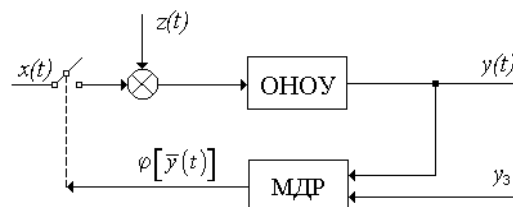


Рис. 1. Типовая структурная схема многоканального двухпозиционного регулирования температуры процесса восстановления (сепарации)

Здесь под $z(t)$ подразумевают изменение тепловых потерь зоны нагрева, изменение тепла зоны экзотермической реакции аппарата восстановления, изменение потребляемого тепла зоны нагрева аппарата сепарации. МДР включением и выключением входной величины $x(t)$ (мощности нагрева зоны или мощности охлаждения зоны реакции) поддерживает выходную величину $y(t)$ (температуру) ОНОУ на заданном уровне y_3 в соответствии с алгоритмом:

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

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

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

Таким образом, при включении $x(t)$ на входе ОНОУ действует разность $x(t) - z(t)$, при выключении $x(t)$ поведение ОНОУ определяется возмущаю-

щим воздействием $z(t)$. Система регулирования при этом работает в режиме автоколебаний.

Рассмотрим особенности построения интервальной модели динамики ОНОУ в многоканальной двухпозиционной системе регулирования температуры процессов восстановления и вакуумной сепарации.

В общем случае для решения задач управления технологическими процессами необходимо иметь математическое описание, устанавливающее связь между входными и выходными переменными. При этом 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» [1].

Если при этом отсутствует априорная информация о форме и степени связи входных и выходных величин, то имеет место структурная и параметрическая неопределенность математической модели объекта управления. Для исследования систем автоматического управления при наличии неопределенностей в математической модели объекта предложен ряд методов, позволяющих достичь цели управления. Наиболее перспективными являются интервальные методы исследований, используемые для разработки робастных систем управления [11].

Методология построения интервальной модели динамики процессов производства губчатого титана предусматривает структурную и параметрическую идентификацию ОНОУ [3], [5].

В теории управления технологическими процессами 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 [1].

Структура модели динамики ОНОУ задана оператором A , устанавливающим соответствие между выходной функцией $y(t)$ и входными функциями $x(t)$, $z(t)$:

$$y(t) = A\{x(t), z(t)\}. \quad (1)$$

Для оценки динамических свойств реального ОНОУ оператор (1) представлен эквивалентным нестационарным объектом с самовывравниванием, описываемым соответствующим дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами:

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

где $T_0(t)$, $K_0(t)$, $\tau(t)$ – постоянная времени, коэффициент усиления, время запаздывания ОНОУ.

Таким образом, предполагалось, что априорно известна структура оператора ОНОУ, представленная уравнением (2). При этом нестационарность обусловлена тем, что коэффициенты $T_0(t)$, $K_0(t)$, $\tau(t)$, $z(t)$ уравнения (2) являются некоторыми неизвестными функциями времени. Задача параметрической идентификации состояла в определении этих коэффициентов. Для ее решения получены системы конечных уравнений, устанавливающие взаимосвязь параметров автоколебаний в многоканальной двухпозиционной системе регулирования температуры ОНОУ с искомыми коэффициентами дифференциального уравнения. Задача идентификации в данном случае сводится к решению систем уравнений для определения по измеренным в эксперименте параметрам автоколебаний температуры значений указанных коэффициентов. Критерий качества идентификации определен функцией потерь, представляющей собой среднеквадратичную оценку измеренных в эксперименте и расчетных параметров автоколебаний. Разработаны алгоритмы решения систем конечных уравнений (алгоритмы идентификации), минимизирующие функцию потерь. Мерой близости модели и реального ОНОУ в данном случае является разность измеренных и расчетных значений параметров автоколебаний температуры, которая не превышает 0,1 % [3]. В результате получена адекватная реальному ОНОУ модель динамики и определены интервальные значения ее коэффициентов [6]:

$$\begin{aligned} T_0^{\min} &\leq T_0(t) \leq T_0^{\max}; \\ K_0^{\min} &\leq K_0(t) \leq K_0^{\max}; \\ \tau^{\min} &\leq \tau(t) \leq \tau^{\max}; \\ z^{\min} &\leq z(t) \leq z^{\max}. \end{aligned}$$

Выводы

Для одного из типов промышленных аппаратов производства губчатого титана получены следующие интервальные значения ОНОУ: $T_0^{\min} = 320\text{с}$, $T_0^{\max} = 390\text{с}$, $K_0^{\min} = 2,1^\circ\text{C/кВт}$, $K_0^{\max} = 3,2^\circ\text{C/кВт}$, $\tau^{\min} = 21\text{с}$, $\tau^{\max} = 30\text{с}$, $z^{\min} = 12\text{кВт}$; $z^{\max} = 110\text{кВт}$. Указанные интервальные значения использованы для синтеза робастной системы управления, обеспечивающей за счет улучшения качества управления температурным режимом повышение производительности процессов восстановления и вакуумной сепарации и снижение энергозатрат.

Литература

1. Анисимов С.А., Дынькин В.Н., Касавин А.Д., Лотцкий В.А., Райбман Н.С. Основы управления технологическими процессами. М., 1978.
2. Кири́н Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф., Бильфельд Н.В. Современные направления совершенствования и развития производства губчатого титана // Титан. 2003. № 2(13). С. 11–16.
3. Кири́н Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф., Краев С.Л. Идентификация технологических процессов производства губчатого титана // Проблемы управления. 2008. № 4. С. 71–77.
4. Кири́н Ю.П. Позиционное управление технологическими процессами в условиях неопределенности // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2009. №2. С. 158–160.
5. Кири́н Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф. Построение моделей динамики сложных технологических объектов в позиционных системах управления // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №3(27). С. 25–28.
6. Кири́н Ю.П. Импульсное позиционное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами // Новый университет. 2011. №2. С. 18–22.
7. Пушкарев М.И. Анализ и синтез систем управления технологическими объектами с интервальными параметрами на основе корневых показателей качества: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2014.
8. Суходоев М.С. Корневой анализ и синтез систем с интервальными параметрами на основе вершинных характеристик полиномов: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2008.
9. Тарасов А.В. Металлургия титана. М., 2003.
10. Целигоров Н.А., Мафура Г.В. Причины возникновения интервальных значений в математических моделях исследования робастной устойчивости систем управления // Инженерный вестник Дона. 2012. №4. Ч. 1. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340>.
11. Целигоров Н.А., Целигорова Е.Н., Мафура Г.В. Математические модели неопределенностей систем управления и методы, используемые для их исследования // Инженерный вестник Дона. 2012. №4. Ч. 2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340>.
12. Ackermann J. Parameter space design of robust control systems // IEEE Trans. On Autom. Control. 1980. Vol. 25. №6. pp. 1058–1072.
13. Chen C.T., Wang M.D. Robust controller design for interval process systems // Computers and Chemical Engineering. 1997. Vol. 21. pp. 707–721.

References

1. Anisimov S.A. *Osnovy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Fundamentals of process control]. Moscow, 1978.
2. Kirin Yu.P. *Sovremennye napravleniya sovershenstvovaniya i razvitiya proizvodstva gubchatogo titana* [Modern

directions of perfection and development of production of titanium sponge]. *Titan* [Titanium], 2003, № 2(13), pp. 11–16.

3. Kirin Yu. P. Identifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva gubchatogo titana [Identification of technological processes of production of titanium sponge]. *Problemy upravleniya* [control], 2008, № 4, pp. 71–77.

4. Kirin Yu.P. Pozitsionnoe upravlenie tekhnologicheskimi processami v usloviyakh neopredelennosti [Positional control of technological processes under uncertainty conditions]. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of southern Federal University. Technical science], 2009, №2, pp. 158–160.

5. Kirin Yu. P., Zatonskiy A. V., Bekker V. F. Postroenie modeley dinamiki slozhnykh tekhnologicheskikh ob'ektov v pozitsionnykh sistemakh upravleniya [Modeling the dynamics of complex technological objects in positional control systems]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk state technical University. G.I. Nosova], 2009, №3(27), pp. 25–28.

6. Kirin Yu.P. Impul'snoe pozitsionnoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami s nestatsionarnymi parametrami [Pulse position control of technological processes with time-varying parameters]. *Novyy universitet* [New University], 2011, №2, pp. 18–22.

7. Pushkarev M.I. Analiz i sintez sistem upravleniya tekhnologicheskimi ob'ektami s intervalnymi parametrami na osnove kornevykh pokazateley kachestva [Analysis and synthesis of control systems of technological objects with interval parameters based on root quality indices. Dr. dis.]. Tomsk, 2014.

8. Suhodoev M.S. Kornevoy analiz i sintez sistem s intervalnymi parametrami na osnove vershinnnykh harakteristik polinomov [Root analysis and synthesis of systems with interval parameters based on the characteristics of the vertex polynomials: Dr. dis.]. Tomsk, 2008.

9. Tarasov A.V. *Metallurgiya titana* [Metallurgy of titanium]. Moscow, 2003.

10. Celigorov N.A., Mafura G.V. Prichiny vozniknoveniya intervalnykh znacheniy v matematicheskikh modelyakh issledovaniya robastnoy ustoychivosti sistem upravleniya [Causes of interval values in mathematical models of the study of robust stability of control systems]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2012, №4, Vol. 1. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340>.

11. Celigorov N.A., Celigorova E.N., Mafura G.V. Matematicheskie modeli neopredelennostey sistem upravleniya i metody, ispolzuemye dlya ih issledovaniya [Mathematical models of uncertainties of the control systems and methods used for their research]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2012, №4, Vol. 2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340>.

12. Ackermann J. Parameter space design of robust control systems *IEEE Trans. On Autom. Control*, 1980, Vol. 25, №6, pp. 1058–1072.

13. Chen C.T., Wang M.D. Robust controller design for interval process systems *Computers and Chemical Engineering*, 1997, Vol. 21, pp. 707–721.