

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Ю. П. Кирин, В. В. Кирьянов, Робастное управление технологическими процессами производства губчатого титана,
Пробл. управл., 2016, выпуск 6, 71–79

<https://www.mathnet.ru/pu1004>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.87

18 мая 2025 г., 10:49:27



РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА ГУБЧАТОГО ТИТАНА

Ю.П. Кирин, В.В. Кирьянов

Рассмотрен робастный подход к управлению процессами восстановления и вакуумной сепарации губчатого титана, позволяющий интенсифицировать процессы путем повышения температуры. Получено описание объектов в виде интервальной динамической модели. С помощью данной модели выполнены анализ и синтез робастного управления, обеспечивающего гарантированное поддержание максимально допустимой температуры процессов при изменении неопределенных параметров в заданных интервалах.

Ключевые слова: губчатый титан, восстановление и вакуумная сепарация, температурный режим, робастное управление, гарантирующее заданное значение.

ВВЕДЕНИЕ

Основу промышленного производства губчатого титана составляют процессы восстановления тетрахлорида титана магнием и последующей вакуумной сепарации, осуществляемые в аппаратах периодического действия. После восстановления в реакторе остается спекшийся блок реакционной массы в виде титановой губки, поры которой заполнены основными примесями — магнием и хлоридом магния. Последние характеризуются достаточно высоким давлением паров и при нагревании в процессе сепарации под вакуумом испаряются, а затем отгоняются в конденсатор. Конструкцией аппаратов предусмотрено разделение рабочего объема каждого аппарата на ряд зон нагрева (аппарат сепарации), зон нагрева и зону экзотермической реакции (аппарат восстановления) [1].

Основные направления совершенствования производства губчатого титана заключаются в получении высококачественного однородного по химическому составу губчатого титана и повышении производительности процессов восстановления и вакуумной сепарации. Один из путей реализации указанных направлений состоит в интенсификации процессов благодаря повышению температуры [2].

В результате экспериментальных и теоретических исследований условий интенсификации процессов восстановления и сепарации установлено влияние температуры на скорость реакции восстановления тетрахлорида титана магнием и скорость очистки блока губчатого титана от примесей магния и хлорида магния. Так, для одной и той же концентрации тетрахлорида титана, равной $0,85 \cdot 10^{-2}$ моль/л, значения константы скорости реакции восстановления составляют при 750, 850 и 950 °С соответственно 0,75, 2,24 и 7,48 л/(моль · с) [1]. Это обуславливает ускорение реакции с ростом температуры. Даже небольшое повышение температуры ведет к заметному повышению скорости сепарации: для одинаковой полноты удаления магния из блока губчатого титана при температуре 925 °С требуется вдвое меньше времени, чем при температуре 900 °С [3]. При повышении температуры процесса с 700 до 1000 °С скорость сепарации возрастет более, чем в 100 раз [4]. При этом, конечно, температура процессов не должна превышать своих максимально допустимых значений для реакторов восстановления и сепарации, выполненных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Определены технологические ограничения значений максимальной температуры процессов. За верхний предел допустимой температуры процесса восстановления принимается 900 °С, при пре-

вышении которой губчатый титан загрязняется примесями железа вследствие их перехода из материала стенки реактора через газовую фазу тетрахлорида титана. За верхний предел допустимой температуры процесса сепарации принимается $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, при превышении которой происходит загрязнение губчатого титана примесями железа вследствие их диффузии из материала стенки реактора. Объектами управления служат зоны нагрева и зоны экзотермической реакции аппаратов восстановления, зоны нагрева аппаратов вакуумной сепарации, температура которых поддерживается на заданных уровнях многоканальными двухпозиционными регуляторами [1].

В производственных условиях температурный режим процессов восстановления и вакуумной сепарации обеспечивался экспериментальным подбором заданий регуляторам температуры указанных зон аппаратов. В первых работах по интенсификации процессов задания регуляторам температуры зон нагрева и зон экзотермической реакции аппаратов назначались значительно ниже максимально допустимых значений — $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ для процесса восстановления и $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ для процесса сепарации, что снижало технико-экономические показатели производства губчатого титана [5, 6].

В сложившейся ситуации задача интенсификации процессов состояла в разработке такого управления, которое позволяло бы поддерживать температурный режим на максимально допустимом уровне. С момента организации и в течение всего времени производства губчатого титана проблема интенсификации процессов восстановления и вакуумной сепарации связана с изучением процессов как объектов управления и совершенствованием систем их автоматизации. Ее решение осложнялось тем, что названные процессы являются объектами управления с неопределенными динамическими параметрами, которые в условиях производства изменяются в некоторых пределах [2]. Для эффективного управления такими объектами в настоящей статье предложен робастный подход, обеспечивающий гарантированное поддержание максимально допустимого температурного режима при изменении неопределенных параметров объектов в заданных диапазонах. Рассмотрен эволюционный путь решения проблемы интенсификации, предусматривающий разработку на основе интервальной динамической модели методов робастного управления температурным режимом процессов восстановления и вакуумной сепарации и их практическую реализацию на разных этапах автоматизации производства губчатого титана с применением машин централизованного контроля, управляющих вычислительных машин, микропроцессорных контроллеров и компьютеров [2, 7, 8].

1. МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ВАКУУМНОЙ СЕПАРАЦИИ

Рассмотрим модель динамики процессов, протекающих в системе многоканального двухпозиционного регулирования температуры [9].

Введем понятие обобщенного нестационарного объекта управления (ОНОУ), под которым подразумевают зону нагрева, зону экзотермической реакции аппарата восстановления или зону нагрева аппарата сепарации. Реальный ОНОУ представлен нестационарным объектом с самовыравниванием, описываемым дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами:

$$T_0(t) \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_0(t) \{x[t - \tau(t)] - z(t)\}, \quad (1)$$

где $y(t)$ — выходная величина (температура) ОНОУ; $x(t)$ — входная величина (мощность нагрева или охлаждения) ОНОУ; $T_0(t)$, $K_0(t)$ и $\tau(t)$ — постоянная времени, коэффициент усиления и время запаздывания ОНОУ; $z(t)$ — неконтролируемое возмущающее воздействие, под которым подразумевают изменение тепловых потерь зоны нагрева, изменение тепла зоны экзотермической реакции аппарата восстановления, изменение тепла, потребляемого зоной нагрева аппарата сепарации на испарение из титановой губки магния и хлорида магния.

Управление процессами восстановления и вакуумной сепарации состоит в данном случае из ряда типовых нестационарных нелинейных (двухпозиционных) систем регулирования температуры. Каждая из таких систем регулирования состоит из ОНОУ, на вход которого воздействует неконтролируемое возмущение $z(t)$, и многоканального двухпозиционного регулятора (МДР) (рис. 1), функции которого выполняет машина централизованного контроля [7].

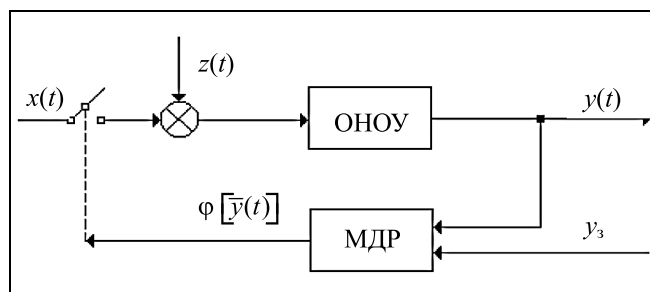


Рис. 1. Типовая структурная схема многоканального двухпозиционного регулирования температуры процесса восстановления (сепарации)



Включением и выключением входной величины $x(t)$ МДР поддерживает выходную величину $y(t)$ ОНОУ на заданном уровне y_3 в соответствии с алгоритмом:

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

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

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 подключении входной величины $x(t)$ на входе ОНОУ действует разность $x(t) - z(t)$, при ее отключении поведение ОНОУ определяется возмущающим воздействием $z(t)$. Система регулирования при этом работает в режиме автоколебаний, параметры которых используются для решения задачи идентификации ОНОУ и определения значений величин $T_0(t)$, $K_0(t)$, $\tau(t)$ и $z(t)$ в уравнении (1).

2. КАЧЕСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

В общем случае при разработке системы многоканального двухпозиционного регулирования качество ее работы оценивают по максимальной амплитуде отклонения выходной величины от заданного значения, которую определяют с помощью аналитических соотношений по предварительно заданным динамическим параметрам стационарного объекта управления. Это объясняется тем, что при регулировании технологических параметров в условиях производства недопустимо какое-либо отклонение их за пределы заданных технологических режимов [10].

В нашем случае практический интерес представляет максимально возможная амплитуда положительного отклонения температуры ОНОУ от заданного значения, характеризующая размер превышения регулируемой температурой заданного значения. Аналитическое выражение для ее оценки получено из уравнения (1) в предположении о квазистационарности ОНОУ на интервале иденти-

фикации (в течение периода автоколебаний температуры) [9]:

$$\Delta y_{(+)} = K_0 \cdot (x - z) \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_{off} + \tau_{d.off}}{T_0}\right) \right] + \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{off} + \tau_{d.off}}{T_0}\right), \quad (2)$$

где $\Delta y_{(+)}$ — амплитуда положительного отклонения температуры от заданного значения y_3 , τ_{off} — время запаздывания ОНОУ при отключении входной величины $x(t)$, $\tau_{d.off}$ — дополнительное время запаздывания МДР при ее отключении.

Как видно из выражения (2), при заданных x , Δy_0 величина $\Delta y_{(+)}$ зависит от динамических параметров, возмущения ОНОУ и времени дополнительного запаздывания МДР, которые изменяются в некоторых пределах в ходе процессов восстановления и вакуумной сепарации, а также значительно различаются в промышленных аппаратах периодического действия. Эти обстоятельства затрудняют однозначную оценку величины $\Delta y_{(+)}$, так как последняя является функцией указанных переменных [11]:

$$\Delta y_{(+)}(t) = K_0(t) [x - z(t)] \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_{off}(t) + \tau_{d.off}(t)}{T_0(t)}\right) \right] + \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{off}(t) + \tau_{d.off}(t)}{T_0(t)}\right). \quad (3)$$

3. ИНТЕРВАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Изложенное дает основание рассматривать ОНОУ как объект регулирования с интервально-неопределенными параметрами, а систему многоканального двухпозиционного регулирования температуры ОНОУ — как интервальную систему автоматического регулирования [12, 13].

Для исследования интервальной системы управления применяют робастный подход, предусматривающий анализ робастного качества для определения наихудших показателей качества системы при изменении интервальных параметров в заданном диапазоне, и разработку методов синтеза робастных регуляторов, обеспечивающих гарантированное по определенному критерию качество работы системы при любых значениях параметров объекта управления из известных интервалов. Качество работы системы обычно оценивают по размеру максимальной ошибки регулирования в наи-

более неблагоприятных условиях функционирования системы [14].

Для реализации робастного подхода требуется описание объекта в виде интервальной динамической модели, обеспечивающей синтез алгоритмов гарантированного управления. Предполагается, что неизвестные значения параметров объекта лежат внутри некоторого известного интервала [15].

В результате решения задачи идентификации получены интервальные значения динамических параметров ОНОУ [16]:

$$T_0^{\min} \leq T_0(t) \leq T_0^{\max}; \quad (4)$$

$$K_0^{\min} \leq K_0(t) \leq K_0^{\max}; \quad (5)$$

$$\tau^{\min} \leq \tau(t) \leq \tau^{\max}. \quad (6)$$

Определены наиболее неблагоприятные (наихудшие) сочетания значений динамических параметров ОНОУ из диапазона (4)–(6), при которых в системе имеет место наибольшая ошибка регулирования температуры.

Показано [17], что для промышленных нестационарных статических объектов первого порядка наихудшее сочетание соответствует значениям T_0^{\min} , K_0^{\max} и τ^{\max} .

Подстановкой указанных значений параметров в уравнение (1) получена интервальная модель динамики ОНОУ, позволяющая установить возможные границы изменения $\Delta y_{(+)}$. Запишем уравнение (1) в виде:

$$T_0^{\min} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_0^{\max} [x(t - \tau^{\max}) - z(t)]. \quad (7)$$

Оно описывает динамику в наихудшем (в смысле наибольшего значения положительного отклонения температуры) режиме работы ОНОУ объекта управления и служит основой для синтеза гарантированного управления его температурным режимом.

Аналогично можно записать уравнение, описывающее динамику ОНОУ для наилучшего (в смысле наименьшего значения положительного отклонения температуры) режима:

$$T_0^{\max} \frac{d[y(t)]}{dt} + y(t) = K_0^{\min} [x(t - \tau^{\min}) - z(t)]. \quad (8)$$

4. АНАЛИЗ РОБАСТНОГО КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Воспользуемся интервальной моделью для оценки наихудшего качества регулирования и опреде-

лим возможный диапазон изменения положительного отклонения температуры ОНОУ. При расчетах качества регулирования вносимое МДР дополнительное запаздывание принимаем равным максимальному — интервалу квантования по времени T [10].

В силу уравнений (7), (8) и соотношения (3), полагая $\tau_{d.off} = T$, запишем аналитические выражения для определения значений положительного отклонения температуры в наихудшем ($\Delta y_{(+)}^{\text{HX}}$) и наилучшем ($\Delta y_{(+)}^{\text{HL}}$) режимах функционирования ОНОУ:

$$\Delta y_{(+)}^{\text{HX}}(t) = K_0^{\max} [x - z(t)] \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{off}^{\max} + T}{T_0^{\min}}\right) \right) + \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{off}^{\max} + T}{T_0^{\min}}\right),$$

$$\Delta y_{(+)}^{\text{HL}}(t) = K_0^{\min} [x - z(t)] \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{off}^{\min} + T}{T_0^{\max}}\right) \right) + \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{off}^{\min} + T}{T_0^{\max}}\right).$$

Запишем эти выражения в виде:

$$\Delta y_{(+)}^{\text{HX}}(z) = K_0^{\max} (x - z) \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{off}^{\max} + T}{T_0^{\min}}\right) \right) + \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{off}^{\max} + T}{T_0^{\min}}\right), \quad (9)$$

$$\Delta y_{(+)}^{\text{HL}}(z) = K_0^{\min} (x - z) \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{off}^{\min} + T}{T_0^{\max}}\right) \right) + \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{off}^{\min} + T}{T_0^{\max}}\right). \quad (10)$$

Таким образом, отклонения температуры (9) и (10) зависят от возмущающего воздействия ОНОУ.

В качестве примера ОНОУ рассмотрим зону нагрева промышленного аппарата вакуумной сепарации. На рис. 2 приведены графики изменения $\Delta y_{(+)}^{\text{HX}}(z)$ и $\Delta y_{(+)}^{\text{HL}}(z)$, построенные по соотношениям (9), (10) для интервальных значений: $T_0^{\min} = 760$ с, $T_0^{\max} = 840$ с, $K_0^{\min} = 2,1$ °С/кВт, $K_0^{\max} = 2,5$ °С/кВт, $\tau^{\min} = 22$ с, $\tau^{\max} = 28$ с. Известны мощность нагревателя ($x = 130$ кВт), диапазон изменения возму-

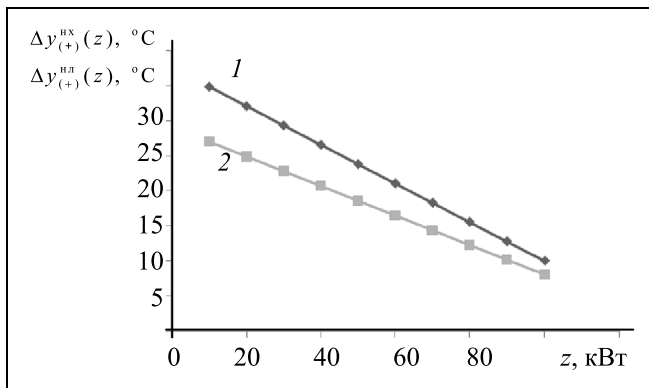


Рис. 2. Изменение положительного отклонения температуры ОНОУ в многоканальной двухпозиционной системе: 1 – $\Delta y_{(+)}^{hx}(z)$; 2 – $\Delta y_{(+)}^{hl}(z)$

шения ($z^{\min} = 10$ кВт, $z^{\max} = 100$ кВт), параметры МДР температуры: $\Delta y_0 = 2$ °С, $T = 60$ с.

Диапазоны изменения отклонений $\Delta y_{(+)}^{hx}(z)$, $\Delta y_{(+)}^{hl}(z)$ составляют соответственно 10,03—34,78 °С и 8,1—27,0 °С. Очевидно, что величина $\Delta y_{(+)}^{hx}(z)$ является гарантирующей оценкой максимально возможного диапазона изменения положительного отклонения температуры в том смысле, что при любом другом выборе динамических параметров диапазонов из (4)—(6) диапазон изменения отклонения температуры будет не больше, чем $\Delta y_{(+)}^{hx}(z)$. Таким образом, величина $\Delta y_{(+)}^{hx}(z)$ характеризует наихудшее функционирование объекта управления.

5. СИНТЕЗ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Во Введении отмечалось, что для интенсификации восстановления и вакуумной сепарации необходимо температурный режим процессов поддерживать на максимально допустимом уровне. Практическая реализация такого управления осложняется наличием в интервальной модели ОНОУ неопределенных динамических параметров и возмущения, значения которых изменяются по неизвестным законам внутри известных интервалов. Для решения этой проблемы предлагаются методы синтеза робастного управления температурным режимом, обеспечивающего гарантированное поддержание максимально допустимой температуры объекта управления при любых изменениях неопределенных параметров в пределах известных интервалов.

Такой подход основывается на концепции гарантируемого (минимаксного) управления, предполагающей достижение наилучшего результата при наихудших сочетаниях неопределенных факторов [14, 18]. Ее применение позволяет придать МДР робастные свойства для поддержания максимально допустимой температуры ОНОУ, которые обеспечиваются использованием значения величины $\Delta y_{(+)}^{hx}(z)$ в качестве гарантированного критерия оценки работы многоканальной двухпозиционной системы. Задача синтеза робастного управления заключается в данном случае в нахождении такого заданного значения температуры y_3 (см. рис. 1), которое гарантировало бы поддержание максимально допустимой температуры ОНОУ при наличии в интервальной модели неопределенных факторов. В такой постановке задачи заданное значение температуры y_3 рассматривается в качестве гарантирующего управления температурным режимом ОНОУ.

Как уже отмечалось во Введении, для решения этой задачи применен эволюционный подход к разработке и внедрению робастного управления температурным режимом процессов с учетом сложившейся практики создания систем автоматизации производства губчатого титана. Эффективность робастного управления оценивалась уровнем гарантирующего заданного значения температуры y_3 , который в значительной степени определялся возможностями применяемых для автоматизации технических и программных средств. Далее рассмотрены методы синтеза робастного управления, обеспечивающего интенсификацию процессов восстановления и вакуумной сепарации благодаря повышению гарантирующего заданного значения температуры y_3 на разных этапах автоматизации производства губчатого титана.

5.1. Гарантирующее управление температурой объекта в многоканальной двухпозиционной системе регулирования

Первые исследования робастного управления проведены в многоканальной двухпозиционной системе регулирования температуры ОНОУ, реализованной на основе машины централизованного контроля (см. § 1). На этом этапе автоматизации задача состояла в определении гарантирующего заданного значения температуры y_3 в условиях, когда возмущение $z(t)$ недоступно для измерения, известен диапазон изменения возмущения.

Для ведения в оптимальных режимах технологических процессов производства губчатого титана требуется предварительное определение макси-

мального заданного значения температуры ОНОУ, которое назначают в МДР перед началом технологических процессов и сохраняют неизменным в течение процессов. Запишем для этого случая условие поддержания максимально допустимой температуры y_d в виде $y_3 + \Delta y_{(+)}^{HX}(z) = y_d$ и определим заданное значение температуры [19]:

$$y_3 = y_d - \Delta y_{(+)}^{HX}(z). \quad (11)$$

Это значение определяется величиной $\Delta y_{(+)}^{HX}(z)$, которая, в свою очередь, зависит от возмущающего воздействия. При выборе заданного значения необходимо учитывать наибольшее значение $\Delta y_{(+)}^{HX}(z)$ в известном диапазоне изменения возмущения. В приведенном выше примере оно составляет $34,78^\circ\text{C}$ при $z^{\min} = 10$ кВт. В этом случае формулу (11) можно записать в виде

$$y_3 = y_d - \Delta y_{(+)}^{HX}(z^{\min}). \quad (12)$$

Выполнение соотношения (12) означает, что регулируемая температура не превысит установленного ограничения. Следовательно, рассчитанное по этому соотношению значение y_3 можно рассматривать в качестве гарантирующего управления температурным режимом. При $y_d = 1050^\circ\text{C}$ гарантирующее заданное значение составляет $1015,22^\circ\text{C}$.

5.2. Гарантирующее управление температурой объекта в системе с быстродействующим регулятором

Дальнейшее повышение заданного значения температуры ОНОУ достигнуто благодаря разработке методов управления, минимизирующих величину $\Delta y_{(+)}^{HX}(z)$. Критерий качества управления J представлен в работе [20]:

$$J = \max[\Delta y_{(+)}^{HX}(z)] \rightarrow \min. \quad (13)$$

Рассмотрим управление ОНОУ, удовлетворяющее требованию (13) и основанное на повышении быстродействия МДР температуры. Как и ранее, предполагается, что диапазон изменения возмущения известен.

В металлургическом цехе одновременно работают несколько десятков аппаратов восстановления и вакуумной сепарации. В каждом из них имеются три и более зон нагрева. В аппарате восстановления, кроме того, имеется зона экзотермической реакции. Каждый канал МДР обслуживает один ОНОУ. Величина $\Delta y_{(+)}^{HX}(z)$ в значительной степени зависит от интервала квантования по времени T ,

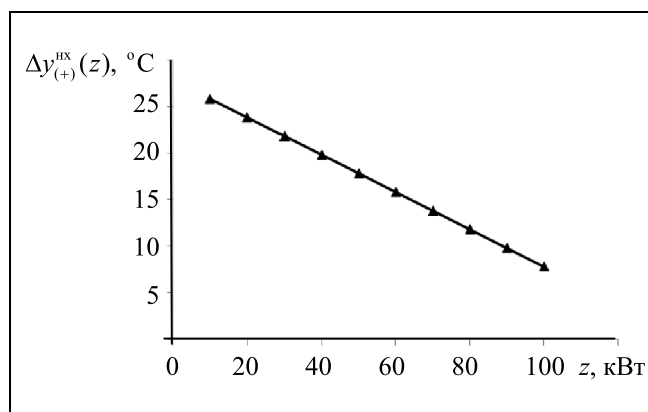


Рис. 3. Изменение амплитуды положительного отклонения температуры ОНОУ в многоканальной двухпозиционной системе с быстродействующим МДР

который, как видно из рассмотренного выше примера, более, чем в два раза превышает время запаздывания ОНОУ. Интервал квантования равен времени обегания коммутатором датчиков температуры ОНОУ.

Решение задачи повышения быстродействия основано на сокращении времени связи каналов с измерительной цепью МДР, которое задается коммутатором [21]. Для этого в процессе обегания датчиков для каждого ОНОУ анализируются результаты измерений температуры, полученные в текущем и предыдущем интервалах квантования. При совпадении результатов измерений коммутатор соответствующего канала переключается с сокращенным временем связи, в противном случае устанавливается фиксированное (заданное) время связи. Поэтому, интервал квантования будет переменным. Такие системы относятся к классу систем управления со случайным периодом квантования [22].

Для практической реализации быстродействующего МДР разработаны устройство обработки измерительной информации и управления переключением коммутатора, а также коммутатор, позволяющий изменять скорость переключения каналов [21, 23]. Это позволило сократить интервал квантования с 60 до 22...30 с [24].

Как и в предыдущем случае, определено гарантирующее управление температурным режимом ОНОУ с применением быстродействующего МДР. Для этого в выражение (9) вместо $T = 60$ с подставлено значение $\bar{T} = 30$ с. Величина $\Delta y_{(+)}^{HX}(z^{\min})$ в данном случае снижается до $25,84^\circ\text{C}$ (рис. 3). Соответственно повышается гарантирующее заданное значение температуры МДР, которое согласно формуле (12) составляет $1024,16^\circ\text{C}$.

5.3. Алгоритм изменения гарантирующего управления температурой объекта в системе с быстродействующим регулятором

Новые возможности совершенствования робастного управления температурным режимом ОНОУ связаны с применением управляющих вычислительных машин для измерения возмущений в системах автоматизации производства губчатого титана [8].

Подставим в формулу (11) значение $\Delta y_{(+)}^{\text{HX}}(z)$, определяемое формулой (9), и преобразуем полученное выражение к виду:

$$y_3 = M + Nz, \quad (14)$$

где M и N — постоянные коэффициенты:

$$M = y_d - K_0^{\text{max}} x \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{\text{off}}^{\text{max}} + \bar{T}}{T_0^{\text{min}}}\right) \right) - \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{\text{off}}^{\text{max}} + \bar{T}}{T_0^{\text{min}}}\right), \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$N = K_0^{\text{max}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{\text{off}}^{\text{max}} + \bar{T}}{T_0^{\text{min}}}\right) \right), \text{ } ^\circ\text{C}/\text{кВт}.$$

Из выражения (14) следует, что поддержание гарантирующего заданного значения температуры сводится к измерению возмущения и изменению заданного значения по результатам измерений. По сравнению с предыдущим случаем данный алгоритм позволяет поддерживать более высокое заданное значение температуры в диапазоне 1024,16—1042,16 °С (рис. 4).

В условиях промышленного производства губчатого титана возмущение измеряют прямым или косвенным методом [25, 26]. Один из возможных

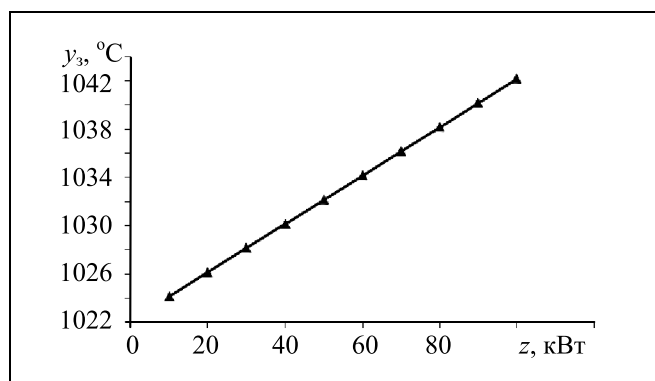


Рис. 4. Изменение гарантирующего заданного значения температуры ОНОУ в зависимости от возмущения

вариантов алгоритма изменения гарантирующего заданного значения температуры приведен в работе [27].

5.4. Алгоритм изменения гарантирующего управления температурой объекта в системе с корректирующим устройством

Алгоритм (14) усовершенствован введением коррекции двухпозиционного регулирования температуры, реализованной средствами микропроцессорной и компьютерной техники [2].

Известно, что один из методов снижения положительного отклонения температуры в системах двухпозиционного регулирования состоит в уменьшении кратности притока вводимой в объект регулирования энергии, под которой понимают отношение притока к оттоку энергии [28]. В нашем случае мощность нагревателя x остается постоянной в ходе процесса вакуумной сепарации, а возмущение $z(t)$ снижается. При этом кратность притока $m = x/z(t)$ возрастает с 1,3 до 13, и соответственно возрастает величина $\Delta y_{(+)}^{\text{HX}}(z^{\text{min}})$ до 25,84 °С. Поэтому для ее уменьшения целесообразно корректировать регулирование температуры ОНОУ, поддерживая постоянную кратность притока мощности нагревателя m , т. е.

$$m = x(t)/z(t) = \text{const}. \quad (15)$$

Корректирующее устройство по результатам измерений $z(t)$ снижает $x(t)$, поддерживая в ходе процесса сепарации заданное значение m .

С учетом условия (15) преобразуем выражение (9) к виду

$$\Delta y_{(+)}^{\text{HX}}(z) = K_0^{\text{max}} (m - 1) \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{\text{off}}^{\text{max}} + \bar{T}}{T_0^{\text{min}}}\right) \right) z(t) + \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{\text{off}}^{\text{max}} + \bar{T}}{T_0^{\text{min}}}\right). \quad (16)$$

На рис. 5 приведен построенный по соотношению (16) график изменения $\Delta y_{(+)}^{\text{HX}}(z)$ с коррекцией регулирования температуры при $m = 1,25$. Сравнивая максимальные значения $\Delta y_{(+)}^{\text{HX}}(z)$ без коррекции (25,84 °С) и с коррекцией (6,82 °С), отметим, что коррекция регулирования позволяет снизить положительное отклонение температуры ОНОУ более чем в 3 раза. Принципы построения корректирующего устройства рассмотрены в работе [29].

Для практической реализации алгоритма в качестве МДР применен быстродействующий микропроцессорный контроллер [9], для которого в соотношении (16) можно принять $\bar{T} = 0$.

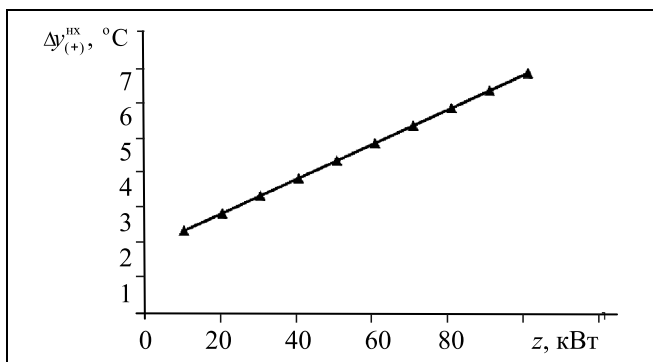


Рис. 5. Изменение амплитуды положительного отклонения температуры ОНОУ в многоканальной двухпозиционной системе с корректирующим устройством

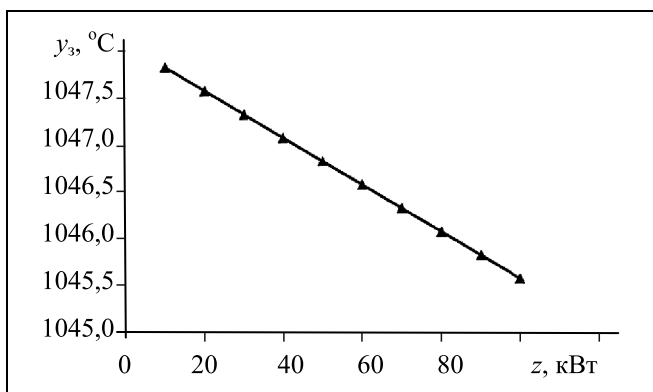


Рис. 6. Изменение гарантирующего заданного значения температуры ОНОУ в многоканальной двухпозиционной системе с корректирующим устройством

Подставляя значение $\Delta y_{(+)}^{HX}(z)$ из соотношения (16) в формулу (11), после преобразований получим:

$$y_3 = M' - N'z, \quad (17)$$

где M' и N' — постоянные коэффициенты:

$$M' = y_d - \Delta y_0 \exp\left(-\frac{\tau_{off}^{max}}{T_0^{min}}\right), \quad ^\circ\text{C};$$

$$N' = K_0^{max}(m-1) \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{off}^{max}}{T_0^{min}}\right)\right), \quad ^\circ\text{C}/\text{кВт}.$$

Как видно из построенного по соотношению (17) графика (рис. 6), данный алгоритм позволяет поддерживать гарантирующее заданное значение температуры в диапазоне 1045,58—1047,83 °С, превышающем температурный диапазон, полученный с помощью алгоритма (14).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методы синтеза робастного управления нашли практическое применение на разных этапах автоматизации производства губчатого титана и позволили в конечном итоге на 5...8 % повысить температуру процессов восстановления и вакуумной сепарации. Это дало возможность интенсифицировать процессы и улучшить технико-экономические показатели производства [2, 30]: длительность процессов восстановления и вакуумной сепарации сократилась на 5...10 %, улучшилось качество и однородность по химическому составу губчатого титана, твердость партий кричного титана, сформированных из блоков губчатого титана, снизилась с 3,6 до 2,7 ед. НВ, снизились энергозатраты при получении тонны губчатого титана на 400...500 кВт·ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов А.В. *Металлургия титана*. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. — 328 с.
2. Кирич 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. Кук М., Уортман Ф. Очистка титановой губки методом вакуумной сепарации / В сб.: *Титан*. — М.: Иностранная литература, 1954. — Вып. 3. — С. 69—82.
4. Кушкин Б.Н. Исследование процесса очистки магнетермической титановой губки методом вакуумной сепарации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Свердловск: УПИ, 1966. — 19 с.
5. Петров В.И., Соколов И.И., Мальшин В.М. Разработка технологии и аппаратов повышенной производительности для получения титановой губки // *Сб. трудов ВАМИ*. — 1963. — № 50. — С. 157—166.
6. *Разработка стандартного процесса получения титановой губки* / В.И. Петров, Р.Г. Локшин, В.М. Мальшин и др. // *Журнал прикладной химии*. — 1965. — Т. 38, вып. 6. — С. 1217—1224.
7. Лидерман В.И., Кирич Ю.П. Опыт внедрения и эксплуатации автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами в производстве титана // *Цветная металлургия*. — 1976. — № 17. — С. 56—58.
8. *Автоматизированная система управления процессом производства губчатого титана «Титан»* / В.Ф. Скорик, В.Б. Бирюков, Н.В. Дегтярик и др. // *Цветная металлургия*. — 1984. — № 1. — С. 41—45.
9. Кирич Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф., Краев С.Л. Идентификация технологических процессов производства губчатого титана // *Проблемы управления*. — 2008. — № 4. — С. 71—77.
10. Черепанов А.И. *Динамика систем многоканального позиционного регулирования*. — М.: Энергия, 1970. — 80 с.
11. Кирич Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф. и др. Идентификация математических моделей нестационарных объектов управления // *Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. 14-й Междунар. науч. конф. ММТТ-14* — Смоленск, 2001. — Т. 2. — С. 92—94.
12. Неймарк Ю.И. *Робастная устойчивость линейных систем* // *Доклады АН СССР*. — 1991. — Т. 319, № 3. — С. 578—580.



13. Гусев Ю.М., Ефанов В.Н., Крымский В.Г. Анализ и синтез линейных интервальных динамических систем (состояние проблемы) // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. — 1991. — № 1. — С. 3—23.
14. Небылов А.В. Гарантирование точности управления. — М.: Наука, 1998. — 304 с.
15. 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> (дата обращения 20.09.2016).
16. Кирин Ю.П. Импульсное позиционное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами // Новый университет. — 2011. — № 2. — С. 18—22.
17. Автоматический контроль и регулирование в черной металлургии: Справочник / М.Д. Климовицкий, А.П. Копелович. — М.: Металлургия, 1967. — 467 с.
18. Афанасьев В.Н. Концепция гарантированного управления неопределенными объектами // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2010. — № 1. — С. 16—23.
19. Кирин Ю.П., Кирьянов В.В. Оптимальное управление температурой вакуумной сепарации губчатого титана // Научно-технический вестник Поволжья. — 2014. — № 5. — С. 217—222.
20. 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: Сб. тр. 15-й Междунар. науч. конф. ММТТ-15. — Тамбов, 2002. — Т. 9. — С. 210—214.
21. А. с. 746436 СССР. Устройство для контроля и регулирования параметров / Ю.П. Кирин // Бюл. — 1980. — № 25. — С. 91.
22. Артемьев В.М., Ивановский А.В. Дискретные системы управления со случайным периодом квантования. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 96 с.
23. Кирин Ю.П. Бесконтактный коммутатор для машин централизованного контроля // Цветная металлургия. — 1977. — № 14. — С. 44—47.
24. Кирин Ю.П., Беккер В.Ф., Затонский А.В. Совместное проектирование технологии и системы управления вакуумной сепарацией губчатого титана. — Пермь: ПГТУ, 2008. — 124 с.
25. Система автоматического управления процессом сепарации губчатого титана / Ю.А. Захаров, В.Г. Поплавко, С.В. Огурцов и др. // Цветная металлургия. — 1978. — № 7. — С. 57—59.
26. Кирин Ю.П., Черепанов А.И., Протасов Ю.А. и др. Минимизация длительности процессов сепарации титана в АСУТП // Цветные металлы. — 1983. — № 1. — С. 51—54.
27. А. с. 790816 СССР. Способ регулирования процесса сепарации титана / Ю.П. Кирин, Б.А. Оверин, А.И. Гулякин и др. // Бюл. — 2000. — № 4. — С. 121.
28. Камне-Нем А.А. Автоматическое двухпозиционное регулирование. — М.: Наука, 1967. — 160 с.
29. Пат. 1797288 РФ. Способ управления аппаратом вакуумной сепарации губчатого титана / Ю.П. Кирин, Ю.А. Протасов, Н.А. Носков и др. // Бюл. — 1996. — № 27. — С. 145.
30. Кирин Ю.П., Беккер В.Ф., Затонский А.В. Некоторые результаты совершенствования процесса получения губчатого титана // Цветные металлы. — 2009. — № 12. — С. 91—94.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Красновой.

Кирин Юрий Петрович — канд. техн. наук, доцент,
✉ klu2010@mail.ru,

Кирьянов Василий Викторович — ведущий электроник,
✉ kvas@bf.pstu.ru,

Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета.



Содержание сборника «Управление большими системами», 2016, вып. 63

Барабанов И.Н., Новиков Д.А. Динамические модели управления возбуждением толпы в непрерывном времени

Белявский А.О., Томашевич С.И. Синтез адаптивной системы управления квадрокоптером методом пассификации

Горелов М.А. Иерархические игры со случайными факторами

Железнов К.О. Решение задачи анализа с возмущением во входе и выходе

Лазарев А.А., Бронников С.В., Герасимов А.Р. и др. Математическое моделирование планирования подготовки космонавтов

Рогаткин А.Д. Оценка вероятности редких событий в поведении толпы

Скороходов В.А. Задача нахождения порогового значения в эргодической ресурсной сети

Тихонов А.В. Анализ структуры сети Интернет с помощью обобщенных маршрутов

Тексты статей в свободном доступе на сайте <http://ubs.mtas.ru/>