

Л.В. ДЕРБУНОВИЧ, д-р. техн. наук, проф. каф. АУТС НТУ "ХПИ",
В.С. СУЗДАЛЬ, д-р. техн. наук, **Ю.М. ЕПИФАНОВ**, канд. техн. наук,
Л.И. ГЕРАСИМЧУК, канд. техн. наук (Институтт сцинтилляционных
материалов НАН Украины), **Ю.С. КОЗЬМИН**, инженер ИСМА

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЫРАЩИВАНИЕМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ

В статті розглянуто систему управління багатомірним технологічним процесом вирощування методом Чохральського сцинтиляційних монокристалів великих розмірів; визначені задачі оптимального управління режиму установок типу "РОСТ"; застосування розроблених методів і засобів дозволило підвищити вихід придатної продукції.

In this paper viewing algorithms of MIMO-system control for Czochralski technological process growing of large single crystals; was define problems of control and searching optimal heat conditions for growth plant type "ROST"; carrying out of useful productions was increased by using this methods and tools.

Постановка проблемы. Сцинтилляционные монокристаллы (СМК) выращивают из расплава методом Чохральского, который заключается в вытягивании монокристалла из расплава, находящегося в тигле при температуре выше точки плавления сырья, на затравку, прикрепленную к охлаждающему стержню - кристаллодержателю [1]. В основе метода Чохральского, как и других методов выращивания монокристаллов из расплава, заложены принципы направленной кристаллизации, которая осуществляется при наличии и взаимодействии двух направленных потоков – переноса тепловой энергии и межфазного массопереноса. В методе Чохральского боковая поверхность образца формируется без контакта со стенками тигля, поэтому форма и размер кристалла определяются капиллярными силами, формирующими мениск расплава, и условиями тепло - массообмена в системе кристалл - расплав.

Форма выращиваемого кристалла в основной его части является цилиндрической, а его качество (степень бездефектности и однородность распределения примеси) в значительной степени определяется стабильностью геометрии поверхности образца. К параметрам, оказывающим существенное влияние на условия кристаллизации СМК в установках "РОСТ", относятся: температура в ростовой камере, уровень расплава в тигле, скорость вытягивания кристалла. С целью стабилизации диаметра кристалла в существующих SISO-системах осуществляется замкнутое управление тепловым режимом кристаллизации, которое обеспечивает точность стабилизации диаметра растущего образца ~3% [2-4].

Технологический процесс выращивания СМК относится к

многомерным объектам управления, поскольку обладает многими внутренними обратными связями, сложными нелинейными взаимодействиями между входными и выходными переменными. Для него характерен высокий уровень шумов (ошибки измерений, погрешности аналитического контроля и т.д.), некоторые параметры на протяжении значимых временных интервалов являются фактически ненаблюдаемыми. Исходя из этих предпосылок, актуальной задачей следует считать применение при выращивании крупногабаритных СМК оптимальной системы управления (СУ), в которой наиболее полно учитывается сложный характер объекта управления.

Анализ литературы. В работе [1] приведены результаты выращивания крупногабаритных СМК при использовании *SISO*-системы, управляющей диаметром растущего образца на основе ПИД-закона управления. В [2,3] дана оценка разработанных авторами прогнозных алгоритмов, применение которых обеспечивает точность стабилизации диаметра растущего кристалла до 3%. Анализ этих работ, а также особенностей реализации процесса с увеличением размеров образца и тигля показывает, что использование одномерных СУ для стабилизации диаметра крупногабаритных СМК в процессе их выращивания недостаточно эффективно.

Цель статьи: изложение и обсуждение результатов разработки СУ для управления процессом выращивания крупногабаритных СМК из расплава как многомерного ОУ, внедрение которой позволяет, в конечном итоге, повысить качество и конкурентоспособность готовой продукции.

Система управления. СМК больших размеров выращивают на промышленных установках типа "РОСТ", в которых для оценки диаметра растущего кристалла применяют метод измерения падения уровня расплава Δh в результате быстрого (за время Δt_1) дискретного подъема кристалла из расплава на малую величину (рис. 1).

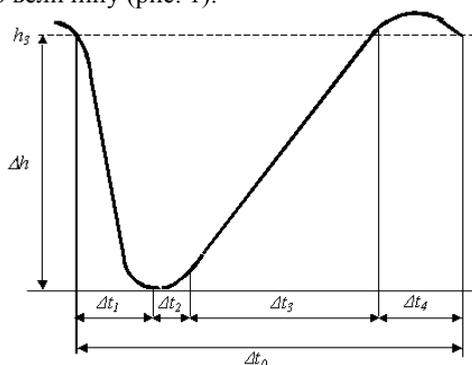


Рис. 1. Изменение уровня расплава в зависимости от режима работы установки [1, с. 435]

В процессе роста монокристалла в тигле автоматически поддерживают уровень расплава h_3 , подпитывая его твердым исходным сырьем, которое предварительно подают в расположенную коаксиально тиглю кольцевую емкость для расплавления боковым нагревателем. Температуру в ростовой печи корректируют на протяжении рабочего цикла Δt_0 основным (донным) нагревателем по результатам измерения уровня расплава [4]. Математическую модель многомерного процесса выращивания SMK отнесем к классу моделей, описываемых разностными уравнениями с дискретным временем. Пусть в результате идентификации объекта управления получена модель, имеющая r входов, m выходов и l шумов. Представим полученную модель для k -го шага в конечных разностях с матрицами размерности $r \times 1$ для входных сигналов $U(k)$, $l \times 1$ - для возмущений $W(k)$ и $m \times 1$ - для выходных сигналов $Y(k)$:

$$A(B) \cdot Y(k) = G(B) \cdot U(k) + D(B) \cdot W(k), \quad (1)$$

где $A(B)$, $G(B)$, $D(B)$ - матричные полиномы степеней m , r , l :

$$A(B) = I - \sum_{j=1}^m A_j B^j, \quad G(B) = I + \sum_{j=1}^r G_j B^j, \quad D(B) = I + \sum_{j=1}^l D_j B^j.$$

Каждая из j ($j = 0, 1, \dots, p$) матриц $A_j(B)$ - квадратная (размерности $m \times m$); прямоугольная матрица $G_j(B)$ имеет размерность $m \times r$, $D_j(B)$ - размерность $m \times l$.

Текущее значение выходной переменной в (1) представлено по ее предыдущим значениям в виде авторегрессионной модели со скользящим средним и с внешними возмущающими воздействиями (полиномы системы выровнены по максимальному порядку p одного из них).

Значение выходного сигнала для следующего, $(k+1)$ -го шага

$$Y(k+1) = A_1(B) \cdot Y(k) + A_2(B) \cdot Y(k-1) + \dots + A_p(B) \cdot Y(k-p+1) + G_0(B) \cdot U(k+1) + \dots + G_p(B) \cdot U(k-p+1) + D_0(B) \cdot W(k+1) + \dots + D_p(B) \cdot W(k-p+1), \quad (2)$$

и, более подробно, с учетом размерности матриц $A_j(B)$, $G_j(B)$, $D_j(B)$:

$$\begin{aligned} Y(k+1) &= A_1^{(1)}(B)Y(k-1) + \dots + A_p^{(1)}(B)Y(k-p) + G_0(B)U(k+1) + \\ &+ G_0^{(1)}(B)U(k) + G_1^{(1)}(B)U(k-1) + G_2^{(1)}(B)U(k-2) + \dots + G_p^{(1)}(B)U(k-p) + \\ &+ D_0(B)W(k+1) + D_0^{(1)}(B)W(k) + D_1^{(1)}(B)W(k-1) + \dots + D_p^{(1)}(B)W(k-p), \end{aligned}$$

где $A_1^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot A_1(B)$; $A_2^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot A_2(B) + A_3(B)$; $A_{p-1}^{(1)}(B) = A_1(B)A_{p-1}(B) + A_p(B)$;

$$A_p^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot A_p(B); \quad G_0^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot G_0(B) + G_1(B) \quad G_1^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot G_1(B) + G_2(B);$$

$$G_2^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot G_2(B) + G_3(B); \dots \quad G_{p-1}^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot G_{p-1}(B) + G_p(B); \quad G_p^{(1)}(B) = A_1 G_p(B);$$

$$D_0^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot D_0(B) + D_1(B) \quad D_1^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot D_1(B) + D_2(B); \quad D_2^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot D_2(B) + D_3(B);$$

$$\dots \quad D_{p-1}^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot D_{p-1}(B) + D_p(B); \quad D_p^{(1)}(B) = A_1(B) \cdot D_p(B).$$

Следовательно, значение выходного сигнала на $(k+1)$ -м шаге является

$$D(B) = \begin{bmatrix} D_p(B) & D_{p-1}(B) & \dots & D_1(B) \\ D_p^{(1)}(B) & D_{p-1}^{(1)}(B) & \dots & D_1^{(1)}(B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_p^{(q)}(B) & D_{p-1}^{(q)}(B) & \dots & D_1^{(q)}(B) \\ D_p^{(q+1)}(B) & D_{p-1}^{(q+1)}(B) & \dots & D_1^{(q+1)}(B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_p^{(s-1)}(B) & D_{p-1}^{(s-1)}(B) & \dots & D_1^{(s-1)}(B) \end{bmatrix}, A(B) = \begin{bmatrix} A_p(B) & A_{p-1}(B) & \dots & A_1(B) \\ A_p^{(1)}(B) & A_{p-1}^{(1)}(B) & \dots & A_1^{(1)}(B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_p^{(q)}(B) & A_{p-1}^{(q)}(B) & \dots & A_1^{(q)}(B) \\ A_p^{(q+1)}(B) & A_{p-1}^{(q+1)}(B) & \dots & A_1^{(q+1)}(B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_p^{(s-1)}(B) & A_{p-1}^{(s-1)}(B) & \dots & A_1^{(s-1)}(B) \end{bmatrix}.$$

Величина $Y_s(k)$ представляет собой вектор выходных данных (между тактами k и $k+s-1$), вектор $Y_p(k-p)$ содержит p данных (между тактами $k-p$ и $k-1$). $T_u(B)$, $T_w(B)$ - теплицевы матрицы.

Осуществим синтез многомерного регулятора, полагая, что проведена предварительная идентификация модели ОУ [5]. На первом этапе определим, какими должны быть сигналы управления $U(k)$, $U(k+1), \dots, U(k+q-1)$, чтобы последовательность выходных сигналов $Y(k+q)$, $Y(k+q+1), \dots, \infty$ стала нулевой, т.е. апериодической (под последовательностью выходных сигналов здесь и далее понимается рассогласование между выходным сигналом модели ОУ и задающим воздействием). Пусть управление начинается с шага k , до которого система разомкнута, и заканчивается на $(k+q)$ -м шаге, т.е. ненулевыми являются только значения управления от $U(k)$ до $U(k+q-1)$. При этом условии уравнение (3) преобразуется:

$$Y_p(k+q) = T_u'(B)U_q(k) + G'(B)U_p(k-p) + A'(B)Y_p(k-p) + T_w'(B)W_q(k) + D'(B)W_p(k-p), \quad (4)$$

где

$$Y_p(k+q) = \begin{bmatrix} Y(k+q) \\ Y(k+q+1) \\ \vdots \\ Y(k+q+p-1) \end{bmatrix}, U_q(k) = \begin{bmatrix} U(k) \\ U(k+1) \\ \vdots \\ U(k+q-1) \end{bmatrix}, W_q(k) = \begin{bmatrix} W(k) \\ W(k+1) \\ \vdots \\ W(k+q-1) \end{bmatrix},$$

$$Y_p(k-p) = \begin{bmatrix} Y(k-p) \\ Y(k-p+1) \\ \vdots \\ Y(k-1) \end{bmatrix}, U_p(k-p) = \begin{bmatrix} U(k-p) \\ U(k-p+1) \\ \vdots \\ U(k-1) \end{bmatrix}, W_p(k-p) = \begin{bmatrix} W(k-p) \\ W(k-p+1) \\ \vdots \\ W(k-1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
T'_u(B) = T_u(B) \cdot [pm \times qr] &= \begin{bmatrix} G_0^{(q)}(B) & G_0^{(q-1)}(B) & \dots & G_0^{(1)}(B) \\ G_0^{(q+1)}(B) & G_0^{(q)}(B) & \dots & G_0^{(2)}(B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_0^{(q+p-1)}(B) & G_0^{(q+p-2)}(B) & \dots & G_0^{(p)}(B) \end{bmatrix}, \\
T'_w(B) = T_w(B) \cdot [pm \times ql] &= \begin{bmatrix} D_0^{(q)}(B) & D_0^{(q-1)}(B) & \dots & D_0^{(1)}(B) \\ D_0^{(q+1)}(B) & D_0^{(q)}(B) & \dots & D_0^{(2)}(B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_0^{(q+p-1)}(B) & D_0^{(q+p-2)}(B) & \dots & D_0^{(p)}(B) \end{bmatrix}, \\
G'(B) = G(B) \cdot [pm \times pr] &= \begin{bmatrix} G_p^{(q)}(B) & G_{p-1}^{(q)}(B) & \dots & G_1^{(q)}(B) \\ G_p^{(q+1)}(B) & G_{p-1}^{(q+1)}(B) & \dots & G_1^{(q+1)}(B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_p^{(q+p-1)}(B) & G_{p-1}^{(q+p-1)}(B) & \dots & G_1^{(q+p-1)}(B) \end{bmatrix}, \\
D'(B) = D(B) \cdot [pm \times pl] &= \begin{bmatrix} D_p^{(q)}(B) & D_{p-1}^{(q)}(B) & \dots & D_1^{(q)}(B) \\ D_p^{(q+1)}(B) & D_{p-1}^{(q+1)}(B) & \dots & D_1^{(q+1)}(B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_p^{(q+p-1)}(B) & D_{p-1}^{(q+p-1)}(B) & \dots & D_1^{(q+p-1)}(B) \end{bmatrix}, \\
A'(B) = A(B) \cdot [pm \times pm] &= \begin{bmatrix} A_p^{(q)}(B) & A_{p-1}^{(q)}(B) & \dots & A_1^{(q)}(B) \\ A_p^{(q+1)}(B) & A_{p-1}^{(q+1)}(B) & \dots & A_1^{(q+1)}(B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_p^{(q+p-1)}(B) & A_{p-1}^{(q+p-1)}(B) & \dots & A_1^{(q+p-1)}(B) \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

Уравнение (4) получено из (3) отсечением первых q и следующих за $(q+p-1)$ -м уравнений. Матрица $T_u'(B)$ имеет размерность $pm \times qr$ и формируется из импульсных характеристик (q - число шагов регулирования). Вектор выходных сигналов $Y_p(k+q)$ в (4) включает в себя последовательность выходных сигналов с индексами i , принимающими значения от $(k+q)$ до $(k+q+p-1)$. Параметры этого вектора зависят от величины вектора входного сигнала $U_q(k)$, а также векторов $U_p(k-p)$ и $Y_p(k-p)$, состоящих из последовательностей входных и выходных сигналов при $i = (k-p) \div (k-1)$. С учетом (4) входная и выходная зависимости могут быть изменены так, чтобы значения выходных сигналов, начиная с $i = k+q$, вычислялись из значений входных сигналов при $i = (k-p) \div (k+q-1)$ и выходных при $i = (k-p) \div (k-1)$. Тогда информация о значениях выходных сигналов в диапазоне $i = k \div (k+q-1)$ для

предсказания этих величин, начиная с $i = (k+q)$, не потребуется. Из (4) следует, что если взять управление:

$$U_q(k) = -[T'_u(B)]^+ \begin{bmatrix} G'(B)U_p(k-p) + A'(B)Y_p(k-p) + \\ T'_w(B)W_q(k) + D'(B)W_p(k-p) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

то

$$Y_p(k+q) = \begin{bmatrix} Y(k+q) \\ Y(k+q+1) \\ \vdots \\ Y(k+q+p-1) \end{bmatrix} = 0,$$

и, значит, управляющим воздействием на выходе СУ устанавливается нулевое значение выходного сигнала через q шагов, начиная с k -го. Теоретически система окажется в состоянии покоя уже через $(k+q)$ шагов, поскольку входные управляющие сигналы, начиная с $U(k+q)$, тоже имеют нулевое значение. В практически реализуемых системах, где сигналы на входе и выходе объекта имеют стохастический характер, никакие управляющие воздействия не могут обеспечить нулевых значений выходных сигналов. Поскольку формирование управляющих воздействий осуществляется на основе модели технологического процесса, эффективность управления в значительной степени определяется качеством идентификации модели в режиме реального времени [5].

При синтезе регулятора для управления процессом кристаллизации на установке "РОСТ" число каналов в целом соответствует множеству входных переменных, в которых формируются взаимосвязанные управляющие воздействия - температура донного T_d и бокового T_b нагревателей, скорость вытягивания кристалла $v_{\text{выт}}$, и выходных переменных - диаметр растущего монокристалла D и показатели качества кристалла, определяемые в режиме реального времени.

Формализация задачи управления предполагает выбор моделей действующих в системе возмущений. Основными возмущениями в СУ выращиванием СМК являются колебания уровня расплава, которые определяются диаметром кристалла и длительностью цикла управления (см. рис. 1). Ограничение амплитуды возмущающих воздействий достигают с помощью подпитки расплава, которая в ростовой установке улучшает тепловые условия роста кристаллов и позволяет добиться относительной стабилизации уровня расплава в тигле [1]. Из анализа временных массивов изменения основных входных параметров [7] следует, что возмущающие воздействия в рассматриваемой СУ могут быть описаны волновой моделью вида

$$W(k) = C_1 f_1(t) + C_2 f_2(t), \quad (5)$$

где функции $f_1(t)$ и $f_2(t)$ играют роль базиса функционального пространства, а

коэффициенты C_1 и C_2 – кусочно-постоянные весовые коэффициенты [6, с. 258]. Если учесть, что наиболее часто идентифицируемые возмущения при росте кристаллов могут быть представлены в виде взвешенных линейных комбинаций прямоугольных ступенек и функций с постоянным наклоном, то достаточно точно подходит аналитическое выражение:

$$W(k) = C_1 + C_2 \cdot t, \quad (6)$$

где весовые коэффициенты C_1 и C_2 являются случайными кусочно-постоянными величинами, а базисные функции имеют вид: $f_1(t) = 1$; $f_2(t) = t$. Поскольку значения весовых коэффициентов из-за случайного характера их изменения фактически неизвестны, можно рассчитывать лишь на их эмпирическое предсказание, принимая структуру модели (6). В работе [8] предлагается метод построения оценок параметров линейных многомерных систем с интервальной неопределенностью в данных. Наряду с аддитивной составляющей из-за ошибок измерений в модели предполагается наличие мультипликативной матричной неопределенности, что позволяет рассматривать более широкий класс объектов с неопределенной структурой. Усложняет задачу необходимость учета при управлении ростом кристаллов возмущений, действующих на измерительные приборы, даже при условии представления их моделью белого шума.

Выводы. Для разработки регулятора диаметра СМК предложена процедура синтеза вектора аperiodического управляющего воздействия на процесс кристаллизации с учетом действующих в системе возмущений.

Список литературы: 1. Горилецкий В.И., Гринев Б.В., Заславский Б.Г., Смирнов Н.Н., Суздаль В.С. Рост кристаллов. – Харьков: АКТА, 2002. – 535 с. 2. Суздаль В.С. Синтез отказоустойчивых автоматизированных систем управления процессами выращивания высококачественных крупногабаритных монокристаллов: Дис... д-ра техн. наук: 05.13.07. – Харьков, 2006. – 396 с. 3. Дербунович Л.В., Герасимчук Л.И., Суздаль В.С., Соболев А.В. Прогнозное управление процессом выращивания скнтилляционных монокристаллов // Вестник национального технического университета "ХПИ". Тематический выпуск "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика" - 2005. - №45. - С. 113-115. 4. Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Герасимчук Л.И., Соболев А.В., Тавровский И.И. Управление нестационарным процессом выращивания крупногабаритных монокристаллов из расплава // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - Харків: ХарДАЗТ, 2007. - №4 (66). - С.77-82. 5. Суздаль В.С., Соболев А.В., Стрельников С.Н. Идентификация модели объекта управления при выращивании скнтилляционных монокристаллов // Нові технології. Науковий вісник Інституту економіки та нових технологій. - Кременчук, 2004. - №1-2 (4-5). - С.135-142. 6. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. Леондеса К.Т.- М.: ГТТИ. - 1952. - 891 с. 7. Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Герасимчук Л.И., Тавровский И.И., Дербунович Л.В. Алгоритм адаптации системы управления процессом выращивания крупногабаритных скнтилляционных монокристаллов // Вісник національного технічного університету "ХПИ" - 2007. - №36. - С.89-98. 8. Оценивание параметров в линейных многомерных системах с интервальной неопределенностью / Поляк Б.Т., Назин С.А. // Проблемы управления и информатики. — 2006. — № 1–2. — С. 103–115.

Поступила в редколлегию 16.04.08

П.А. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф. каф АУТС “НТУ ХПИ”,
А.А. БОНДАРЬ (г.Харьков)

ВИРТУАЛЬНОЕ ПРОСТРАНСТВО В НЕЛИНЕЙНОЙ ПЕРСПЕКТИВЕ

В статті розглянуті методи лінійної та нелінійної перспективи. Розглянуто застосування нелінійної перспективи в візуалізації.

In article is dedicated methods linear and nonlinear prospect. Rassmotrenno using the nonlinear prospect in visualizations.

Анализ литературы. В работе [1] рассмотрена теория оптических приборов. В [2] рассмотрены основы интерактивной машинной графики и свойства линейного проективного преобразования. В [3] рассмотрена программная система для разработки виртуальных сред на персональной ЭВМ, использование компьютерной графики, а в [4] – рассмотрены линейная и нелинейные перспективы.

Постановка проблемы. Текущий момент характеризуется небывалым ростом информации, которое необходимо обрабатывать для поддержания прогресса в развитии современной цивилизации. Объем данных растет быстрее, чем производительность компьютеров, которая, следуя закону Мура, удваивается каждые полтора года. А данные, помимо порождения компьютерами, извлекаются и непосредственно из самой природы с помощью всевозможных детекторов и сенсоров, быстрдействие которых также следует экспоненциальному росту. Важнейшей вехой на пути преодоления "кризиса данных" стал отчет Национального научного фонда США "Визуализация в научных вычислениях" (1987 г.), подчеркнувший важность интерактивной визуализации больших массивов данных и обративший внимание научной общественности на знаменитый афоризм Хемминга: "Целью вычислений являются не числа, а понимание (постижение, проникновение в суть, интуиция, insight)". В результате было сформировано новое научное направление "Научная визуализация", которое в свою очередь тесно связано с компьютерной графикой.

Цель статьи. Главной задачей компьютерной графики является создание реалистичных изображений, которые воспроизводят картину окружающего пространства в соответствии со зрительными ощущениями человека. В настоящее время компьютерная графика – это отрасль производства, которая включает в себя и разработку систем автоматизированного проектирования, и создание визуальных эффектов в