

**В. С. СУЗДАЛЬ, А. В. СОБОЛЕВ. И. И. ТАВРОВСКИЙ**

## СИНТЕЗ ПИД РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ МНОГОМЕРНОГО ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Для многомерного процесса выращивания крупногабаритных щелочногалоидных монокристаллов проведен синтез регулятора полного порядка с использованием  $H_\infty$  - процедуры формирования контура, учитывающей неопределенность в описании модели процесса кристаллизации и действующих внешних возмущений. Синтез  $H_\infty$  регулятора, основанный на 2-Риккати подходе, дал регулятор с порядком, равным порядку объекта управления. Регулятор полного порядка аппроксимирован до ПИД регулятора на основе разложения в ряд Маклорена матричной передаточной функции полного регулятора, представленного в пространстве состояний. Аппроксимация ПИД регулятора обеспечила высокое качество управления процессом выращивания монокристалла CsI(Tl) диаметром 300 мм при необходимом запасе устойчивости системы.

**Ключевые слова:** робастный ПИД регулятор, формирования контура, многомерный процесс.

**Введение.** Крупногабаритные щелочногалоидные монокристаллы (ЩГК) выращивают методом Чохральского на установках типа «РОСТ» и «КРИСТАЛЛ» [1]. В настоящее время практическая реализация в промышленности процесса управления таким сложным объектом, как процесс выращивания ЩГК, в основном основывается на использовании принципа автономности. При реализации автономного управления система со многими управляемыми входами распадается на ряд автономных, не связанных между собой, систем управления, каждая из которых имеет одну управляемую переменную [2]. Однако исследование проблем промышленного производства монокристаллов показывает, что качество продукции определяется многими технологическими параметрами установок выращивания и их взаимосвязью, т.е. процесс выращивания необходимо рассматривать как многомерную, многосвязную динамическую систему. Не учет этих связей при управлении процессами выращивания в промышленном производстве приводит к экономическим потерям. Таким образом, система управления таким сложноорганизованным объектом управления (ОУ), как процесс выращивания ЩГК, должна проектироваться как многомерная оптимальная система [3].

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** В дальнейшем в качестве объекта управления рассматривается установка типа «РОСТ» для выращивания ЩГК методом Чохральского (рис. 1). Монокристалл (рис.1, блок 2) вращается с некоторой угловой скоростью и вытягивается на затравку. В процессе роста монокристалла в тигле (рис.1, блок 1) автоматически поддерживают постоянный уровень расплава, подпитывая его исходным сырьем, которое предварительно подают в расположенную коаксиально тиглю кольцевую емкость для расплавления этого сырья боковым нагревателем (рис.1, блок 5).

Процесс выращивания включает в себя несколько основных этапов: иницирования роста монокристалла с помощью затравочного кристалла (затравливание) и вытягивания образца сначала с переменным сечением (разращивание кристалла), а затем с постоянным сечением (рост по высоте).

Затравливание и разращивание кристалла ведется в ручном режиме без включения обратной связи в системе управления. Система управления диаметром монокристалла включается с началом роста кристалла по высоте. Этот момент определяет начальные условия управления.

Известно, что качество кристалла определяется стабильностью массовой скорости его роста, стабильностью формы фронта кристаллизации (рис.1, блок 3) и равномерностью вхождения активатора по длине кристалла. В системах управления кристаллизацией скорость роста косвенно оценивается по диаметру растущего монокристалла, который и стабилизируется в процессе выращивания.

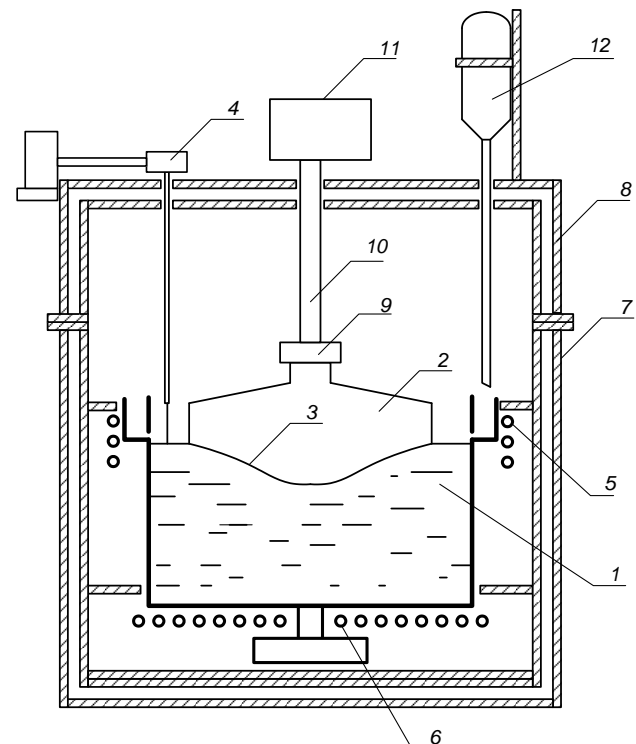


Рис. 1. – Схема ростовой установки: 1 – тигель с расплавом; 2 – растущий кристалл; 3 – фронт кристаллизации; 4 – датчик уровня (уровнемер) с щупом; 5 – боковой нагреватель; 6 – донный нагреватель; 7 – нижний охлаждаемый полукорпус; 8 – верхний охлаждаемый

полукорпус; 9 – кристаллодержатель; 10 – штук кристаллодержателя; 11 – редуктор системы вращения и

вытягивания штока кристаллодержателя; 12 – система подпитки расплава

Диаметром 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]. Падения уровня расплава измеряется уровнемером 4. Таким образом, объект управления – это динамическое звено, входом которого являются тепловые условия кристаллизации, а выходом – диаметр монокристалла. Особенно следует подчеркнуть, что при выращивании крупногабаритных ЦГК с увеличением длины растущего образца изменяется характер теплообмена в системе кристалл-расплава, т.е. процесс кристаллизации крупногабаритных монокристаллов является нестационарным. Нестационарность термических процессов в ростовой системе при выращивании ЦГК является источником неопределенности объекта управления.

Исследования процесса кристаллизации крупногабаритных ЦГК показывают, что процесс выращивания можно условно разбить на несколько интервалов, в пределах которых тепловые условия кристаллизации являются квазистационарными, т.е. задачу управления нестационарным процессом можно свести к управлению объектом с неопределенностью. Проектируемая система управления должна обеспечивать приемлемое качество переходных процессов, необходимую точность и робастность к неопределенности модели объекта управления. Следовательно, решение задачи высококачественного управления процессом кристаллизации ЦГК следует искать в классе робастных систем управления. При этом необходимо особо подчеркнуть, что синтезируемые регуляторы должны быть реализуемыми, т.е. они должны иметь приемлемый порядок и фиксированную структуру. Самой распространенной структурой в промышленных системах управления, в том числе и при выращивании монокристаллов, является ПИД регулятор (пропорциональное, интегральное и дифференциальное управление) [2]. Несмотря на то, что простота ПИД регуляторов является одновременно и их слабостью – простота ограничивает диапазон объектов, которыми они могут управлять – удивительная многосторонность и робастность ПИД управления обеспечивает в течение длительного времени значительную популярность этого регулятора. Существует большое количество работ, посвященных методам синтеза регуляторов пониженного порядка. Такие методы 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 порядка и затем он упрощается, либо сначала проводится редукция модели объекта управления, для нее синтезируется регулятор, и затем он применяется для исходного объекта [4]. Для синтеза регуляторов фиксированной структуры и пониженного (фиксированного) порядка

широко используются идеи робастного управления ( $H_\infty$  - оптимизации), в рамках которого проводится синтез робастных алгоритмов управления, учитывающих неопределенность в описании модели объекта управления и действующих внешних возмущений. Задачу  $H_\infty$  - оптимизации будем решать методом формирования контура (*loop-shaping  $H_\infty$  approach*). Синтез регуляторов с использованием  $H_\infty$  - процедуры формирования контура, предложенный Д. МакФарлейном и К. Гловером, является эффективным методом синтеза робастных регуляторов и успешно применяется для решения задач управления [5, 6]. Под формированием контура при синтезе системы управления понимают метод синтеза, при котором непосредственно определяют форму частотной характеристики передаточной функции разомкнутой или замкнутой системы. Результатом синтеза является субоптимальный  $H_\infty$  контроллер, имеющий порядок обобщенной модели объекта управления. Для синтеза регуляторов фиксированной структуры и пониженного порядка (ПИД) используется аппроксимация полного контроллера усеченным разложением в ряд Маклорена. В результате получен ПИД регулятор, хорошо аппроксимирующий полный  $H_\infty$  контроллер в низком частотном диапазоне, что позволяет ему сохранить устойчивость полного  $H_\infty$  контроллера.

**Цель и задачи исследования.** В теории робастной оптимизации показано, что требование робастной устойчивости и робастного качества для многомерных систем могут быть записаны как требования максимизации и минимизации сингулярных чисел некоторых передаточных функций замкнутой системы [7]. Зависимость сингулярных чисел передаточной функции от частоты, является обобщением АЧХ в одномерных системах. В системах с одним входом и одним выходом эти понятия эквивалентны. Сингулярные числа характеризуют по соответствующему выходу многомерной системы коэффициент усиления на заданной частоте. Для заданной частоты минимальный (максимальный) коэффициент усиления характеризуется минимальным (максимальным) сингулярным числом.

Принципиальная идея формирования контура заключается в том, что максимальные сингулярные числа передаточных матричных функций замкнутых систем могут быть непосредственно определены над соответствующими частотными диапазонами посредством сингулярных чисел соответствующих передаточных матричных функций (МПФ) разомкнутых систем. Таким образом, синтез регулятора,  $K$  удовлетворяющего некоторым требованиям замкнутой системы может быть достигнут посредством выбора  $K$ , который соответствующим образом «формирует» сингулярные числа разомкнутой системы. Следовательно, требования к замкнутой системе в  $H_\infty$  методе формирования контура задаются в частотной области в соответствующих частотных диапазонах в виде

требований к максимальным и минимальным – сингулярным числам МПФ разомкнутой системы.

В методе формирования контура задача робастной стабилизации решается не для исходного, а для нового обобщенного объекта, образованного с помощью формирующих функций. Обобщенный объект представляет собой последовательное соединение передаточных функций двух формирующих функций и исходного номинального ОУ. Требуемые характеристики качества и робастности замкнутой системы обеспечиваются благодаря выбору соответствующих формирующих функций, а решение задачи робастной стабилизации гарантирует устойчивость замкнутой системы. Кроме того, значение величины запаса робастной устойчивости является единственным индикатором, характеризующим степень достижения задаваемых требований к замкнутой системе.

**Материалы и методы синтеза ПИД регулятора методом формирования контура.** Пусть замкнутой системе управления соответствует стандартный объект управления вида

$$\begin{bmatrix} z_1(s) \\ z_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_y & W_2 G(s) W_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_2 G(s) W_1 \\ I_u \end{bmatrix} u(s)$$

$$y(s) = \begin{bmatrix} I_y & W_2 G(s) W_1 \\ & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} + W_2 G(s) W_1 u(s), \quad (1)$$

где  $d_1$  – сигнал на выходе объекта управления  $G$  и  $d_2$  – сигнал на входе,  $z_1$  – выход замкнутой системы, определяемый измеряемым выходом объекта  $y$ , а  $z_2$  – выход, определяемый управлением  $u$ , которое формируется регулятором  $K_\infty$  в обратной связи,  $I_y$  и  $I_u$  – единичные матрицы соответствующей размерности. На рисунке 2 приведена структурная схема замкнутой системы с последовательными формирующими функциями  $W_1$  и  $W_2$ .

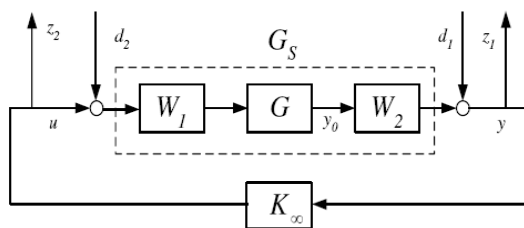


Рис. 2. – Структурная схема замкнутой системы с последовательными формирующими функциями

Передаточная функция замкнутой системы с объектом управления  $G$  и регулятором  $K_\infty$  в обратной связи от всех внешних входов  $w = [d_1^T, d_2^T]^T$  к выходам замкнутой системы  $z = [y^T, u^T]^T$  определяется выражением

$$T_{wz}(G_s, K_\infty) = \begin{bmatrix} (I - G_s K_\infty)^{-1} & (I - G_s K_\infty)^{-1} G_s \\ K_\infty (I - G_s K_\infty)^{-1} & K_\infty (I - G_s K_\infty)^{-1} G_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

где  $G_s = W_2 G W_1$  – обобщенный объект управления.

Математическая постановка задачи синтеза регулятора  $K(s)$  формулируется как задача  $H_\infty$  - оптимизации, т.е. для объекта управления  $G$  и формирующих функций  $W_1$  и  $W_2$  необходимо синтезировать регулятор  $K(s)$  в виде обратной связи по измеряемому выходу  $u(s) = K(s)y(s)$ , обеспечивающий минимально возможное значение для  $H_\infty$  - нормы передаточной функции замкнутой системы

$$T_{wz} \cdot \|T_{wz}(G_s, K_\infty)\|_\infty = \gamma_{min} \quad (3)$$

При синтезе регулятора методом формирования контура задаются формирующие функции префильтра  $W_1$  постфильтра  $W_2$ , и формируется обобщенный объект  $G_s = W_2 G W_1$ , который задает желаемые частотные характеристики разомкнутой системы. Решается задача  $H_\infty$ - оптимизации для обобщенного объекта  $G_s$  и определяется величина максимального запаса робастной устойчивости  $\epsilon_{max} = \gamma_{min}^{-1}$ . Если величина максимального запаса робастной устойчивости  $\epsilon_{max} < 0.5$ , то искомый регулятор определяется в виде

$$K = W_1 K_\infty W_2. \quad (4)$$

Проведем синтез робастного регулятора. Данные для идентификации объекта управления получены в реальном масштабе времени при выращивании монокристалла CsI(Tl). Процесс выращивания рассматривался как двухмерный линейный стационарный объект управления (LTI-объект) с двумя входными величинами – температура основного  $T_d$  и температура дополнительного нагревателя  $T_b$  и двумя выходами – диаметр кристалла  $D_s$  и температура питающего расплава  $T_p$ . Матричная передаточная функция ОУ

$$W = \begin{bmatrix} W_{D_s}^{T_d} & W_{D_s}^{T_b} \\ W_{T_p}^{T_d} & W_{T_p}^{T_b} \end{bmatrix},$$

где

$$W_{D_s}^{T_d} = \frac{1.055s - 2.008}{s^2 + 5.453s + 1.548}, \quad W_{T_p}^{T_d} = \frac{3.398s + 0.292}{s^2 + 3.124s + 0.216},$$

$$W_{D_s}^{T_b} = \frac{22.291s + 8.568}{s^2 + 5.453s + 1.548}, \quad W_{T_p}^{T_b} = \frac{-1.657s - 0.394}{s^2 + 3.124s + 0.216}.$$

Модель полностью управляема и наблюдаема. Требования к проектируемой замкнутой системе управления сформулированы следующим образом. Замкнутая система с регулятором  $K(s)$  в виде динамической обратной связи по измеряемому выходу  $y$  должна гарантировать устойчивость и для управляемых выходов СУ обеспечивать: переходные процессы с перерегулированием не больше 20%, время регулирования, не превышающее заданного значения при выращивании монокристаллов

заданного диаметра, иметь достаточный запас устойчивости замкнутой системы.

Решение задачи минимизации  $H_\infty$  нормы передаточной функции замкнутой системы, проведено в среде Matlab с использованием программы `hinfnmix` из пакета решения линейных матричных неравенств LMI Control Toolbox. При синтезе регулятора выбраны следующие параметры:

$$tfw_1 = 0.5, \quad tfw_2 = 1, \quad tfw_3 = (8s + 14) / 8s,$$

$$tfw_4 = (2s + 1) / 4s,$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} tfw_1 & 0 \\ 0 & tfw_2 \end{bmatrix}, \quad W_2 = \begin{bmatrix} tfw_3 & 0 \\ 0 & tfw_4 \end{bmatrix},$$

при которых используется функция Matlab:

$$[gopt, h2opt, K_\infty, R, S] = \text{hinfnmix}(P, [0 \ 2 \ 2], [3.355 \ 0 \ 1 \ 0])$$

, где  $P$  – стандартный объект управления в виде соответствующей системной матрицы пакета Tools MATLAB. Синтезирован регулятор  $K_\infty$  – 4-го (полного) порядка. Исходный полноразмерный оптимальный регулятор  $K = W_1 K_\infty W_2$  – 6-го порядка. При величине максимального запаса робастной устойчивости, равной  $\varepsilon_{\max} = 0.298$ , достигнута удовлетворительная совместимость требований между качеством переходных процессов и робастной устойчивостью замкнутой системы, что подтверждено графиками сингулярных чисел обобщенного объекта и разомкнутой системы с синтезированным регулятором полного порядка  $K_\infty$ , приведенных на рисунке 3 (сплошная и штриховая линии). На рисунке 4 для замкнутой системы с оптимальным регулятором  $K$  и номинальным ОУ показаны сингулярные значения функций чувствительности и дополнительной чувствительности канала управления диаметром растущего кристалла с передаточной функцией  $W_{Ds}^{Td}$  (сплошные линии). Анализ сингулярных значений на рисунке 4 показывает, что максимальные сингулярные числа функции чувствительности  $\bar{\sigma}(S(j\omega))$  характеризуют удовлетворительное подавление возмущений на низких частотах, а также низкую колебательность замкнутой системы. Сингулярные числа  $\bar{\sigma}(T(j\omega))$  функции дополнительной чувствительности – гарантированное подавление высокочастотных внешних возмущений, высокое демпфирование замкнутой системы и робастность относительно частичной структурной мультипликативной неопределенности в модели объекта управления.

**ПИД аппроксимация** В работе [8] предлагается регулятор полного порядка, синтезированный на основе  $H_\infty$  - метода формирования контура, аппроксимировать до ПИД регулятора на основе разложения в ряд Маклорена МПФ полного регулятора, представленного в пространстве состояний.

Известно, что синтез  $H_\infty$  регуляторов, основанный на 2-Риккати подходе, дает регулятор с

порядком, равным порядку ОУ [9]. Используемый метод не позволяет получить ПИД регулятор, который обладает такими же параметрами робастности и удовлетворял тем же критериям качества, что и регулятор полного порядка. Возможны два направления аппроксимации:

- обеспечить, по возможности, качество управления и пожертвовать робастностью;
- обеспечить робастность и пожертвовать качеством.

Поскольку используемая модель объекта управления обладает лишь частичной структурной неопределенностью, требования робастности не являются критичными и аппроксимация ПИД регулятора на основе разложения в ряд Маклорена обеспечивает, по возможности, качество и жертвует робастностью.

Предположим, что исходный полноразмерный оптимальный регулятор  $K = W_1 K_\infty W_2$  задан в пространстве состояний следующим образом

$$\begin{cases} \dot{x} = A_k x + B_k u \\ u = C_k x + D_k y \end{cases}$$

где  $A_k \in R^{n \times n}$ ,  $B_k \in R^{n \times p}$ ,  $C_k \in R^{q \times n}$ ,  $D_k \in R^{q \times p}$ .

Пусть ранг матрицы  $A_k$  будет равен  $r$ . Кратность нулевого собственного значения  $A_k$  будет  $n-r$  и существует  $n-r$  линейно независимых собственных векторов для этого нулевого собственного значения. Найдем теперь преобразование подобия  $T$  такое, что

$$TA_k T^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix},$$

где  $A_k$  невырождена. Это преобразование подобия  $T$  может быть вычислено, используя декомпозицию собственных чисел матрицы  $A_k$  [4, 8]. С этим  $T$  новая реализация в пространстве состояний задается в виде

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \tilde{A}_k \tilde{x} + \tilde{B}_k u \\ u = \tilde{C}_k \tilde{x} + \tilde{D}_k y \end{cases}$$

где  $\tilde{A}_k = TA_k T^{-1}$ ,  $\tilde{C}_k = C_k T^{-1} = [C_1 \ C_2]$ ,  $\tilde{D}_k = D_k$ ,  $\tilde{B}_k = TB_k = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$ .

ПИД аппроксимация в форме

$$K_{PID}(s) = K_p + K_i / s + K_d s \quad (5)$$

может быть получена путем рассмотрения первых членов ряда Маклорена для регулятора по переменной  $s$ :

$$K(s) = \tilde{C}_k \begin{bmatrix} sI & 0 \\ 0 & sI - A_2 \end{bmatrix} \tilde{B}_k = \frac{C_1 B_1}{s} + (D_k - C_2 A_2^{-1} B_2 - C_2 A_2^{-2} B_2 s + \dots$$

Итак, для регулятора (5) получаем

$$K_p = D_k - C_2 A_2^{-1} B_2, \quad K_i = C_1 B_1, \quad K_d = -C_2 A_2^{-2} B_2. \quad (6)$$

При аппроксимации предполагается  $s \ll \underline{\sigma}(A_2)$ , что характеризует поведение на низких частотах [8]. Таким образом, основанный на рассмотренной процедуре аппроксимации результирующий ПИД регулятор может достигать хорошей аппроксимации регулятора полного порядка (4) на низких частотах. Кроме того, можно ожидать, что результирующий ПИД регулятор будет сохранять качество парирования возмущений регулятора высокого порядка.

В нашем случае полноразмерный регулятор  $K$  аппроксимируется ПИД регулятором со следующими коэффициентами

$$K_p = \begin{bmatrix} -0.1094 & 0.1085 \\ -0.5942 & 0.5935 \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} -0.5139 & 0.5139 \\ 2.8199 & -2.8193 \end{bmatrix},$$

$$K_d = \begin{bmatrix} -0.1201 & 0.1199 \\ -0.3214 & 0.3216 \end{bmatrix}.$$

В системах управления выращиванием ЩГК в большинстве случаев применяется ПИ регулятор, что связано со спецификой процесса роста.

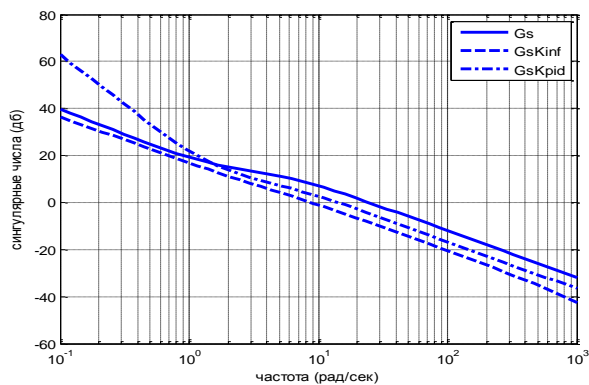


Рис. 3. – Сингулярные значения обобщенного объекта  $G_s$  и разомкнутой системы с регуляторами  $K_\infty$  (штриховая линия) и  $K_{PI}$  (штрих пунктирная линия)

Сингулярные значения обобщенного объекта  $G_s$  и разомкнутой системы управления с регуляторами  $K_\infty$  и  $K_{PI}$  приведены на рисунке 3. Из графиков следует, что оба регулятора имеют близкие характеристики в пределах полосы пропускания. В области частоты среза их поведение практически не отличается. Анализ частотных характеристик замкнутой системы с регулятором  $K_{PI}$  (рис. 4) показывает, что наблюдается некоторое ухудшение свойств системы с ПИД регулятором в области высоких частот. Графики сингулярных значений функции дополнительной чувствительности и функции чувствительности (штриховые линии) канала управления диаметром растущего кристалла также показывают, что в замкнутой системе управления с регулятором  $K_{PI}$  нет и заметного ухудшения робастных свойств.

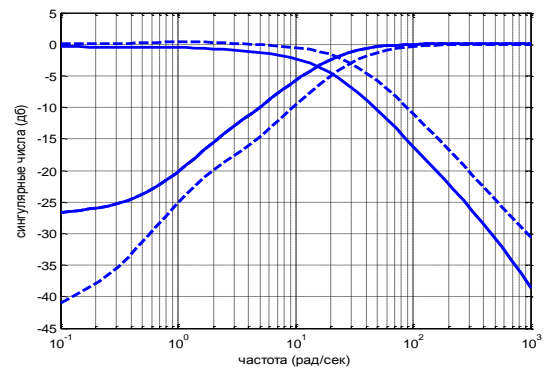


Рис. 4. – Сингулярные значения функции дополнительной чувствительности и функции чувствительности канала управления диаметром растущего кристалла замкнутой системы с регуляторами  $K_\infty$  (сплошные линии) и  $K_{PI}$  (штриховые линии)

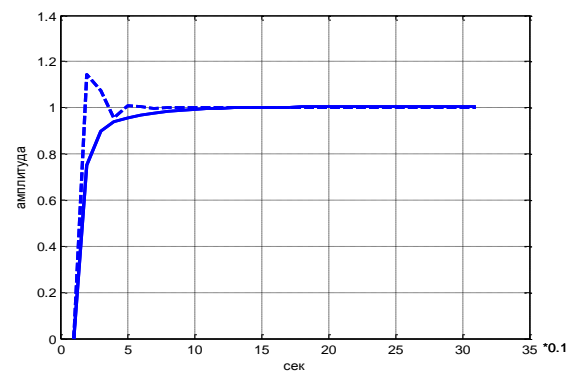


Рис. 5. – Переходная характеристика канала управления диаметром растущего кристалла замкнутой системы с регуляторами  $K_\infty$  (сплошная линия) и  $K_{PI}$  (штриховая линия)

Графики переходной характеристики канала управления замкнутой системы с регуляторами  $K_\infty$  (сплошная линия) и  $K_{PI}$  (штриховая линия) (рис. 5) показывают, что в системе с регулятором  $K_{PI}$  появилось перерегулирование. Величина перерегулирования приблизительно 18%, при этом изменение длительности переходного процесса фактически не произошло. Такое перерегулирование, при полученной длительности переходного процесса вполне допустимо в системе управления диаметром монокристалла величиной до 300 мм.

**Выводы.** Предложенный косвенный метод синтеза и настройки регулятора низкого порядка и заданной структуры на основе разложения в ряд Маклорена оптимального регулятора полного порядка, синтезированного  $H_\infty$  - методом формирования контура, позволяет получить ПИД регулятор, который может быть успешно использован в управлении процессами выращивания ЩГК. Регулятор обладает параметрами качества, сравнимыми с параметрами регулятора полного порядка в рабочем диапазоне частот. Параметры робастности полученного ПИД регулятора удовлетворяют требованиям, наложенным используемой моделью объекта управления.

**Список литературы:** 1. Горилецкий В. И. Рост кристаллов / Горилецкий В. И., Гринев В. В., Заславский Б. Г. и др. // Харьков: АКТА. – 2002. – 535 с. 2. Суздаль В. С. Сцинтилляционные монокристаллы: автоматизированное выращивание / Суздаль В. С., Стаоник П. Е., Герасимчук Л. И., Епифанов Ю. М. // Сер. Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники. – Харьков: ИСМА. – 2009. – 260 с. 3. Суздаль В. С. Оптимизация управления процессами выращивания сцинтилляционных монокристаллов / Суздаль В. С., Епифанов Ю. М. // Сер. Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники. – Харьков: ИСМА. – 2015. – 111 с. 4. Бойченко А. П. Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры / Бойченко В. А., Курдюков А. П., Тимин В. Н. и др. // Управление большими системами – Москва: ИПУ РАН, –2007 – Вып. 19. – 23–126 с. 5. McFarlane D. C., Glover K. A loop shaping design procedure using  $H_\infty$  synthesis // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1992. – Vol. 37 – 759 – 769 p. 6. Курдюков А. П. Синтез робастного  $H_\infty$ -регулятора для управления энергетической котельной установкой / Курдюков А. П., Тимин В. Н. // Управление большими системами. – М.: ИПУ РАН, 2011. – Вып. 25. – 179–214 с. 7. Zames G. Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses / G. Zames // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1981. – V. AC–26, № 2. – 301–320 p. 8. Tan W. Multivariable Robust Controller Design for Boiler System, / Tan W., Marquez H. J., Chen T. // IEEE Transactions on Automatic Control System Technology. – 2002. – Vol.10. – №5. – 735–742 p. 9. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егунова. – Москва.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с

**Bibliography (transliterated):** 1. Gorileckij V. I. *Rost kristallov* / Gorileckij V. I., Grinev V. V., Zaslavskij B. G. i dr.]. – Kharkov: AKTA,

2002. – 535 p. 2. Suzdal' V. S. *Scintilljacionnye monokristally: avtomatizirovannoe vyrashhivanie* / Suzdal' V. S., Stadnik P. E., Gerasimchuk L. I., i dr. // Ser.: Sostojanie i perspektivy razvitiya funkcional'nyh materialov dlja nauki i tehniki. – Kharkov: ISMA, –2009. – 260 p. 3. Suzdal' V. S. *Optimizacija upravlenija processami vyrashhivaniya scintilljacionnyh monokristallov* / Suzdal' V.S., Epifanov Ju.M. // Ser.: Sostojanie i perspektivy razvitiya funkcional'nyh materialov dlja nauki i tehniki. – Kharkov: «ISMA», –2015. – 111 p. 4. Bojchenko V. A. *Nekotorye metody sinteza reguljatorov ponizhennogo porjadka i zadanoj struktury* / Bojchenko V. A., Kurdjukov A. P., Timin V. N. i dr. // Upravlenie bol'shimi sistemami – Moscow: IPU RAN, –2007. – Вып. 19. – 23–126 p. 5. McFarlane D. C. *A loop shaping design procedure using  $H_\infty$  synthesis* / McFarlane D. C., Glove K. // IEEE Transactions on Automatic Control. Vol. 37. –1992.– 759 – 769 p. 6. Kurdjukov A. P. *Sintez robastnogo -reguljatora dlja upravlenija jenergeticheskoj kotel'noj ustanovkoj* / Kurdjukov A. P., Timin V. N. // Upravlenie bol'shimi sistemami. – Moscow: IPU RAN, –2011. – Вып. 25. – 179–214 p. 7. Zames G. *Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses* / Zames G. // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1981. – V. AC–26, no 2. – 301–320 p. 8. Tan W. *Multivariable Robust Controller Design for Boiler System* / Tan W., Marquez H. J., Chen T. // IEEE Transactions on Automatic Control System Technology. – 2002. – Vol.10. – no 5. – 735–742 p. 9. *Metody robastnogo, nejro-nechetkogo i adaptivnogo upravlenija* / Pod red. N. D. Egunova. – Moscow: Izd-vo MG TU im. N. Je. Baumana, – 2002. – 744 p

Поступила (received) 25.02.2016

**Суздаль Виктор Семенович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, ИСМА НАН Украины, ведущий научный сотрудник лаборатории систем управления отдела технологии выращивания монокристаллов; тел.: (057) 341-01-45; email: suzdal@isma.kharkov.ua.

**Suzdal Victor Semenovich** – Doctor of Engineering, Senior Researcher, ISMA NAS of Ukraine, Leader researcher of control systems Lab of single crystal technology department; ph. (057) 341-01-45; email: suzdal@isma.kharkov.ua

**Соболев Александр Викторович** – кандидат технических наук, ИСМА НАН Украины, научный сотрудник лаборатории систем управления отдела технологии выращивания монокристаллов: тел.: (057) 341-01-45; email: sobolev@isma.kharkov.ua.

**Sobolev Aleksandr Victorovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), ISMA NAS of Ukraine, Research Associate of control systems Lab of single crystal technology department: ph. (057) 341-01-45; email: sobolev@isma.kharkov.ua.

**Тавровский Игорь Игоревич** – кандидат технических наук, ИСМА НАН Украины, старший научный сотрудник лаборатории систем управления отдела технологии выращивания монокристаллов: тел. (057) 341-01-45; email: tawr@isma.kharkov.ua.

**Tavrovskiy Ihor Ihorovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), ISMA NAS of Ukraine, Senior Researcher of control systems Lab of single crystal technology department: ph. (057) 341-01-45; email: tawr@isma.kharkov.ua..