

Контроллер для систем управления сосудами гидротермального синтеза Хижняков А. А.

Хижняков Андрей Андреевич / Khizhnyakov Andrey Andreevich - аспирант,
кафедра электротехники и промышленной электроники,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева, г. Рыбинск

Аннотация: в статье анализируется проблема запаздывания регулирования температуры в автоклаве и проблема поддержания заданной температуры в автоклаве.

Ключевые слова: автоклав, температура, модель, контроллер, программа.

- Существует потребность предприятий в определении оптимальных настроек систем управления установок (автоклавов) разных типов и объёмов для их разогрева и поддержания постоянной требуемой температуры на всём протяжении работы, так как от этого напрямую зависит качество производимого продукта. Контролируемая и точная температура внутри автоклава это один из основных показателей работы установки.

- Сейчас в основном применяются регуляторы, которые не обеспечивают подстройку системы под изменяющуюся внешнюю температуру или снижение температуры вследствие открывания шиберов. Поэтому требуется применение адаптивных регуляторов для систем автоматического управления.

- Для определения оптимальных настроек регуляторов с целью снижения процента «брака» и затрат на подводимую энергию создаётся модель автоклава.

- На данный момент модель работает в программной среде MatLab. В дальнейшем алгоритмы управления будут перенесены на локальный контроллер (ПЛК), что позволит определить оптимальные режимы управления и реализовать их.

В основе получения монокристаллов лежат гетерогенные химические реакции, при которых одинаковые атомы «стремятся» иметь одинаковое окружение, оптимальное при определенных физико-химических условиях. Кристаллизация начинается в результате образования твердой фазы из жидкой только в том случае, когда исходная фаза становится пересыщенной по отношению к новой твердой фазе. Пересыщение системы достигается различными способами: *понижением* температуры или *давления, испарением* растворителя, *введением* в систему кристаллизующегося вещества и т. п.

Для того чтобы происходила кристаллизация, температура на поверхности раздела кристалл-расплав должна быть ниже равновесной температуры плавления T_0 на некоторую малую величину ΔT . Величина ΔT определяет скорость кристаллизации: чем больше ΔT , тем быстрее растет кристалл. [www.biblioclub.ru] График роста на рисунке 1.

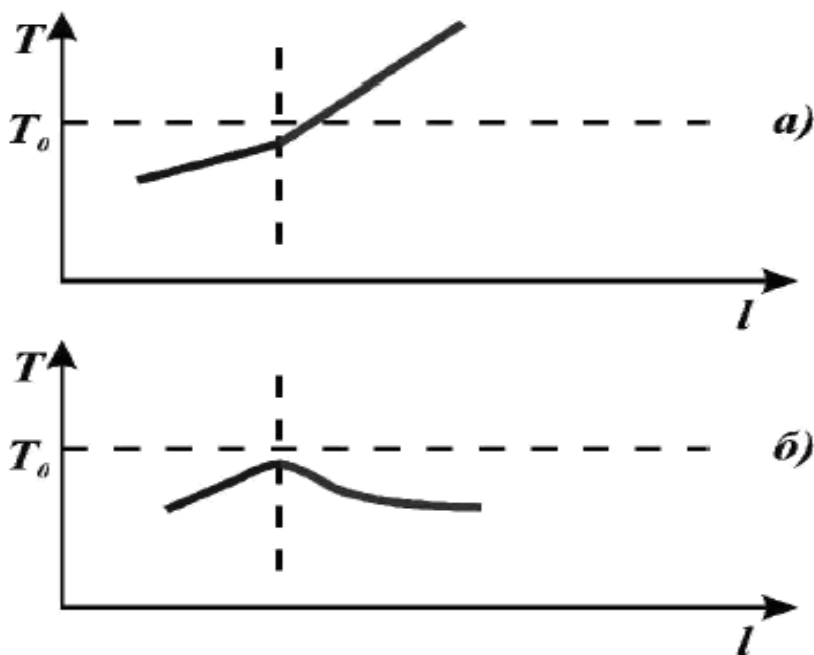


Рис. 1. График роста

- а) расплав перегрет (нормальный рост)
- б) расплав переохлажден (опасность дендритного роста)

Таблица 1. Требования к стабильности поддержания температуры для гидротермального синтеза

Стабильность относительная, %	Стабильность в °С, (600 – 1000) °С	Оценка
± 0.5	± (3 – 5)	Нижняя граница стабильности
± 0.3	± (1 – 3)	Достижима в большинстве существующих установок
± 0.1	± (0.6 – 1)	Рекомендуемая стабильность

**Матричная модель многозонного термического объекта (МТО)
Уравнение нестационарного теплового процесса**

T – температура (°С), t – время (сек),
 λ – коэффициент теплопроводности (Вт/м °С),
 c – удельная теплоёмкость (Дж/кг °С), ρ – удельная плотность (кг/м³),
 q – удельная производительность внутренних источников (Вт/м³).

Уравнение для i -й области

или

$$\lambda_{i-1} \frac{BH}{c_i \rho_i} \frac{dT}{dt} = \lambda_{i+1} \frac{BH}{c_{i+1} \rho_{i+1}} \frac{dT}{dt} + p_i$$

$$C_i m_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n \gamma_{i,j} (T_j - T_i) + p_i$$

Матричная форма

$$\gamma = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \dots & \gamma_{nn} \end{pmatrix}; \text{ где } P = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{pmatrix}; \Lambda = T \bar{\Gamma} + \Gamma_0 - \gamma$$

$$\Gamma = \text{diag} \left(\sum_{i=1}^n \gamma_{1,i}, \sum_{i=1}^n \gamma_{2,i}, \dots, \sum_{i=1}^n \gamma_{n,i} \right)$$

$$\Gamma_0 = \text{diag}(\gamma_{1,0}, \gamma_{2,0}, \dots, \gamma_{n,0})$$

1. МТО в пространстве состояний

$\frac{dX}{dt} = -(CM)^{-1}(\Gamma + \Gamma_0 - \gamma)X + (CM)^{-1}P$

где $\lambda_{ik} = \lambda_{ki} = |k - i| \lambda$, $\lambda_{0k} = \lambda_{k0} = \lambda_0$

$$MC \frac{dT}{dt} + LT = P + L_0 T_0 \quad L = \lambda_0 \text{eye}(n) + \lambda [Sd(n) + To(n)]$$

$$S(k, n) = \sum_{i=1}^{|k-n|} 1$$

$Sd(n) = \begin{pmatrix} 0 & S(2, n) & \dots & (n-1) \\ 1 & 0 & \dots & (n-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & S(n, n) \end{pmatrix}$ - матрица Теплица

$To(n) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (n-1) & (n-2) & \dots & 0 \end{pmatrix}$

3. МТО как каскад инерционных звеньев (изображен на рисунке 2)

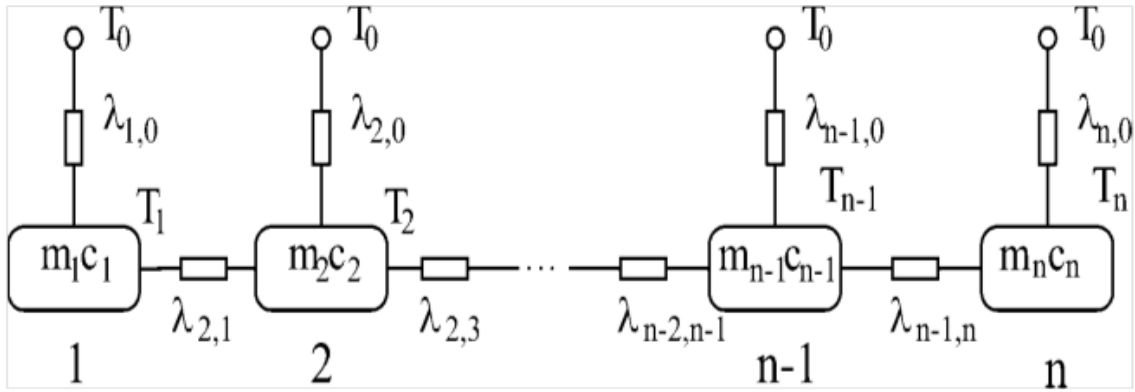


Рис. 2. МТО как каскад инерционных звеньев

$$T = \left(L_n^{-1} [H_1 - L^{-1}(A+B)]^{-1} C T_0 \quad \dots \quad 0 \quad 0 \right)$$

4. МТО с термостатическими зонами

$$L = \begin{pmatrix} 0 & \tau_{n-1}s+1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{n-2}s+1 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$M = C \frac{dT_v}{ds} + [\Lambda_{VV} - \Lambda_{VC} \Lambda_{CC}^{-1} \Lambda_{CV}] T_v = P_v - \Lambda_{VC} \Lambda_{CC}^{-1} P_C + [\Lambda_{VC} + \Lambda_{VC} \Lambda_{CC}^{-1} \Lambda_{CV}] T_0$$

Синтез корректирующих звеньев для динамической стабилизации градиента

$$D = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \dots & D_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{мис связи } VC \\ \text{средованные связи} \end{matrix}$$

$$F = D + R$$

$$R = \sum_{k=2}^n D^k - \text{diag} \left(\sum_{k=2}^n D^k \right) \text{кции}$$

W Трехзонный МТО (рисунок 3)

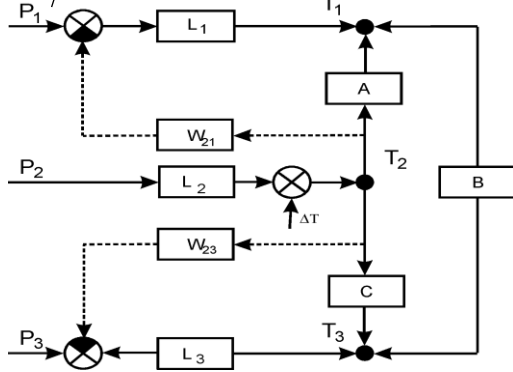


Рис. 3. Трехзонный МТО

$$D = \begin{pmatrix} 0 & A & B \\ A & 0 & C \\ B & C & 0 \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} 0 & A+BC & B+AC \\ A+CB & 0 & C+AB \\ B+CA & C+BA & 0 \end{pmatrix}$$

Оптимальное управление частично-управляемым МТО (модель МТО изображена на рисунке 3)

$$T_{OUT} = \Lambda_{IO}^{-1} P_{IN} - \Lambda_{IO}^{-1} \Lambda_{IN} T_{IN}$$

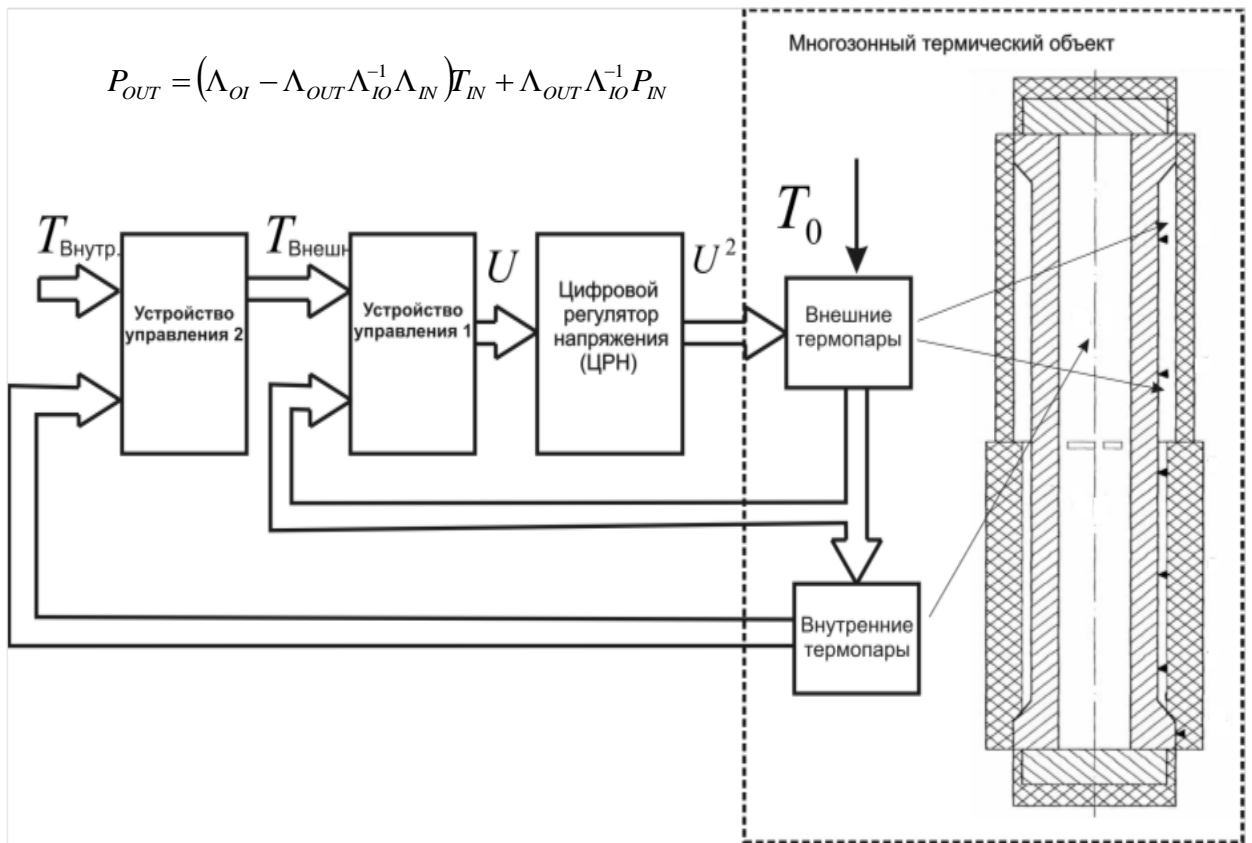


Рис. 4. Модель МТО

Запаздывание сигнала от внутренних термопар приводит к перерегулированию при выводе автоклава на режим роста. Расчет оптимального управления позволяет избежать перерегулирования.

При изменении температуры окружающей среды происходит отклонение температур внутри на величину до 0.8 градуса. Введение каскадного управления позволило на порядок снизить влияние изменения температуры окружающей среды, что позволило снизить величину критерия потерь с 20 до 0.04. Изменения представлены на рисунке 4 [www.biblioclub.ru].

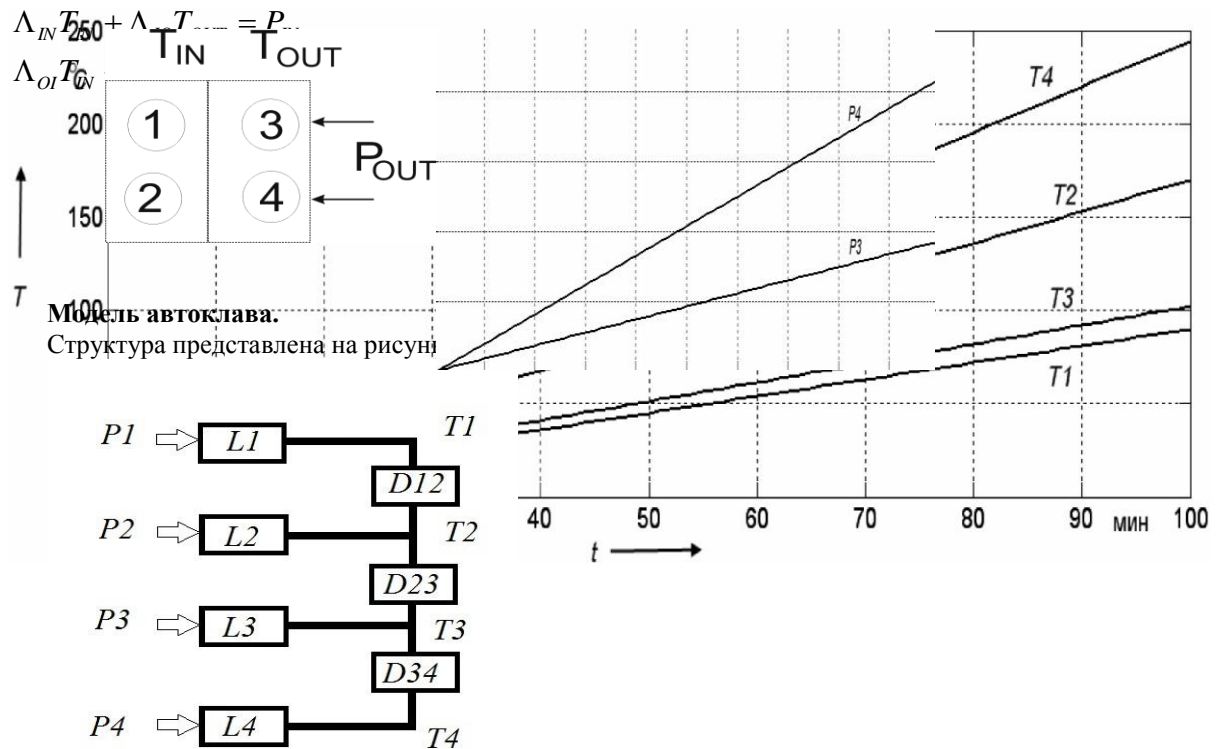


Рис. 5. Модель автоклава

Прежде всего, в этой структуре можно выделить передаточные функции, описывающие динамику преобразования подводимой мощности в температуру стенки. В данном случае матрица является диагональной размерности 4.

Изменение температуры, в какой-либо зоне может быть вызвано за счет собственных источников тепла. Для учета этого влияния необходимо сформировать единичную диагональную матрицу размерностью 4 на 4.

По известной структуре можно сформировать матрицу непосредственных связей, считая, что номера строк этой матрицы соответствуют входам многомерного термического объекта (МТО), а номера столбцов – его выходам.

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_4 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & D_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

То есть, температура 4 зоны нагрева оказывает влияние на температуру в зоне 3 через передаточную функцию D_{34} , температура 3 зоны нагрева оказывает влияние на температуру в зоне 2 через передаточную функцию D_{23} , температура 2 зоны нагрева оказывает влияние на температуру в зоне 1 через передаточную функцию D_{12} .

Определение матрицы опосредованных связей k -го порядка может быть осуществлено по формуле

Первый элемент представляет собой сумму матриц опосредованных связей через одну, две и так далее до $n-1$ зоны.

Матрица полных связей представляет собой сумму матриц непосредственных и опосредованных связей:

Определим матрицу опосредованных связей второго порядка $F = D + R$.

$$R = \begin{pmatrix} 0 & D_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & D_{12}D_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{23}D_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Матрица полных связей представляет собой сумму матриц непосредственных и опосредованных связей. Тестовое воздействие на 4 зону после преобразования изображено на рисунке 6.

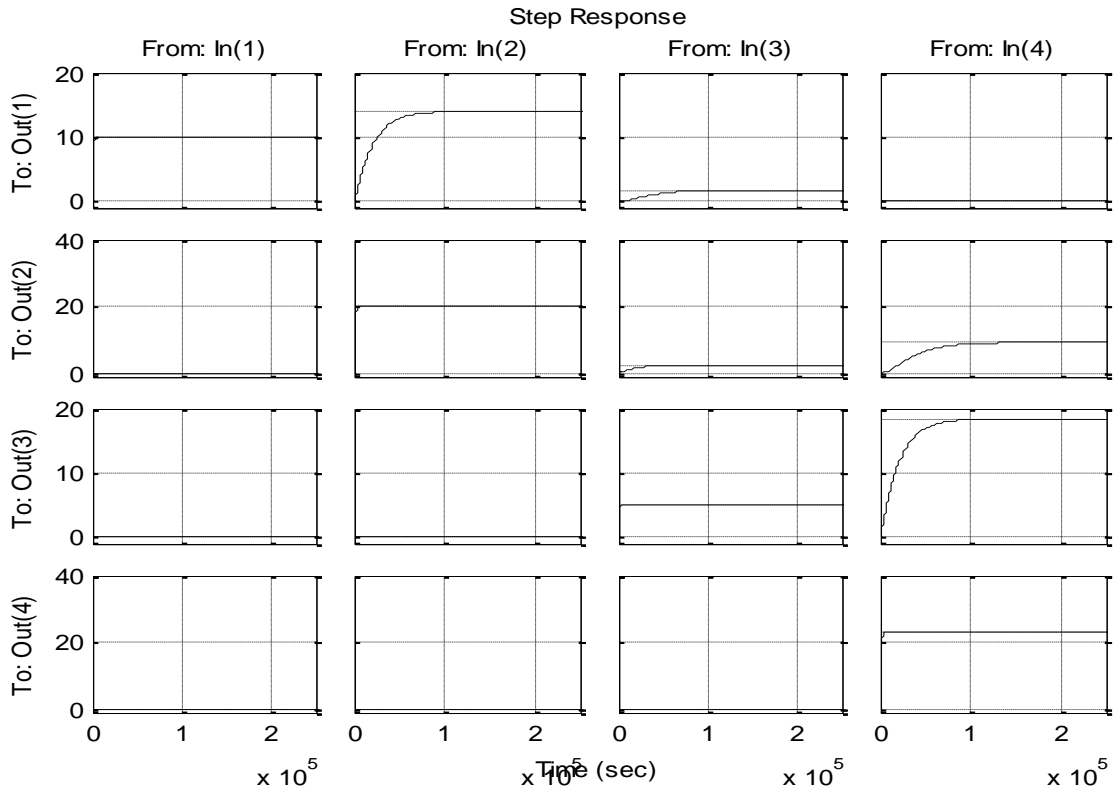


Рис. 6. Тестовое воздействие на 4 зону после преобразования

Как видно из рисунка 6, теперь при тестовом воздействии на четвертую зону происходят изменения в 3 и 2 второй, но не в первой, то есть необходимо повысить порядок матрицы опосредованных связей. Матрица полных связей представляет собой сумму матриц непосредственных и опосредованных связей.

$$R=D^2+D^3;$$

$$F=D+\text{diag}([1 \ 1 \ 1 \ 1])+R;$$

$$W=F*L;$$

Результат тестового воздействия после такого преобразования можно наблюдать на рисунке 7.

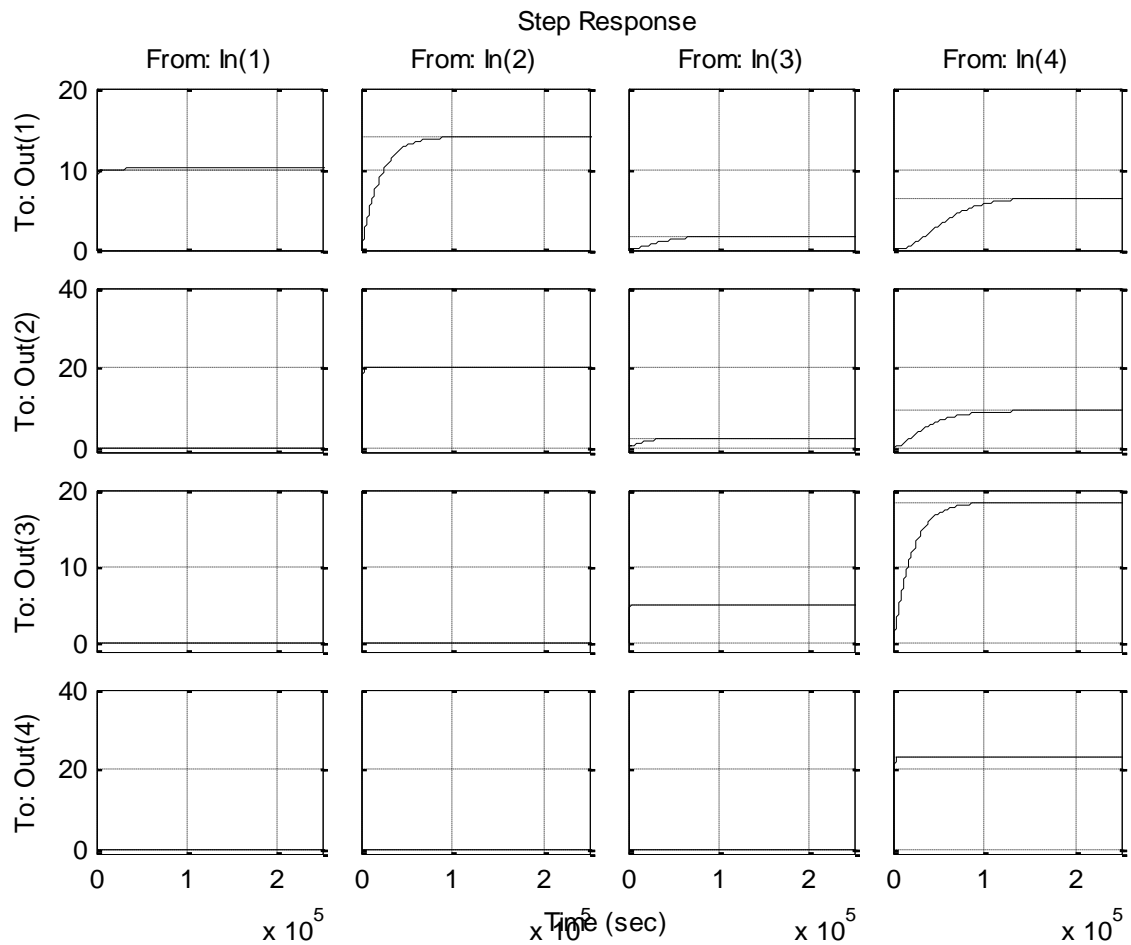


Рис. 7. Результат тестового преобразования 4 зоны с последующими изменениями в 3, 2 и зоне

В заключении можно сказать, что такая модель автоклава будет учитывать потери на нагрев стенок автоклава и потери мощности нагревательных элементов при нагреве в четырех зонах. Такая модель автоклава будет способствовать более точной подстройке регуляторов температуры под заданные параметры, что немало важно для выращивания монокристаллов.

На данном этапе имеются аналитические и экспериментальные подтверждения работоспособности технологии. Ведётся разработка проекта, основная часть которого разрабатывается в виде программного кода в среде MatLab.

1. Юдин В. В., Малков Б. Б. Исследование на ЭВМ моделей элементов РЭА: Учебное пособие / ЯПИ. Ярославль, 1989. 80 с.
2. Юдин А. В. Оптимизация цифровых регуляторов мощности к задачам энергообеспечения процессов направленной кристаллизации: Монография. Рыбинск: РГАТА, 2009.
3. [Электронный ресурс]: «Университетская библиотека». Режим доступа: www.biblioclub.ru (дата обращения: 16.10.2016).