

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВЫРАЩИВАНИЕМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ

В.С. СУЗДАЛЬ, Ю.М. ЕПИФАНОВ

Рассмотрена автоматизированная система робастного управления технологическими процессами получения сцинтилляционных материалов. Построение регуляторов системы управления предложено проводить на основе H_∞ -метода формирования контура управления с последовательными формирующими функциями, позволяющего обеспечить гарантированные «робастность», устойчивость и требуемое качество управления системами кристаллизации, а также оптимальный выбор основных интервалов робастной стабилизации этих систем. Эксплуатация двумерного робастного регулятора на ростовых установках позволила увеличить точность поддержания тепловых условий выращивания при максимальных возмущениях тепловых режимов путем высокой динамической точности процесса управления диаметром кристалла, увеличения степени устойчивости, уменьшения колебательности системы, уменьшения длительности переходных процессов. Улучшено качество монокристаллов и увеличен выход готовой продукции, а, значит, обеспечен гарантированный выход из этих кристаллов качественных детекторов ионизирующих излучений.

ВВЕДЕНИЕ

Крупногабаритные сцинтилляционные монокристаллы (СМК) выращивают в промышленности методом Чохральского, вытягивая кристалл со свободной поверхности расплава на затравку. Исследования процессов выращивания СМК показали, что с увеличением длины растущего образца существенно изменяется характер теплообмена в системе кристалл–расплава (рис. 1), т.е. процесс кристаллизации крупногабаритных монокристаллов, является нестационарным [1].

На рис. 1 приведена схема процесса роста крупногабаритного монокристалла из расплава на различных стадиях. Основные каналы управления: «температура донного нагревателя — диаметр растущего монокристалла»; «температура бокового нагревателя — температура расплава». Основной измерительный канал — «уровень расплава». Длительность процесса роста крупногабаритного (масса ≈ 500 кг) кристалла более 15 суток.

Для решения задачи управления нестационарный процесс роста СМК можно условно разбить на ряд таких временных интервалов (как правило, от 3 до 5), только в пределах которых тепловые условия кристаллизации можно считать квазистационарными с такой неопределенностью объекта управления (ОУ), которая позволяет синтезировать робастные регуляторы для обеспечения на каждом из этих интервалов требуемого качества управления [2].

В реальных условиях производства СМК можно оценить только верхнюю границу отклонения передаточных функций или частотных характерис-

тик объекта управления от номинальных, без точного знания, чем и в какой степени эти отклонения вызваны. Эти неопределенности ОУ, которые принято называть неструктурными, будут рассматриваться в дальнейшем при синтезе робастных регуляторов [3].

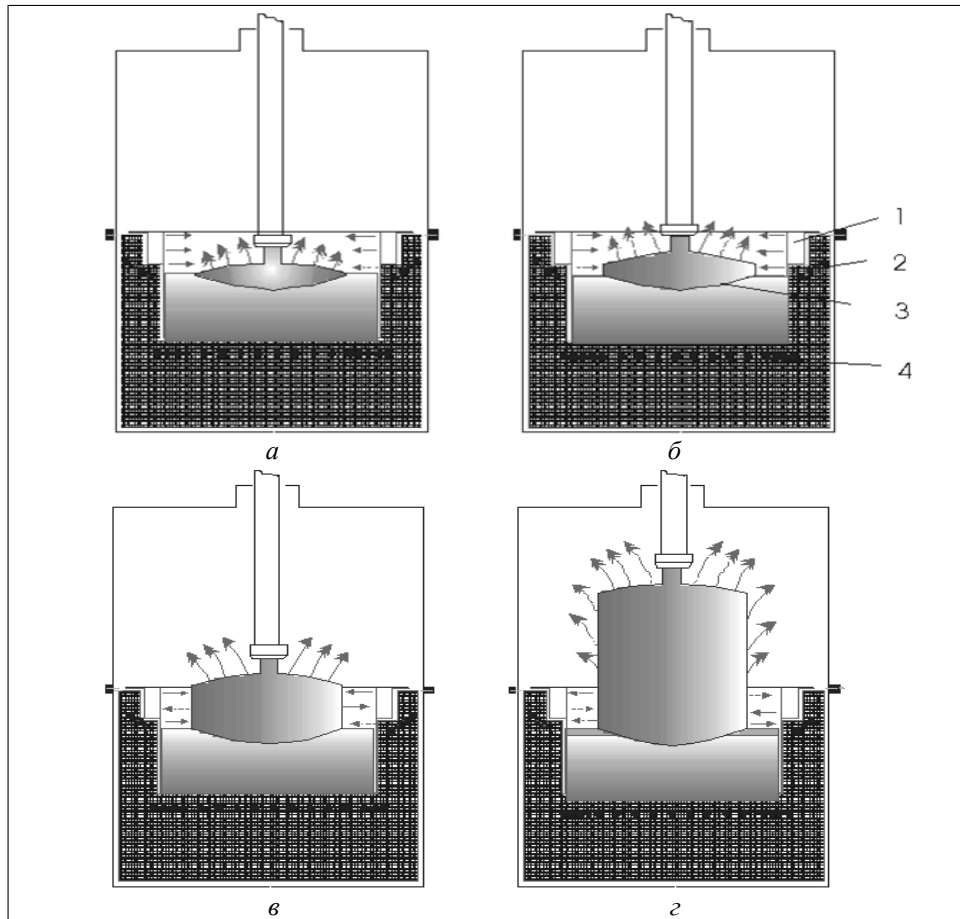


Рис. 1. Нестационарность тепловых условий роста крупногабаритного монокристалла: а — разращивание по диаметру, б — начало роста в длину, в — рост в длину; г — завершение выращивания; 1 — дополнительная вертикальная стенка тигля; 2 — боковой нагреватель, 3 — кристалл, 4 — донный нагреватель

Цель работы — на примере технологического процесса получения сцинтилляционных кристаллов на установках типа «РОСТ» рассмотреть вопросы анализа и синтеза систем автоматизированного управления процессом выращивания СКК, включая методические и инженерно-технические основы построения регуляторов этих СУ, устойчивых к фактически имеющемуся уровню неопределенности в условиях промышленного производства кристаллов.

СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА

Существует ряд методов синтеза робастных систем. Широко используются методы синтеза по нормам пространств Харди [2].

Для решения задачи робастного управления процессом выращивания СМК формулируются требования к устойчивости и качеству управления. По данным наблюдений функционирования процесса кристаллизации в условиях нормальной эксплуатации проводится идентификация ОУ для получения линеаризованной динамической модели объекта управления [4].

Синтез робастного регулятора осуществим H_∞ -методом формирования контура [5]. В методе формирования контура задача робастной стабилизации решается не для исходного, а для обобщенного объекта, образованного с помощью формирующих функций (префильтра и постфильтра), которые используются в этом методе для задания требуемой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) разомкнутого контура. Обобщенный объект представляет собой последовательное соединение передаточных функций двух формирующих функций и исходного номинального объекта управления. Требуемые характеристики качества и робастности замкнутой системы обеспечиваются благодаря выбору соответствующих формирующих функций. Решение задачи робастной стабилизации гарантирует устойчивость замкнутой системы.

На рис. 2 приведена схема замкнутой системы управления (СУ). Внешними входами СУ являются сигналы d_1 на выходе объекта управления G и d_2 на его входе.

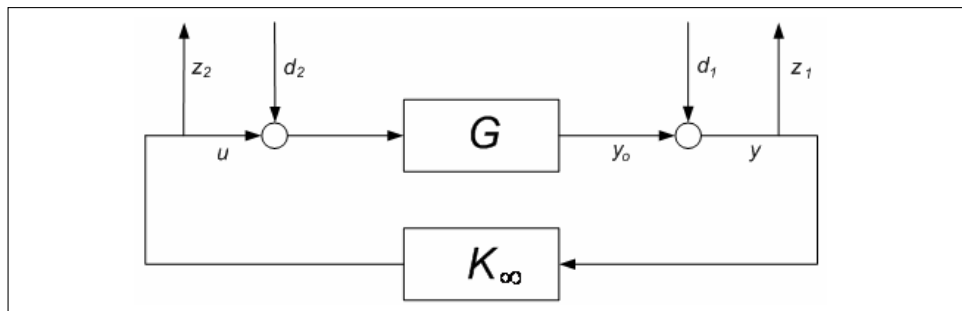


Рис. 2. Замкнутая система управления

Выходом z_1 замкнутой системы является измеряемый выход объекта y , а выходом z_2 — управление u , формируемое регулятором K_∞ в обратной связи. G — передаточная функция объекта управления от сигнала управления u к выходу объекта y_0 .

Для замкнутой СУ на рис. 2 имеем:

$$\begin{bmatrix} z_1(s) \\ z_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{d_1} & G(s) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G(s) \\ I_{d_2} \end{bmatrix} u(s),$$

$$y(s) = [I_{d_1} \quad G(s)] \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} + G(s)u(s),$$

где I_{d_1} и I_{d_2} — единичные матрицы соответствующей размерности.

С учетом формирующих функций W_1 и W_2 передаточная функция замкнутой системы с объектом управления G и регулятором K_∞ в обрат-

ной связи от всех внешних входов w к выходам замкнутой системы z , определяется выражением:

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

где $G_s = W_2 G W_1$ — обобщенный ОУ.

Математическая постановка задачи синтеза регулятора $K(s)$ формулируется как задача H_∞ -оптимизации. Для ОУ, с формирующими функциями W_1 и W_2 , а так же измеряемым выходом y , необходимо синтезировать регулятор $K(s)$ в виде ОС $u(s) = K(s)y(s)$, обеспечивающий минимально возможное значение γ для H_∞ нормы передаточной функции замкнутой системы T_{wz} :

$$\|T_{wz}(G_s K_\infty)\|_\infty = \gamma_{\min}. \quad (2)$$

Задача H_∞ -оптимизации решается для обобщенного объекта G_s , при этом определяется величина максимального запаса робастной устойчивости $\varepsilon_{\max} = \gamma_{\min}^{-1}$. Базисом для H_∞ -формирования контура является тот факт, что регулятор K_∞ не модифицирует желаемую форму контура существенным образом на низких и высоких частотах, если достигнутая ε_{\max} является достаточно малой величиной [5].

Если величина максимального запаса робастной устойчивости $\varepsilon_{\max} < 0,5$, то искомый регулятор определяется в виде

$$K(s) = W_1(s) K_\infty(s) W_2(s). \quad (3)$$

Неопределенность возмущенного объекта с передаточной функцией $G(s)$ относительно номинального объекта $G_n(s)$ определялась в виде мультипликативной неопределенности $UN_m(s) = (G(s) - G_n(s)) / G_n(s)$, при условии $\|UN_m(s)\|_\infty < \infty$ [6]. Для выбора приемлемого интервала управления выращиванием СМК использовался критерий в виде

$$|UN_m(s)| < \left| 1 + \frac{1}{K(s)G(s)} \right|. \quad (4)$$

Это робастный критерий устойчивости [7]. Он удобен для анализа, так как его величина мала на низких частотах, где номинальная модель ОУ обычно известна достаточно точно и является большой на высоких частотах, где номинальная модель ОУ всегда неточная.

Для интервала выращивания монокристалла $CsI(Tl)$ диаметром 500 мм передаточные функции канала «температура донного нагревателя — диаметр растущего монокристалла» как объекта управления [4]:

$$G_1(s) = (6,868s^2 + 0,0687s) / (s^2 + 0,0282s + 4,404e - 005);$$

$$G_2(s) = (6,464s^3 + 0,130s^2 + 0,001s + 8,17e - 008) /$$

$$\begin{aligned} & / (s^3 + 0,047s^2 + 0,001s + 4,664e - 007); \\ G_3(s) &= (1,938s^3 + 0,05s^2 + 0,001s + 1,085e - 006) / \\ & / (s^3 + 0,106s^2 + 0,001s - 2,103e - 006). \end{aligned}$$

На рис. 3 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) объекта управления на интервале выращивания.

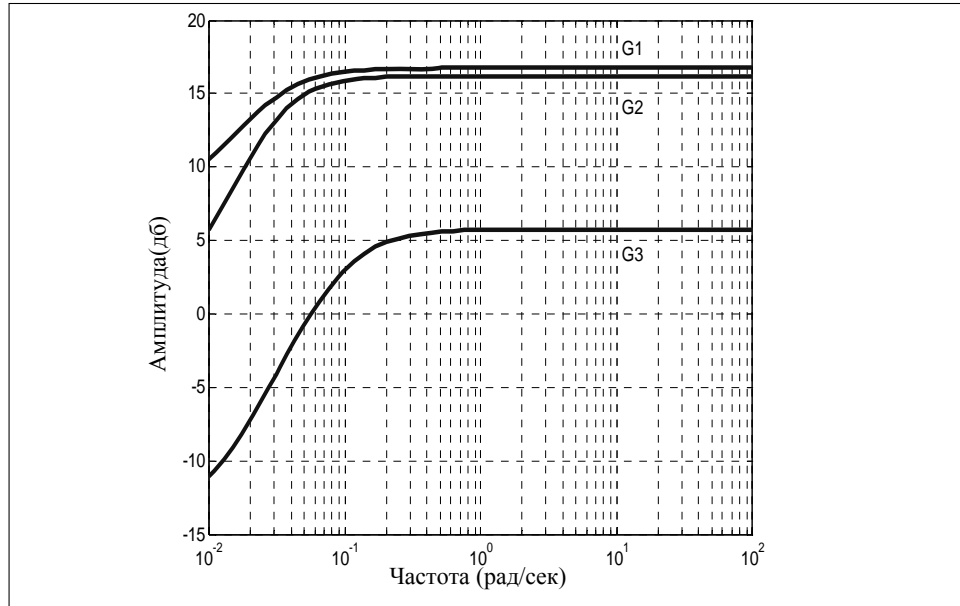


Рис. 3. АЧХ канала «температура донного нагревателя — диаметр монокристалла» на интервале выращивания

Синтез регулятора проводился в среде MATLAB (hinfmix) с префильтром $W_1 = 0,23 / (6,013s + 0,001)$ и постфильтром $W_2 = 17$. В результате синтеза получен регулятор K_∞ при $\varepsilon_{\max} = 0,1115$. Регулятор K_∞ — 5-го порядка. Искомый регулятор $k(s)$, полученный по выражению (3), — 6-го порядка. Замкнутая система управления — 10-го порядка.

Результаты синтеза характеризуют удовлетворительную оценку совместимости требований между качеством переходных процессов и робастной устойчивостью замкнутой системы, а также близость АЧХ обобщенного объекта $G_s = W_2GW_1$ и разомкнутой системы G_sK_∞ с синтезированным регулятором полного порядка. Это подтверждается графиками на рис. 4.

На рис. 5 приведены результаты анализа по критерию (4) робастности по отношению к мультипликативному отклонению $G_n(s)$ на интервале выращивания для синтезированного регулятора $K(s)$. Из рис. 5 следует, что критерий удовлетворяется для возмущенных ОУ $G_2(s)$, $G_3(s)$ (мультипликативная неопределенность UNm_2 , UNm_3). Для дальнейшего управления процессом кристаллизации необходим переход на следующий интервал выращивания и синтез регулятора для нового интервала.

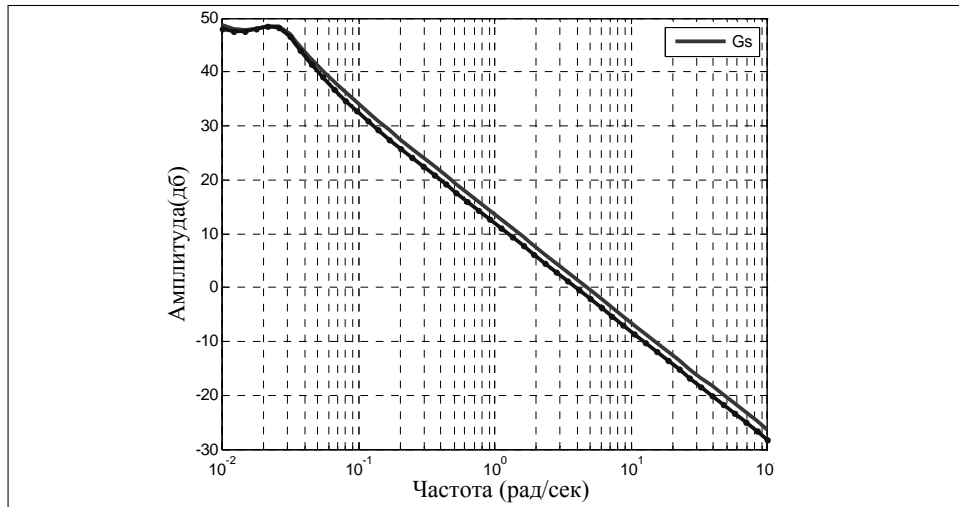


Рис. 4. АЧХ обобщенного объекта $G_s = W_2 G W_1$ и $G_s K_\infty$

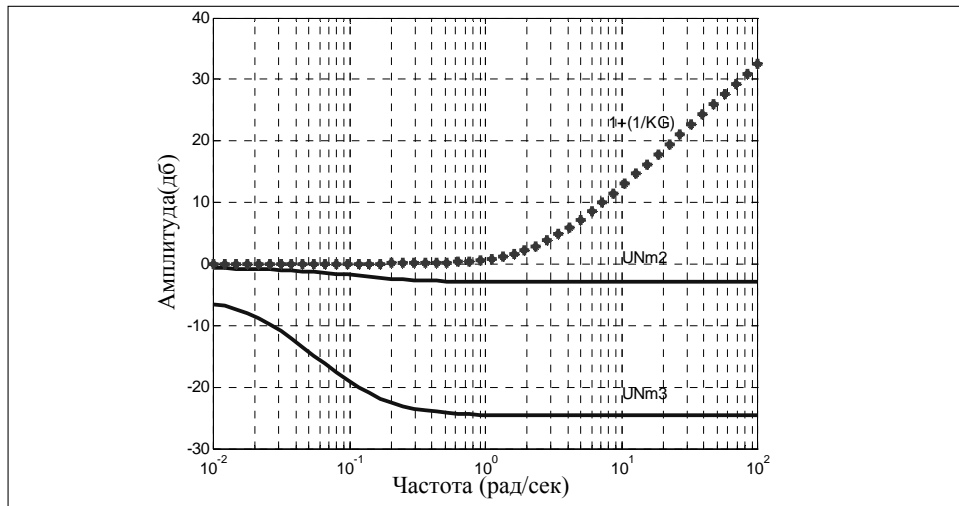


Рис. 5. Анализ условия робастной устойчивости на интервале выращивания для регулятора K 6-го порядка

На рис. 6 приведены АЧХ замкнутой системы управления $T(\omega)$ и функции чувствительности $S(\omega)$ системы с регулятором K и номинальным ОУ $G_1(s)$. Из рис. 6 следует, что АЧХ функции $S(\omega)$ имеет наклон, приблизительно 20 дБ/дек на низких частотах, на частотах, около 10^1 рад/сек этот наклон, уменьшается до 0 дБ и остается таким (без подъема этой функции) на более высоких частотах. Такое поведение функции $S(\omega)$ характеризует удовлетворительное подавление возмущений на низких частотах, а также низкую колебательность замкнутой системы. Уменьшение влияния возмущений является очень важным для рассматриваемой системы, так как основное возмущение на низких частотах — это колебания уровня расплава с частотой 1,0–5,0 рад/сек (в результате возникновения вибраций при вращении тигля [1]). Анализ функции $T(\omega)$

показывает, что в системе будет обеспечено подавление высокочастотных внешних возмущений (наклон, приблизительно — 20 дБ/дек на высоких частотах), в частности, шумов измерений.

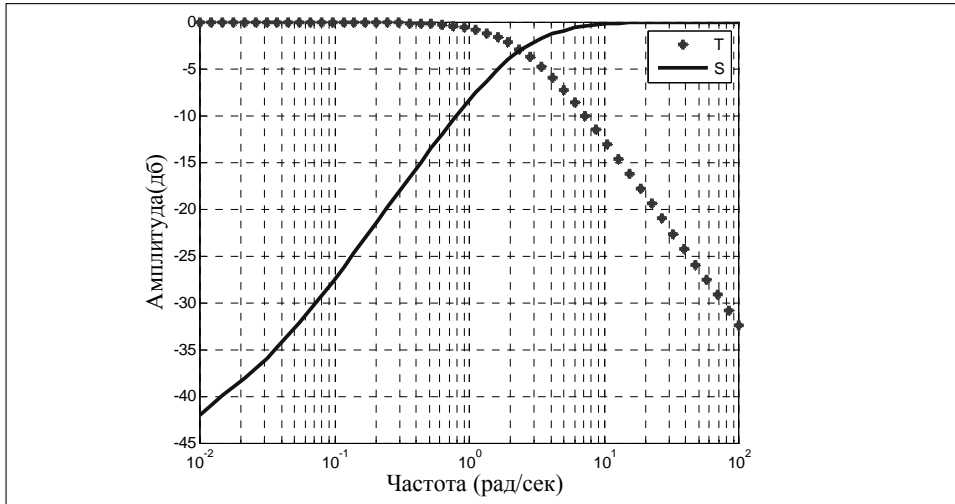


Рис. 6. АЧХ функций замкнутой системы T и чувствительности S

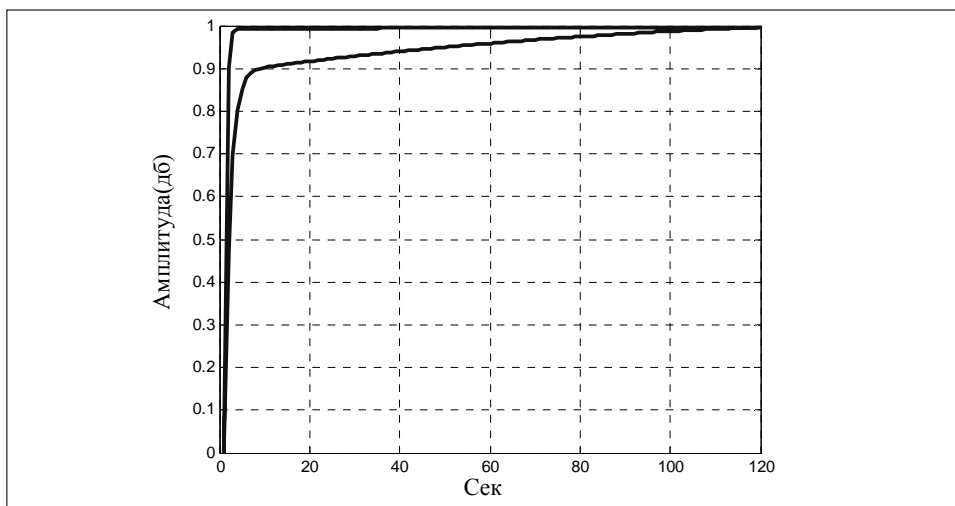


Рис. 7. Переходные характеристики замкнутой системы

На рис. 7 приведены переходные характеристики замкнутой системы управления с синтезированным регулятором $K(s)$ для номинального $G_1(s)$ (верхняя кривая) и возмущенного $G_3(s)$ (в конце интервала) объектов управления.

Из рис. 7 следует, что на выбранном интервале выращивания длительность переходного процесса изменяется от 5 сек. до 80 сек. Это вполне удовлетворительно для системы управления выращиванием крупногабаритных СМК.

Таким образом, система управления на всем интервале выращивания сохраняет устойчивость и необходимое качество управления процессом

роста. Это подтверждается практикой выращивания на установках типа «РОСТ». СУ кристаллизацией обеспечила при выращивании монокристаллов $CsI(Tl)$ устойчивый рост кристалла со скоростью до 4,0 мм/час и точность поддержания диаметра до 1%.

ВЫВОДЫ

Проведен синтез робастного стабилизирующего регулятора для оптимизации управления процессом выращивания крупногабаритных монокристаллов на квазистационарных интервалах кристаллизации. Оптимизация управления подтверждена эксплуатацией робастных регуляторов в условиях промышленного производства монокристаллов, в результате которой выход крупногабаритных кристаллов СМК увеличился в среднем на 20%, при этом, более 80% общей массы выращиваемых СМК признаются пригодными для практического применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / [Под ред. Н.Д. Егулова]. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 744 с.
3. Перельмутер В.М. Пакеты расширения Matlab. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. — 222 с.
4. Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Соболев А.В.. Параметрическая идентификация VARMAX моделей процесса кристаллизации крупногабаритных монокристаллов // Нові технології. — Кременчуг: Кр. ун-т, 2009. — № 4 (26). — С. 23–29.
5. Баландин Д.В. Линейно-квадратичные и γ -оптимальные законы управления по выходу // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 6. — С. 5–14.
6. Поляк Б.Т. Робастная устойчивость и управление. — М.: Наука, 2002. — 303 с.
7. Дорф Р. Современные системы управления. — М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. — 832 с.

Поступила 18.10. 2011