

Управление технологическими процессами производства губчатого титана в условиях неопределенности

Ю. П. Кирин, В. В. Кирьянов

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Березниковский филиал*

Аннотация: В статье предложены подходы к разработке адаптивной и робастной систем, предназначенных для повышения качества управления температурным режимом процессов восстановления и вакуумной сепарации губчатого титана в условиях неопределенности. Рассмотрены принципы построения систем управления. Показано, что при практически одинаковом с адаптивной системой качестве управления робастная система имеет более простую структуру. Изложен метод определения робастных настроек ПИ- регулятора температурного режима процессов.

Ключевые слова: губчатый титан, восстановление и вакуумная сепарация, условия неопределенности, модель динамики, адаптивное и робастное управление.

Введение

Основными технологическими процессами промышленного производства губчатого титана являются восстановление тетраоксида титана магнием и последующая вакуумная сепарация реакционной массы. Процессы проводят в аппаратах периодического действия. После окончания процесса восстановления получают реакционную массу, представляющую собой титановую губку, в порах которой содержатся примеси магния и хлорида магния. В процессе вакуумной сепарации реакционную массу нагревают в герметичном аппарате, в котором создают вакуум. При этом возрастает давление паров примесей, которые испаряются из реакционной массы, а затем отгоняются в конденсатор. Рабочий объем каждого аппарата восстановления разделяют на несколько зон нагрева и зону экзотермической реакции, рабочий объем каждого аппарата вакуумной сепарации – на три и более зон нагрева [1].

Первоочередными задачами действующего производства являются повышение качества губчатого титана и производительности технологических процессов. Эти задачи реализуют в аппаратах периодического действия путем улучшения качества управления

температурным режимом процессов восстановления и вакуумной сепарации. Объектами управления являются зоны нагрева и зоны экзотермической реакции аппаратов восстановления, зоны нагрева аппаратов вакуумной сепарации. Особенность таких объектов состоит в том, что исполнительными механизмами служат электромеханические контакторы или магнитные пускатели с двумя рабочими положениям (включено - отключено), т.е. используется двухпозиционное управление температурным режимом технологических процессов.

Для решения названных задач к системам двухпозиционного управления предъявляют требования стабильности и интенсификации температурного режима процессов восстановления и вакуумной сепарации. Двухпозиционные регуляторы должны с высокой точностью поддерживать заданную температуру для обеспечения стабильности технологических процессов. Кроме того, улучшение качества двухпозиционного управления должно обеспечивать интенсификацию и сокращение продолжительности процессов за счет повышения в допустимых пределах их рабочей температуры [2].

Обзор ранее выполненных работ показал, что повышению качества двухпозиционного управления температурным режимом процессов уделялось недостаточное внимание. Рабочие режимы двухпозиционного регулирования температуры – сложные асимметричные автоколебания, для которых характерно наличие остаточной неравномерности. На практике это приводит к возникновению ошибки регулирования, величина и знак которой изменяются в ходе технологических процессов. Максимальные величины амплитуд отклонений температуры от заданных значений достигали $\pm 27^{\circ}\text{C}$. При этом не удавалось обеспечить высокую точность повторения технологических режимов процессов восстановления и сепарации. Из-за низкого качества регулирования заданные значения двухпозиционным

регуляторам температуры назначались значительно ниже допустимых пределов. Эти обстоятельства снижали качество губчатого титана и производительность процессов восстановления и вакуумной сепарации. В сложившейся ситуации предложено использовать совершенствование систем управления температурным режимом процессов как одно из направлений повышения технико - экономических показателей производства губчатого титана [3].

Решение указанных вопросов встречает значительные трудности, связанные с тем, что управление температурным режимом процессов восстановления и вакуумной сепарации осуществляется в условиях неопределенности, под которыми понимают [4]:

- структурную и параметрическую неопределенность математических моделей динамики объектов управления;
- отсутствие информации о характеристиках, действующих на объекты возмущений.

Существующие традиционные методы анализа и синтеза систем двухпозиционного регулирования разработаны для стационарных объектов управления и неприемлемы для решения задач повышения качества управления в условиях неопределенности [5].

Проблема повышения качества управления технологическими процессами в условиях неопределенности остается основной проблемой современной теории и практики управления. Для ее решения разработаны и успешно применяются в различных отраслях промышленности адаптивные и робастные системы управления [6].

В нашей работе используются аналогичные подходы, предусматривающие два основных этапа:

- построение и идентификацию моделей динамики процессов производства губчатого титана в условиях неопределенности [7];
-

- синтез с применением моделей адаптивной и робастной систем управления температурным режимом процессов [8,9].

Структурная схема системы двухпозиционного регулирования температуры процессов производства губчатого титана

Построение и идентификация моделей динамики процессов восстановления и вакуумной сепарации выполнены в замкнутом контуре двухпозиционного регулирования температуры [7,8].

Введено понятие обобщенного нестационарного объекта управления (ОНОУ), под которым понимают названные выше зоны нагрева и зоны экзотермической реакции аппаратов производства губчатого титана. Проведена декомпозиция системы управления технологическими процессами, в результате которой управление разделено на типовые нестационарные двухпозиционные системы регулирования температуры, каждая из которых состоит (рис. 1) из ОНОУ и многоканального двухпозиционного регулятора (МДР). На входе ОНОУ действует неконтролируемое возмущение $z(t)$ – изменение тепловых потерь зоны нагрева, изменение тепла зоны экзотермической реакции аппарата восстановления или изменение тепла, потребляемого зоной нагрева аппарата сепарации на испарение магния и хлорида магния.

МДР включением и отключением входной величины $x(t)$ поддерживает заданное значение y_3 выходной величины $y(t)$ ОНОУ в соответствии с алгоритмом:

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

где $\varphi[y(t)]$ – выходная величина МДР; $2\Delta y_0$ – зона нечувствительности МДР; $y'(t)$ – скорость изменения выходной величины; $x(t)$ – мощность нагрева зоны или мощность охлаждения зоны экзотермической реакции; $y(t)$ – температура ОНОУ.

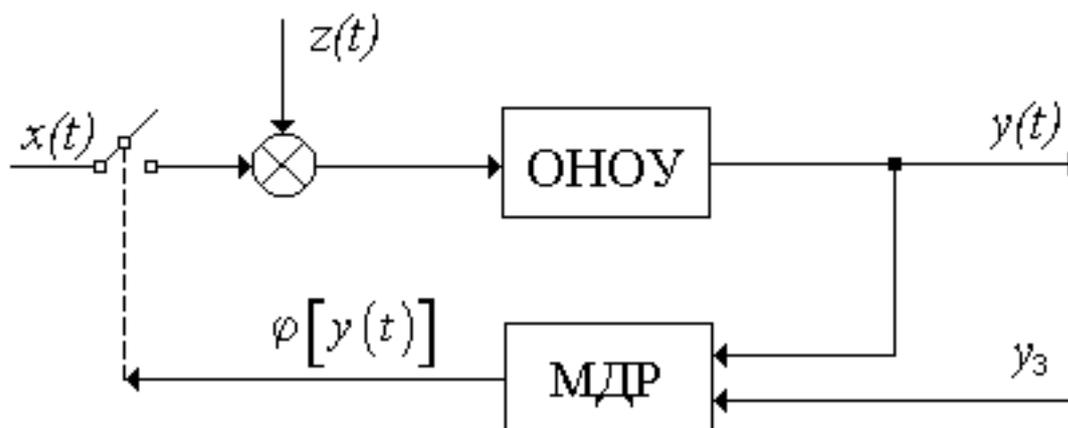


Рис.1.- Структурная схема двухпозиционного регулирования температуры технологических процессов производства губчатого титана

Двухпозиционное регулирование температуры осуществляется следующим образом: в позиции «включено» на входе ОНОУ действует разность $x(t) - z(t)$, в позиции «отключено» - возмущение $z(t)$. Двухпозиционная система при этом работает в автоколебательном режиме.

Структура модели динамики ОНОУ

Для синтеза систем управления температурным режимом процессов в условиях неопределенности модель динамики ОНОУ представлена дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами:

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

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

Таким образом, предполагаем, что уравнением (1) априорно задана структура модели динамики, в которой неизвестными величинами являются динамические параметры и возмущение ОНОУ.

Описание автоколебаний в двухпозиционной системе регулирования температуры ОНОУ

Параметрическая идентификация ОНОУ заключается в определении названных неизвестных величин. Для решения задачи параметрической идентификации автоколебания температуры описаны системой конечных уравнений в предположении, что на интервале идентификации (в течение периода автоколебаний) динамические параметры и возмущение ОНОУ являются постоянными величинами ($T_0(t) = const$, $K_0(t) = const$, $z(t) = const$, $\tau(t) = const$):

$$\Delta y_{(+)} = K_0 \cdot (x - z) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T_0}\right) \right] + \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{T_0}\right); \quad (2)$$

$$\Delta y_{(-)} = K_0 \cdot z \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T_0}\right) \right] + \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{T_0}\right); \quad (3)$$

$$T_{on} = \tau + T_0 \cdot \ln \frac{K_0 \cdot x - (K_0 \cdot z - \Delta y_0) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{T_0}\right)}{K_0 \cdot (x - z) - \Delta y_0}; \quad (4)$$

$$T_{off} = \tau + T_0 \cdot \ln \frac{K_0 \cdot x - [K_0 \cdot (x - z) - \Delta y_0] \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{T_0}\right)}{K_0 \cdot z - \Delta y_0}, \quad (5)$$

где $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$ – соответственно амплитуды положительного и отрицательного отклонений $y(t)$ от y_3 ; T_{on} , T_{off} , – время включения и выключения $x(t)$.

Заметим, что x и Δy_0 известные величины. Полагаем, что на интервале идентификации значения $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$, T_{on} , T_{off} могут быть измерены.

В этом случае решение задачи идентификации состоит в определении из системы уравнений (2)-(5) неизвестных коэффициентов T_0 , K_0 , z , τ уравнения (1).

Структурная схема системы идентификации ОНОУ

Для решения задачи параметрической идентификации ОНОУ структурная схема (см. рис. 1) содержит устройство измерения параметров автоколебаний (УИПА) и оценивающее устройство – идентификатор (ИД) (рис. 2), в который заложен алгоритм идентификации, реализованный применением метода Ньютона для численного решения системы уравнений (2)- (5).

УИПА в процессе двухпозиционного регулирования температуры ОНОУ измеряет значения параметров автоколебаний T_{on} , T_{off} , $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$, которые используются в ИД для определения неизвестных T_0 , K_0 , z , τ с помощью алгоритма идентификации.

Такой подход дает возможность автоматизировать процесс идентификации и позволяет непосредственно в рабочем режиме двухпозиционного регулирования температуры оценивать динамические параметры и возмущения ОНОУ.

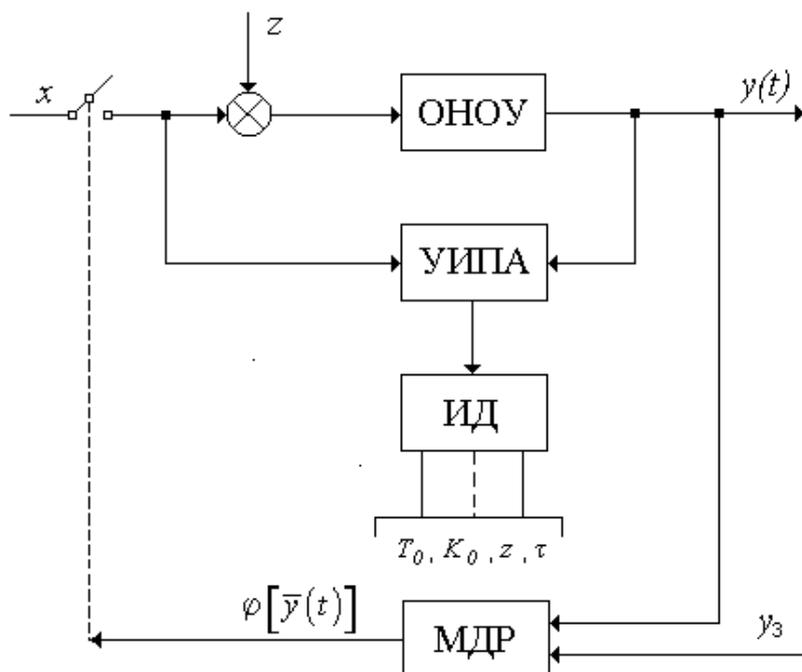


Рис.2. – Структура системы идентификации ОНОУ

Во введении статьи отмечалось, что для выполнения требований стабильности и интенсификации процессов восстановления и вакуумной сепарации необходимо, чтобы МДР с высокой точностью поддерживал заданное значение температуры ОНОУ.

Однако непредвиденные изменения $T_0(t)$, $K_0(t)$, $z(t)$, $\tau(t)$ приводят к возникновению на выходе ОНОУ автоколебаний температуры недопустимо большой амплитуды.

Принципы построения адаптивной системы управления ОНОУ

Для повышения качества двухпозиционного регулирования температуры разработана адаптивная система управления ОНОУ [8] (рис.3).

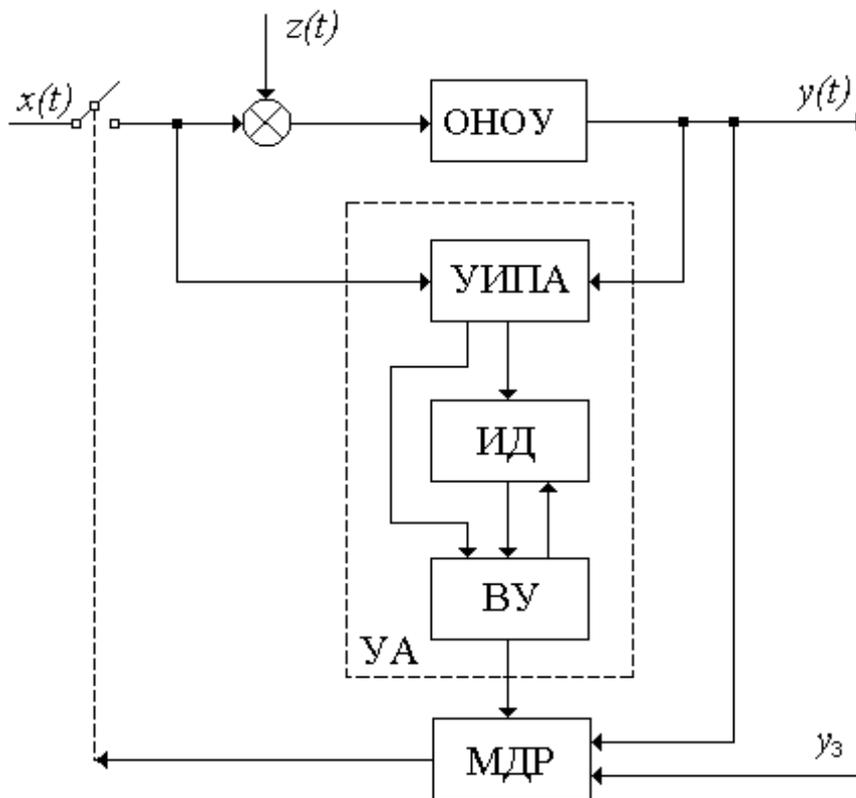


Рис. 3.- Структурная схема адаптивной системы управления ОНОУ

К контуру двухпозиционного регулирования температуры, образованному МДР и ОНОУ, подключено устройство адаптации (УА), содержащее УИПА, ИД и вычислительное устройство (ВУ). Назначение ВУ – коррекция двухпозиционного регулирования температуры по результатам идентификации ОНОУ.

Для этого в ВУ предварительно задают желаемые значения амплитуд положительного ($\Delta y_{(+)}^{жс}$) и отрицательного ($\Delta y_{(-)}^{жс}$) отклонений температуры от

y_3 и соответствующие погрешности $\Delta_{(+)}$, $\Delta_{(-)}$ их воспроизведения:

$$\left| \Delta y_{(+)} - \Delta y_{(+)}^{жс} \right| \leq \Delta_{(+)}; \quad (6)$$

$$\left| \Delta y_{(-)} - \Delta y_{(-)}^{жс} \right| \leq \Delta_{(-)}. \quad (7)$$

Параметры автоколебаний T_{on} , T_{off} , $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$ измеряются УИПА. Результаты измерений поступают в блок ИД. Значения $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$ поступают также в ВУ для проверки выполнения условий (6)-(7). Если они выполняются, то работа МДР не корректируется. Если одно из условий не выполняется, то по сигналам ВУ в блоке ИД определяются неизвестные T_0 , K_0 , z , τ . Затем ВУ, используя результаты идентификации, рассчитывает и реализует в МДР необходимые корректирующие воздействия для выполнения условий (6)-(7).

Таким образом, в процессе адаптации последовательно выполняются процедура идентификации ОНОУ и последующий расчет и реализация в МДР оптимальных корректирующих воздействий.

Имитационное моделирование, проведенное с применением программных средств *Matlab*, показало, что адаптивная система управления поддерживает заданную температуры ОНОУ с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$, что отвечает сформулированным выше требованиям стабильности и интенсификации технологических процессов [10].

Вместе с тем практическая реализация адаптивной системы управления достаточно сложна, так как для ее функционирования необходимо измерять параметры автоколебаний температуры, идентифицировать динамику и возмущения ОНОУ, рассчитывать оптимальные настройки и корректировать работу двухпозиционного регулятора. Это снижает надежность работы системы и увеличивает затраты на ее разработку и эксплуатацию.

Робастный подход к управлению температурным режимом ОНОУ

Альтернативным адаптивному управлению является робастное управление. Робастное управление отличается простотой исполнения,

поскольку реализуется линейным регулятором, имеющим постоянные настроечные параметры [11].

Для синтеза робастного управления требуется построение интервальной модели объекта и оценка ее адекватности. При описании объекта управления в виде интервальной динамической модели предполагается, что неизвестные значения его динамических параметров лежат внутри некоторого известного интервала [12].

Для этого необходимо в процессе эксплуатации ОНОУ учитывать возможные диапазоны изменения его динамических параметров и возмущений, т.е значений коэффициентов $T_0(t)$, $K_0(t)$, $\tau(t)$, $z(t)$ уравнения (1). Реальный ОНОУ в данном случае следует рассматривать как объект управления с интервально-неопределенными параметрами, а систему двухпозиционного регулирования температуры - как интервальную систему автоматического регулирования [13,14].

В результате решения задачи идентификации получена адекватная реальному ОНОУ модель динамики и определены интервальные значения его динамических параметров и возмущения [15]:

$$T_0^{\min} \leq T_0(t) \leq T_0^{\max}; \quad (8)$$

$$K_0^{\min} \leq K_0(t) \leq K_0^{\max}; \quad (9)$$

$$\tau^{\min} \leq \tau(t) \leq \tau^{\max}; \quad (10)$$

$$z^{\min} \leq z(t) \leq z^{\max}. \quad (11)$$

Метод определения робастных настроек ПИ-регулятора температуры ОНОУ

В общем случае робастный подход предусматривает анализ робастного качества для определения наихудших показателей качества функционирования системы регулирования при изменении интервальных

параметров в заданных пределах и разработку методов синтеза робастных регуляторов, обеспечивающих гарантированное по определенному критерию качество работы системы при любых изменениях значений параметров объекта из заданных интервалов [16,17]. Качество работы системы обычно оценивают по величине максимальной ошибке регулирования в наиболее неблагоприятных условиях функционирования системы [18].

В практике автоматизации технологических процессов для робастного управления широко используют типовые линейные регуляторы: пропорционально-интегральный (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регуляторы. Задача параметрического синтеза регуляторов состоит в нахождении таких настроек регуляторов, которые обеспечивают гарантированные показатели качества переходных процессов в системе управления интервально – неопределенным объектом. При этом актуальна разработка процедур определения настроек ПИ- и ПИД-регуляторов, которые придают системе регулирования свойство робастной апериодичности. Это свойство заключается в обеспечении апериодических переходных процессов для уменьшения в системе колебательности и перерегулирования при любых значениях интервально-неопределенных параметров объекта [19,20].

Рассмотрим метод определения робастных настроек ПИ- регулятора, обеспечивающий апериодический характер и гарантированное качество переходных процессов в системе управления температурой ОНОУ при изменении его динамических параметров в диапазоне (8)-(10). Определим наиболее неблагоприятные (наихудшие) сочетания значений динамических параметров ОНОУ из указанного диапазона, при которых в системе регулирования имеет место наибольшая ошибка регулирования температуры [9].

В работе [21] показано, что для промышленных нестационарных статических объектов первого порядка такими сочетаниями динамических параметров являются:

- минимальная величина постоянной времени (T_0^{\min});
- максимальная величина коэффициента усиления (K_0^{\max});
- максимальная величина времени запаздывания (τ^{\max}).

Подставим в уравнение (1) значения динамических параметров из (8)-(10) и запишем его в следующем виде:

$$T_0^{\min} \cdot \frac{d[y(t)]}{dt} + y(t) = K_0^{\max} \cdot [x(t - \tau^{\max}) - z(t)]. \quad (12)$$

Данное уравнение описывает динамику в наихудшем (с точки зрения наибольшей ошибки регулирования температуры) режиме функционирования ОНОУ и используется для определения робастных настроек ПИ-регулятора.

Настройки ПИ-регулятора - коэффициент передачи K_p , время издромы T_u для условия аperiodичности переходного процесса в системе регулирования со статическим объектом первого порядка рассчитывают по известным формулам [21]:

$$K_p = 0,6 / (K_0 \cdot \theta); \quad (13)$$

$$T_u = 0,6 \cdot T_0, \quad (14)$$

где $\theta = \tau / T_0$.

Можно получить робастные настройки ПИ-регулятора $K_p^{роб}$ и $T_u^{роб}$, обеспечивающие в условиях действия возмущения $z(t)$ аperiodические переходные процессы и гарантированное качество регулирования

температуры при вариациях (8)-(10) динамических параметров ОНОУ. Для этого подставим в (13), (14) вместо T_0 , K_0 , τ значения T_0^{\min} , K_0^{\max} , τ^{\max} из уравнения (12), соответствующие наихудшему режиму функционирования ОНОУ, т.е.

$$K_p^{роб} = 0,6 / (K_0^{\max} \cdot \theta^{\max}); \quad (15)$$

$$T_u^{роб} = 0,6 \cdot T_0^{\min}, \quad (16)$$

где $\theta^{\max} = \tau^{\max} / T_0^{\min}$.

Структура робастной системы управления температурой ОНОУ

Структура робастной системы построена с учетом двухпозиционного принципа управления температурным режимом ОНОУ [9] (рис.4).

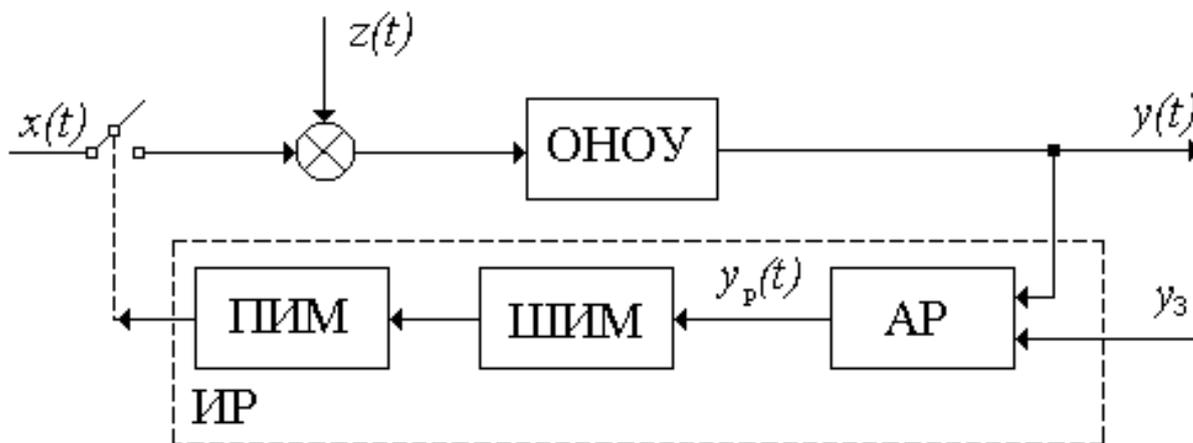


Рис.4.- Структурная схема робастной системы управления ОНОУ

Для поддержания заданного значения y_3 выходной величины $y(t)$ ОНОУ используется импульсный регулятор (ИР), в состав которого входят аналоговый регулятор (АР), широтно-импульсный модулятор (ШИМ), позиционный исполнительного механизма (ПИМ) – электромеханический контактор. В качестве АР используется ПИ- или ПИД- регулятор. В нашем

случае используется ПИ-регулятор с робастными настройками (15) и (16), преобразующий в соответствии с ПИ- алгоритмом ошибку регулирования $\varepsilon(t) = y_3 - y(t)$ в выходную величину регулятора $y_p(t)$. ШИМ преобразует $y_p(t)$ в последовательность импульсов с постоянным периодом повторения, длительность которых меняется пропорционально $y_p(t)$. Сигналы с выхода ШИМ воздействуют на ПИМ, который изменяет в соответствии с полученными сигналами скважность включения входной величины $x(t)$ пропорционально $y_p(t)$, обеспечивая поддержание заданного значения выходной величины ОНОУ.

Настроечный параметр ШИМ – период повторения импульсов T^{omn} . Величина T^{omn} определена экспериментально с таким расчетом, чтобы при включении и выключении ПИМ в пределах T^{omn} не наблюдалось колебаний температуры ОНОУ. При этом период T^{omn} обеспечивает допустимую частоту срабатываний ПИМ.

Заключение

Для одного из типов промышленных аппаратов производства губчатого титана получены следующие интервальные значения динамических параметров и возмущения ОНОУ: $T_0^{\min}=760\text{с}$, $T_0^{\max}=840\text{с}$, $K_0^{\min}=2,1^\circ\text{C/кВт}$, $K_0^{\max}=2,5^\circ\text{C/кВт}$, $\tau^{\min}=22\text{с}$, $\tau^{\max}=28\text{с}$, $z^{\min}=10\text{ кВт}$, $z^{\max}=100\text{ кВт}$. Указанные интервальные значения использованы для синтеза робастной системы управления, обеспечивающей в условиях действия возмущения $z(t)$ апериодические переходные процессы и гарантированное качество регулирования температуры с ошибкой, не превышающей $\pm 2^\circ\text{C}$ для всех значений динамических параметров ОНОУ из диапазона (8)-(10). Это дало

возможность улучшить качество губчатого титана и повысить производительность процессов восстановления и вакуумной сепарации [2,3].

Литература

1. Тарасов А.В. *Металлургия титана*. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 328 с.
2. Кирин Ю.П., Беккер В. Ф., Затонский А. В. Некоторые результаты совершенствования процесса получения губчатого титана // *Цветные металлы*. 2009. №12. С.91.- 94.
3. Кирин 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.
4. Кирин Ю. П. Позиционное управление технологическими процессами в условиях неопределенности // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2009. №2. С.158 – 160.
5. Кирин Ю.П., Затонский А В., Беккер В. Ф., Бильфельд Н. В. Синтез и анализ оптимального позиционного управления технологическими процессами производства губчатого титана // *Автоматизация и современные технологии*. 2010. №9. С.18- 21.
6. Целигоров Н.А., Целигорова Е. Н., Мафура Г. В. Математические методы неопределённостей систем управления и методы, используемые для их исследования // *Инженерный вестник Дона*, 2012, №4 (2 часть). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340/.
7. Кирин Ю.П., Затонский А. В., БеккерВ.Ф., Краев С. Л. Идентификация технологических процессов производства губчатого титана // *Проблемы управления*. 2008. № 4. С. 71-77.
8. Кирин Ю. П., Затонский А.В., Беккер В. Ф. Построение адаптивной системы управления технологическими процессами в

производстве губчатого титана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. №2. С. 1 – 7.

9. Кирин Ю. П., Кирьянов В. В. Робастное управление технологическими процессами производства губчатого титана // Научно – технический вестник Поволжья. 2016. №2. С. 120 – 123.

10. Затонский А.В., Кирин Ю.П., Беккер В.Ф. Позиционное управление в сложных системах. Березники: БФ ПГТУ, 2008. 150с.

11. Цыкунов А. М. Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу. М.: Физматлит, 2009. 268с.

12. Целигоров Н. А., Мафура Г. В. Причины возникновения интервальных значений в математических моделях исследования робастной устойчивости систем управления // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (1 часть). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340/.

13. Ackermann J. Parameter space design of robust control systems. // IEEE Trans. On Autom. Control. 1980. Vol. 25. №6. pp.1058-1072.

14. Суходоев М. С. Корневой анализ и синтез систем с интервальными параметрами на основе вершинных характеристик полиномов: дис... канд. техн. наук: 05.13.01. Томск, 2008. 131 с.

15. Кирин Ю. П., Кирьянов В. В. Построение интервальной модели динамики процессов производства губчатого титана // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. №2. С.7–10.

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

17. Пушкарев М. И. Анализ и синтез систем управления технологическими объектами с интервальными параметрами на основе корневых показателей качества: дис... канд. техн. наук: 05.13.06. Томск, 2014. 155 с.

18. Небылов А. В. Гарантирование точности управления. М.: Наука, 1998. 304с.
19. Поляк Б. Т., Цыпкин Я. З. Частотные критерии робастной устойчивости и апериодичности линейных систем // Автоматика и телемеханика. 1990. №9. С.45-54.
20. Гайворонский С. А., Суходоев М. С. Определение настроек линейных регуляторов, обеспечивающих апериодические переходные процессы в системах с интервально- определенными параметрами // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т.316. №5. С.12-15.
21. Автоматический контроль и регулирование в черной металлургии: Справочник / М. Д. Климовицкий, А. П. Копелович. М.: Металлургия, 1967. 467с.

References

1. Tarasov A.V. Metallurgiya titana [Metallurgy of the titanium]. М.: ИКТs «Akademkniga», 2003. 328 p.
 2. Kirin Yu.P., Bekker V.F., Zatonskiy A.V. Tsvetnye metally. 2009. №12. pp.91-94.
 3. Kirin Yu.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F., Bil'fel'd N.V. Titan. 2003. № 2(13). pp.11–16.
 4. Kirin Yu.P. Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2009. №2. pp.158–160.
 5. Kirin Yu.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F., Bil'fel'd N.V. Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii. 2010. №9. pp.18-21.
 6. Tseligorov N.A., Tseligorova E.N., Mafura G.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 (2 chast'). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340/.
-



7. Kirin Yu.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F., Kraev S.L. Problemy upravleniya. 2008. № 4. pp.71-77.
8. Kirin Yu.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2009. №2. pp.1–7.
9. Kirin Yu.P., Kir'yanov V.V. Nauchno – tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya. 2016. №2. pp.120–123.
10. Zatonskiy A.V., Kirin Yu.P., Bekker V.F. Pozitsionnoe upravlenie v slozhnykh sistemakh [Position management in complex systems]. Berezniki: BF PGTU, 2008. 150 p.
11. Tsykunov A.M. Adaptivnoe i robastnoe upravlenie dinamicheskimi ob"ektami po vykhodu [Adaptive and robust management of dynamic objects on an exit]. M.: Fizmatlit, 2009. 268 p.
12. Tseligorov N.A., Mafura G.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 (1 chast'). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340/.
13. Ackermann J. Parameter space design of robust control systems. IEEE Trans. On Autom. Control. 1980. Vol. 25. N6. pp.1058-1072.
14. Sukhodoev M.S. Kornevoy analiz i sintez sistem s interval'nymi parametrami na osnove vershinnykh kharakteristik polinomov [The root analysis and synthesis of systems with interval parameters on the basis of topmost characteristics of polynoms]: dis... kand. tekhn. nauk: 05.13.01. Tomsk, 2008. 131 p.
15. Kirin Yu.P., Kir'yanov V.V. Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. №2. pp.7–10.
16. Chen C.T., Wang M.D. Robust controller design for interval process systems. Computers and Chemical Engineering. 1997.Vol. 21. pp.707-721.
17. Pushkarev M.I. Analiz i sintez sistem upravleniya tekhnologicheskimi ob"ektami s interval'nymi parametrami na osnove kornevykh pokazateley kachestva [The analysis and synthesis of control systems of technological objects



with interval parameters on the basis of root indicators of quality]: dis... kand. tekhn. nauk: 05.13.06. Tomsk, 2014. 155 p.

18. Nebylov A.V. Garantirovanie tochnosti upravleniya [Guaranteeing accuracy of management]. M.: Nauka, 1998. 304 p.

19. Polyak B.T., Tsyarkin Ya.Z. Avtomatika i telemekhanika. 1990. №9. pp.45-54.

20. Gayvoronskiy S.A., Sukhodoev M.S. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2010. T.316. №5. pp.12-15.

21. Avtomaticheskii kontrol' i regulirovanie v chernoy metallurgii [Automatic control and regulation in ferrous metallurgy]: Spravochnik. M.D. Klimovitskiy, A.P. Kopelovich. M.: Metallurgiya, 1967. 467 p.