

УДК 681.5.669.295

Ю.П. Кирин, В.А. ТихоновБерезниковский филиал Пермского национального исследовательского
политехнического университета, Березники, Россия**РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ТЕТРАХЛОРИДА ТИТАНА МАГНИЕМ**

Рассмотрен робастный подход к управлению процессом восстановления титана, позволяющий интенсифицировать процесс за счет повышения температуры. Объектом управления является зона экзотермической реакции промышленного аппарата восстановления титана, представленная объектом управления с интервально-неопределенными параметрами, заданное значение температуры которого поддерживается двухпозиционным регулятором. Определено технологическое ограничение значения максимальной температуры объекта управления. Получено описание объекта в виде интервальной динамической модели. С применением модели в классе двухпозиционных систем проведены анализ робастного качества и синтез робастного управления температурой объекта управления. Анализ робастного качества предусматривает определение наихудшего показателя качества работы двухпозиционной системы регулирования температуры при любых значениях параметров объекта из известных интервалов. Таким показателем является максимально возможная амплитуда положительного отклонения температуры, характеризующая в двухпозиционной системе величину превышения регулируемой температурой заданного значения. Синтез робастного управления температурой основан на концепции гарантируемого (минимаксного) управления, предполагающей достижение наилучшего результата при наихудших сочетаниях неопределенных факторов. Ее применение позволяет придать двухпозиционному регулятору робастные свойства для поддержания максимально допустимой температуры объекта управления, которые обеспечиваются использованием амплитуды положительного отклонения температуры в качестве гарантированного критерия оценки работы двухпозиционной системы. Задача синтеза робастного управления заключается в нахождении такого заданного значения двухпозиционному регулятору, которое гарантировало бы поддержание максимально допустимой температуры объекта при наличии в интервальной модели неопределенных факторов. В такой постановке задачи заданное значение двухпозиционного регулятора является гарантирующим управлением температурой объекта. В статье рассмотрен эволюционный путь решения проблемы интенсификации процесса восстановления, предусматривающий разработку на основе интервальной динамической модели и практическую реализацию предложенных методов робастного управления температурой на разных этапах автоматизации производства губчатого титана с применением машин централизованного контроля, управляющих вычислительных машин, микропроцессорных контроллеров и компьютеров. Робастное управление позволило повысить температуру и улучшить за счет этого технологические показатели процесса восстановления тетраоксида титана магнием.

Ключевые слова: восстановление тетраоксида титана магнием, двухпозиционное регулирование, интервальная модель, робастное управление, гарантирующее заданное значение температуры.

Yu.P. Kirin, V.A. Tikhonov

Berezniki branch of the Perm National Research Polytechnic University,
Berezniki, Russian Federation

ROBUST CONTROL OF THE RECOVERY PROCESS OF TETRACHLORIDE TITANIUM MAGNESIUM

A robust approach to controlling the process of titanium reduction is considered, which makes it possible to intensify the process by increasing the temperature. The control object is the exothermic reaction zone of the industrial titanium recovery apparatus, represented by the control object with interval-indeterminate parameters, the set temperature value of which is maintained by the on-off regulator. The technological limitation of the value of the maximum temperature of the control object is determined. A description of the object in the form of an interval dynamic model is obtained. Using the model in the class of two-point systems, an analysis of robust quality and synthesis of robust control of the temperature of the control object was carried out. The analysis of robust quality provides the definition of the worst performance indicator of a two-position temperature control system for any values of object parameters from known intervals. Such an indicator is the maximum possible amplitude of the positive temperature deviation, characterizing in the two-position system the magnitude of the excess of the setpoint set by the temperature. Synthesis of robust temperature control is based on the concept of guaranteed (minimax) control, suggesting the achievement of the best result with the worst combinations of uncertain factors. Its application allows the on-off regulator to robust properties to maintain the maximum permissible temperature of the control object, which are provided by using the amplitude of the positive temperature deviation as a guaranteed criterion for estimating the operation of the two-position system. The task of synthesis of robust control is to find such a given value for a two-position controller that would guarantee the maintenance of the maximum permissible temperature of the object if there are undetermined factors in the interval model. In this formulation of the problem, the set value of the on-off regulator is the guaranteeing control of the temperature of the object. The article considers the evolutionary way of solving the problem of intensification of the restoration process, which involves the development, based on the interval dynamic model and practical implementation of the proposed methods of robust temperature control at different stages of automation of sponge titanium production with the use of centralized control machines, control computers, microprocessor controllers and computers. Robust control allowed to increase the temperature and improve the technological parameters of the process of reduction of titanium tetrachloride with magnesium.

Keywords: reduction of titanium tetrachloride by magnesium, on-off control, interval model, robust control, guaranteeing the set temperature

Введение. Основу промышленного магнийтермического производства губчатого титана составляют процессы восстановления тетрахлорида титана магнием и последующей вакуумной сепарации, осуществляемые в аппаратах периодического действия [1].

Восстановление тетрахлорида титана магнием – высокотемпературный экзотермический процесс, основанный на реакции химического превращения:



Процесс проводят в герметичном аппарате в атмосфере инертного газа. Магний загружают в аппарат перед началом процесса одной

порцией, тетрахлорид титана подают непрерывно в течение всего процесса. При магнетермическом восстановлении титана наряду с восстановителем – жидким магнием в аппарате содержатся титановая губка, образующая пористый блок, и побочный продукт реакции – хлорид магния, который имеет более высокую плотность, чем магний. Хлорид магния опускается в донную часть аппарата, откуда периодически удаляется через сливное отверстие. После восстановления в реакторе остается спекшийся блок реакционной массы в виде титановой губки, поры которой заполнены основными примесями – магнием и хлоридом магния. Последние имеют достаточно высокое давление паров и при нагревании в процессе сепарации под вакуумом испаряются, а затем отгоняются в конденсатор.

Конструкция промышленного аппарата восстановления предусматривает выделение в рабочем объеме на заданном уровне по высоте аппарата зону взаимодействия тетрахлорида титана с магнием – зону экзотермической реакции. При существующем аппаратурном оформлении процесса выделяемое тепло отводят направленным потоком воздуха, подаваемым в зону экзотермической реакции аппарата вентилятором. Температура зоны экзотермической реакции поддерживается на заданном уровне двухпозиционным регулятором включением и выключением вентилятора.

Основными направлениями совершенствования производства губчатого титана являются получение высококачественного однородного по химическому составу губчатого титана и повышение производительности процессов восстановления и вакуумной сепарации.

Один из путей реализации указанных направлений состоит в интенсификации процесса восстановления [2].

В результате экспериментальных и теоретических исследований определены условия интенсификации процесса восстановления и установлено влияние температуры и концентрации тетрахлорида титана на скорость реакции восстановления. 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). Это обуславливает ускорение реакции с ростом температуры. Повышение концентрации тетрахлорида титана и связанное с ним повышение общего давления в реакторе восстановления также способствуют ускорению реакции восста-

новления: при изменении концентрации от $0,42 \cdot 10^{-2}$ до $3,4 \cdot 10^{-2}$ моль/л скорость реакции при 850°C возрастает с 90 до 478 кг/(м²·ч) [3]. В промышленной практике повышение концентрации тетрахлорида титана реализовано экспериментальным подбором подаваемого в аппарат максимально возможного расхода тетрахлорида с таким расчетом, чтобы при интенсифицированных режимах не ухудшалось качество получаемого губчатого титана [4].

Определено технологическое ограничение значения максимальной температуры для реакторов восстановления, выполненных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. За верхний предел допустимой температуры процесса восстановления принимается 900°C , при превышении которой губчатый титан загрязняется примесями железа вследствие их перехода из материала стенки реактора через газовую фазу тетрахлорида титана [3].

В производственных условиях температурный режим процесса восстановления обеспечивался экспериментальным подбором задания многоканальному двухпозиционному регулятору температуры зоны экзотермической реакции. В первых работах по интенсификации процесса восстановления задание регулятору температуры зоны экзотермической реакции назначалось значительно ниже максимально допустимого значения – на уровне 800°C [5, 6].

В сложившейся ситуации задача интенсификации процесса восстановления состояла в разработке такого управления, которое позволяло бы поддерживать температуру зоны экзотермической реакции на максимально допустимом уровне. Ее решение осложнялось тем, что зона экзотермической реакции является объектом управления с неопределенными динамическими параметрами, которые в условиях производства губчатого титана изменяются в некоторых пределах [7].

Для эффективного управления такими объектами предложены методы анализа и синтеза робастного управления, позволяющие в классе двухпозиционных систем обеспечить гарантированное поддержание максимально допустимой температуры процессов восстановления и вакуумной сепарации губчатого титана при изменении неопределенных параметров объектов в заданных диапазонах. Практическая реализация методов продемонстрирована на примере робастного управления температурой эндотермического процесса – вакуумной сепарации губчатого титана. Объектом управления служила зона нагрева промышленного аппарата вакуумной сепарации [8].

В настоящей статье рассматривается применение данных методов для анализа и синтеза робастного управления температурой экзотермического процесса – восстановления тетрахлорида титана магнием. Объектом управления является зона экзотермической реакции промышленного аппарата восстановления титана. Рассмотрен эволюционный путь решения проблемы интенсификации, предусматривающий разработку на основе интервальной динамической модели методов робастного управления температурой зоны экзотермической реакции промышленного аппарата восстановления и их практическую реализацию на разных этапах автоматизации производства губчатого титана с применением машин централизованного контроля, управляющих вычислительных машин, микропроцессорных контроллеров и компьютеров [2, 9, 10].

1. Модель динамики зоны экзотермической реакции. Рассмотрим модель динамики зоны экзотермической реакции (МДР) аппарата восстановления титана, построенную в системе многоканального двухпозиционного регулирования температуры [7].

Зона экзотермической реакции представлена нестационарным объектом управления (НОУ), описываемым дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами:

$$T_{0p}(t) \cdot \frac{dy_p(t)}{dt} + y_p(t) = K_{0p}(t) \cdot \{x_p[t - \tau_p(t)] - z_p(t)\}, \quad (1)$$

где $y_p(t)$ – выходная величина (температура) НОУ; $x_p(t)$ – входная величина (мощность воздушного охлаждения) НОУ; $T_{0p}(t)$, $K_{0p}(t)$, $\tau_p(t)$ – постоянная времени, коэффициент усиления, время запаздывания НОУ соответственно; $z_p(t)$ – неконтролируемое возмущение (изменение тепла экзотермической реакции, выделяемого при взаимодействии тетрахлорида с магнием). Нестационарность объекта обусловлена тем, что названные коэффициенты являются неизвестными функциями времени и изменяются в некоторых пределах.

В представленной на рис. 1 схеме НОУ функционирует в режиме нормальной эксплуатации в замкнутом контуре многоканального двухпозиционного регулирования.

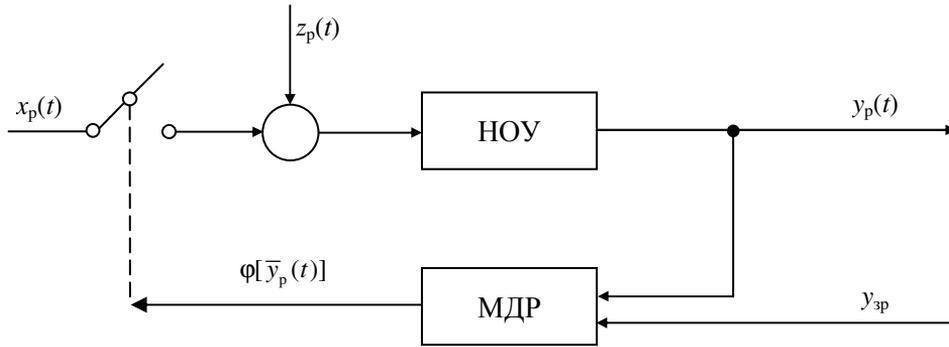


Рис. 1. Структурная схема многоканального двухпозиционного регулирования температуры зоны экзотермической реакции аппарата восстановления титана

На входе НОУ действует возмущение $z_p(t)$. Включением и выключением входной величины $x_p(t)$ многоканальный двухпозиционный регулятор (МДР), функции которого выполняет машина централизованного контроля, поддерживает выходную величину $y_p(t)$ НОУ на заданном уровне y_{zp} в соответствии с алгоритмом:

$$\varphi[\bar{y}_p(t)] = \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ при } \bar{y}_p(t) < y_{zp} - \Delta y_0 \text{ и} \\ y_{zp} - \Delta y_0 \leq \bar{y}_p(t) \leq y_{zp} + \Delta y_0, y'_p(t) > 0; \\ x_p(t) \text{ при } \bar{y}_p(t) > y_{zp} + \Delta y_0 \text{ и} \\ y_{zp} - \Delta y_0 \leq \bar{y}_p(t) \leq y_{zp} + \Delta y_0, y'_p(t) < 0; \end{array} \right.$$

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

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

Таким образом, двухпозиционное регулирование температуры осуществляется следующим образом: в позиции «включено» на входе НОУ действует разность $x_p(t) - z_p(t)$, в позиции «отключено» – возмущение $z_p(t)$. Двухпозиционная система при этом работает в режиме автоколебаний, параметры которых использованы для решения задачи

параметрической идентификации НОУ и определения значений коэффициентов $T_{0p}(t)$, $K_{0p}(t)$, $\tau_p(t)$, $z_p(t)$ уравнения (1).

2. Интервальная модель динамики объекта управления. Изложенное выше дает основание рассматривать НОУ как объект регулирования с интервально-неопределенными параметрами, а систему многоканального двухпозиционного регулирования температуры НОУ – как интервальную систему автоматического регулирования [11, 12].

Для исследования такой интервальной системы управления воспользуемся робастным подходом [13, 14], предусматривающим анализ робастного качества для определения наихудших показателей качества двухпозиционной 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. В общем случае качество работы системы оценивают по величине максимальной ошибки регулирования в наиболее неблагоприятных условиях функционирования системы. В нашем случае критерием качества работы двухпозиционной системы служит максимально возможная амплитуда положительного отклонения температуры НОУ от заданного значения, характеризующая величину превышения регулируемой температурой заданного значения [8]. Ее аналитическое выражение получено из уравнения (1) в предположении о квазистационарности НОУ на интервале идентификации (в течение периода автоколебаний температуры) [7]:

$$\Delta y_{(+p)} = K_{0p} \cdot z_p \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_{on.p} + \tau_{d.on}}{T_{0p}}\right) \right] + \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{on.p} + \tau_{d.on}}{T_{0p}}\right), \quad (2)$$

где $\Delta y_{(+p)}$ – амплитуда положительного отклонения температуры от $y_{зр}$; $\tau_{on.p}$ – время запаздывания НОУ при включении $x_p(t)$; $\tau_{d.on}$ – дополнительное время запаздывания МДР при включении $x_p(t)$.

Для реализации робастного подхода получено описание НОУ в виде интервальной динамической модели, обеспечивающей анализ робастного качества и синтез гарантированного управления температурой НОУ. При этом предполагается, что неизвестные значения параметров объекта лежат внутри некоторого известного интервала [15].

В результате решения задачи параметрической идентификации получены интервальные значения динамических параметров НОУ:

$$T_{0p}^{\min} \leq T_{0p}(t) \leq T_{0p}^{\max}; \quad (3)$$

$$K_{0p}^{\min} \leq K_{0p}(t) \leq K_{0p}^{\max}; \quad (4)$$

$$\tau_p^{\min} \leq \tau_p(t) \leq \tau_p^{\max}. \quad (5)$$

Определены наиболее неблагоприятные (наихудшие) сочетания значений динамических параметров НОУ из диапазона (3)–(5), при которых в системе имеет место наибольшая ошибка регулирования температуры. Запишем уравнение (1) в следующем виде:

$$T_{0p}^{\min} \frac{dy_p(t)}{dt} + y_p(t) = K_{0p}^{\max} [x_p(t - \tau_p^{\max}) - z_p(t)]. \quad (6)$$

Данное уравнение описывает динамику в наихудшем (с точки зрения наибольшей величины амплитуды положительного отклонения температуры) режиме функционирования НОУ. Аналогично можно записать уравнение, описывающее динамику НОУ для наилучшего (с точки зрения наименьшей величины амплитуды положительного отклонения температуры) режима функционирования НОУ:

$$T_{0p}^{\max} \frac{dy_p(t)}{dt} + y_p(t) = K_{0p}^{\min} [x_p(t - \tau_p^{\min}) - z_p(t)]. \quad (7)$$

3. Анализ робастного качества регулирования температуры объекта управления. С помощью интервальной модели оценим наихудшее качество регулирования и определим возможный диапазон изменения амплитуды положительного отклонения температуры НОУ. При расчетах качества регулирования вносимое МДР дополнительное запаздывание принимают равным максимальной величине – интервалу квантования по времени T [16].

Тогда, используя соотношение (2), уравнения (6), (7), а также полагая $\tau_{d.on} = T$, запишем аналитические выражения для определения значений амплитуд положительного отклонения температуры в наихудшем $\Delta y_{(+p)}^{\text{нх}}(z_p)$ и наилучшем $\Delta y_{(+p)}^{\text{нл}}(z_p)$ режимах функционирования НОУ [8]:

$$\Delta y_{(+p)}^{\text{нх}}(z_p) = K_{0p}^{\max} \cdot z_p \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{on.p}^{\max} + T}{T_{0p}^{\min}}\right) \right) + \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{on.p}^{\max} + T}{T_{0p}^{\min}}\right), \quad (8)$$

$$\Delta y_{(+p)}^{нл}(z_p) = K_{0p}^{\min} \cdot z_p \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{on.p}^{\min} + T}{T_{0p}^{\max}}\right) \right) + \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{on.p}^{\min} + T}{T_{0p}^{\max}}\right). \quad (9)$$

Таким образом, амплитуды (8), (9) зависят от возмущающего воздействия НОУ.

На рис. 2 приведены графики изменения $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$ и $\Delta y_{(+p)}^{нл}(z_p)$, построенные по соотношениям (8), (9) для интервальных значений НОУ: $T_{0p}^{\min} = 710$ с, $T_{0p}^{\max} = 780$ с, $K_{0p}^{\min} = 2,2$ °C/кВт, $K_{0p}^{\max} = 2,8$ °C/кВт, $\tau_{on.p}^{\min} = 23$ с, $\tau_{on.p}^{\max} = 30$ с. Известны диапазон изменения возмущения ($z_p^{\min} = 20$ кВт, $z_p^{\max} = 80$ кВт), а также параметры МДР температуры: $\Delta y_0 = 2$ °C, $T = 60$ с.

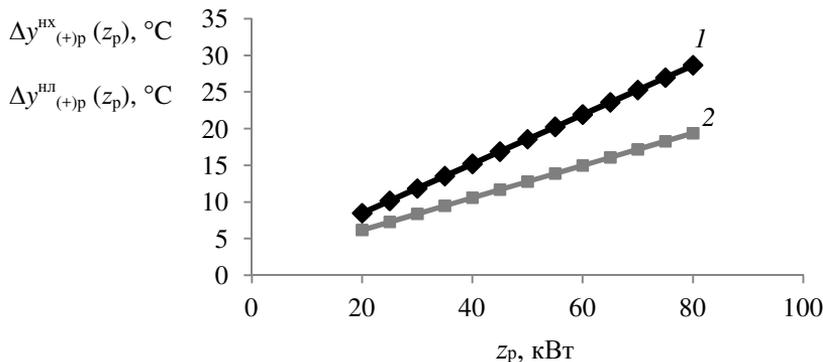


Рис. 2. Изменение амплитуды положительного отклонения температуры НОУ в многоканальной двухпозиционной системе:

$$1 - \Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p); 2 - \Delta y_{(+p)}^{нл}(z_p)$$

Диапазоны изменения $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$, $\Delta y_{(+p)}^{нл}(z_p)$ составляют соответственно 8,48 – 28,64 и 6,18–19,38 °C. Очевидно, что $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$ является гарантирующей оценкой максимально возможного диапазона изменения амплитуды положительного отклонения температуры в том смысле, что при любом другом выборе динамических параметров НОУ диапазон изменения амплитуды будет не больше, чем $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$. Таким образом, амплитуда $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$ характеризует наихудшее функционирование НОУ.

4. Синтез робастного управления температурой объекта. Во введении статьи отмечалось, что для интенсификации процесса восстановления необходимо температуру зоны экзотермической реакции поддерживать на максимально допустимом уровне. Для решения этой проблемы предложены методы синтеза робастного управления температурой, основанные на концепции гарантируемого (минимаксного) управления, предполагающей достижение наилучшего результата при наихудших сочетаниях неопределенных факторов [17, 18]. Ее применение позволяет придать МДР робастные свойства для поддержания максимально допустимой температуры НОУ, которые обеспечиваются использованием $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$ в качестве гарантированного критерия оценки работы многоканальной двухпозиционной системы. Задача синтеза робастного управления заключается в данном случае в нахождении такого заданного значения МДР, которое гарантировало бы поддержание максимально допустимой температуры НОУ при наличии в интервальной модели неопределенных факторов. В такой постановке задачи заданное значение МДР рассматривается в качестве гарантирующего управления температурным режимом НОУ [8].

Как уже отмечалось во введении, для решения этой задачи использован эволюционный подход к разработке и внедрению робастного управления температурой процесса восстановления с учетом сложившейся практики создания систем автоматизации производства губчатого титана. Эффективность робастного управления при этом оценивалась величиной гарантирующего заданного значения температуры МДР, которая в значительной степени определялась возможностями применяемых для автоматизации технических и программных средств.

Ниже рассмотрены методы синтеза робастного управления, обеспечивающего интенсификацию процесса восстановления за счет повышения гарантирующего заданного значения температуры МДР на разных этапах автоматизации производства губчатого титана.

4.1. 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 [9] (см. п.1). На этом этапе автоматизации задача состояла в определении гарантирующего заданного значения температуры МДР в условиях, когда возмущение $z_p(t)$ недоступно для измерения, известен диапазон изменения возмущения.

Для ведения в оптимальных режимах процесса восстановления требуется предварительное определение максимального заданного значения температуры, которое назначают в МДР перед началом процесса и сохраняют неизменным в течение всего процесса. Запишем для этого случая условие поддержания максимально допустимой температуры (y_d) НОУ в виде $y_{зр} + \Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p) = y_d$ и определим заданное значение температуры [8]:

$$y_{зр} = y_d - \Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p). \quad (10)$$

Это значение определяется величиной $\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p)$, которая, в свою очередь, зависит от возмущающего воздействия. При выборе заданного значения необходимо учитывать наибольшую величину $\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p)$ в известном диапазоне изменения возмущения. В приведенном выше примере она составляет 28,64 °С при $z_p^{\text{max}} = 80$ кВт. В этом случае (10) может быть записано в следующем виде:

$$y_{зр} = y_d - \Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p^{\text{max}}). \quad (11)$$

Выполнение соотношения (11) означает, что регулируемая температура не превысит установленного ограничения. Следовательно, рассчитанное по этому соотношению $y_{зр}$ можно рассматривать в качестве гарантирующего управления температурой НОУ. При $y_d = 900$ °С гарантирующее заданное значение МДР составляет 871,36 °С.

4.2. Гарантирующее управление температурой объекта в многоканальной двухпозиционной системе с быстродействующим регулятором. Дальнейшее повышение гарантирующего заданного значения температуры МДР осуществлено за счет разработки методов управления, минимизирующих величину $\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p)$. Критерий качества управления J представлен в следующем виде [8]:

$$J = \max [\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p)] \rightarrow \min. \quad (12)$$

Величина $\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p)$ в значительной степени зависит от интервала квантования по времени T , который, как видно из приведенного выше примера, в два раза превышает время запаздывания НОУ. Интервал квантования равен времени обегания коммутатором датчиков температуры НОУ.

Рассмотрим управление НОУ, удовлетворяющее требованию (12), основанное на повышении быстродействия МДР температуры. В данном случае, как и в предыдущем, предполагается, что известен диапазон изменения возмущения.

Решение задачи повышения быстродействия основано на сокращении времени связи каналов с измерительной схемой МДР, которое задается коммутатором [19]. В металлургическом цехе одновременно функционируют несколько десятков аппаратов восстановления титана. Каждый канал МДР обслуживает один НОУ. В процессе обегания датчиков в каждом НОУ анализируют 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. Следовательно, интервал квантования будет переменной величиной. Такие системы относятся к классу систем управления со случайным периодом квантования [20].

Для практической реализации быстродействующего МДР разработаны устройство обработки измерительной информации и управления переключением коммутатора, а также коммутатор, позволяющий изменять скорость переключения каналов. Это позволило сократить интервал квантования с 60 до 22–30 с [19, 21].

$$\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p), \text{ } ^\circ\text{C}$$

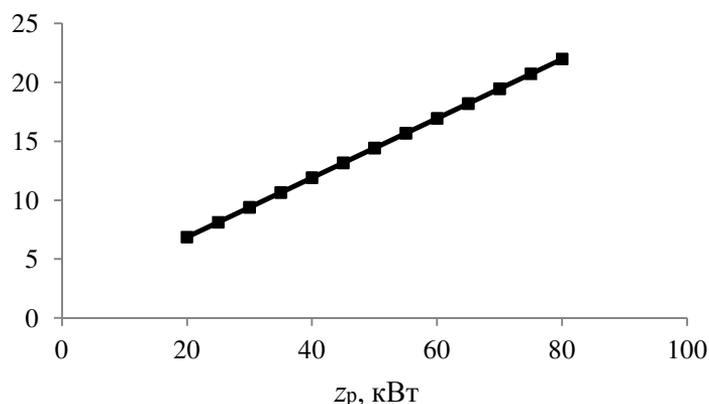


Рис. 3. Изменение амплитуды положительного отклонения температуры НОУ в многоканальной двухпозиционной системе с быстродействующим МДР

Как и в предыдущем случае, определено гарантирующее управление температурой НОУ с применением быстродействующего МДР. Для этого в (8) вместо $T = 60$ с подставлено значение $\bar{T} = 30$ с. Величина $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p^{\max})$ в данном случае снижается до $21,98$ °С (рис. 3). Соответственно повышается гарантирующее заданное значение температуры МДР, которое согласно (11) составляет $878,02$ °С.

4.3. Алгоритм изменения гарантирующего управления температурой объекта в многоканальной двухпозиционной системе с быстродействующими регуляторами. Новые возможности совершенствования робастного управления температурным режимом НОУ связаны с применением управляющих вычислительных машин и компьютеров для измерения возмущений в системах автоматизации производства губчатого титана [2, 10].

Подставим в (10) значение $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$ из (8) и преобразуем полученное выражение к следующему виду:

$$y_{zp} = K - L \cdot z_p, \quad (13)$$

где K, L – постоянные коэффициенты, °С и °С/кВт соответственно:

$$K = y_d - \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{on.p}^{\max} + \bar{T}}{T_{0p}^{\min}}\right),$$

$$L = K_{0p}^{\max} \cdot \exp\left(1 - \frac{\tau_{on.p}^{\max} + \bar{T}}{T_{0p}^{\min}}\right).$$

Из (13) следует, что поддержание гарантирующего заданного значения температуры сводится к измерению возмущения и изменению заданного значения МДР по результатам измерений. В условиях промышленного производства губчатого титана измерение возмущения НОУ осуществляют прямым или косвенным методами [8].

По сравнению с предыдущим случаем данный алгоритм позволяет поддерживать более высокое заданное значение температуры НОУ в диапазоне $878,02$ – $893,14$ °С. Еще более высокое заданное значение температуры в диапазоне $886,9$ – $895,3$ °С получено в результате применения в качестве МДР быстродействующего микропроцессорного контроллера, для которого в (13) можно принять $\bar{T} = 0$ (рис. 4).

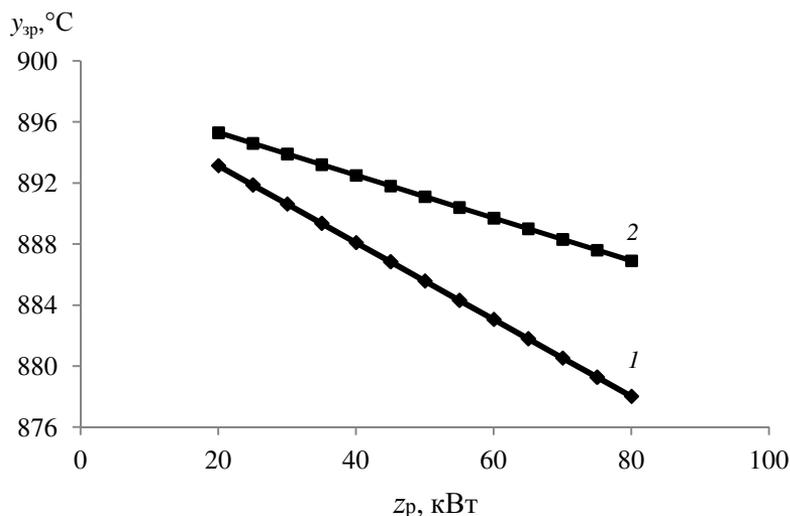


Рис. 4. Изменение гарантирующего заданного значения температуры НОУ в зависимости от возмущения в многоканальной двухпозиционной системе с быстродействующим МДР (1) и с микропроцессорным контроллером в качестве МДР (2)

Выводы. Рассмотренные методы анализа и синтеза робастного управления нашли практическое применение на разных этапах автоматизации производства губчатого титана и позволили в конечном итоге на 5–7 % повысить температурный режим зоны экзотермической реакции аппарата восстановления титана. Это дало возможность интенсифицировать процесс восстановления и улучшить его технологические показатели [2, 22]: повысилась производительность процесса, улучшилось качество губчатого титана, снизились энергозатраты.

Библиографический список

1. Родякин В.В., Гегер В.Э., Скрыпнюк В.М. Магниетермическое производство губчатого титана. – М.: Металлургия, 1971. – 216 с.
2. Современные направления совершенствования и развития производства губчатого титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, Н.В. Бильфельд // Титан. – 2003. – № 2(13). – С. 11–16.
3. Тарасов А.В. Металлургия титана. – М.: Академкнига, 2003. – 328 с.
4. Интенсификация технологического режима процесса восстановления в аппарате производительностью 4,5–5 т губчатого титана за цикл / А.Б. Танкеев, Д.А. Рымкевич, О.А. Путина [и др.] // Титан. – 2007. – № 1. – С. 3–8.

5. Петров В.И., Соколон И.И., Мальшин В.М. Разработка технологии и аппаратов повышенной производительности для получения титановой губки // Сб. трудов ВАМИ. – Л., 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. Идентификация технологических процессов производства губчатого титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, С.Л. Краев // Проблемы управления. – 2008. – № 4. – С. 71–77.
8. Кирин Ю.П., Кирьянов В.В. Робастное управление технологическими процессами производства губчатого титана // Проблемы управления. – 2016. – № 6. – С. 71–79.
9. Лидерман В.И., Кирин Ю.П. Опыт внедрения и эксплуатации автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами в производстве титана // Цветная металлургия. – 1976. – № 17. – С. 56–58.
10. Скорик В.Ф., Бирюков В.Б., Дегтярик Н.В. и др. Автоматизированная система управления процессом производства губчатого титана «Титан» // Цветная металлургия. – 1984. – № 1. – С. 41–45.
11. Неймарк Ю.И. Робастная устойчивость линейных систем // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 319, № 3. – С. 578–580.
12. Гусев Ю.М., Ефанов В.Н., Крымский В.Г. Анализ и синтез линейных интервальных динамических систем (состояние проблемы) // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1991. – № 1. – С. 3–23.
13. Ackermann J. Parameter space design of robust control systems // IEEE Trans. On Autom. Control. – 1980. – Vol. 25, № 6. – P. 1058–1072.
14. Chen C.T., Wang M.D. Robust controller design for interval process systems // Computers and Chemical Engineering. – 1997. – Vol. 2. – P. 707–721.
15. Кирин Ю.П., Кирьянов В.В. Построение интервальной модели динамики процессов производства губчатого титана // Вестник Череповец. гос. ун-та. – 2016. – № 2. – С. 7–10.
16. Черепанов А.И. Динамика систем многоканального позиционного регулирования. – М.: Энергия, 1970. – 80 с.
17. Афанасьев В.Н. Концепция гарантированного управления неопределенными объектами // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 16–23.

18. Небылов А.В. Гарантирование точности управления. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
19. А.с. 746436 СССР. Устройство для контроля и регулирования параметров / Ю.П. Кирин; опубл. 1980. Бюл. № 25. – С. 91.
20. Артемьев В.М., Ивановский А.В. Дискретные системы управления со случайным периодом квантования. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
21. Кирин Ю.П. Бесконтактный коммутатор для машин централизованного контроля // Цветная металлургия. – 1977.– № 14. – С. 44–47.
22. Кирин Ю.П., Беккер В.Ф., Затонский А.В. Некоторые результаты совершенствования процесса получения губчатого титана // Цветные металлы. – 2009. – № 12. – С. 91–94.

References

1. Rodiakin V.V., Geger V.E., Skrypniuk V.M. Magnietermicheskoe proizvodstvo gubchatogo titana [Magnesium thermal production of titanium sponge]. Moscow: Metallurgii, 1971. 216 p.
2. Kirin Iu.P., Zatonskii A.V., Bekker V.F., Bil'fel'd N.V. Sovremennye napravleniia sovershenstvovaniia i razvitiia proizvodstva gubchatogo titana [Modern directions of improvement and development of titanium sponge production]. *Titan*, 2003, no. 2(13), pp. 11-16.
3. Tarasov A.V. Metallurgii titana [Metallurgy of titanium]. Moscow: Akademkniga, 2003, 328 p.
4. Tankeev A.B., Rymkevich D.A., Putina O.A. et al. Intensifikatsiia tekhnologicheskogo rezhima protsessa vosstanovleniia v apparate proizvoditel'nost'iu 4,5-5 tonn gubchatogo titana za tsikl [Intensification of the technological mode of the recovery process in the apparatus with a capacity of 4.5–5 tons of spongy titanium per cycle]. *Titan*, 2007, no. 1, pp. 3-8.
5. Petrov V.I., Sokolon I.I., Mal'shin V.M. Razrabotka tekhnologii i apparatov povyshennoi proizvoditel'nosti dlia polucheniia titanovoi gubki [Development of technology and high-performance apparatuses for titanium sponge production]. *Sbornik trudov VAMI*. Leningrad, 1963, no. 50, pp. 157-166.
6. Petrov V.I., Lokshin R.G., Mal'shin V.M. et al. Razrabotka standartnogo protsessa polucheniia titanovoi gubki [Development of a standard process for obtaining titanium sponge]. *Zhurnal prikladnoi khimii*, 1965, vol. 38, iss. 6, pp. 1217-1224.
7. Kirin Iu.P., Zatonskii A.V., Bekker V.F., Kraev S.L. Identifikatsiia tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva gubchatogo titana [Identification

of technological processes for the production of spongy titanium]. *Problemy upravleniia*, 2008, no. 4, pp. 71-77.

8. Kirin Iu.P., Kir'ianov V.V. Robastnoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami proizvodstva gubchatogo titana [Robust control of technological processes for the production of sponge titanium]. *Problemy upravleniia*, 2016, no. 6, pp. 71-79.

9. Liderman V.I., Kirin Iu.P. Opyt vnedreniia i ekspluatatsii avtomatizirovannykh sistem kontroliia i upravleniia tekhnologicheskimi protsessami v proizvodstve titana [Experience of implementation and operation of automated systems for monitoring and control of technological processes in the production of titanium]. *Tsvetnaia metallurgiiia*, 1976, no. 17, pp. 56-58.

10. Skorik V.F., Biriukov V.B., Degtiarik N.V. et al. Avtomatizirovannaia sistema upravleniia protsessom proizvodstva gubchatogo titana "Titan" [Automated control system of titanium sponge titanium production process]. *Tsvetnaia metallurgiiia*, 1984, no. 1, pp. 41-45.

11. Neimark Iu.I. Robastnaia ustoichivost' lineinykh sistem [Robust stability of linear systems]. *Doklad AN SSSR*, 1991, vol. 319, no. 3, pp. 578-580.

12. Gusev Iu.M., Efanov V.N., Krymskii V.G. Analiz i sintez lineinykh interval'nykh dinamicheskikh sistem (sostoianie problemy) [Analysis and synthesis of linear interval dynamic systems (state of the problem)]. *Izvestiia AN SSSR. Tekhnicheskaiia kibernetika*, 1991, no. 1, pp. 3-23.

13. Ackermann J. Parameter space design of robust control systems. *IEEE Trans. On Autom. Control*, 1980, vol. 25, no 6, pp. 1058-1072.

14. Chen C.T., Wang M.D. Robust controller design for interval process systems. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, vol. 2, pp. 707-721.

15. Kirin Iu.P., Kir'ianov V.V. Postroenie interval'noi modeli dinamiki protsessov proizvodstva gubchatogo titana [Building an interval model of the dynamics of titanium sponge production processes]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 2, pp. 7-10.

16. Cherepanov A.I. Dinamika sistem mnogokanal'nogo pozitsionnogo regulirovaniia [Dynamics of multichannel position control systems]. Moscow: Energiia, 1970. 80 p.

17. Afanas'ev V.N. Kontseptsiiia garantirovannogo upravleniia neopredelennymi ob"ektami [The concept of guaranteed management of uncertain objects]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Teoriia i sistemy upravleniia*, 2010, no. 1, pp. 16-23.

18. Nebylov A.V. Garantirovanie tochnosti upravleniia [Guaranteeing Accuracy of Control]. Moscow: Nauka, 1998. 304 p.

19. Kirin Iu.P. Ustroistvo dlia kontroliia i regulirovaniia parametrov [Device for control and regulation of parameters]. Avtorskoe svidetel'stvo 746436 SSSR no. 25 (1980).

20. Artem'ev V.M., Ivanovskii A.V. Diskretnye sistemy upravleniia so sluchainym periodom kvantovaniia [Discrete control systems with a random quantization period]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 96 p.

21. Kirin Iu.P. Beskontaktnyi kommutator dlia mashin tsentralizovannogo kontroliia [Contactless switch for centralized control machines]. *Tsvetnaia metallurgii*, 1977, no. 14, pp. 44-47.

22. Kirin Iu.P., Bekker V.F., Zatonskii A.V. Nekotorye rezul'taty sovershenstvovaniia protsessa polucheniia gubchatogo titana [Some results of improving the process of obtaining titanium sponge]. *Tsvetnye metally*, 2009, no. 12, pp. 91-94.

Сведения об авторах

Кири́н Ю́рий Петро́вич (Березники, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология и экология» Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, Березники, Тельмана, 7, e-mail: klu2010@mail.ru).

Тихоно́в Вячесла́в Алекса́ндрович (Березники, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология и экология» Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, Березники, Тельмана, 7, e-mail: vtihonov@bf.pstu.ru).

About the authors

Kirin Yuri Petrovich (Berezniki, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Ecology of Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University (618404, Berezniki, 7, Telmana, e-mail: klu2010@mail.ru).

Tikhonov Vyacheslav Aleksandrovich (Berezniki, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Ecology of Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University (618404, Berezniki, 7, Telmana, e-mail: vtihonov@bf.pstu.ru).

Получено 17.01.2019