

УДК 021.8 + 025.1
ББК 78.34

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ В УСТАНОВКАХ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Гоник М. М.¹, Боевкин В. И.²

*(Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана, Москва)*

Рассматривается многосвязная система автоматического управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов, позволившая обеспечить регулирование температуры вокруг растущего кристалла с точностью 0,05–0,1 градусов на протяжении всего ростового цикла. Проектирование системы управления основано на предварительном исследовании и выборе информационной структуры многосвязной системы с целью уменьшения взаимного влияния каналов в объекте управления и изменения его параметров в процессе роста кристалла. Исследование системы и определение стратегии управления проводится на базе динамической численной двумерной модели тепломассопереноса при кристаллизации. Управление многомерным объектом осуществляется с помощью отдельных ПИД-регуляторов.

Ключевые слова: управление температурным режимом, многосвязная система, исследование информационной структуры.

¹ Гоник Марк Михайлович, аспирант (mark_tg@inbox.ru).

² Боевкин Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор.

1. Введение

Выращивание кристаллов из расплавов представляет собой процесс управляемой кристаллизации [7]. Горячий расплав перемещается в холодную зону в строго определенных тепловых условиях, которые создаются и поддерживаются системой управления. Автоматическая система должна обеспечивать заданную скорость кристаллизации, форму фронта, осевой и радиальный градиенты температур вблизи него. Точность поддержания этих параметров определяет качество растущего кристалла. На сегодняшний день требование к точности управления температурой внутри зоны (вблизи фронта) кристаллизации (рис. 1) составляет $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении всего ростового цикла [9]. Однако при выращивании кристаллов традиционными методами такое качество управления не всегда обеспечивается. Одна из причин заключается в том, что температура внутри зоны кристаллизации не измеряется прямым способом и не регулируется системой управления. Конструкция ростовой установки позволяет размещать термодатчики и управляющие нагреватели лишь на удалении от непосредственного объекта. В результате приходится определять оптимальную программу или стратегию управления температурами на удалении от зоны кристаллизации (такими как T_{11} , T_{12} , T_{13} , T_{14}), которая обеспечивала бы необходимый температурный режим внутри неё [2, 17]. Точность решения такой задачи во многом зависит от применяемых моделей теплопереноса и на сегодняшний день в лучшем случае составляет $1\text{--}2$ градуса [18]. В процессе эксперимента нестационарные тепловые процессы в зоне кристаллизации остаются неизвестными. Точность управления температурным режимом оценивается уже после ростового цикла по качеству выращенного кристалла.

В настоящей работе рассматривается система управления, которая позволяет регулировать температуру не на удалении от растущего кристалла, а вблизи него, причем с требуемой точностью. Измерительные датчики размещаются вокруг зоны кри-

сталлизации; дополнительно используется нагреватель, погруженный в расплав и приближенный к фронту кристаллизации (рис. 1).

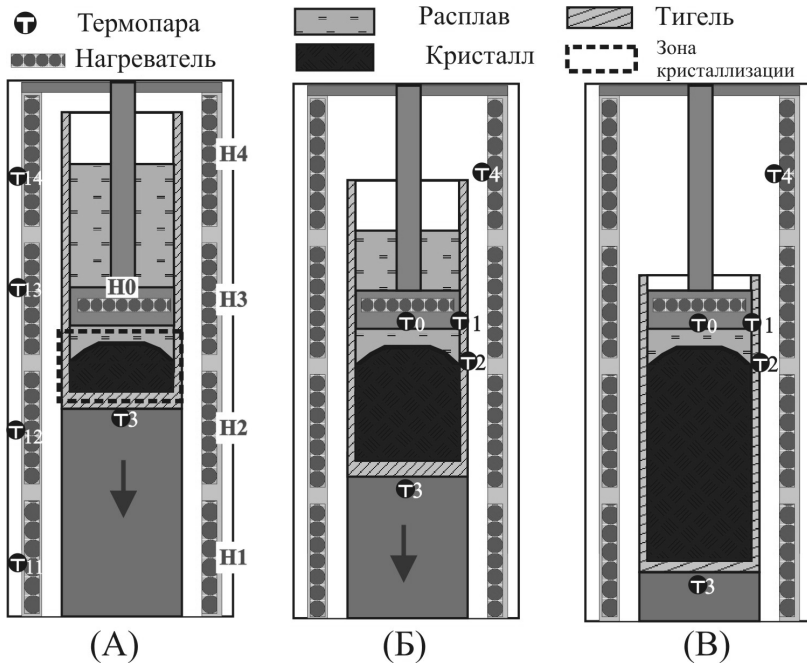


Рис. 1. Схема установки кристаллизации на (А) – начальном, (Б) – среднем, (В) – конечном этапах ростового цикла

Такая структура позволяет повысить точность определения стратегии управления. Обратная тепловая задача имеет более простое и корректное решение для температуры на границах зоны кристаллизации, чем на удалении от нее. Однако при этом усложняется задача регулирования. Приближение термопар к кристаллу и друг к другу с одновременным удалением от нагревателей приводит к увеличению инерционности и взаимного влияния каналов в таком многомерном объекте управления. Применение традиционных ПИД регуляторов для такой систе-

мы становится проблематичным. Достижение высокого качества регулирования требует специальной информационной структуры системы управления [8, 11]. В настоящей работе авторами предлагается методика исследования и выбора такой структуры с целью уменьшения взаимного влияния каналов в объекте управления и изменения его параметров в процессе роста кристалла. Исследование структуры системы управления, а также определение стратегии управления, производится на базе численной динамической модели теплопереноса при кристаллизации. Производится синтез и натурные испытания многосвязной системы регулирования на базе отдельных ПИД-регуляторов с постоянными коэффициентами.

2. Проектирование многосвязной системы управления температурным режимом

2.1. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Многосвязная система автоматического управления (далее МСАУ) состоит из пяти нагревателей: четырех цилиндрических «фоновых», удаленных от кристалла, и одного плоского, погруженного в расплав (рис. 1) [4]. МСАУ должна поддерживать температуру в зоне роста так, чтобы при опускании с постоянной скоростью тигля с расплавом и кристаллом выполнялись требования к параметрам кристаллизации. Задача управления осложняется нестационарным характером объекта управления вследствие перераспределения в объеме материалов с разными теплофизическими свойствами в процессе роста кристалла. Осевой градиент температуры контролируется и регулируется по показаниям термопар, размещенных на оси установки в погруженном нагревателе T_0 и доньшке тигля T_3 . При этом доньшко тигля вместе с термопарой перемещается вниз относительно неподвижных нагревателей, что также определяет нестационарность объекта в канале управления температурой T_3 . Прежняя структура системы управления [4] обеспечивала регу-

лирование этих температур с помощью фоновых нагревателей Н2 и Н3. Стратегия управления определялась по одномерной модели и представляла константу для T_0 и линейный сигнал для T_3 . Остальные фоновые нагреватели поддерживали постоянными рядом с собой температуры (T_{11} и T_{14}). Погруженный нагреватель в управлении не участвовал, выделяя постоянную мощность. Точность управления температурами на оси T_0 и T_3 с помощью ПИД-регуляторов в предыдущей системе в процессе роста кристалла варьировалась от 0,5 до 1,5 градусов. Качество управления заметно ухудшалось при увеличении размера кристалла.

Для исследования многосвязной системы управления было разработано специализированное программное обеспечение (далее ПО) [5]. Численная динамическая двумерная модель теплопереноса [3, 13] была совмещена с дискретной системой управления. Модель основана на решении уравнения теплопроводности с учетом фазового перехода (задача Стефана) при наличии внутренних источников тепла:

$$(1) \quad \rho(T) \frac{\partial e(T)}{\partial t} = \nabla(k(T)\nabla T) + Q(t),$$

$$\rho(T) = \begin{cases} \rho_1, & T < T_\varepsilon, \\ \rho_2, & T > T_\varepsilon; \end{cases} \quad k(T) = \begin{cases} k_1(T), & T < T_\varepsilon, \\ k_2, & T > T_\varepsilon; \end{cases}$$

$$e(T) = \begin{cases} e(T_0) + c_1(T)T, & T < T_\varepsilon, \\ e(T_\varepsilon) + q_\varepsilon + c_2(T)(T - T_\varepsilon), & T > T_\varepsilon; \end{cases}$$

где T_κ – температура кристаллизации; ε – удельная энтальпия; q_κ – удельная теплота кристаллизации. Теплопроводность k , теплоемкость c , плотность ρ материалов являются функциями температур и имеют разрыв при фазовом переходе. При численном решении функции заменяются кусочно-линейными.

Расчетная область (рис. 2) включает кристаллизующий материал (германий, кремний, висмут) и элементы конструкции из кварца, графита, молибдена, алунда, графитового войлока. Для решения уравнений применяется метод конечных элементов; форма ячейки сетки – треугольная. Задача рассматривается как

осесимметричная. Граничные условия на верхней, нижней и боковой поверхностях задаются 3 рода – конвективный теплообмен между поверхностью и внешней средой. В случае, когда модель включает область конструкции установки с водяным охлаждением, граничное условие на нижней поверхности задается 1 рода (постоянная температура). В качестве начальных условий используется решение стационарной тепловой задачи, которое находится с помощью той же модели.

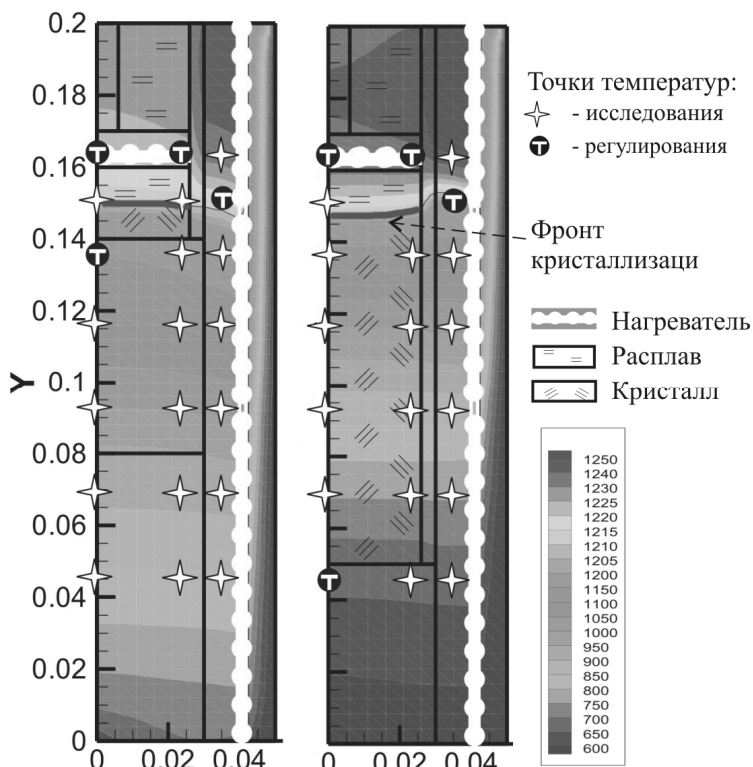


Рис. 2. Расчетная область для 2D модели теплового поля в ростовой установке на начальной (А) и конечной (В) стадиях кристаллизации

Внутренние источники тепла Q могут размещаться в любой ячейке сетки модели. Источники объединяются в рамках нагревателей, мощности которых являются управляющими воздействиями в автоматической системе. Значения мощностей могут изменяться и в ручном режиме, что использовалось для проведения идентификаций объекта и исследования многосвязной системы управления. Дополнительно в модель введен источник тепла, распределенный вдоль фазовой границы. Тепловыделение на поверхности фронта кристаллизации позволяет исследовать влияние скрытой теплоты кристаллизации на процесс управления температурой в квазистационарном режиме кристаллизации. В качестве управляемых значений могут выбираться температуры в любом узле сетки модели, в том числе внутри исследуемой зоны кристаллизации.

Существующие модели [15, 16], аналогичные рассматриваемой, используют в качестве управляющих воздействий изменения граничных условий 2 рода (внешний поток) на боковой стенке. Такой подход не позволяет адекватно моделировать многомерную систему управления, особенно в нашем случае, когда используется погруженный в расплав нагреватель Н0. Другим преимуществом рассматриваемой модели является возможность проведения расчетов в масштабе реального времени. Так, при разбиении сетки на ячейки с шагом 1 мм (при размере всей области 200×45 мм) массив температур во всех ее узлах рассчитывается в несколько раз быстрее шага дискретизации системы. Такая возможность обусловлена тем, что модель не учитывает конвекцию в расплаве, которая существенно подавлена в тонком слое расплава под погруженным нагревателем и не влияет на теплоперенос.

С помощью ПО нами было проведено более 1000 идентификаций пар управления «нагреватель – температура» в разных точках исследуемого объекта с распределенными параметрами, на разных стадиях технологического процесса (рис. 2) для разных вариантов конструкции установки и геометрии фоновых нагревателей. Информационная структура системы управления

выбиралась в результате компромисса при решении в принципе противоположных задач. С одной стороны точки регулирования должны располагаться как можно ближе к фронту кристаллизации и, следовательно, друг к другу для того, чтобы в большей степени определять его положение и форму, а также градиент температур. С другой стороны эти точки должны быть как можно дальше разнесены друг от друга для того, чтобы минимизировать взаимное влияние между каналами в объекте управления и обеспечить высокую точность управления с помощью сепаратных ПИД регуляторов. При этом изменение матричной передаточной функции объекта управления должно быть в допустимом диапазоне, который позволял бы успешно использовать регуляторы с постоянными коэффициентами.

Анализ степени связности в многомерном объекте производился с помощью матрицы Бристоля Λ [10], которая характеризует изменения коэффициентов усиления в сепаратных разомкнутых контурах при замыкании всех остальных контуров в многосвязной системе. При этом элемент λ_{ij} матрицы Λ определяется следующим образом:

$$(2) \quad \lambda_{ij} = \frac{\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_i} \right)_{\text{все контуры разомкнуты}}}{\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_i} \right)_{\text{все контуры кроме } u_i \text{ замкнуты}}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m,$$

где y – выход разомкнутой системы, а u – управляющий сигнал. При уменьшении взаимного влияния в объекте диагональные элементы λ_{ii} матрицы Бристоля стремятся к единице, а недиагональные λ_{ij} – к нулю. Единичная матрица соответствует автономной системе управления. Сумма элементов любой строки матрицы Бристоля или любого столбца равна единице [10]. На рис. 3 приведены матрицы Бристоля для четырех разных объектов управления, отличающихся степенями связности каналов.

Для выбранной таким образом информационной структуры системы управления с помощью модели изучены особенности дискретно-непрерывной системы с ПИД-регуляторами, исследовано явление выделения теплоты кристаллизации как внеш-

него возмущения для системы управления, выявлены проблемы регулирования в многосвязной системе.



Рис. 3. Передаточные функции объекта и матрицы Бристоля для двух информационных структур системы управления, отличающихся геометрией нагревателей, на начальной (А) и конечной (В) стадиях кристаллизации

Так же на модели определена стратегия управления температурами в точках, выбранных для регулирования в реальной установке. Стратегия определялась по результатам оптимизации теплового поля на модели установки для нескольких стадий ростового цикла. На рис. 2а изображено «правильное» тепловое поле на начальной стадии роста кристалла, при котором фронт кристаллизации имеет заданное положение и форму при требуемой величине градиента температур. На рис. 2б изображено поле температур на последней стадии кристаллизации, при

котором фронт имеет нежелательную (вогнутую) форму при правильном положении и градиенте температур. Оптимизации поля проводилась несколькими способами. Первый способ представлял собой вариации мощностей нагревателей в ручном режиме. Второй – подбор стратегии управления при активизированной системе регулирования температур вокруг зоны кристаллизации. Третий способ заключался в том, что система регулирования настраивалась на температуры в точках внутри зоны кристаллизации, через которые должен проходить фронт кристаллизации и соседние изотермы, определяющие градиент температур. При подаче соответствующих входных сигналов, установившееся состояние такой системы определяло заданный температурный режим в установке в целом и необходимые температуры в исследуемых точках в частности.

2.2. СИНТЕЗ МНОГОСВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Синтез многосвязной системы автоматического регулирования (далее МСАР) проводился с помощью созданного нами программного обеспечения [5] в среде *Labview*, использующего специализированные библиотеки проектирования систем управления *Control*, *Identification*, *Simulation* [14]. Синтез основан на определении коэффициентов дискретных ПИД-регуляторов для отдельных систем и последующей их корректировки по результатам моделирования многосвязной системы управления. Дискретный регулятор проектируется по аналоговому прототипу, так как в процессе экспериментов шаг дискретизации варьируется оператором от 10 до 30 секунд, и удобно использовать неизменяемые коэффициенты аналогового регулятора. Учитывая рекомендации специалистов [12] о том, что значение частоты дискретизации должно быть в 10 раз больше, чем значение полосы пропускания системы, определяется требование к длительности переходного процесса в замкнутой системе в пределах 400–600 с.

Точность регулирования складывается из точности слежения за входным сигналом при действии внешних возмущений и результата прохождения случайных сигналов через систему. Линейный входной сигнал для температуры T_3 на нижней границе кристалла определяет в системе с ПИД регуляторами наличие астатизма, которое зависит от коэффициента интегрального члена регулятора. Внешними возмущениями для рассматриваемой системы являются выделение теплоты кристаллизации, скачки напряжения в электросети, изменение температуры и давления в системе охлаждения установки, турбулентные потоки газа в рабочей камере. Синтез МСАР проводился именно с целью компенсации таких возмущений (рис. 4а). Выявлен недостаток проектирования предыдущей МСАР, заключавшийся в том, что выбор коэффициентов регуляторов в сепаратных системах осуществлялся по виду переходных процессов только при изменении входных сигналов. Это приводило к известной проблеме сокращения полюсов объекта нулями регулятора. В результате характеристическое уравнение замкнутой системы содержало малые по модулю корни, что приводило к плохому качеству компенсации внешних возмущений и воздействий других сепаратных контуров управления. Случайные сигналы в системе присутствуют вследствие шума при измерении температуры. Дисперсия случайного сигнала на выходе системы пропорциональна дисперсии входного сигнала, шагу дискретизации и эквивалентной полосе пропускания системы [1]. Более того, как показало моделирование в многосвязной системе, дисперсия сигнала на выходе может существенно возрастать в зависимости от перекрестных связей в объекте управления (рис. 4б). Шум при измерении управляемого сигнала приводит к флуктуациям управляющего сигнала, что является крайне нежелательным при выращивании кристаллов. Для решения этой проблемы предложена методика проектирования цифрового фильтра для обработки управляемого сигнала. Методика основана на выборе частоты среза, при которой система регулирования сохраняет свои динамические свойства [6].

Предложено также применять предварительную фильтрацию входного сигнала для уменьшения резких скачков управляющего сигнала.

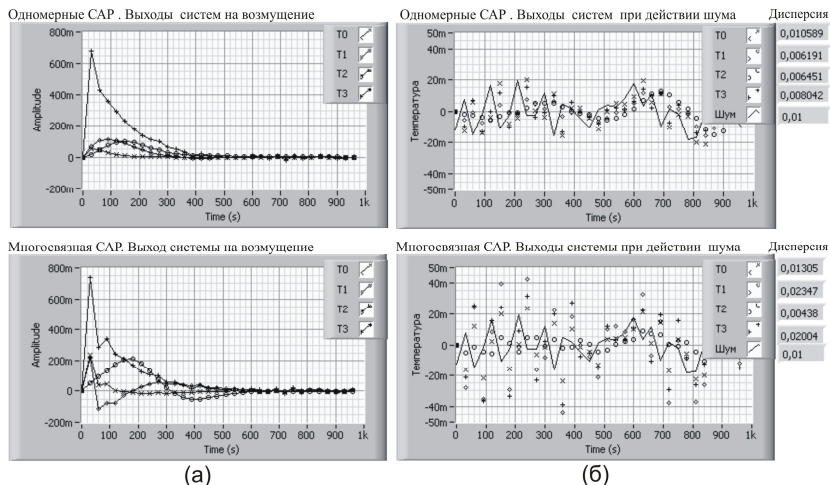


Рис. 4. Регулирование в одномерной и многовязной системах.

Стабилизация выходного сигнала при действии единичных возмущений на объект (а) и в условиях прохождения шума через систему (б). Шаг дискретизации – 30 с

Коэффициенты регуляторов выбирались по совокупности предъявляемых к системе требований. Шаг дискретизации применяли наименьшим возможным, несмотря на повышение износа измерительного оборудования. Программно-аппаратными средствами обеспечена высокая точность относительных измерений температур 0,01 °С и формирования напряжения на нагревателях 0,01 В [5]. Предложены решения по уменьшению времени между измерением и подачей управляющего сигнала в контурах регулирования. Методика синтеза МСАР и соответствующее программное обеспечение испытывались на созданной численной динамической модели.

Натурные испытания системы управления проводились на исследовательской установке выращивания кристаллов, сконст-
222

руированной с учетом предложенной новой информационной структуры системы управления. Эксперименты проводились по выращиванию кристалла висмута. Скорость кристаллизации и опускания тигля с расплавом и кристаллом была выбрана 20 мм в час. Темп охлаждения температуры T_5 около нижней границы кристалла составил 23 градуса в час.

3. Результаты проектирования и испытаний многосвязной системы управления температурным режимом

Новая информационная структура МСАУ выбрана так, что дополнительно к температурам T_0 и T_3 на оси кристалла регулируются еще T_1 и T_2 возле его боковой поверхности (рис. 1). Внесены изменения в геометрию нагревателей относительно предыдущей конструкции установки. Предложены новые пары управления между нагревателями и термопарами. Новая структура обеспечивает меньшую взаимосвязь в каналах объекта управления и изменение его параметров в процессе роста кристалла, чем структура, основанная на предыдущей конструкции ростовой установки. На рис. 3 приведены передаточные функции и соответствующие им матрицы Бристоля для двух таких структур. Почти все элементы в матрице Бристоля для новой структуры (структура 2) на порядок меньше аналогичных элементов для предыдущей (структура 1). Диагональные элементы ближе к единицам, а недиагональные к нулям. Изменения параметров передаточной функции объекта в процессе роста кристалла находятся в пределах 20–30%, что позволяет успешно применять ПИД-регуляторы с постоянными коэффициентами.

Определена стратегия управления температурами для такой МСАУ. Получены теоретически ожидаемые результаты: все температуры вокруг зоны кристаллизации должны быть постоянными в течение ростового цикла. Определены их конкретные значения для выращивания кристалла германия. Также на двумерной модели получено подтверждение результата, опреде-

ленного ранее на одномерной модели, что температуры T_3 должна уменьшаться по линейной функции. Однако выявлено, что углы наклона этих функций отличаются (рис. 5). Более того, отличаются результаты, получаемые на двумерной модели для различных структур системы управления, особенно на стадиях роста большого по высоте кристалла. Следовательно, одномерное приближение решаемой задачи не позволяет корректно определить и обеспечить заданный режим кристаллизации, – необходимо использовать двумерную модель.

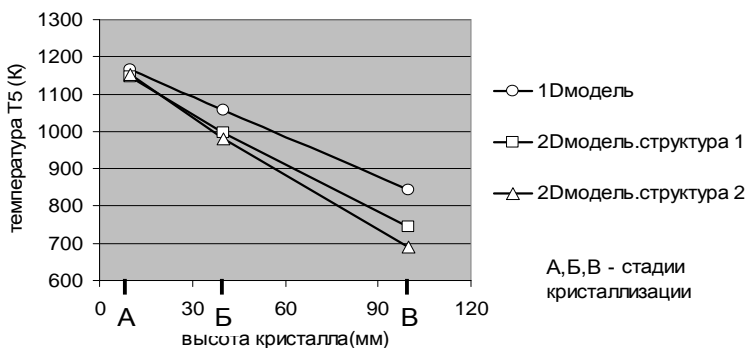


Рис. 5. Стратегии управления температурой T_3 , определенные на 1D и 2D моделях

Передаточная функция многомерного диагонального регулятора R для системы управления с новой информационной структурой составила:

$$R = \begin{bmatrix} R_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix},$$

$$R_0(s) = 1 + \frac{1}{100s}, \quad R_2(s) = 4 + \frac{4}{100s},$$
$$R_1(s) = 3 + \frac{3}{100s}, \quad R_3(s) = 6 + \frac{6}{200s} + \frac{60s}{0.1s + 1};$$

где R_0, R_1, R_2, R_3 – отдельные регуляторы в каналах управления температурами T_0, T_1, T_2, T_3 .

Во всех каналах, кроме одного, используются ПИ-регуляторы. ПИД-алгоритм применяется только для регулирования температуры в доньшке тигля T_3 . Регулятор R обеспечивает заданное качество управления для всего диапазона изменения параметров объекта в процессе роста кристалла. Теоретические расчеты и моделирование показали (рис. 4), что время переходных процессов в многосвязной системе составляет желаемые 300–500 с, внешние возмущения не приводят к колебаниям в системе, величина ошибки за счёт неточности астатизма при управлении температурой T_3 не превышает 0,05 °С. При этом флуктуации управляемых сигналов, вызванные шумом при измерении, даже при шаге дискретизации 30 с, находятся в диапазоне 0,05 °С.

Проведенные натурные испытания МСАР подтвердили теоретические результаты. Точность стабилизации температур вокруг зоны кристаллизации и слежения за линейной уставкой температуры T_3 составила 0,05–0,1 градусов. Длительность переходных процессов находилась в диапазоне 500–600 с. На рис. 6 приведены графики измерения температур T_0 и T_3 на оси кристалла в процессе его роста. Всплески Б1 и Б2 температур на графике T_0 соответствуют тестовым воздействиям на систему потоком воздуха через щели в конструкции исследовательской установки. Система демонстрирует хорошее качество подавления таких возмущений. Графики других трех температур (T_1, T_2, T_4), поддерживаемых постоянными, имеют подобный вид. Переходные процессы А и В относятся к началу и окончанию кристаллизации, когда меняется характер входного сигнала для температуры на доньшке T_3 . Сигнал уставки изменяется плавно с целью уменьшения флуктуаций при этом управляющего на-

пряжения. В процессе экспериментов выявилась проблема выхода управляющих сигналов МСАР из рабочего диапазона напряжений нагревателей. Для предотвращения такой ситуации было определено начальное состояние системы управления, которое обеспечило нахождение напряжений нагревателей в линейном диапазоне на протяжении всего процесса роста кристалла.

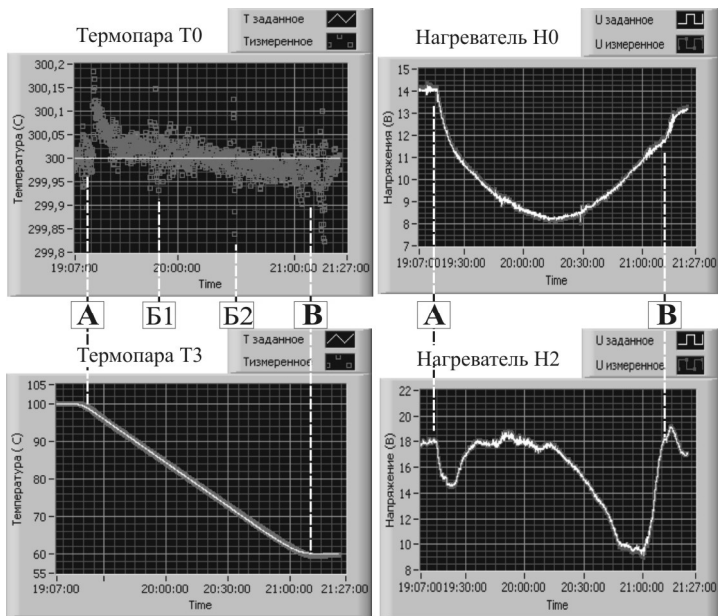


Рис. 6. Графики управляемых температур на оси кристалла T_0 , T_3 и управляющих напряжений на нагревателях в процессе ростового эксперимента.

А, B1, B2, B – стадии кристаллизации

4. Заключение

Разработанная многосвязная система управления используется при выращивании кристаллов и исследовании процессов кристаллизации методом ОТФ (Осевого Теплового потока вблизи Фронта кристаллизации [4]). Одной из сильных сторон системы с практической и экономической точек зрения является то, что она обеспечивает высокую точность управления температурным режимом с помощью обычных ПИД-регуляторов. Относительная простота такого регулирования определяется информационной структурой системы управления, которая исследуется и выбирается на стадии проектирования конструкции ростовой установки. Продолжением данной работы авторы видят построение системы управления неизмеряемыми параметрами кристаллизации в процессе ростового эксперимента с помощью созданной модели, работающей в масштабе реального времени.

Литература

1. БЕССЕКЕРСКИЙ В. А. *Цифровые автоматические системы*. – М: Наука, 1976. – 575 с.
2. БУТКОВСКИЙ А. Г. *Методы управления системами с распределенными параметрами*. – М: Наука, 1975. – 568 с.
3. ГАЛАНИН М. П., ГУЗЕВ М. А., НИЗКАЯ Т. В. *Разработка и реализация вычислительного алгоритма для расчета температурных напряжений, возникающих при нагреве металла, с учетом фазовых переходов*. – Препринт ИПМ им. Келдыша РАН. – №139. – Москва, 2005.
4. ГОЛЫШЕВ В. Д., ГОНИК М. А., ЦВЕТОВСКИЙ В. Б., ЛЮБЧЕНКО В. С. *Компьютерное управление выращиванием кристаллов методом ОТФ // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2002. – №5. – С. 49–55.

5. ГОНИК М. М., БОЕВКИН В. И., НИЗКАЯ Т. В. *Программно-технические средства для исследования и управления процессами теплопереноса при росте кристаллов* // Труды конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» ИПУ РАН, Москва, 10-12 ноября 2008 г. – С. 372–379.
6. ИЗЕРМАН Р. *Цифровые системы управления*. – М: Мир. 1984. – 541 с.
7. ЛОДИЗ Р., ПАРКЕР Р. *Рост монокристаллов*. – М: Мир, 1974. – 540 с.
8. МЕЕРОВ М. В. *Исследование и оптимизация многосвязных систем управления*. – М: Наука, 1986. – 231 с.
9. ПАНОВ П. И. *Построение систем управления и информационно-измерительных модулей высокопроизводительного оборудования для выращивания монокристаллического кремния*: Дис. канд. техн. наук. – Красноярск, 2004. – 195 с.
10. РЭЙ У.. *Методы управления технологическими процессами*. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
11. СОБОЛЕВ О. С. *Методы исследования линейных многосвязных систем*. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 120 с.
12. СОЛОДОВНИКОВ В. В., ПЛОТНИКОВ В. Н., ЯКОВЛЕВ А. В. *Теория автоматического управления техническими системами*. – М.: МГТУим. Баумана, 1993. – 492 с
13. GONIK M. A. et al. *Development of a model for on-line control of crystal growth by the AHP method* // Journal of Crystal Growth. – 2007. – Vol. 303, №1. – P. 180–186.
14. *Labview Control Design Toolkit User Manual*. – National Instruments, 2006. – 211 p.
15. LUN L., YECKEL A., DERBY J., DAOUTIDIS P. *Control of interface shape of cadmium zinc telluride grown via an electrodynamic gradient freeze furnace* // Proceedings of the IEEE 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation (MED2007), Athens, Greece, June 27-29, 2007.
16. MARGULIES M., WITOMSKI P., DUFFAR T., *Optimization of the bridgman crystal growth process* // J. Cryst. Growth.

2004. – Vol. 266, №1–3. – P. 175–181.

17. METZGER M. *Optimal control of crystal growth process* // Journal of Crystal Growth. – 2001. – Vol. 230, №1. – P. 210–216.
18. REED M. D. et. al. *Computational modeling of heat transport in a multi-zone high-pressure vertical electro-dynamic gradient CdZnTe furnace* / Journal of Crystal Growth. – 2006. – Vol. 289, №2. – P. 494–501.

INCREASING THE CONTROL ACCURACY OF TEMPERATURE CONDITION IN CRYSTAL GROWTH PLANT

Mark Gonik, Bauman Moscow State Technical University, Ph.D. student (mark_mg@inbox.ru).

Victor Boevkin, Bauman Moscow State Technical University, Doctor of Science, professor

Abstract: We consider a multidimensional (MIMO) temperature control system for the crystal growth plant. The control system regulates the temperature around the growing crystal with accuracy of 0.05-0.1 °C during the whole growth process. Design of the control system is based on the preliminary investigation and choice of the information structure of MIMO system to decrease plant parameters changes and channels interconnection during the crystal growth. The analysis of the system and the solution of the control problem are performed with the aid of the dynamic computational 2D model of heat and mass transfer in the process of crystallization. Separated PID regulators are used for MIMO plant control.

Keywords: temperature condition control, multidimensional (MIMO) system, investigation of information structure.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Н. Н. Бахтадзе*