

Ю. С. КОЗЬМИН, В. С. СУЗДАЛЬ

РЕДУКЦИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМ ПРОЦЕССОМ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Для управления процессом кристаллизации щелочно-галогидных кристаллов использован косвенный метод синтеза регуляторов низкого порядка и заданной структуры. Для получения робастного регулятора пониженного порядка применяется процедура сбалансированного отсечения. Подход основан на задаче управления по норме H_∞ . Такой подход уменьшает ошибку, которая обусловлена применением редуцированного регулятора. На конкретном примере показано, что не наблюдается заметного ухудшения робастных свойств при допустимом сохранении свойств системы в области высоких частот.

Ключевые слова: робастный ПИД регулятор, монокристаллы, многомерный процесс управления.

Введение. Крупногабаритные щелочногалогидные монокристаллы (ЩГК) выращивают *методом Чохральского* на установках типа «РОСТ». В системах управления кристаллизацией скорость роста косвенно оценивается по диаметру растущего монокристалла, который и стабилизируется в процессе выращивания. Диаметр растущего кристалла управляют, изменяя тепловые условия выращивания. Для оценки диаметра растущего кристалла применяют метод измерения падения уровня расплава в результате быстрого дискретного подъема кристалла из расплава на малую величину [1]. Объект управления (ОУ) – это динамическое звено, входом которого являются тепловые условия кристаллизации, а выходом – диаметр монокристалла. При этом необходимо особо подчеркнуть, что синтезируемые регуляторы для управления процессами выращивания должны быть реализуемыми, то есть они должны иметь пониженный порядок с фиксированной структурой [2, 3].

Существует большое количество работ, посвященных методам синтеза регуляторов пониженного порядка. Такие методы, следуя [4], можно разделить на два класса: *прямые*, в которых параметры вычисляются при помощи оптимизации или какой-либо другой процедуры, и *косвенные*, в которых либо сначала находится регулятор полного (высокого) порядка и затем он упрощается (например, редуцируется *методом сбалансированного отсечения*), либо сначала проводится редукция модели объекта управления, для нее синтезируется регулятор, и затем он применяется для исходного объекта. Процедура сбалансированного отсечения имеет много привлекательных свойств, но, в то же время, у нее есть один серьезный недостаток – эта процедура применяется для незамкнутой системы, то есть в процессе редукции никак не учитываются не только свойства регулятора (объекта управления), но и сам факт наличия регулятора (объекта управления). Известны подходы к редукции замкнутой системы, в которых ОУ сначала стабилизируется стандартным регулятором, и только затем к замкнутой системе применяется процедура сбалансированного отсечения [4, 5].

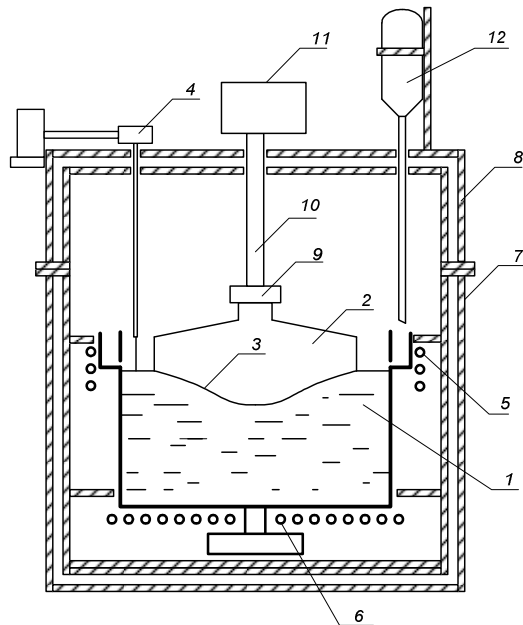


Рис. 1. – Схема ростовой установки: 1 – тигель с расплавом; 2 – растущий кристалл; 3 – фронт кристаллизации; 4 – датчик уровня (уровнемер) со щупом; 5 – боковой нагреватель; 6 – донный нагреватель; 7 – нижний охлаждаемый полукорпус; 8 – верхний охлаждаемый полукорпус; 9 – кристаллодержатель; 10 – шток кристаллодержателя; 11 – редуктор системы вращения и вытягивания штока кристаллодержателя; 12 – система подпитки расплава.

возмущения, связанные с изменением характера теплообмена в системе кристалл-расплав. Процесс кристаллизации крупногабаритных монокристаллов становится нестационарным. Исследования процесса кристаллизации ЩГК показывают, что задачу управления процессом выращивания можно свести к управлению объектом с неопределенностью. Проектируемая система управления должна обеспечивать приемлемое качество переходных процессов, необходимую точность и прямую чувствительность (*робастность*) к неопределенности модели объ-

Постановка задачи. В качестве объекта управления (ОУ) рассматривается установка типа «РОСТ» для выращивания крупногабаритных щелочно-галогидных (ЩГК) монокристаллов методом Чохральского (рис. 1). Монокристалл 2 вращается с некоторой угловой скоростью и вытягивается на затравку. В процессе роста монокристалла в тигле 1 автоматически поддерживают постоянный уровень расплава за счет подпитки сырьем из боковой кольцевой емкости. Сырье расплавляется боковым нагревателем 5.

Задача H_∞ – оптимизации. При выращивании крупногабаритных ЩГК с увеличением длины растущего образца возникают

екта управління. Следовательно, решение задачи высококачественного управления процессом кристаллизации ЩГК следует искать в классе робастных систем управления.

Для синтеза регуляторов систем управления выращиванием монокристаллов широко используются идеи робастного управления (H_∞ – оптимизации), в рамках которого проводится синтез робастных алгоритмов управления, учитывающих неопределенность в описании модели объекта управления G и действующих внешних возмущений.

Задачу H_∞ – оптимизации для нахождения робастного регулятора будем решать *методом смешанной чувствительности* [3]. Строго правильная рациональная передаточная матрица K робастного регулятора должна обеспечивать устойчивость замкнутой системы. В соответствии с *критерием Найквиста* для устойчивой системы график $G(j\omega)K(j\omega)$ не должен проходить или охватывать точку $(-1, j0)$, то есть достаточным условием устойчивости системы является $\|GK\|_\infty < 1$. Будем считать, что это условие выполняется. Известно, что робастность по возмущениям и робастную стабилизацию в методе смешанной чувствительности можно выразить соотношением:

$$\left\| \begin{array}{c} (I + G_n K)^{-1} \\ (I + G_n K)^{-1} \Delta_a K \\ (I + G_n K)^{-1} G_n \Delta_m K \end{array} \right\|_\infty \leq 1, \quad (1)$$

где G_n – номинальный ОУ; $\Delta_a = G - G_n$ – *аддитивная неопределенность*; $\Delta_m = (G - G_n)/G_n$ – *мультипликативная неопределенность*; $S = (I + G_n K)^{-1}$ – *функция чувствительности* или передаточная функция ошибки; $H = (I + G_n K)^{-1} G_n K$ – передаточная функция замкнутой системы; $R = (I + G_n K)^{-1} K$ – функция чувствительности управления.

Выбор регулятора K для выполнения всех трех требований в (1) при больших значениях $\|\Delta_a\|_\infty$, $\|\Delta_m\|_\infty$ может оказаться противоречивым. Поэтому при синтезе робастного регулятора используют подход, который базируется на частотных требованиях к системе, то есть необходимо рационально потребовать выполнение неравенств (1), каждого в своем частотном диапазоне. Первое неравенство должно работать в низкочастотной области (до частоты среза), а второе и третье неравенства – в окрестности частоты среза и правее ее. Для этого вводятся частотные весовые матрицы W_1, W_2, W_3 , обеспечивающие такое частотное разделение. После задания весовых матриц существующая система расширяется так, что она включает в себя уравнения этих матриц как дополнительные фазовые координаты. Данная операция выполняется, например, командой $[TSS] = \text{augf}(\text{sys}, W_1, W_2, W_3)$ из Robust Control Toolbox (RCT) MatLab, где sys – исходная система, TSS – расширенная система.

Таким образом, все требования к системе управления по ослаблению возмущений и обеспечению робастной устойчивости сводятся, на основании выражения (1), к следующему соотношению:

$$\|H_{y1u1}\|_\infty \leq 1, \quad (2)$$

где $H_{y1u1} = [S W_1 R W_2 H W_3]^T$ – функция стоимости метода смешанной чувствительности.

Для решения задачи робастной оптимизации, удовлетворяющей условию (2), используем команду $[\text{gamopt}, \text{sscp}, \text{sscl}] = \text{hinfort}(TSS, \gamma_a)$. Здесь sscp – уравнение регулятора, sscl – уравнение расширенной системы с регулятором. Команда hinfort осуществляет γ – итерации, чтобы рассчитать оптимальный регулятор для нормы

$$\left\| \begin{array}{c} \gamma H_{y1u1}(\gamma_a) \\ H_{y1u1} \end{array} \right\|_\infty < 1,$$

где γ_a – индекс выходных каналов функции стоимости, которые умножаются на γ . По умолчанию умножаются все выходные каналы. Очевидно, чем больше γ , тем меньше $\|H_{y1u1}\|_\infty$, таким образом, искомым является максимальное значение γ_{\max} , при котором решение задачи существует.

Выбор весовых матриц W_1, W_2, W_3 в (2) требует учета особенностей ОУ, таких как информации о диапазоне рабочих частот замкнутой системы, о степени подавления внешних возмущений, о наибольших прогнозах мультипликативных возмущений. Диагональная матрица устойчивых низкочастотных фильтров W_1 выбирается из условия подавления низкочастотных возмущений. Немоделируемая динамика оценивается матрицей W_2 в случае аддитивных отклонений Δ_a от номинального объекта G_n и для случая мультипликативных возмущений Δ_m – матрицей W_3 . Из (1) видно, что мультипликативные возмущения «охватывают» и аддитивные, поэтому можно ограничиться только учетом всех возмущений матрицей W_3 , то есть величина $|W_3^{-1}|$ фактически является оценкой верхней грани-

цы немодулируемой динамики в высокочастотной области. Матрица W_2 может использоваться для ограничения мощности управления, а также как параметр, настраиваемый для регулирования быстродействия. В некоторых случаях введение W_2 необходимо для существования решения рассматриваемой задачи. При этом можно ограничиться простейшим выбором $W_2 = \varepsilon I$, где ε – малая величина, I – единичная матрица соответствующих размеров.

Редукция методом H_∞ – сбалансированного отсечения. Для получения робастного регулятора пониженного порядка объединим объект управления G со стандартным робастным регулятором, сбалансируем эту конфигурацию и применим процедуру сбалансированного отсечения [5]. Такой подход основан на нормализованной H_∞ задаче управления.

Эта задача описывается в пространстве состояний следующей системой уравнений:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bw_1(t) + Bu(t), \quad y = Cx + w_2(t), \quad z_1(t) = Cx(t), \quad z_2(t) = u(t), \quad (3)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния; $u \in R^m$ – вектор управления; $y \in R^q$ – выходной вектор; w_1 и w_2 – белый гауссовский шум с нулевым средним значением.

В дальнейшем реализацию (A, B, C) в пространстве состояний размерности n будем всегда считать минимальной.

На рис. 2 показана структурная схема к задаче синтеза. Обозначим $z = [z_1^T \ z_2^T]^T$ и $w = [w_1^T \ w_2^T]^T$. Передаточная функция замкнутой системы от w к z будет иметь вид:

$$H(G, K) = \begin{bmatrix} (I - GK)^{-1}G & (I - GK)^{-1}GK \\ K(I - GK)^{-1}G & K(I - GK)^{-1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

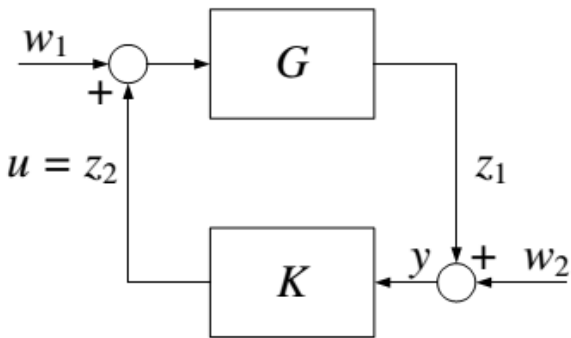


Рис. 2 – Структурная схема задачи синтеза.

В [4] приведен ряд основных определений, которые позволяют сформулировать задачу H_∞ сбалансированного отсечения замкнутой системы.

Определение 1. Регулятор K является (G, γ) – допустимым, если он стабилизирует G и если $\|H(G, K)\|_\infty < \gamma$.

Определение 2. Если K – это (G, γ) – допустимый регулятор, то тогда $\|H(G, K)\|_\infty < \gamma$ называется (G, γ) – допустимой передаточной матрицей замкнутой цепи.

Решение нормализованной задачи H_∞ управления (нахождение нормализованного H_∞ регулятора) дает следующая теорема, доказательство которой приведено в [6].

Теорема 1. Пусть некоторое $\gamma > \gamma_0$. Тогда существует единственное положительно определенное стабилизирующее решение $X_\infty = X_\infty^T$ алгебраического уравнения Риккати для H_∞ управления

$$A^T X_\infty + X_\infty A - (1 - \gamma^{-2}) X_\infty B B^T X_\infty + C^T C = 0. \quad (5)$$

Кроме того, существует единственное положительно определенное стабилизирующее решение $Y_\infty = Y_\infty^T$ алгебраического уравнения Риккати для H_∞ фильтрации

$$A Y_\infty + Y_\infty A^T - (1 - \gamma^{-2}) Y_\infty C^T C Y_\infty + B B^T = 0. \quad (6)$$

(G, γ) – допустимый регулятор существует тогда и только тогда, когда существуют положительно определенные матрицы X_∞ и Y_∞ , которые удовлетворяют условию

$$\lambda_{\max}(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2. \quad (7)$$

Определим

$$Z_\infty = (I - \gamma^2 Y_\infty X_\infty)^{-1}. \quad (8)$$

Нормализованный H_∞ регулятор $K_\infty = \begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} \\ \hat{C} & 0 \end{bmatrix}$ имеет форму наблюдателя $\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}u$, где

$$\hat{A} = (A - (1 - \gamma^{-2}) Y_\infty C^T C - B B^T X_\infty Y_\infty), \quad (9)$$

$$\hat{B} = Y_\infty C^T, \quad (10)$$

плюс обратная связь по состоянию $u = -\hat{C}\hat{x}$, где

$$\hat{C} = B^T X_\infty Z_\infty. \quad (11)$$

Квадратные корни из собственных значений матрицы $X_\infty Y_\infty$ назовем H_∞ – характеристическими значениями ν системы G . Лемма 1.10 из [4] позволяет формально определить H_∞ сбалансированную реализацию системы G через преобразование подобия, которое приводит матрицы X_∞ и Y_∞ к виду $N = \text{diag}(\nu_1, \dots, \nu_n)$.

Как было показано в работе [7], редуцированный ОУ и редуцированный H_∞ регулятор можно получить отсечением тех состояний H_∞ сбалансированной реализации, которые соответствуют малым значениям H_∞ – характеристических значений ν .

Рассмотрим построение редуцированного H_∞ регулятора.

Теорема 2. Пусть реализация (A, B, C) в пространстве состояний является H_∞ сбалансированной для заданного $\gamma > \gamma_0$, имеет H_∞ сбалансированные значения $\gamma > \nu_1 \geq \dots \geq \nu_n > 0$, а матрица $N = \text{diag}(\nu_1, \dots, \nu_n)$ является стабилизирующим решением алгебраических уравнений Риккати для H_∞ управления и H_∞ фильтрации. Выберем r такое, что $r < n$ и $\nu_r > \nu_{r+1}$, а затем разобьем матрицу N на блоки следующим образом

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix},$$

где $N_1 = \text{diag}(\nu_1, \dots, \nu_r)$ и $N_2 = \text{diag}(\nu_{r+1}, \dots, \nu_n)$. Пусть, в соответствии с теоремой 1, регулятор K_∞ является нормализованным H_∞ регулятором для объекта G и заданного γ . Матрицы нормализованного регулятора разобьем на блоки

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \hat{A}_{11} & \hat{A}_{12} \\ \hat{A}_{21} & \hat{A}_{22} \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} \hat{B}_1 \\ \hat{B}_2 \end{bmatrix}, \hat{C} = \begin{bmatrix} \hat{C}_1 & \hat{C}_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Тогда реализация $(\hat{A}_1, \hat{B}_1, \hat{C}_1)$ в пространстве состояний размерности r является редуцией нормализованного H_∞ регулятора, а ошибка, которая обусловлена применением редуцированного регулятора с исходным, не редуцированным ОУ, равна

$$\varepsilon \leq 2 \sum_{i=r+1}^n \frac{\beta \nu_i}{\sqrt{1 + \beta^2 \nu_i^2}}, \quad (13)$$

где $\beta = \sqrt{1 - \gamma^{-2}}$.

Синтез регулятора. Проведем синтез робастного регулятора в среде MatLAB. Данные для идентификации объекта управления получены в реальном масштабе времени при выращивании монокристалла NaI(Tl). Процесс выращивания рассматривался как двухмерный линейный стационарный объект управления с двумя входными величинами – температура основного Td и температура дополнительного нагревателя Tb и двумя выходами – диаметр кристалла Ds и температура подпиточного расплава Tr .

Матричная передаточная функция ОУ имеет вид

$$W = \begin{bmatrix} W_{Ds}^{Td} & W_{Ds}^{Tb} \\ W_{Tr}^{Td} & W_{Tr}^{Tb} \end{bmatrix},$$

$$\text{где } W_{Ds}^{Td} = \frac{1.714s^2 + 2.786s + 1.906}{s^3 + 4.638s^2 + 1.914s + 0.056}, W_{Tr}^{Td} = \frac{2.884s + 0.567}{s^2 + 2.785s + 0.519}, W_{Ds}^{Tb} = \frac{6.103s^2 + 8.834s + 3.383}{s^3 + 4.638s^2 + 1.914s + 0.056},$$

$$W_{Tr}^{Tb} = \frac{-1.482s - 0.483}{s^2 + 2.785s + 0.519}.$$

Модель полностью управляема и наблюдаема. Требования к проектируемой системе управления: замкнутая система с регулятором в виде динамической обратной связи по измеряемому выходу y должна обеспечивать переходные процессы с перерегулированием не больше 20%, заданное время регулирования, иметь достаточный запас устойчивости.

Весовые функции по каждому входу выбраны следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{numw1} &= [1 \ 6.5]; \text{denw1} = [40000 \ 0.15]; \text{tfw1} = \text{tf}(\text{numw1}, \text{denw1}); \\ \text{numw2} &= [1 \ 0.75]; \text{denw2} = [1500 \ 0.08]; \text{tfw2} = \text{tf}(\text{numw2}, \text{denw2}); \\ \text{numw3} &= [10 \ 0.95]; \text{denw3} = [150 \ 15]; \text{tfw3} = \text{tf}(\text{numw3}, \text{denw3}); \\ \text{numw4} &= [10 \ 0.03]; \text{denw4} = [10 \ 16]; \text{tfw4} = \text{tf}(\text{numw4}, \text{denw4}); \end{aligned}$$

Весовые матрицы:

$$W1=[numw1;denw1;numw2;denw2];W2=[0.09;15;0.046;11];W3=[numw3;denw3;numw4;denw4];$$

Для решения задачи синтеза была использована команда `hinfort`. Результаты поиска оптимального решения: наилучшее значение $\gamma_{\max} = 15.75$. Регулятор *sscp* имеет 9-ый порядок. Номинальная замкнутая система с номинальным ОУ имеет 14-ый порядок.

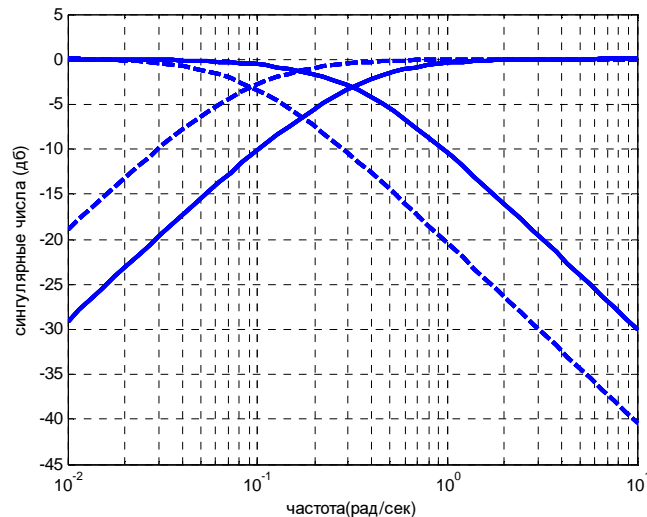


Рис. 3 – Сингулярные значения функции дополнительной чувствительности и функции чувствительности канала управления диаметром растущего кристалла замкнутой системы с регуляторами K_{∞} (сплошные линии) и K_r (штриховые линии).

Методом сбалансированного отсечения, используя команды `balreal` и `modred`, редуцируем в разомкнутой системе регулятор *sscp* до 2-го порядка. Сравним номинальную замкнутую систему управления с системой с редуцированным регулятором 2-го порядка. Для этого сравним *ганкелевы нормы* разности этих систем. Ганкелева норма разности номинальной системы и системы с редуцированным регулятором 2-го порядка $h_{\text{hankb}} = 0.5788$.

Проведем редукцию замкнутой системы методом H_{∞} – сбалансированного отсечения. Сбалансируем в пространстве состояний систему *sscpG* и найдем для нее стабилизирующее решение X_{∞} алгебраического уравнения Риккати для H_{∞} управления и стабилизирующее решение Y_{∞} алгебраического уравнения Риккати для H_{∞} фильтрации. Получаем $\lambda_{\max}(X_{\infty}Y_{\infty}) = 0.5443$. Отсюда наименьшее значение γ , для которого существует (G, γ) – допустимый регулятор, $\gamma_0 = 0.296$.

Выберем $\gamma = 1.502$. (G, γ) – допустимый регулятор существует, так как положительно определенные матрицы X_{∞} и Y_{∞} удовлетворяют условию (7).

Матрицы $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C})$ нормализованного H_{∞} регулятора K_{∞} имеют 14-ый порядок. Выберем $r = 7$. Редуцированный H_{∞} регулятор получим отсечением тех состояний H_{∞} – сбалансированной реализации, которые соответствуют H_{∞} – характеристическим значениям ν_{r+1}, \dots, ν_n . Тогда, согласно (12), реализация $(\hat{A}_{11}, \hat{B}_1, \hat{C}_1)$ в пространстве состояний размерности $r = 7$ и является редукцией нормализованного H_{∞} регулятора. Получаем замкнутую систему 7-го порядка с реализуемым редуцированным регулятором K_r второго порядка. Ганкелева норма разности номинальной системы и системы с редуцированным в замкнутой системе регулятором 2-го порядка $h_{\text{hankb}} = 0.5190$.

На рис. 3 приведены функции дополнительной чувствительности и функции чувствительности канала управления диаметром растущего кристалла замкнутых систем с регуляторами K_{∞} и K_r .

Анализ частотных характеристик замкнутой системы с регулятором K_r (рис. 3) показывает, что наблюдается некоторое ухудшение свойств системы в области высоких частот, но нет заметного ухудшения робастных свойств.

Графики переходных процессов в замкнутой системе с регуляторами K_{∞} (сплошная линия) и K_r (штриховая линия), приведенные на рис. 4, показывают, что в системе с редуцированным регулятором увеличилась длительность переходного процесса (20 секунд – в номинальной системе) до 40 секунд, что вполне допустимо в системе управления диаметром крупногабаритных монокристаллов.

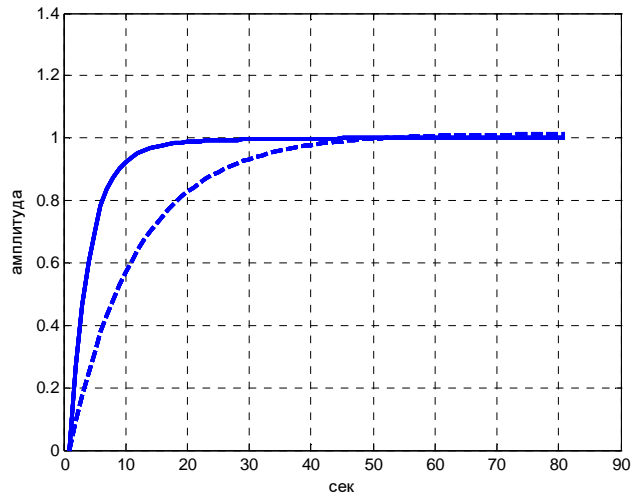


Рис. 4 – Переходная характеристика канала управления диаметром растущего кристалла замкнутой системы с регуляторами K_{∞} (сплошная линия) и K_r (штриховая линия).

Выводы. Для управления процессом кристаллизации ЦГК использован косвенный метод синтеза регуляторов низкого порядка заданной структуры. Подход основан на нормализованной H_{∞} задаче управления. При получении робастного регулятора пониженного порядка объект управления объединяется со стандартным робастным регулятором. Для этой конфигурации применяется процедура сбалансированного отсечения. Численные эксперименты показали, что подобный подход существенно уменьшает ошибку, обусловленную применением метода сбалансированного отсечения к разомкнутой системе.

Список литературы: 1. Горилецкий В. И., Гринева Б. В., Заславский Б. Г., и др. Рост кристаллов. – Харьков : АКТА. – 2002. – 535 с. 2. Суздаль В. С., Стадник П. Е., Герасимчук Л. И., Епифанов Ю. М. Сцинтилляционные монокристаллы: автоматизированное выращивание // Сер. Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники. – Харьков : ИСМА. – 2009. – 260 с. 3. Суздаль В. С., Епифанов Ю. М. Оптимизация управления процессами выращивания сцинтилляционных монокристаллов // Сер. Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники. – Харьков : «ИСМА». – 2015. – 111 с. 4. Бойченко А. П., Курдюков А. П., Тимин В. Н., и др. Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры // Управление большими системами – Москва : ИПУ РАН, –2007. – Вып. 19. – С. 23 – 126. 5. Jonckheere E. A., Silverman L. M. A new set of invariants for linear systems – Application to reduced order compensator design // IEEE Trans. Automat. Control. Vol. 28. – 1983. – P. 953 – 964. 6. Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A. State-space solutions to standard H_2 and H_{∞} control problems // IEEE Trans. Automat. Contr. Vol. 34. – 1989. – No. 8. – P. 831 – 847. 7. Mustafa D., Glover K. Controller reduction by H_{∞} – balanced truncation // IEEE Trans. Automat. Control. Vol. 36. – 1991. – No. 6. – P. 668 – 682.

References: 1. Goriletskiy, V. I., Gorileckij, V. I., Grinev, B. V. and Zaslavskij, B. G. *Rost kristallov* [Crystal Growth]. Kharkov, AKTA Publ., 2002. 535 p. 2. Suzdal', V. S., Stadnik, P. E., Gerasimchuk, L. I. and Epifanov, Yu. M. *Stsintillyatsionnye monokristally: avtomatizirovannoe vyrashhivanie* [Scintillation monocrystal: automated growing]. Ser.: *Sostoyanie i perspektivy razvitiya funktsional'nykh materialov dlya nauki i tekhniki* [Ser.: State and prospects of development of functional materials for science and technology]. Kharkov, ISMA Publ., 2009. 260 p. 3. Suzdal', V. S. and Epifanov, Yu. M. *Optimizatsiya upravleniya processami vyrashchivaniya stsintillyatsionnykh monokristallov* [Optimization of scintillation crystal growth control]. Ser.: *Sostoyanie i perspektivy razvitiya funktsional'nykh materialov dlya nauki i tekhniki* [Ser.: State and prospects of development of functional materials for science and technology]. Kharkov, «ISMA» Publ., 2015. 111 p. 4. Boychenko, V. A., Kurdjukov, A. P. and Timin, V. N. *Nekotorye metody sinteza reguljatorov ponizhennogo porjadka i zadannoy struktury* [Several methods for synthesizing controller of lower order and given structure]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Management of large systems]. Moscow, IPU RAN Publ., 2007, no. 19, pp. 23–126. 5. Jonckheere, E. A. and Silverman, L. M. A new set of invariants for linear systems – Application to reduced order compensator design. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1983, Vol. 28, pp. 953–964. 6. Doyle, J. C., Glover, K., Khargonekar, P. P. and Francis, B. A. State-space solutions to standard H_2 and H_{∞} control problems. *IEEE Trans. Automat. Contr.* 1989, Vol. 34, no. 8, pp. 831–847. 7. Mustafa, D. and Glover, K. Controller reduction by H_{∞} – balanced truncation. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1991, Vol. 36, no. 6, pp. 668–682.

Поступила (received) 18.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Суздаль Віктор Семенович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, ІСМА НАН України, провідний науковий співробітник лабораторії систем управління відділу технології вирощування монокристалів, м. Харків; тел.: (057) 341-01-45; e-mail: suzdal@isma.kharkov.ua.

Суздаль Віктор Семёнович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, ИСМА НАН Украины, ведущий научный сотрудник лаборатории систем управления отдела технологии выращивания монокристаллов, г. Харьков; тел.: (057) 341-01-45; e-mail: suzdal@isma.kharkov.ua.

Suzdal Victor Semenovich – Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, ISMA NAS of Ukraine, Leading Researcher of the Laboratory of Control Systems, Single Crystal Growth Technology Department, Kharkov; tel.: (057) 341-01-45; e-mail: suzdal@isma.kharkov.ua.

Козьмін Юрій Семенович – кандидат технічних наук, ІСМА НАН України, науковий співробітник лабораторії систем управління відділу технології вирощування монокристалів, м. Харків; тел.: (057) 341-01-45; e-mail: ukoz55@mail.ru.

Козьмин Юрій Семёнович – кандидат технических наук, ИСМА НАН Украины, научный сотрудник лаборатории систем управления отдела технологии выращивания монокристаллов, г. Харьков; тел.: (057) 341-01-45; e-mail: ukoz55@mail.ru.

Kozmin Yuriy Semenovich – Candidate of Engineering Sciences, ISMA NAS of Ukraine, Researcher of the Laboratory of Control Systems, Single Crystal Growth Technology Department, Kharkov, tel.: (057) 341-01-45; e-mail: ukoz55@mail.ru.

УДК 001.57

В. О. КОНДРАТЕЦЬ, А. М. МАЦУЙ

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ФОРМУВАННЯ ПОТОКУ ПУЛЬПИ У ПІСКОВОМУ ЖОЛОБІ ОДНОСПІРАЛЬНОГО КЛАСИФІКАТОРА

Представлені результати дослідження формування і руху потоку пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора. При співударянні пісків і води у пісковому жолобі створюється суміш з рівномірно розташованим твердим, яка не змінюється і в процесі руху пульпи. Змінна об'ємна продуктивність пісків класифікатора робить рух пульпи нерівномірним. За отриманими залежностями в певні моменти часу можливо визначити середню швидкість руху і висоту пульпи у пісковому жолобі, які однозначно характеризують умови формування потоку, дають можливість відтворення механізму взаємодії між масивами матеріалу та обґрунтування шляхів підвищення точності вимірювання технологічного параметра.

Ключові слова: спіральний класифікатор, піски, пісковий жолоб, пульпа, потік, швидкість, висота, витрата.

Вступ. Магнетитовий концентрат як продукт збагачення бідних залізних руд є основою сировини чорної металургії України, однак відрізняється підвищеною собівартістю в наслідок значних перевитрат електроенергії, куль і футеровки у першій стадії подрібнення – *класифікації*, які здійснюють здебільшого у кульових млинах і механічних односпіральних класифікаторах. Одним з важливих напрямів зменшення цих витрат, як вказано в [1], є автоматизація даних процесів. Недостатня вивченість процесів руху пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора стримує розробку ефективних засобів контролю об'ємної витрати рідкої суміші у відкритих потоках і, як наслідок, – автоматизацію технологічних процесів подрібнення вихідної руди у першій стадії, що призводить до значних економічних збитків. Зважаючи на те, що дана публікація спрямована на визначення одного з основних технологічних параметрів механічного спірального класифікатора – його піскової продуктивності, її тема є актуальною.

Аналіз останніх досліджень. В роботі [2] вказується на важливість автоматизації перших стадій як подрібнення, так і збагачення. Поряд з цим акцентується увага на відсутності надійних засобів контролю необхідної точності або на значній їх вартості [3], на необхідності розробки інформаційних засобів [1], на важливості автоматичного вимірювання витрати продуктів [4]. В останній час все ширше починають застосовуватись алгоритмічні методи визначення параметрів у збагачувальних технологіях [5, 6], які дозволяють підвищити точність отриманої інформації при вимірюванні деяких параметрів навіть з великою похибкою. Для цього іноді виникає необхідність підвищувати точність вимірювання інших параметрів. У замкненому циклі подрібнення вихідної руди таким параметром є об'ємна витрата пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора. У свій час були запропоновані способи визначення піскової продуктивності механічних спіральних класифікаторів [7, 8, 9], які удосконалювалися і зводилися до обчислення продуктивності за формулами з використанням великої кількості конструктивних і технологічних параметрів. Однак їх недоліком є велика кількість параметрів, які враховуються, і необхідний час їх введення і обчислення, що фактично створює запізнення. Перша спроба прямого вимірювання об'ємної витрати пульпи у пісковому жолобі відмічена в роботі [10]. Згодом були розроблені теоретичні положення даного методу [11], однак для створення діючих вимірювальних пристроїв, визначення умов забезпечення їх найвищої точності, враховуючи і формування хвильового руху пульпи, необхідно мати повну уяву про її рух. Рух пульпи у пісковому жолобі двоспірального класифікатора досліджувався в роботі [12], однак тут умови відрізняються від односпірального класифікатора і результати не можуть бути використані. Отже, ніхто не досліджував умови формування потоку пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора.

Постановка задачі. Метою даної роботи є встановлення умов формування потоку пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора шляхом дослідження взаємодії пісків з днищем транспортуючого засобу, руху пульпи у ньому, розробки математичних моделей процесу та його моделювання і аналізу результатів.