

УДК 621.3.078.3+681.543

**В.С. Суздаль (докт. техн. наук, с.н.с), И.И. Тавровский (канд. техн. наук),
А.В. Соболев (канд. техн. наук), Б.Б Кобылянский (канд. техн. наук)**
«Институт сцинтилляционных материалов» НАН Украины, г. Харьков
лаборатория систем управления
E-mail: sobolev@isma.kharkov.ua

СИСТЕМА С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИНВАРИАНТНОСТЬЮ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

*Проведен синтез системы с параметрической инвариантностью выхода для управления процессом выращивания монокристалла. Показано, что синтезированная система управления в состоянии подавлять возмущения характерные для ростовых систем.
Ключевые слова: инвариантные системы, ростовые системы, синтез регуляторов.*

Общая постановка проблемы

Решение задачи инвариантности подразумевает определение такой структуры и параметров системы управления, при которых качество функционирования системы не зависит от возмущений. В [1] получены необходимые и достаточные условия инвариантности по выходу для линейных стационарных динамических систем к произвольным внешним возмущениям.

Процессы выращивания крупногабаритных сцинтилляционных монокристаллов относятся к классу многомерных многосвязных объектов управления (ОУ), параметры которых в условиях промышленного производства подвержены изменениям. Поэтому для процессов кристаллизации необходима система управления, которая обеспечивает сохранение основных ее характеристик при изменении параметров объекта управления в достаточно широких пределах, т.е. системы с параметрической инвариантностью [2].

Постановка задачи синтеза регулятора

Пусть задана математическая модель объекта управления в пространстве состояний в виде линейной стационарной системы без запаздывания и ограничений на управление

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \rho w(t), x(0) = x_0, \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (2)$$

где $x(t) \in R^n$ – n -мерный вектор состояния системы, $u(t) \in R^l$ – l -мерный вектор управления и $y(t) \in R^m$ – m -мерный вектор контролируемых координат, $w(t) \in R^s$ – s -мерный вектор возмущений. Компоненты вектора w принадлежат к классу произвольных непрерывных функций.

Реализацию в пространстве состояний (1), (2) обозначим четверкой матриц (A, B, C, ρ) соответствующих размеров с постоянными числовыми элементами.

Введем в рассмотрение регулятор

$$u = Kx(t), \quad (3)$$

где K – постоянная матрица коэффициентов усиления.

Пусть $\rho = \Delta A + \Delta B K$, где ΔA и ΔB – параметрические возмущения матриц A и B соответственно. Известно, что система (1) – (3) обладает параметрической инвариантностью выхода к параметрическим возмущениям ρ , если выполняется тождество

$$W_y^0(p) = C(pI_n - A - BK)^{-1} \equiv C(pI_n - A - BK - \rho)^{-1}, \quad (4)$$

где $W_y^0(p)$ – передаточная матрица от начальных условий к выходу.

Задача синтеза регулятора заключается в определении условий существования и описания всех регуляторов, обеспечивающих выполнение тождества (4) при фиксированных матрицах A, B, C и ρ . Если обозначить через $\overline{M}^L, \overline{M}^R$ и \tilde{M} левый и правый делители нуля и сводный канонизатор максимального ранга для некоторой матрицы M [3], то эти условия определяются следующим выражением для соответствующих матриц [1]

$$\overline{C}^R \pi \rho = 0, \quad (5)$$

где π – матрица максимального столбцового ранга, удовлетворяющая условию

$$\overline{C}^R \pi B \overline{C}^R \pi A \overline{C}^R \pi = 0 \quad (6)$$

и система замкнута любым регулятором из множества

$$\{K\} \chi \gamma = -(\overline{C}^R \pi B) \tilde{C}^R \pi A \overline{C}^R \pi (\overline{C}^R \pi)^{\sim} + \overline{C}^R \pi B \chi + \gamma \overline{C}^R \pi, \quad (7)$$

где χ и γ – матрицы заданных размеров с произвольными числовыми элементами.

Алгоритм формирования матрицы π максимального ранга, удовлетворяющую условию (6) приведен в [1]:

1. Проверяется условие

$$\overline{C}^R \pi B \overline{C}^R \pi A \overline{C}^R \pi = 0. \quad (8)$$

Если это условие выполняется, то принимается $\pi = \pi_0 = I_{(n-\text{rank}C)}$.

2. Если условие (8) не выполняется, то определяется матрица

$$\pi_1 = \overline{C}^R \pi B \overline{C}^R \pi A \overline{C}^R \pi.$$

Если $\pi_1 = 0$, то система не обладает инвариантностью, а алгоритм останавливается. В противном случае проверяется условие (6) при $\pi = \pi_1$.

3. Если условие (6) на предыдущем шаге не выполняется, то i увеличивается на единицу и определяется матрица i -й итерации.

$$\pi_i = \overline{C}^R \pi_{i-1} B \overline{C}^R \pi_{i-1} A \overline{C}^R \pi_{i-1}. \quad (9)$$

Если $\pi_i = 0$, то система не обладает инвариантностью, а алгоритм останавливается. В противном случае проверяется условие (6) при $\pi = \pi_i$.

4. Алгоритм останавливается на k -ом шаге при первом выполнении условия (6). Матрица π максимального ранга имеет значение π_k .

Регулятор для процесса выращивания

Моделирование процесса выращивания, как объекта управления, проводилось на примере получения крупногабаритных активированных монокристаллов GsJ методом Чохральского. Процесс выращивания рассматривался как двумерный линейный стационарный объект управления с двумя входными величинами – температура Td основного и температура Tb дополнительного нагревателя и двумя выходами – диаметр кристалла Ds и температура подпиточного расплава Tr [4].

Модель ОУ в пространстве состояний имеет следующие матрицы

$$A = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 & x4 \\ x1 & 0 & -1.548 & 0 & 0 \\ x2 & 1 & -5.453 & 0 & 0 \\ x3 & 0 & 0 & 0 & -0.4322 \\ x4 & 0 & 0 & 0.5 & -3.124 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} u1 & u2 \\ x1 & -0.5019 & 2.142 \\ x2 & 0.2637 & 5.573 \\ x3 & 0.2915 & -0.3939 \\ x4 & 1.699 & -0.8284 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 & x4 \\ y1 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ y2 & 0 & 0 & 20 \end{bmatrix}.$$

Модель ОУ устойчива, полностью управляема и наблюдаема.

Условие (5) выполняется на первом шаге для $\pi = I_{(2)}$. Так как для рассматриваемого

ОУ $\overline{\overline{C^R \pi B}}^L = 0$, то из (7) находим класс регуляторов по выражению

$$K = -(\overline{\overline{C^R \pi B}}^L \overline{\overline{C^R \pi}}^L \overline{\overline{A C^R \pi}}^L + \gamma \overline{\overline{C^R \pi}}^L).$$

$$K = \begin{bmatrix} 0.0855 & 0 & 0.2877 & 0 \\ 0.1754 & 0 & -0.0136 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Если выбрать $\gamma = [-5.69 \quad -0.977; \quad 0 \quad 0]$, то получим конкретную реализацию регулятора

$$K = \begin{bmatrix} 0.0855 & -5.690 & 0.2877 & 0.9770 \\ 0.1754 & 0 & -0.0136 & 0 \end{bmatrix}.$$

Переходной процесс в замкнутой системе с регулятором K по каналу: температура Td основного нагревателя – диаметр кристалла Ds приведен на рисунке 1.

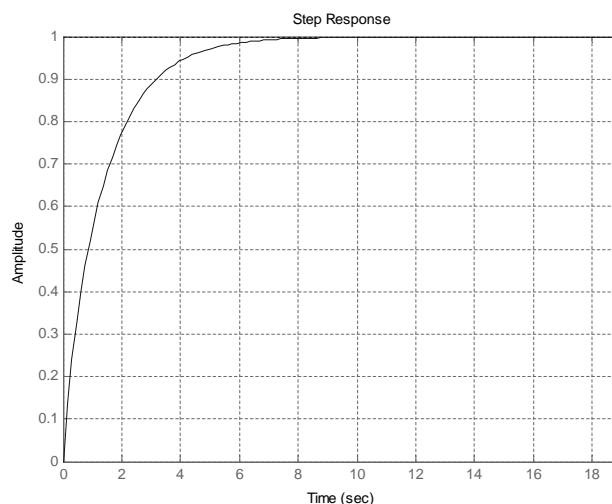


Рисунок 1 – Переходной процесс в замкнутой системе по каналу:
температура Td основного нагревателя – диаметр кристалла Ds

Длительность переходного режима для замкнутой системы – 5 секунд. Это стандартное отображение качества управления для инерционных ОУ, какими является процесс выращивания крупногабаритных монокристаллов, позволяет сделать вывод, что синтезированный регулятор может быть использован для управления выращиванием активированных монокристаллов.

Множество параметрических возмущений ρ , для которых при любом регуляторе из множества (7) обеспечивается параметрическая инвариантность, определяется выражением

$$\{\rho\}_\mu = \bar{C}^R \mu, \quad (10)$$

где μ – матрица соответствующего размера с произвольными числовыми элементами.

Для рассматриваемого ОУ имеем $\bar{C}^R = [0 \ 1; 0 \ 0; 1 \ 0; 0 \ 0]$, т.е. в синтезированной системе подавляются параметрические возмущения, определяемые матрицей

$$\{\rho\}_\mu = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \mu_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \mu_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Выводы

В системах выращивания крупногабаритных монокристаллов методом Чохральского параметры объекта управления подвержены изменениям при изменении условий выращивания, а также с течением времени, что можно интерпретировать как параметрические возмущения в системе. Проведен синтез системы с параметрической инвариантностью выхода для управления процессом выращивания. Синтезированная система управления, как показывает выражение (11), в состоянии подавлять такие возмущения при соответствующем выборе матрицы μ .

Список использованной литературы

1. Буков В.Н. Условия инвариантности выхода линейных систем/ В. Н. Буков, А. М. Бронников // Автоматика и телемеханика. – 2005. – №2. – С.21–35.
2. Рост кристаллов / [Горилецкий В. И., Гринев Б. В., Заславский Б. Г. и др.]. – Харьков: АКТА, 2002. – 535 с.
3. Буков В.Н. Решение матричных уравнений методом канонизации / В.Н. Буков, В.Н. Рябченко, В.В. Косьянчук, Е.Ю. Зыбин // Вестник Киевского ун-та. Сер. Физ.-матем. Науки. Вып. 1. Киев: Изд. Киевского нац. ун-та. – 2002. – С. 19-28.
4. 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.

References

1. Bukov, V.N. and Bronnikov, A.M., (2005), "Invariance condition output linear systems", *Avtomatika i telemehnika*, no. 2, pp. 21–35.

2. Gorileckij, V.I., Grinev, B.V. and Zaslavskij, B.G. (2002), *Rost kristallov* [Crystal Growth], АКТА, Har'kov, Ukraine.
3. Bukov, V.N., Rjabchenko, V.N. and Zybin, E.Ju. (2002), "Solution of matrix equations by canonization", *Vestnik Kievskogo un-ta. Ser. Fiz.-matem. Nauki*, no. 1, pp. 19-28.
4. Suzdal, V.S., Epifanov, Ju.M. and Tavrovskij, I.I. (2009), "Parametric identification VARMAX models crystallization process large single crystals", *Novi tehnologii. Naukovij visnik Kremenchuc'kogo universitetu ekonomiki, informacijnih tehnologij i upravlinnja*, no. 4(26), pp. 23-29.

Надійшла до редакції:
20.05.2014 р.

Рецензент:
канд. техн. наук, проф. Маренич К.М.

В.С. Суздаль, І.І. Тавровський, О.В. Соболев, Б.Б. Кобылянський
«Інститут сцинтиляційних матеріалів» НАН України

Система з параметричною інваріантністю для процесів кристалізації. Проведено синтез системи з параметричною інваріантністю виходу для управління процесом вирощування монокристалів. Синтезована система управління в стані пригнічувати збурення, що в цілому характерні для ростових систем.

Ключові слова: інваріантні системи, ростові системи, синтез регуляторів.

V. Suzdal, I. Tawrovskiy, O. Sobolev, B. Kobilyanskiy
«Institute for Scintillation Materials» NAS of Ukraine

System with parametric invariance for crystallization processes. The synthesis of system for control process of crystal growth with parametric invariance of the output variable was carried out. The synthesized control system able to suppress the disturbances that generally typical for growing plants.

Keywords: invariance system, system for growing crystals, the synthesis of regulators.

Суздаль Виктор Семенович, Україна, закончил Харьковский политехнический институт, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией систем управления «Института сцинтиляционных материалов» НАН Украины (просп. Ленина, 60, г. Харьков, 64001, Украина). Основное направление научной деятельности – идентификация, моделирование и развитое управление технологическими процессами.

Тавровский Игорь Игоревич, Україна, закончил Харьковский авиационный институт, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории систем управления «Института сцинтиляционных материалов» НАН Украины (просп. Ленина, 60, г. Харьков, 64001, Украина). Основное направление научной деятельности – программно-аппаратные комплексы для управление технологическими процессами.

Соболев Александр Викторович, Україна, закончил Харьковский национальный университет радиоэлектроники, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории систем управления «Института сцинтиляционных материалов» НАН Украины (просп. Ленина, 60, г. Харьков, 64001, Украина). Основное направление научной деятельности – идентификация и моделирование процессов кристаллизации.

Кобылянский Борис Борисович, Україна, закончил Украинскую инженерно-педагогическую академию, кандидат технических наук, доцент, кафедра электроники и компьютерных технологий систем управления (ул. Носакова 9а, г. Артемовск, 84500, Украина). Основное направление научной деятельности – моделирование и управление современными технологическими процессами.