

Рис. 2. Уточнение границы зрачка методом Daugman

#### 4. Выводы

В данной работе приводится решение научной задачи компьютерной идентификации зрачка на основании анализа фронтального изображения глаза. Проведенный анализ состояния проблемы компьютерной идентификации радужки показал, что в настоящее время для решения задач автоматического обнаружения и распознавания не выработано единого и надежного подхода. Для дальнейшего развития и исследований избраны следующие методы решения поставленной задачи, которая разделяется на два последовательных этапа – предварительное обнаружения зрачка методом AdaBoost и уточнение границ методом Daugman. В дальнейшем для поиска внешней границы ириса и прикрывающего нижнего и верхнего века планируется использовать аналогичные алгоритмы.

Предложенные в работе методы реализованы в программном продукте, который осуществляет поиск зрачка на изображении глаза. Данный программный продукт является частью автоматического рабочего места иридолога.

**Список литературы:** 1. Zhu D., Moore S.T. and Raphan T. Robust pupil center detection using a curvature algorithm // Computer methods and programs in biomedicine. – 1999. – Vol. 59. – №3. – pp. 145–157. 2. Кузьмук В.В., Волошин М.В. Визначення впливу моделі опису об'єкта на достовірність його ідентифікації в системах комп'ютерного зору // МЕЕС'10 – 2010. – с. 69-72. 3. Волошин М.В. Моделі опису об'єкта та достовірність ідентифікації в системах комп'ютерного зору // ЕЕ JET. – 2010. – №4/7 (46) – с. 56-63. 4. John Daugman, High Confidence Visual Recognition of Persons by a Test of Statistical Independence // IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 15, no. 11, p. 1148–1161, November 1993.

*Поступила в редколлегию 23.02.2011*

**УДК 621.3.078.3**

**В. С. СУЗДАЛЬ**, докт. техн. наук, вед. науч. сотр., Институт  
сцинтилляционных материалов НАН Украины, г. Харьков

**Ю.М. ЕПИФАНОВ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт  
сцинтилляционных материалов НАН Украины, г. Харьков

### **МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЫРАЩИВАНИЕМ КРУПНОГАБАРИТНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ**

Для кристалізації великогабаритних монокристалів проведений синтез системи модального керування з регулятором низького порядку, яка забезпечує робастну стійкість і необхідну якість керування.

Ключові слова: великогабаритний монокристал, метод Чохральського, синтез регулятора, модальне керування, робастна стійкість.

Для кристаллизации крупногабаритных монокристаллов проведен синтез системы модального управления с регулятором низкого порядка, которая обеспечивает робастную устойчивость и требуемое качество управления.

Ключевые слова: крупногабаритный монокристалл, метод Чохральского, синтез регулятора, модальное управление, робастная устойчивость.

The synthesis of modal control system with low-order controller for crystallization of large size single crystals, have been proposed. This system gives the robust stability and quality of control.

Key words: the large size, the single crystal, Czochralski method, the synthesis of controller, the robust stability.

## 1. Введение

Крупногабаритные щелочногалоидные монокристаллы (ЩГК) выращивают в промышленности методом Чохральского на установках типа «РОСТ», в которых для оценки диаметра растущего кристалла применяют метод измерения падения уровня расплава в результате быстрого дискретного подъема кристалла из расплава на малую величину [1]. Известно, что в процессе выращивания ЩГК, сопровождаемом заменой расплава кристаллизуемой средой и перераспределением масс расплава и кристалла в рабочем пространстве ростовой установки, изменяются все характеристики теплового поля – значения температур расплава и кристалла, параметры теплопереноса, положение фронта кристаллизации и величина градиента температуры в области фронта кристаллизации, т.е. процесс кристаллизации является нестационарным.

Исследования процесса кристаллизации крупногабаритных ЩГК показывают, что этот процесс можно условно разбить на несколько интервалов, в пределах которых его тепловые условия являются квазистационарными. В этом случае задачу управления нестационарным процессом можно свести к управлению объектом с неопределенностью. Проектируемая система управления должна обеспечивать приемлемое качество переходных процессов, необходимую точность и грубость (робастность) к неопределенности модели объекта управления (ОУ). Следовательно, решение задачи высококачественного управления процессом кристаллизации ЩГК следует искать, во-первых, в классе робастных систем управления и, во-вторых, в классе систем модального управления, которые на интервале выращивания обеспечат устойчивость и высокое качество управления. Решение этой задачи проведено на основе синтеза стабилизирующего регулятора  $H_\infty$  - методом формирования контура [3].

## 2. Синтез робастного регулятора

Пусть 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

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

где  $y$  – выход объекта управления  $G$ ,  $u$  – управление, которое формируется регулятором  $K_\infty$ ,  $G_s = W_2 G W_1$  – обобщенный объект управления с формирующими функциями  $W_1$  и  $W_2$ , которые используются в методе формирования контура для задания АЧХ разомкнутого контура.

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

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

Задача  $H_\infty$  - оптимизации решается для обобщенного объекта  $G_s$ , при этом определяется величина максимального запаса робастной устойчивости  $\varepsilon_{\max} = \gamma_{\min}^{-1}$ . Базисом для  $H_\infty$  - формирования контура является тот факт, что  $K_\infty$  не модифицирует желаемую форму контура существенным образом на низких и высоких частотах, если достигнутая  $\varepsilon_{\max}$  является достаточно малой величиной. Если величина максимального запаса робастной устойчивости  $\varepsilon_{\max} < 0.5$ , то искомый регулятор определяется в виде  $K(s) = W_1(s)K_\infty(s)W_2(s)$ .

Неструктурная неопределенность возмущенного объекта с передаточной функцией  $G(s)$  относительно номинального объекта  $G_n(s)$  определялась в виде мультипликативной неопределенности

$$UNm_n(s) = (G(s) - G_n(s)) / G_n(s) \quad (1)$$

при  $\|UNm(s)\|_\infty < \infty$ . Для выбора интервала управления выращиванием ЦГК использовался робастный критерий устойчивости в виде

$$|UNm(s)| < \left| 1 + \frac{1}{K(s)G(s)} \right|. \quad (2)$$

Известно, что характер переходных процессов в системе определяется расположением корней  $s_i$  ее характеристического полинома. В работе [4] рассматривается задача синтеза  $H_\infty$  - оптимального регулятора с расположением полюсов замкнутой системы в ограниченной выпуклой области на комплексной плоскости  $s$ . Требования к расположению полюсов передаточной функции замкнутой системы в некоторой области на комплексной плоскости позволяют для систем управления кристаллизацией задавать: ограничения на быстродействие, которое может быть оценено по степени устойчивости (абсолютной величине действительной части ближайшего к мнимой оси корня);

запас устойчивости, который может быть оценен по колебательности (максимальному отношению мнимой части корня к его действительной части) или параметру затухания (коэффициенту демпфирования); максимальную

угловую частоту собственных колебаний системы (максимальную абсолютную величину мнимой части корня).

Для систем управления выращиванием крупногабаритных монокристаллов в качестве области расположения полюсов замкнутой системы на комплексной плоскости был выбран конический сектор с углом  $\varphi$  наклона его ребра к действительной оси  $Re z$  и с вершиной на расстоянии  $\eta$  от мнимой оси  $Im z$ . Размещение полюсов передаточной функции замкнутой системы в этой области гарантирует затухание колебаний переходных процессов не менее  $\eta$ , коэффициент демпфирования – не менее  $\xi = \cos \varphi$  (или колебательность – не более  $tg \varphi$ ). Практический опыт выращивания крупногабаритных монокристаллов CsI(Tl) показывает, что система управления должна обеспечивать точность стабилизации диаметра ЩГК до 2%, длительность переходного процесса менее 120 сек, перерегулирование до 15%.

Для интервала выращивания монокристалла CsI(Tl) диаметром 500 мм передаточные функции канала «температура донного нагревателя – диаметр растущего монокристалла» как объекта управления [2]:

$$G_1(s) = (6.868s^2 + 0.06868s)/(s^2 + 0.02819s + 4.404e - 005),$$

$$G_2(s) = (6.464s^3 + 0.1301s^2 + 0.0006628s + 8.17e - 008)/(s^3 + 0.0473s^2 + 0.0006113s + 4.664e - 007),$$

$$G_3(s) = (1.938s^3 + 0.04961s^2 + 0.0004109s + 1.085e - 006)/(s^3 + 0.1056s^2 + 0.001047s - 2.103e - 006).$$

На рис. 1 приведены АЧХ этих ОУ.

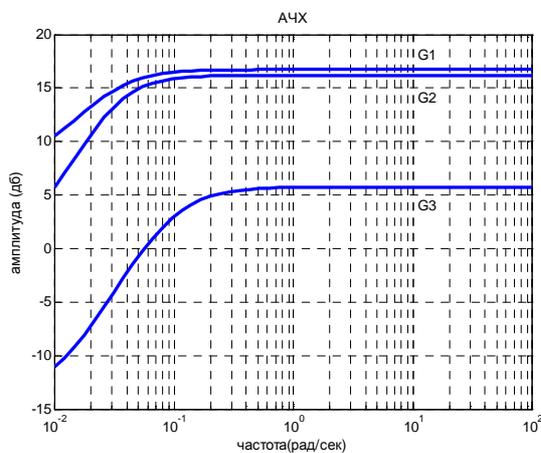


Рис. 1. АЧХ канала «температура донного нагревателя – диаметр монокристалла» для интервала выращивания

Результаты синтеза характеризуют удовлетворительную оценку совместимости требований между качеством переходных процессов и робастной устойчивостью замкнутой системы, а также близость АЧХ обобщенного объекта и разомкнутой системы с синтезированным регулятором полного порядка. На рис. 2 приведены результаты анализа условия робастной устойчивости на

Синтез робастного стабилизирующего регулятора проводился с использованием команд `hinfmix` и `lmiregion` среды MATLAB. Параметры синтеза: префильтр  $W_1 = 0.16/(9.1s + 0.01)$ , постфильтр  $W_2 = 19$ ,  $\eta = -0.000002$ ,  $\varphi = 50^\circ$ . Номинальный объект управления  $G_1(s)$ .

В результате синтеза получен регулятор  $K_\infty(s)$  3-го порядка при  $\varepsilon_{\max} = 0.1$ . Регулятор  $K(s)$  4-го порядка. Замкнутая система управления 6-го порядка.

интервале выращивания, согласно выражению (2), для синтезированного регулятора  $K(s)$  4-го порядка, из которого видно, что возмущенный ОУ  $G_2(s)$ ,  $G_3(s)$

(мультипликативная неопределенность  $UNm_2$ ,  $UNm_3$ , согласно выражению (1)) близко подходит к границе устойчивости (красная кривая). Поэтому, для дальнейшего управления процессом кристаллизации необходим переход на следующий интервал выращивания и синтез регулятора для нового интервала.

На рис. 3 приведены функции дополнительной чувствительности  $T(j\omega)$  системы и функции чувствительности  $S(j\omega)$  с регулятором  $K$  и номинальным ОУ.

Из рис. 3 следует, что АЧХ функции чувствительности имеют наклон примерно 20 дБ/дек на низких частотах и остаются меньше 0 дБ для частот меньших, чем  $10^1$  рад/сек без подъема функции чувствительности на более высоких частотах, что характеризует удовлетворительное подавление возмущений на низких частотах и низкую колебательность замкнутой системы. Это очень важно, так как в рассматриваемой системе основное возмущение на низких частотах – это колебания уровня расплава с частотой 1.0-5.0 рад/сек. Анализ  $T(j\omega)$  показывает аналогичные результаты: в системе будет обеспечено подавление высокочастотных внешних возмущений, в частности, шумов измерений, высокое демпфирование замкнутой системы.

На рис. 4 приведены переходные характеристики замкнутой системы управления с синтезированным регулятором  $K(s)$  4-го порядка и объектами управления: номинальным  $G_1(s)$  и возмущенным  $G_3(s)$  (нижняя кривая). Из рис. 4 следует, что на выбранном интервале выращивания длительность переходного процесса изменяется от 5 сек до 100 сек. Это вполне допустимо для управления выращиванием ЦГК.

Синтезированная система управления редуцировалась методом приближения по ганкелевой норме. Использовались функции `sysbal` и `hankmr`. Функция `sysbal` строит сбалансированную реализацию для заданной системы, которая связана с граммианами управляемости и наблюдаемости. Функцией `hankmr` систему

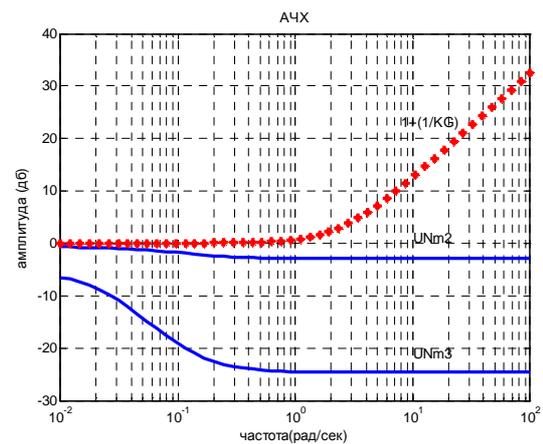


Рис. 2. Анализ условия робастной устойчивости на интервале выращивания для регулятора  $K(s)$  4-го порядка

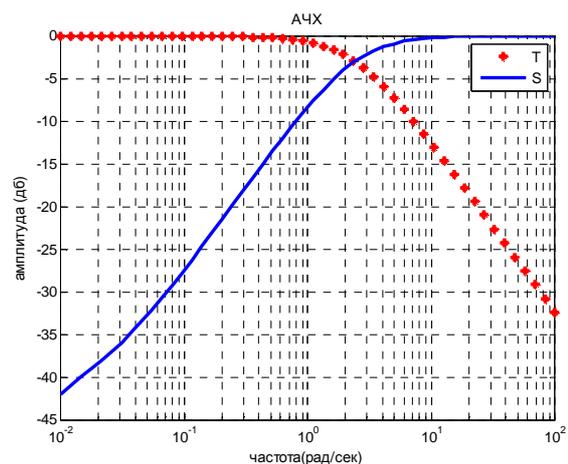


Рис. 3. АЧХ функции дополнительной чувствительности  $T$  и функции чувствительности  $S$

полного порядка можно редуцировать до системы, являющейся оптимальным приближением ганкелевой нормы желаемого порядка  $k$ . Входным аргументом функции `hankmg` является сбалансированная реализация исходной системы, а также ее ганкелевы сингулярные значения, предварительно найденные с помощью функции `sysbal`. Точность редукции оценивалась максимальным ганкелевым сингулярным числом  $\sigma_{\max}$  для разности исходной и редуцированной систем.

Редукция проводилась по функции  $T(s)$  и по редуцированной системе восстанавливалась модель регулятора  $K(s)$  при условии, что модель ОУ не изменилась. Редуцированная замкнутая система управления 5-го порядка при  $\sigma_{\max} = 1.4921e-006$ . Ее полюса представлены в таблице.

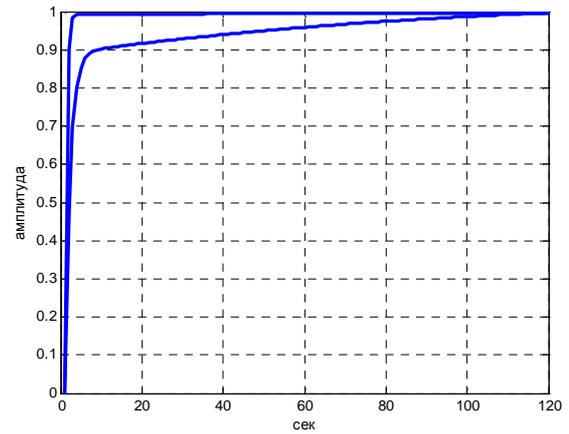


Рис. 4. Переходные характеристики замкнутой системы

Таблица  
Полюса редуцированной замкнутой системы управления

Real	imagina ry	frequen cy	dampin g
- 3.7464e+004	0.0000e +000	3.7464e +004	1.0000e +000
- 2.4044e+000	0.0000e +000	2.4044e +000	1.0000e +000
- 1.1313e-002	0.0000e +000	1.1313e -002	1.0000e +000
- 5.1535e-003	0.0000e +000	5.1535e -003	1.0000e +000
- 1.4588e-006	0.0000e +000	1.4588e -006	1.0000e +000

Редуцированный регулятор  $K(s)$  3-го порядка

$$K_r = \frac{2.173e - 007s^3 + 0.6643s^2 + 1.302e004s + 84.93}{s^3 + 3.746e004s^2 + 225.8s + 0.2071}$$

Исследования устойчивости и качества системы управления 5-го порядка с редуцированным регулятором показывают, что временные и частотные характеристики этой системы практически совпадают с характеристиками системы полного порядка.

### 3. Выводы

Для кристаллизации крупногабаритных монокристаллов проведен синтез системы модального управления с регулятором низкого порядка, которая обеспечивает робастную устойчивость и требуемое качество процесса управления на интервале выращивания.

**Список литературы:** 1. Суздаль В.С.. Сцинтилляционные монокристаллы: автоматизированное выращивание. / Суздаль В.С., Стадник П.Е., Герасимчук Л. И., Епифанов Ю.М. // Сер. Состояние и перспективы развития функцион. матер. для науки и техники. – Харьков: ИСМА, 2009.– 260 с. 2. Суздаль В.С. Параметрическая идентификация VARMAX моделей процесса кристаллизации крупногабаритных монокристаллов / В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, А. В. Соболев, И. И. Тавровский // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2009. – № 4 (26). – С. 23–29. 3. Mcfarlane D.C. Loop Shaping Design Procedure Using  $H_\infty$  Synthesis / Mcfarlane D.C., Glover K. // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1992. – Vol. 37. – № 6. – PP. 759–769. 4. Chilalin M., Gahinet P.  $H_\infty$  Design with Pole Placement Constraints: An LMI Approach // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1996. – Vol. 41. – № 3. – PP. 358–367.

*Поступила в редколлегию 23.02.2011*

**УДК 519.178, 004.942, 57.087**

**Е. А. ТАРАНЕНКО**, директор ООО «Алтимед», академик  
Международной академии информатизации (МАИ), г. Киев  
**В. В. КУЗЬМУК**, докт. техн. наук, проф., академик Международной  
академии информатизации (МАИ), г. Киев  
**А. С. КОВАЛЕНКО**, докт. мед. наук, проф., Международный  
научно-учебный центр информационных технологий и  
систем НАН Украины, г. Киев  
**Е.Г. ФИЛЮНОВА**, врач ООО «Алтимед»  
**Б. М. ЄРЕМЕЄВ**, асп., Институт проблем моделирования в энергетике  
им. Г.Е. Пухова НАНУ, г. Киев  
**А. В. КУЗЬМУК**, асп., Институт проблем моделирования в энергетике  
им. Г.Е. Пухова НАНУ, г. Киев

## **АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В АППАРАТЕ «LANTA ZM»**

В статье представлен анализ и моделирование параллельного алгоритма работы аппарата «Lanta-Zm» с помощью Управляющих сетей Петри. Также были выявлены структурные элементы и функциональные связи, введение которых позволяет значительно повысить надежность медицинского прибора.

Ключевые слова: частотно-резонансная диагностика и терапия, Управляющие сетей Петри, параллельные процессы и параллельные, взаимосвязанные алгоритмы.

У статті представлено аналіз та моделювання паралельного алгоритму роботи приладу «Lanta-Zm» за допомогою Керуючих мереж Петрі. Також було виявлено структурні елементи і функціональні зв'язки, при використанні яких є можливість значно підвищити надійність медичного апарату.

Ключові слова: частотно-резонансна діагностика і терапія, Керуючі мереж Петрі, паралельні процеси, паралельні, взаємопов'язані паралельні алгоритми.

The article presents the analysis and modeling of parallel algorithm apparatus «Lanta-Zm» by means Steuernetze SN. Also it was assign structural and functional relationships, using them we can improve the reliability of medical apparatus.

Keywords: resonant frequency diagnosis and therapy, administering Petri nets, parallel processes.