

**СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ВЫРАЩИВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ
МОНОКРИСТАЛЛОВ**

Тевяшев А.Д., Щелкалин В.Н., Суздаль В.С., Козьмин Ю.С.
Харьковский национальный университет радиозлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина, каф. прикладной математики, тел. (057) 702-14-36,
E-mail: tevyashev@kture.kharkov.ua

The problem of optimal stochastic control system synthesizing of technological process of organic monocrystals growing was considered for reception of monocrystals with guaranteed characteristics.

Органические монокристаллы (ОМК) — это системы обладающие наилучшими характеристиками для задач спектрометрии короткопробежных заряженных частиц и быстрых нейтронов. Наиболее широкое распространение получили кристаллы стиблена и паратерфенила. Последний является наиболее эффективным органическим сцинтиллятором с наилучшими механическими характеристиками [1].

Технология получения органических монокристаллов состоит из следующих основных стадий: очистка исходного сырья, полимеризация монокристаллов, отжиг кристаллов.

Органические кристаллы выращиваются методом Бриджмена-Стокбаргера в ростовых ампулах на затравку. Установка для выращивания ОКМ представляет собой вертикальную шахтную печь с разделенной диафрагменной перегородкой между верхней «горячей» камерой и нижней «холодной», в которой проводят отжиг выращенного монокристалла. В промышленных условиях ростовая камера установки для выращивания ОКМ состоит из двух концентрически расположенных и центрированных стеклянных труб. На внутренней трубе наматываются нижний и верхний нагреватели. Ампула с кристаллом перемещается в ростовой камере с помощью вытягивающего механизма.

При выращивании крупных ОКМ (диаметр 80–120 мм) наблюдается следующий эффект: хотя диафрагменная перегородка, разделяющая камеры печи, существенно ослабляет конвекцию воздуха в рабочем объеме, однако, на начальной стадии выращивания, когда ростовая ампула опускается из верхней камеры в нижнюю, при перекрытии конусным дном ампулы отверстия диафрагмы возникают нестационарные конвективные потоки из-за непрерывно увеличивающейся площади экранирования пространства, соединяющего обе камеры печи. Это приводит к тому, что фронт кристаллизации вначале смещается вниз относительно первоначального положения, затем поднимается вверх, по мере прохождения конического дна ампулы через диафрагму, в результате чего меняется форма фронта кристаллизации и скорость полимеризации. Фронт кристаллизации имеет вогнутую форму, а скорость полимеризации вначале уменьшается, а затем возрастает, причем более чем в два раза. При этом происходит нарушение условий торцевого теплоотвода и однородности теплофизических условий полимеризации на поверхности раздела кристалл-расплав и, следовательно, ухудшается качество монокристалла.

При выращивании крупных ОКМ возникают серьезные трудности, связанные с отжигом полученных монокристаллов, т. е. с их охлаждением от температуры выращивания до комнатной. Из-за низкой механической прочности и малой теплопроводности ОКМ, значительных осевых и радиальных температурных градиентов в ростовой камере, при отжиге в выращенном кристалле возникают термические напряжения, которые могут привести к его разрушению.

Следовательно, установку для выращивания ОКМ необходимо рассматривать как многомерный стохастический объект управления. Это позволит решить задачу стабилизации скорости роста кристалла, а, значит, и повысить его качество, за счет взаимосвязанного управления тепловыми условиями кристаллизации. Актуальной является и задача определения оптимального режима отжига крупногабаритных ОКМ, для решения которой необходимы разработка математических моделей температурных напряжений в кристаллах.

Практическая эксплуатация ОКМ показывает, что влияние дестабилизирующих факторов на сроки работоспособности сцинтилляторов, а также изменения во времени радиационной стойкости и стабильности, термостабильности, механической прочности, гигроскопичности сцинтилляционных материалов являются не менее важными показателями, чем сцинтилляционные характеристики.

Наиболее ценные результаты по изучению температурных напряжений в ОКМ до сих пор получены в основном эмпирическим путем. Важнейшей трудностью мат. описания является информация, полученная на основе температурно-временных кривых процесса отжига для различных объемов реакционной смеси и площадей охлаждающих поверхностей. Подобная информация помогает объяснить происхождение внутреннего напряжения в сцинтилляционных композициях, рассмотреть их с точки зрения образования полимерной структуры и сформулировать требования к температурным условиям ее получения.

Однако проводимые в настоящее время экспериментальные исследования не достаточны для получения продукции, отвечающей современным требованиям рынка ОКМ. Необходимо изучение процесса образования внутренних напряжений на основе математического моделирования.

Таким образом, для любой технологии производства ОМК актуальными являются задачи определения оптимальных режимов выращивания и отжига ОМК, для решения которой необходимы:

- исследования на основе математических моделей физических процессов полимеризации для определения требований к системе управления температурным режимом полимеризации;
- синтез системы оптимального управления температурными режимами выращивания и отжига ОМК.

В докладе приведен метод синтеза системы оптимального управления температурными режимами полимеризации и отжига ОМК и оценка его эффективности по экспериментальным данным.

Синтез системы оптимального управления температурными режимами полимеризации и отжига ОМК проводился в классе математических моделей многомерных многосвязных линейных стохастических систем вида ARMAX-модели, имеющей r входов, m выходов и m шумов [1] (в нашем случае $r = 2$, $m = 2$):

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

где

$$- \mathbf{A}(B), \mathbf{G}(B) \text{ и } \mathbf{D}(B) - \text{матричные полиномы} \quad \mathbf{A}(B) = \mathbf{I} + \sum_{j=1}^{n_a} \mathbf{A}_j \mathbf{B}^j, \quad \mathbf{G}(B) = \sum_{j=0}^{n_g} \mathbf{G}_j \mathbf{B}^j,$$

$$\mathbf{D}(B) = \mathbf{I} + \sum_{j=1}^{n_d} \mathbf{D}_j \mathbf{B}^j \text{ степеней } n_a, n_g \text{ и } n_d \text{ соответственно;}$$

- $\mathbf{U}(k) = [u_1(k) \dots u_r(k)]^T$, $\mathbf{Y}(k) = [y_1(k) \dots y_m(k)]^T$, $\mathbf{W}(k) = [w_1(k) \dots w_m(k)]^T$ - векторы входов, выходов и шумов системы соответственно для k -го шага. Матричные полиномы выровняем по максимальному порядку n_p одного из них, тогда $\mathbf{A}_j [m \times m]$, $\mathbf{G}_j [m \times r]$ и $\mathbf{D}_j [m \times m]$, $j = \overline{1, n_p}$ - матрицы коэффициентов системы, которые необходимо оценить по экспериментальным данным. Для нахождения оценок структуры и параметров VARMAX-модели использовался линейный многоэтапный метод оценивания [3].

Регулирование данной многосвязной системы осуществлялось по схеме обобщённого регулирования с прогнозированием, в соответствии с которой для предсказания и управления будущими выходами системы должны быть сделаны некоторые предположения относительно будущих управляющих сигналов и будущих сигналов шума. Задача регулирования на этапе полимеризации заключалась в приведении выходов системы к требуемым значениям, тогда целевую функцию запишется в виде:

$$\mathbf{J}(k) = \left[\mathbf{Y}_{n_p+n_q}(k) - \mathbf{Y}_{n_p+n_q}^*(k) \right]^T \cdot \mathbf{Q} \cdot \left[\mathbf{Y}_{n_p+n_q}(k) - \mathbf{Y}_{n_p+n_q}^*(k) \right] + \left[\mathbf{U}_{n_p+n_q}(k) \right]^T \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{U}_{n_p+n_q}(k) \quad (2)$$

где

$$\mathbf{Y}_{n_p+n_q}(k) = \mathbf{T}_u \cdot \mathbf{U}_{n_p+n_q}(k) + \mathbf{G} \cdot \mathbf{U}_{n_p}(k - n_p) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{Y}_{n_p}(k - n_p) + \mathbf{T}_w \cdot \mathbf{W}_{n_p+n_q}(k) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{W}_{n_p}(k - n_p),$$

\mathbf{Q} , \mathbf{R} - диагональные матрицы, $\mathbf{Y}_{n_p+n_q}(k) = \text{col}[\mathbf{Y}(k) \mathbf{Y}(k+1) \dots \mathbf{Y}(k+n_p+n_q-1)]$,

$\mathbf{Y}_{n_p+n_q}^*(k) = \text{col}[\mathbf{Y}^*(k) \mathbf{Y}^*(k+1) \dots \mathbf{Y}^*(k+n_p+n_q-1)]$ - вектор состоящий из векторов желаемых значений выходов. Аналогично записываются выражения для $\mathbf{U}_{n_p+n_q}(k)$, $\mathbf{W}_{n_p+n_q}(k)$, $\mathbf{Y}_{n_p}(k-n_p)$, $\mathbf{U}_{n_p}(k-n_p)$, $\mathbf{W}_{n_p}(k-n_p)$;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{A}_{p-1} & \mathbf{A}_{p-2} & \cdots & \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_p^{(1)} & \mathbf{A}_{p-1}^{(1)} & \mathbf{A}_{p-2}^{(1)} & \cdots & \mathbf{A}_1^{(1)} \\ \mathbf{A}_p^{(2)} & \mathbf{A}_{p-1}^{(2)} & \mathbf{A}_{p-2}^{(2)} & \cdots & \mathbf{A}_1^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_p^{(n_p+n_q-1)} & \mathbf{A}_{p-1}^{(n_p+n_q-1)} & \mathbf{A}_{p-2}^{(n_p+n_q-1)} & \cdots & \mathbf{A}_1^{(n_p+n_q-1)} \end{bmatrix}.$$

Матрицы \mathbf{G} и \mathbf{D} записываются аналогично заменив \mathbf{A} на \mathbf{G} и \mathbf{D} соответственно;

$$\mathbf{T}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{G}_0^{(1)} & \mathbf{G}_0 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{G}_0^{(2)} & \mathbf{G}_0^{(1)} & \mathbf{G}_0 & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{G}_0^{(n_p+n_q-1)} & \mathbf{G}_0^{(n_p+n_q-2)} & \mathbf{G}_0^{(n_p+n_q-3)} & \cdots & \mathbf{G}_0 \end{bmatrix},$$

аналогично запишется матрица \mathbf{T}_w заменив \mathbf{G} на \mathbf{D} . Где матрицы коэффициентов $\mathbf{A}_j^{(i)}$, $\mathbf{G}_j^{(i)}$ и $\mathbf{D}_j^{(i)}$ могут быть рекурсивно вычислены по оцененным матрицам коэффициентов \mathbf{A}_j , \mathbf{G}_j и \mathbf{D}_j , $j = \overline{1, n_p}$ соответственно из выражений:

$$\mathbf{A}_j^{(i)} = \mathbf{A}_1^{(i-1)} \cdot \mathbf{A}_j + \mathbf{A}_{j+1}^{(i-1)}, j = \overline{1, n_p-1}; \mathbf{A}_{n_p}^{(i)} = \mathbf{A}_1^{(i-1)} \cdot \mathbf{A}_{n_p};$$

$$\mathbf{G}_j^{(i)} = \mathbf{A}_1^{(i-1)} \cdot \mathbf{G}_j + \mathbf{G}_{j+1}^{(i-1)}, j = \overline{1, n_p-1}; \mathbf{G}_{n_p}^{(i)} = \mathbf{A}_1^{(i-1)} \cdot \mathbf{G}_{n_p};$$

$$\mathbf{D}_j^{(i)} = \mathbf{A}_1^{(i-1)} \cdot \mathbf{D}_j + \mathbf{D}_{j+1}^{(i-1)}, j = \overline{1, n_p-1}; \mathbf{D}_{n_p}^{(i)} = \mathbf{A}_1^{(i-1)} \cdot \mathbf{D}_{n_p};$$

$$\mathbf{G}_0^{(i)} = \mathbf{A}_1^{(i-1)} \cdot \mathbf{G}_0 + \mathbf{G}_1^{(i-1)}; \mathbf{D}_0^{(i)} = \mathbf{A}_1^{(i-1)} \cdot \mathbf{D}_0 + \mathbf{D}_1^{(i-1)},$$

где $\mathbf{A}_0^{(0)} = \mathbf{I}$; $\mathbf{A}_i^{(0)} = \mathbf{A}_i$, $i = \overline{1, n_p}$; $\mathbf{G}_i^{(0)} = \mathbf{G}_i$, $i = \overline{0, n_p}$; $\mathbf{D}_0^{(0)} = \mathbf{I}$; $\mathbf{D}_i^{(0)} = \mathbf{D}_i$, $i = \overline{1, n_p}$.

Минимизирую функцию (2) получаем вектор управлений $\mathbf{U}_{n_p+n_q}(k)$:

$$\mathbf{U}_{n_p+n_q}(k) = - \left[\mathbf{T}_u^T \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{T}_u + \mathbf{R} \right]^{-1} \cdot \mathbf{T}_u^T \cdot \mathbf{Q} \cdot \left[\mathbf{G} \cdot \mathbf{U}_{n_p}(k-n_p) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{Y}_{n_p}(k-n_p) + \right. \\ \left. + \mathbf{T}_w \cdot \mathbf{W}_{n_p+n_q}(k) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{W}_{n_p}(k-n_p) \right] \quad (3)$$

из которого для каждого момента времени в качестве входных значений системы выбираются первые m значений.

При регулировании на этапе перехода от полимеризации к отжигу желаемые значения второго выхода системы (значения температуры нижней печи) фиксируются постоянными, а значения первого выхода системы (значения температуры нижней печи) плавно устремляются к значениям второго выхода системы. На этапе отжига для избежания различий между значениями температур верхней и нижней печей процесс идентификации системы и синтеза регулятора осуществляется с учётом того, что в качестве значений второго выхода системы берутся вместо значений температуры нижней печи разницы между значениями температуры верхней печи и температуры нижней печи. При этом желаемые значения первого выхода системы плавно устремляются к значению температуры 20°C. Стабилизация температуры осуществляется с точностью $\pm 0,4^\circ\text{C}$.

В результате экспериментов был установлен оптимальный объём выборки для идентификации процесса. Он составил порядка 1000 посекундных значений о входах и выходах системы. Малые значения взаимных корреляционных функций между входами и выходами системы говорят об отсутствии необходимости введения задержек по управлению. Применяя подходы, основанные на информационном критерии Акайке (AIC) и байесовском критерии Шварца (BIC), было установлено, что наибольший порядок системы следует выбирать не выше 2. Низкое значение AIC свидетельствует о большой точности аппроксимации. Использованный линейный многоэтапный метод оценивания оказался более эффективным в сравнении с широко используемым рекурсивным методом наименьших квадратов (РМНК), однако РМНК имеет большую скорость сходимости и менее в вычислительном отношении затратен в режиме

реального времени по сравнению с другими методами идентификации систем. Для анализа адекватности модели вычислялась автокорреляционная функция вектора остаточных ошибок модели и взаимная корреляционная функция между остаточными ошибками и входами.

В докладе приводятся сравнительные результаты технологических процессов выращивания ОМК при управлениях до синтеза многосвязной системы управления и после, а также приводится сравнительный анализ свойств монокристаллов выращенных с применением синтезированной многосвязной системы управления и с применением не связанных между собой PID-регуляторов. Анализ показал существенную эффективность синтезированной многосвязной системы управления в сравнении с управлениями не связанных между собой PID-регуляторов.

Список литературы

1. Кашьяп Р.Л., Рао А.Р. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
3. Fassois, S.D. (2000) MIMO LMS-ARMAX identification of vibrating structures – Part I: The Method. Stochastic Mechanical Systems (SMS) Group, Department of Mechanical & Aeronautical Engineering, University of Patras, Greece.
4. Florakis A., Fassois S.D. MIMO LMS-ARMAX identification of vibrating structures – Part II: A critical assessment. Stochastic Mechanical Systems (SMS) Group, Department of Mechanical & Aeronautical Engineering, University of Patras, Greece.
5. Дербунович Л.В., Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Герасимчук Л.И., Козьмин Ю.С. Система управления выращиванием сцинтилляционных монокристаллов. //Вестник Национального Технического Университета. Тематический выпуск "Автоматика и приборостроение". "ХПИ". 31'2008. С. 58-65.