

ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION  
TECHNOLOGIES  
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 681.515

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-2-23-42

## Синтез трехканального ПИД-регулятора для управления трехзонной среднетемпературной печью<sup>\*</sup>

А.И. ЦИБИНА<sup>а</sup>, Г.П. ЧИКИЛЬДИН<sup>б</sup>

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный  
технический университет

<sup>а</sup> [alena.ts1@mail.ru](mailto:alena.ts1@mail.ru)

<sup>б</sup> [chikildin@gmail.com](mailto:chikildin@gmail.com)

В настоящее время в метрологических лабораториях существует необходимость в передаче единиц температур от эталонов высшего разряда посредством воспроизведения реперных точек международной температурной шкалы. Процесс воспроизведения реперной точки подразумевает нагрев, плавление, перегрев и затвердевание металла и иногда может занимать более одного рабочего дня. Целью настоящей работы было создать и практически опробовать алгоритм, учитывающий тепловые потоки в трехзонной печи для равномерного прогрева и относительно быстрого достижения площадки затвердевания.

В течение последних двадцати лет были опробованы несколько алгоритмов, позволяющих пройти все четыре стадии в течение одного рабочего дня. В настоящей работе описан практически опробованный алгоритм управления трехзонными печами для воспроизведения реперных точек температурной шкалы в диапазоне от 156,5985 °C до 1084,62 °C, учитывающий требования к поддержанию минимального градиента температуры по высоте ампулы реперной точки и получивший применение в печах лаборатории Западно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ».

В основе модели регулятора лежат принципы теории автоматического управления, а именно используется стандартный многоканальный дискретный пропорционально-интегрально-дифференциальный, или ПИД-регулятор, модифицированный в соответствии со структурой системы. Основная идея заключается в представлении модели трехзонной печи в виде трехканального объекта управления с взаимной зависимостью между каналами. Соответствующая модель регулятора имеет три канала управления, в каждом из которых в общем случае стоит ПИД-регулятор. В зависимости от фазы процесса воспроизведения регулятор изменяет свою структуру, добавляются управляющие воздействия между каналами и меняются коэффициенты. Такая структура позволила достичь достаточной производительности печи.

**Ключевые слова:** трехзонная печь, реперная точка, международная температурная шкала, ПИД-регулятор, переходный процесс, трехканальная система управления, требования качества системы, градиент температуры

---

<sup>\*</sup> Статья получена 02 марта 2023 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Трехзонные электрические печи сопротивления широко используются в метрологических лабораториях для воспроизведения реперных точек международной практической температурной шкалы МТШ-90 [1] на уровнях от первичных национальных эталонов до уровня рабочих эталонов первого разряда, при реализации которых единица температуры передается эталонным термометрам различных принципов действия с более низким по поверочной схеме разрядом.

Реперные точки температурной шкалы в диапазоне от 156,5985 °С до 1084,62 °С представляют собой герметичные цилиндрические ампулы с чистыми металлами, имеющие в центре канал для погружения термометра, которому будет передаваться единица температуры. Единица температуры передается во время фазового перехода затвердевания металла в ампуле при условии установившегося с достаточной точностью теплового равновесия между ампулой и погруженным в нее термометром. При реализации фазового перехода температура металла внутри ампулы принимается равной температуре, приписанной данной реперной точке температурной шкалы. Следует отметить, что фазовый переход затвердевания выбран в качестве реперной точки температурной шкалы не случайно. В отличие от фазового перехода плавления, затвердевание начинается с заведомо более благоприятных с точки зрения воспроизводимости условий (жидкий металл имеет более высокую теплопроводность, и одновременное начало затвердевания по всей высоте ампулы достигается легче) [2].

Воспроизведение реперной точки температурной шкалы представляет собой сложный физический процесс, имеющий строгие требования ко времени переходного процесса, перерегулированию, а также к статической и динамической ошибкам.

Для достижения благоприятных условий и эффективного функционирования воспроизведения реперной точки желательно создать систему управления, учитывающую требования качества переходного процесса по температуре внутри ампулы при нагреве, плавлении, перегреве и затвердевании.

Целью настоящей работы является синтез такой системы с изменяющимися структурой и параметрами.

## 1. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 156,5985 °С ДО 1084,62 °С

Ключевой особенностью процесса воспроизведения реперных точек, основанных на фазовом переходе затвердевания чистых металлов, является требовательность к минимизации градиента температуры по высоте ампулы реперной точки. От величины этого градиента зависит как точность, так и длительность плато фазового перехода затвердевания. Можно с уверенностью сказать, что градиент температуры по высоте ампулы является основным параметром, который определяет эффективность реперной точки. Кроме того, слишком большой градиент температуры, который может возникнуть при

нагреве даже еще до достижения металлом температуры плавления, способен привести к разрушению герметичного кварцевого чехла ампулы реперной точки.

Эффективным с конструктивной и технологической точек зрения способом управления градиентом при реализации реперных точек температурной шкалы в диапазоне от 156,5985 °C до 1084,62 °C является использование трехзонных электрических печей сопротивления [3], в которых ампула реперной точки размещается внутри вертикально установленной цилиндрической жаровой трубы в зоне центрального (основного) нагревателя, а два дополнительных нагревателя, расположенных выше и ниже центрального (охранные нагреватели), обеспечивают компенсацию паразитных тепловых потоков по торцам жаровой трубы и выравнивание теплового поля в ее центральной части. Структура такой печи представлена на рис. 1.

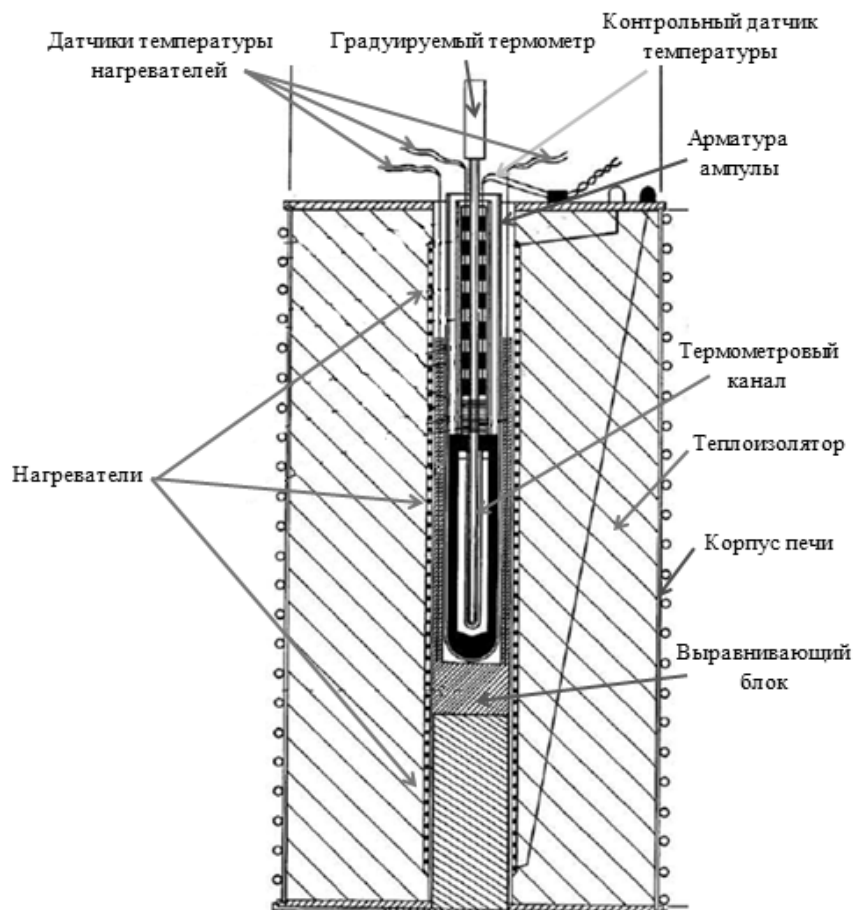


Рис. 1. Устройство трехзонной электрической печи сопротивления

Fig. 1. Construction of a three-zone electric resistance furnace

Несмотря на очевидность решения организовать для управления охранными нагревателями обратную связь по значению градиента температуры, измеряемому непосредственно на ампуле реперной точки, в известных моделях устано-

вок для реализации реперных точек оно не внедрялось вплоть до 2008 г. [4]. Используемые вместо этого подходы эксплуатировали автовыравнивание градиента температуры за счет теплопроводности ампулы и жаровой трубы при искусственно низких скоростях нагрева охлаждения, ценой чему становилась малая производительность установок.

В настоящее время наиболее известными и широко применяемыми в метрологической практике установками для реализации реперных точек температурной шкалы в диапазоне от 156,5985 °С до 1084,62 °С являются установки Fluke 9114 [5] производства США, Isotech ITL-M-17703 [6] производства Великобритании, САУРТ-М [7] (производилась в СССР филиалом ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, эксплуатируется и в настоящее время), ПРТ 50-700 [8] производства АО «НПП «ЭТАЛОН»», г. Омск, РФ. Все перечисленные установки используют для реализации реперных точек температурной шкалы трехзонные электрические печи сопротивления, и ни одна из этих установок не использует в алгоритме управления воспроизведением реперной точки действительное измеренное значение градиента температуры по высоте ампулы. Кроме того, установки не оснащены измерительными каналами для организации обратной связи. Даже если в алгоритме используется значение градиента температуры, оно вычисляется по показаниям датчиков, расположенных вблизи нагревателей печи, на существенном удалении от самой ампулы реперной точки и вдобавок экранированных от нее жаровой трубой печи, имеющей значительную тепловую инерцию. Иногда для настройки алгоритма управления вместо ампулы в печь помещают ее имитатор, оснащенный датчиками градиента температуры [5, 9], но репрезентативность такой настройки и особенно стабильность ее параметров во времени вызывают определенные сомнения.

В ФГУП «СНИИМ» (г. Новосибирск) с 2008 г. разрабатывали и применяли трехзонные печи для воспроизведения реперных точек температурной шкалы в диапазоне от 156,5985 °С до 1084,62 °С, в которых в арматуру для размещения ампул были встроены дополнительные датчики для измерения градиента температуры непосредственно на ампуле реперной точки. До 2020 г. для управления этими печами достаточно эффективно использовались градиентные регуляторы, основанные на методе локальных уставок [4, 10], однако с выработкой ресурса аппаратуры в 2021 г. возникла необходимость в новых регуляторах и было принято решение провести модернизацию с созданием нового, более формализованного с точки зрения теории автоматического управления алгоритма, учитывающего и развивающего опыт применения метода локальных уставок.

Метод локальных уставок демонстрировал большую эффективность и быстродействие по сравнению с другими существующими методами управления трехзонными печами, но не был лишен принципиальных недостатков, ограничивающих потенциальные возможности в части скорости работы при нагреве до начала плавления металла в реперной точке. В связи с этим была поставлена задача по разработке нового алгоритма управления, который должен быть способен эффективно минимизировать градиент температур по высоте ампулы при высокой скорости нагрева. Работа была успешно выполнена, и ее результаты изложены далее в настоящей публикации.

## 2. ТРЕХЗОННАЯ ПЕЧЬ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Автоматическое управление электрическими печами сопротивления достаточно широко освещено в специальной литературе [11, 12], однако примеры, приводимые в этих источниках, относятся исключительно к однозонным печам (с одним каналом управления). Вопросы управления с учетом градиента температуры приведены в [13], однако в этой книге трехзонная печь не рассматривается в качестве объекта управления. Таким образом, для успешного решения поставленной задачи необходимо формализовать описание трехзонной печи в виде многоканального объекта управления.

Трехзонная печь имеет три нагревателя и три датчика температуры, расположенных по высоте ампулы, что с точки зрения теории автоматического управления представляет собой объект с тремя каналами управления. Входные значения каждого канала являются мощностями нагревателей, которые задаются оператором или алгоритмом управления. Выход каждого канала – температура на датчиках внутри ампулы, измеряемая и передаваемая через АЦП в персональный компьютер для обработки. В качестве первого приближения в модели печи не учитываются передаточные функции датчиков и нагревателей.

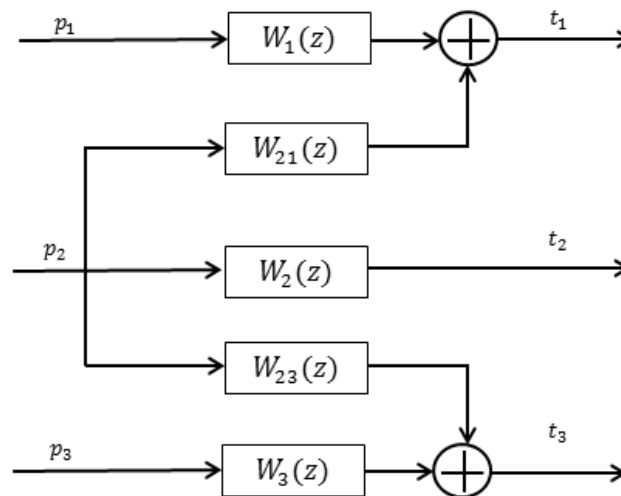


Рис. 2. Модель объекта

Fig. 2. Model of the object

В данном случае первый, второй и третий каналы соответствуют верхней, центральной и нижней части ампулы. Из-за тепловых потоков, идущих из центра печи вниз и вверх, существует взаимное влияние между каналами. Опытным путем было установлено, что наибольшее влияние на все каналы печи оказывает именно центральный нагреватель, что объясняется его большей площадью нагрева и изолированностью от влияния внешней среды. Соответствующая модель объекта представлена на рис. 2.

### 3. УПРАВЛЕНИЕ ПЕЧЬЮ ПРИ ПОМОЩИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ПИ-РЕГУЛЯТОРА

Общепринятые в теории автоматического управления характеристики переходного процесса: время переходного процесса, перерегулирование и статическая ошибка [12]. При создании алгоритма управления печью одним из главных требований качества была минимизация времени переходного процесса для большей производительности реперных точек. Для выполнения этого требования в каждый канал управления был включен пропорциональный регулятор, обеспечивающий быстрое реагирование на изменения разности температуры. С другой стороны, при достижении плато плавления недопустимо наличие статической ошибки. В противном случае температура в ампуле не достигнет температуры плавления или, что еще хуже, произойдет перегрев. Для выполнения данного требования в каждый канал управления был добавлен интегральный регулятор. Требование к перерегулированию: не более 10 %.

На рис. 3 показана модель системы с тремя ПИ-регуляторами. Входные значения, поступающие на регулятор, равны разности целевых температур верхней, центральной и нижней части ампулы и соответствующих показаний приборов измерения.

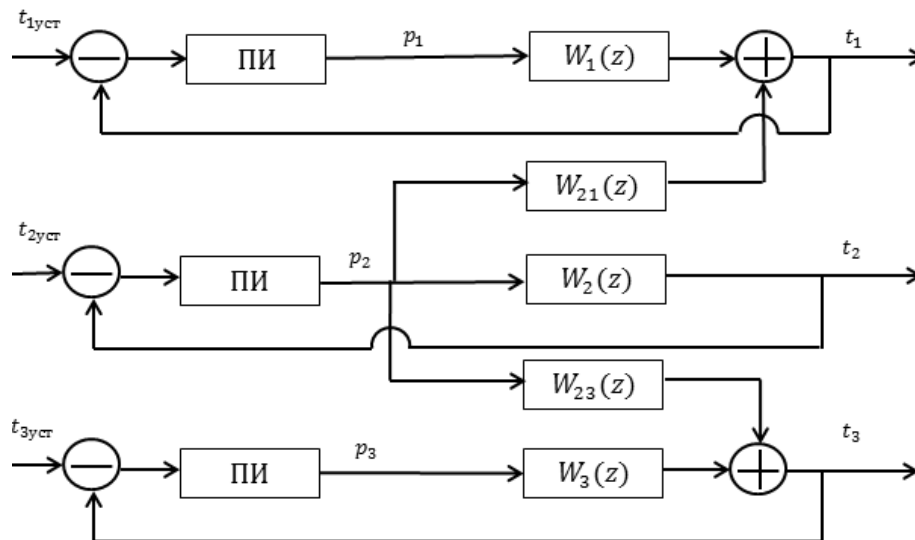


Рис. 3. Система управления с тремя ПИ-регуляторами

Fig. 3. Control system with three PI controllers

Кривые переходных процессов показаны на рис. 4. Температура в нижнем конце ампулы обозначена  $t_6$ , в верхнем –  $t_4$ . Температура на контрольном датчике в центре ампулы обозначена  $t_5$ . На графике видно, что при таком управлении между верхними и нижними концами ампулы, обозначенными  $t_4$  и  $t_6$ , образуется градиент температур. Это объясняется тем, что из-за конструктивных особенностей печи температура внутри ампулы может изменяться неравномерно в процессе нагрева, а это мешает образованию

равномерно прогретого жидкого металла с единственным очагом затвердевания.

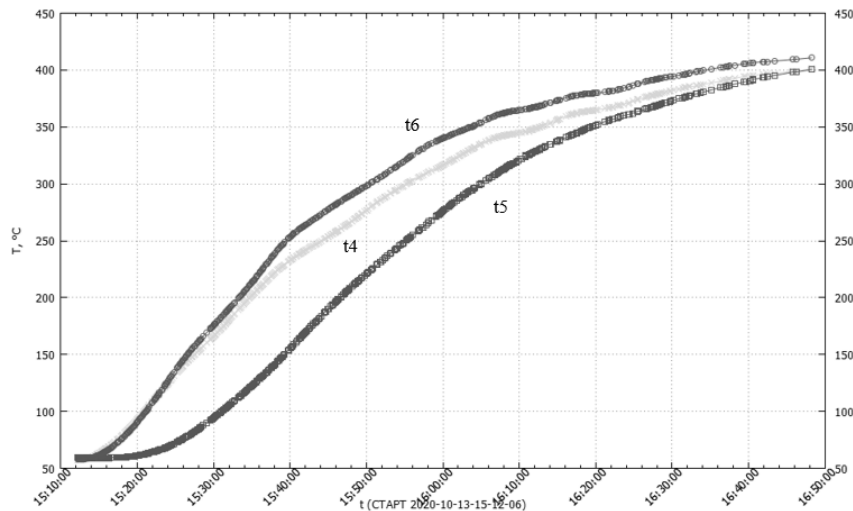


Рис. 4. Переходные процессы в ампуле при использовании трехканального ПИ-регулятора с неполной структурой для реперной точки цинка

Fig. 4. Transient processes in the cell when using a three-channel PI controller with an incomplete structure for the zinc fixed point

Очевидно, что равномерный прогрев по высоте печи ведет к большей длительности последующего плато затвердевания, являющегося целью реализации реперной точки. Достижение минимальной разности температур по высоте ампулы может быть достигнуто разными способами. Первый способ состоит в изменении целевых температур нагревателей в зависимости от градиента через равные промежутки времени (метод локальных уставок). Второй способ состоит в создании регулятора, на вход которого поступает разница, или градиент температур между верхним и нижним концом ампулы, а на выходе – управляющее воздействие для верхнего и нижнего нагревателя. Третий способ представляет собой использование комбинированного управления в виде полной структуры многоканального ПИ-регулятора совместно с ПИ-регулятором по градиенту. В ходе экспериментальных исследований предпочтение было отдано последнему способу как наиболее действенному в сравнении с двумя другими.

Модель системы с дополнительным ПИ-регулятором по градиенту представлена на рис. 5.

На рис. 6 показаны кривые переходных процессов внутри ампулы. В то время как ПИ-регуляторы поддерживают переходные процессы в каждом отдельном канале, дополнительный ПИ-регулятор по градиенту обеспечивает минимизацию разницы температур между верхним и нижним концом, тем самым обеспечивая равномерный прогрев по всей длине ампулы. Получившаяся система удовлетворяет требованиям качества.

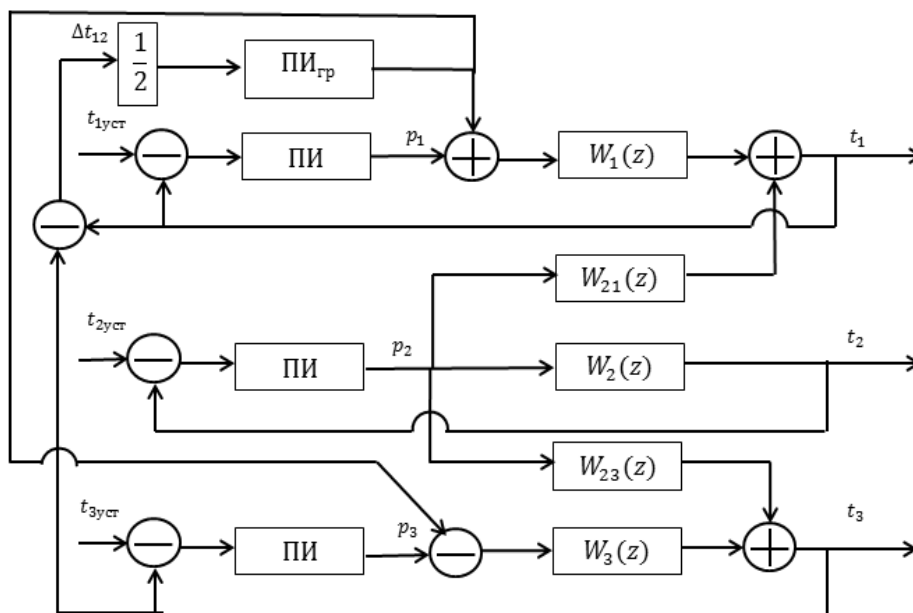


Рис. 5. Система с дополнительным ПИ-регулятором, осуществляющим управление по градиенту температур

Fig. 5. System with an additional PI controller that controls the temperature gradient

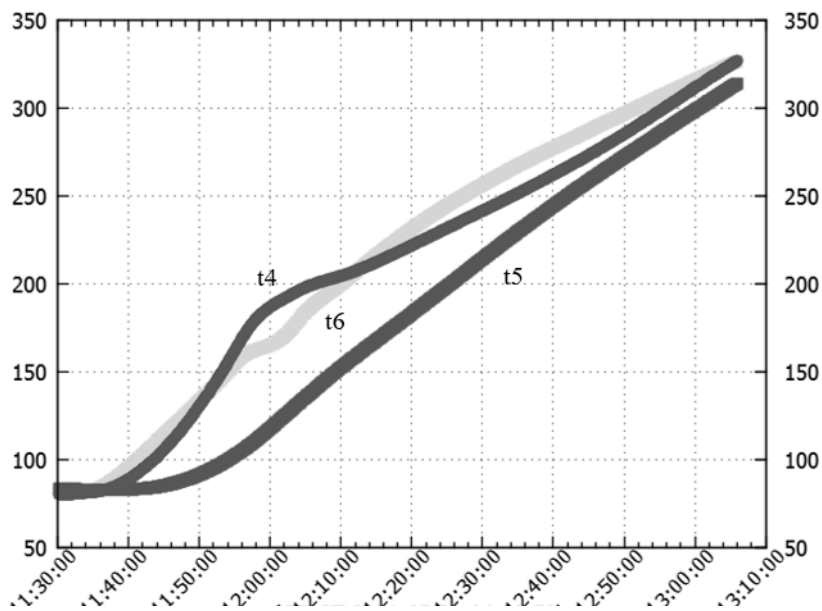


Рис. 6. Локальная минимизация градиента при помощи комбинированного регулятора ( $t_4$  – первый канал,  $t_5$  – второй канал,  $t_6$  – третий канал) для реперной точки цинка

Fig. 6. Local minimization of the gradient using a combined controller ( $t_4$  is the first channel,  $t_5$  is the second channel,  $t_6$  is the third channel) for the zinc fixed point



На рис. 7 показаны графики мощности и температуры на каждом нагревателе. Разница температур на нагревателях при использовании неполного ПИ-регулятора совместно с градиентным достигала  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что могло привести к разрушению кварцевого чехла и дальнейшей неработоспособности печи. Такой регулятор оказался неприменим на практике.

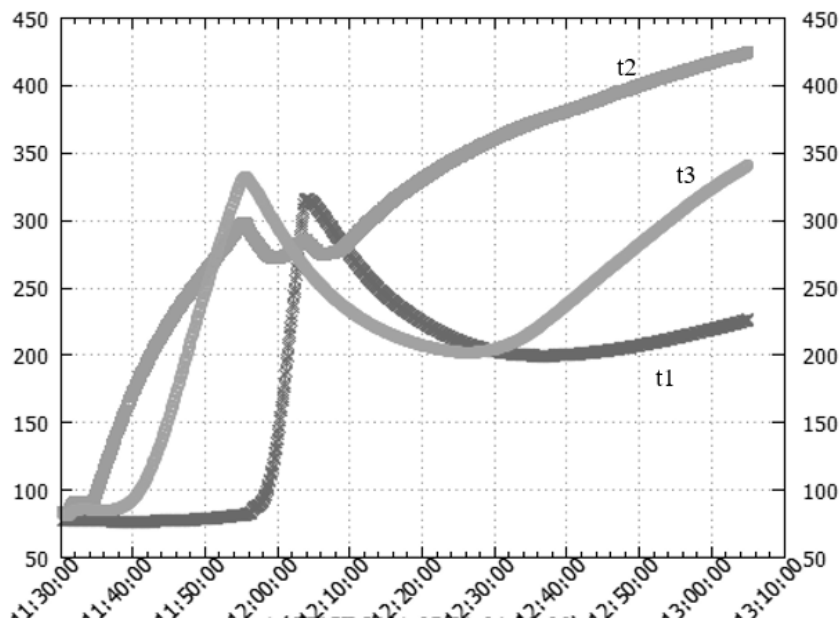


Рис. 7. Переходный процесс на нагревателях при использовании регулятора, модель которого представлена на рис. 5 для реперной точки цинка ( $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  — температуры на верхнем, среднем и нижнем нагревателях)

Fig. 7. The transient process on the heaters when using the controller, whose model is shown in Figure 5 for the zinc fixed point ( $t_1$ ,  $t_2$  and  $t_3$  are the temperatures on the upper, middle and lower heaters)

В [14] отмечается, что в некоторых случаях использование полной структуры ПИД-регулятора с прямыми и перекрестными связями более эффективно, чем использование сокращенной структуры. Воспользуемся указанным подходом для устранения недостатков, описанных выше. Введем для компенсации взаимного влияния каналов в систему дополнительные ПИ-регуляторы, как показано на рис. 8.

Тепловые потоки, идущие из центра вниз и вверх в ампуле, позволяют говорить о взаимном влиянии между каналами, отображенными передаточными функциями  $W_{21}$  и  $W_{23}$ . Для компенсации данных тепловых потоков в систему добавлены соответствующие регуляторы  $\text{ПИ}_{21}$  и  $\text{ПИ}_{23}$ .

В результате получаем регулятор, удовлетворяющий требованиям отсутствия больших перепадов температур на нагревателях (рис. 9).

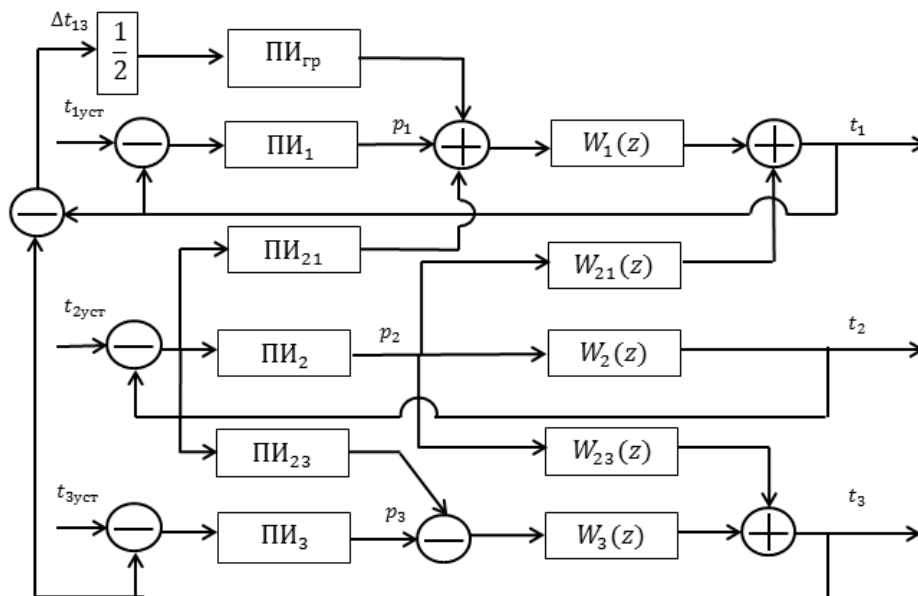


Рис. 8. Схема системы с полной структурой ПИ-регулятора и дополнительным регулятором по градиенту температур

Fig. 8. System diagram with a complete PI controller structure and an additional temperature gradient controller

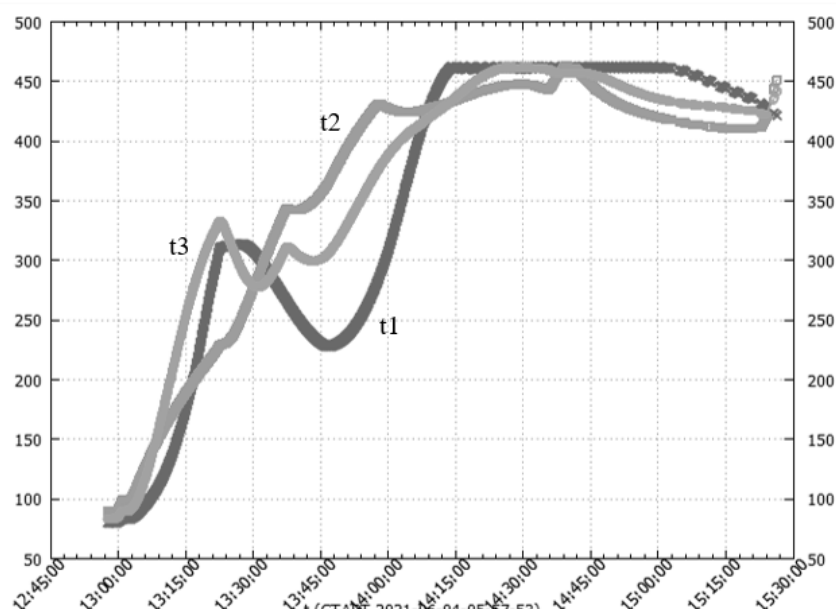


Рис. 9. Графики переходного процесса для реперной точки цинка по температурам на нагревателях: верхнем –  $t_1$ , среднем –  $t_2$  и нижнем –  $t_3$

Fig. 9. Graphs of the transient process for the fixed point of zinc for temperatures on the heaters: upper –  $t_1$ , middle –  $t_2$  and lower –  $t_3$

На рис. 10 представлены результаты такого управления для стадии нагрева металла в ампуле. Разница температур между верхним и нижним концом ампулы на протяжении всего нагрева не превышает 2 °С для реперной точки цинка.

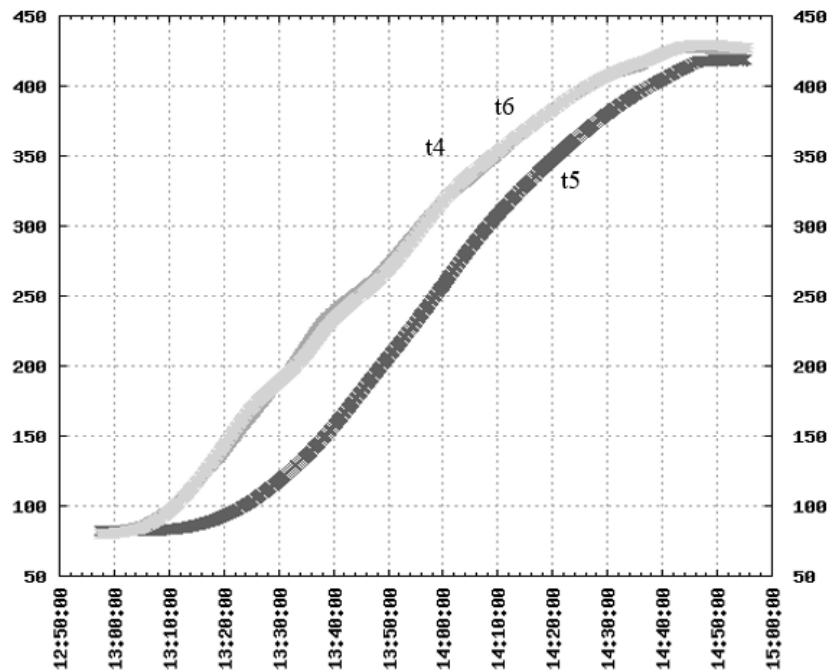


Рис. 10. Переходные процессы в системе с полной структурой ПИ-регулятора для реперной точки цинка ( $t_4$  – температура в верхней части ампулы,  $t_5$  – в центре,  $t_6$  – в нижней части ампулы)

Fig. 10. Transient processes in a system with a complete PI controller structure and an additional temperature gradient controller for the zinc fixed point ( $t_4$  is the temperature in the upper part of the cell,  $t_5$  is in the center,  $t_6$  is in the lower part of the cell)

После достижения плато плавления температура металла внутри ампулы перестает изменяться, поэтому показания на контрольном датчике больше не могут использоваться для управления системой через обратную связь. Таким образом, на этапе плавления модель системы должна быть модифицирована.

#### 4. МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ДЛЯ СТАДИЙ ПЛАВЛЕНИЯ, ПЕРЕГРЕВА И ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

До достижения плато затвердевания, которое является целью всего процесса воспроизведения реперной точки, необходимо пройти три стадии: нагрев металла, плавление, перегрев (рис. 11). Поэтому при создании регулятора необходимо учитывать изменяющиеся параметры и структуру системы на каждой из этих стадий. В частности, в процессе плавления металла темпера-

тура внутри ампулы с металлом не изменяется, что приводит к модели системы с тремя управляющими воздействиями и двумя значениями на выходе (рис. 12). То же самое происходит при перегреве и затвердевании. После окончания стадии нагрева показания температуры на контрольном датчике используются только для определения момента перехода между стадиями.

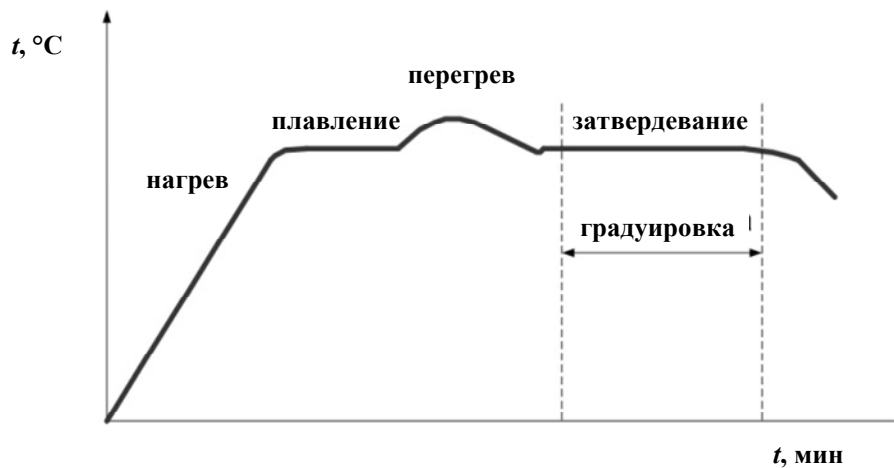


Рис. 11. Процесс воспроизведения реперной точки температурной шкалы

Fig. 11. The process of reproducing the fixed point of the temperature scale

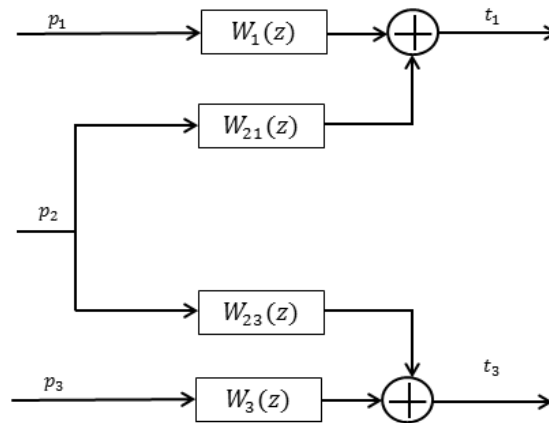


Рис. 12. Модель объекта при плавлении

Fig. 12. Model of the object during melting

После завершения стадии плавления необходимо не допускать перегрева более чем на 2 °С. Процессы в системе на данном этапе должны быть намного быстрее, чем при нагреве металла, поэтому в каждый канал управления было добавлено дифференцирующее звено (рис. 13).

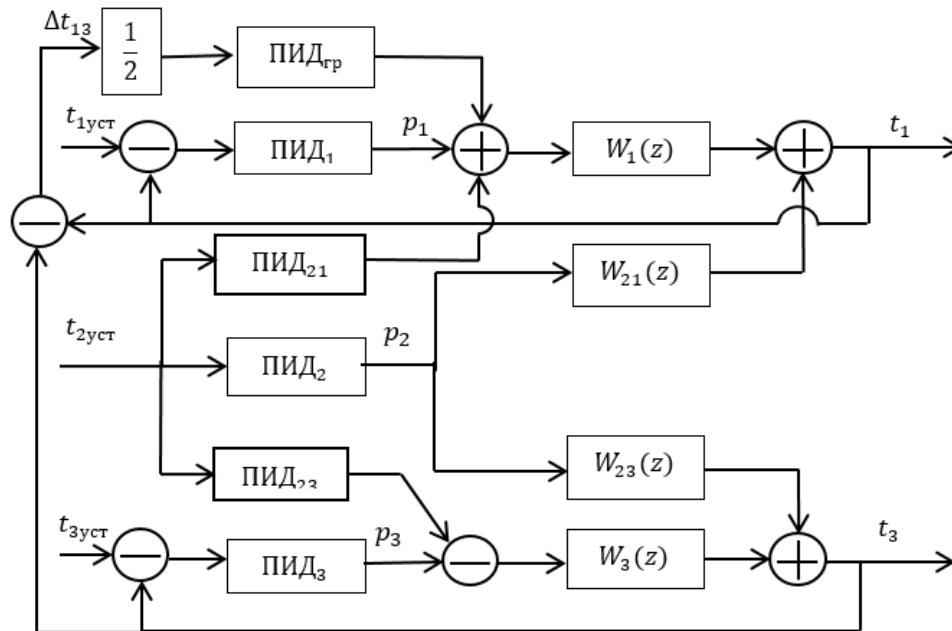


Рис. 13. Модель системы при плавлении, перегреве и затвердевании

Fig. 13. Model of the system during melting, overheating and solidification

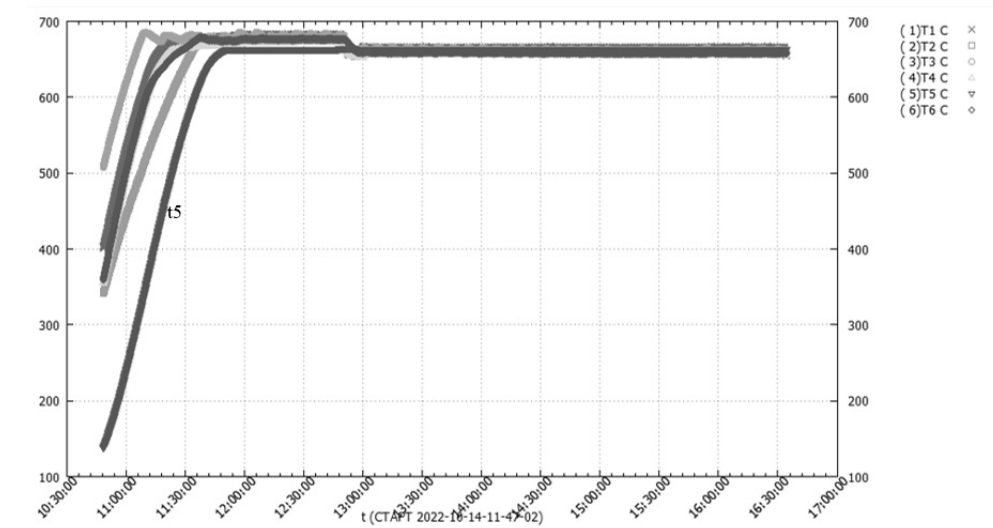


Рис. 14. Воспроизведение реперной точки алюминия ( $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  – температуры на нагревателях,  $t_4$  и  $t_6$  – на датчиках градиента,  $t_5$  – на контрольном датчике)

Fig. 14. Reproduction of the aluminum fixed point ( $t_1$ ,  $t_2$  and  $t_3$  are the temperatures on the heaters,  $t_4$  and  $t_6$  are on the gradient sensors,  $t_5$  is on the control sensor)

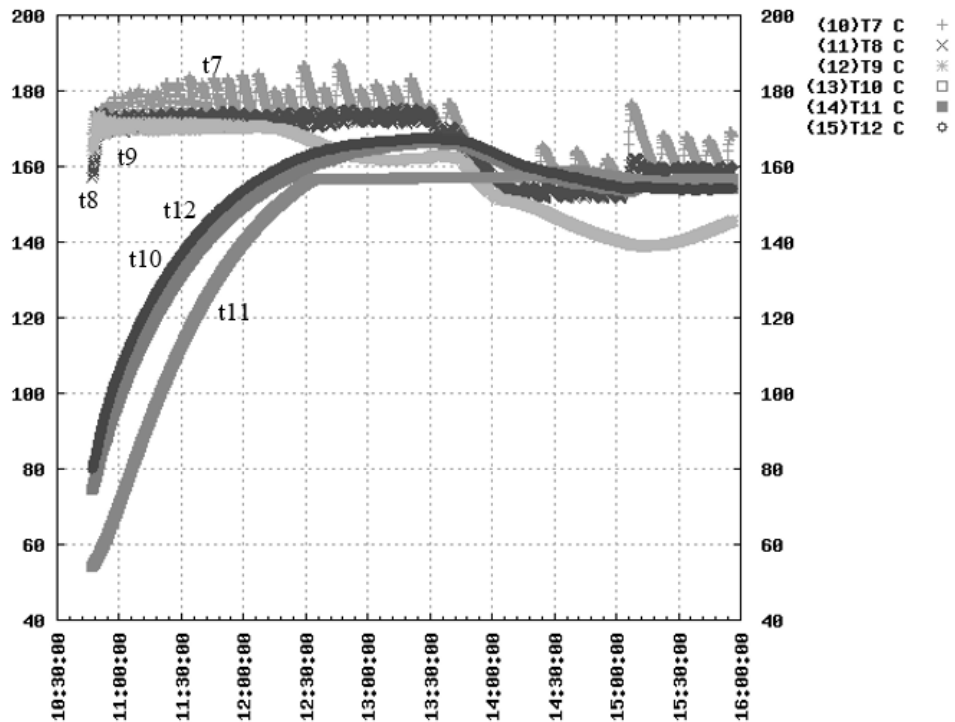


Рис. 15. Воспроизведение реперной точки индия ( $t_7$ ,  $t_8$  и  $t_9$  – температуры на нагревателях,  $t_{10}$  и  $t_{12}$  – на датчиках градиента,  $t_{11}$  – на контрольном датчике)

Fig. 15. Reproduction of the indium fixed point ( $t_7$ ,  $t_8$  and  $t_9$  are the temperatures on the heaters,  $t_{10}$  and  $t_{12}$  are on the gradient sensors,  $t_{11}$  is on the control sensor)

На рис. 14 и 15 приведены переходные процессы для реперных точек алюминия и индия соответственно. Для индия градиент температуры не превышал  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  на этапе нагрева и  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  на протяжении всего остального времени переходного процесса. Для алюминия градиент температуры не превышал  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  на протяжении всего времени переходного процесса вплоть до затвердевания, что позволило достичь площадки затвердевания длительностью три часа. Градиент температуры во время затвердевания алюминия был не более  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА

На основании приведенных теоретических исследований был реализован регулятор в виде программного обеспечения (ПО) и интегрирован в программный комплекс печи государственного вторичного эталона единицы температуры в диапазоне от  $156,5985\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1084,62\text{ }^{\circ}\text{C}$  Западно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ» (ранее – ФГУП «СНИИМ»). Помимо реализованного ПО в программный комплекс входят: сервер данных, выполняющий функции хранения основных данных о температуре, мощности и передачи информации другим компонентам комплекса; драйвер АЦП, выполняющий считывание из последовательного порта, обработку и передачу данных о температуре; драйвер ЦАП, получающий, обрабатывающий и отправляющий значения мощ-

ности в последовательный порт. Регулятор выполняет функции фиксации значений температуры с сервера, расчет мощности и запись ее значений на сервер данных посредством сокетов Windows API. При этом расчет выходных данных происходит циклически по таймеру. На каждой итерации вычисления производились по формулам дискретного ПИД-регулятора [15]:

$$\text{ПИД}_n(kT) = \sum_{i=0}^{k-1} K_{In} e_n(iT) + K_{Пn} e_n(kT) + K_{Дn} \frac{(e_n(kT) - e_n((k-1)T))}{T}; \quad (1)$$

$$\text{ПИД}_{nm}(kT) =$$

$$= \sum_{i=0}^{k-1} K_{Inm} e_n(iT) + K_{Пnm} e_n(kT) + K_{Дnm} \frac{(e_n(kT) - e_n((k-1)T))}{T}; \quad (2)$$

$$u_2(kT) = \text{ПИД}_2(kT); \quad (3)$$

$$u_1(kT) = \text{ПИД}_1(kT) + \text{ПИД}_{21}(kT) + \sum_{i=0}^{k-1} K_{Игр} e_{31}(iT) + K_{П21} e_{31}(kT); \quad (4)$$

$$u_3(kT) = \text{ПИД}_3(kT) + \text{ПИД}_{23}(kT) + \sum_{i=0}^{k-1} K_{Игр} e_{13}(iT) + K_{П21} e_{13}(kT), \quad (5)$$

где  $n, m$  – номера каналов;  $u_2(kT)$  – значение мощности в процентах, подаваемой на главный (центральный нагреватель);  $u_1(kT)$  и  $u_3(kT)$  – значения мощности в процентах, подаваемой на верхний и нижний нагреватели соответственно;  $e_n(iT)$  – разница температур между текущим значением и уставкой в  $i$ -й момент времени на  $n$ -м канале;  $K_{Игр}$  – коэффициент интегральной составляющей градиентного регулятора;  $e_{13}(iT) = -e_{31}(iT)$  – разница температур между верхним и нижним датчиком градиента;  $K_{Пn}$ ,  $K_{Дn}$ ,  $K_{In}$  – пропорциональный, дифференциальный и интегральный коэффициенты  $n$ -го канала.

Дополнительно были добавлены определение стадий процесса воспроизведения и физические ограничения по температурам для печи. Пример определения стадии: плавление определяется по критерию неизменности температуры на контрольном датчике в течение длительного (более двух минут) периода времени. Пример ограничений: температура на нагревателях не должна превышать 190 °С для реперной точки индия.

На рис. 16 и 17 можно видеть полные процессы воспроизведения реперных точек индия и алюминия.

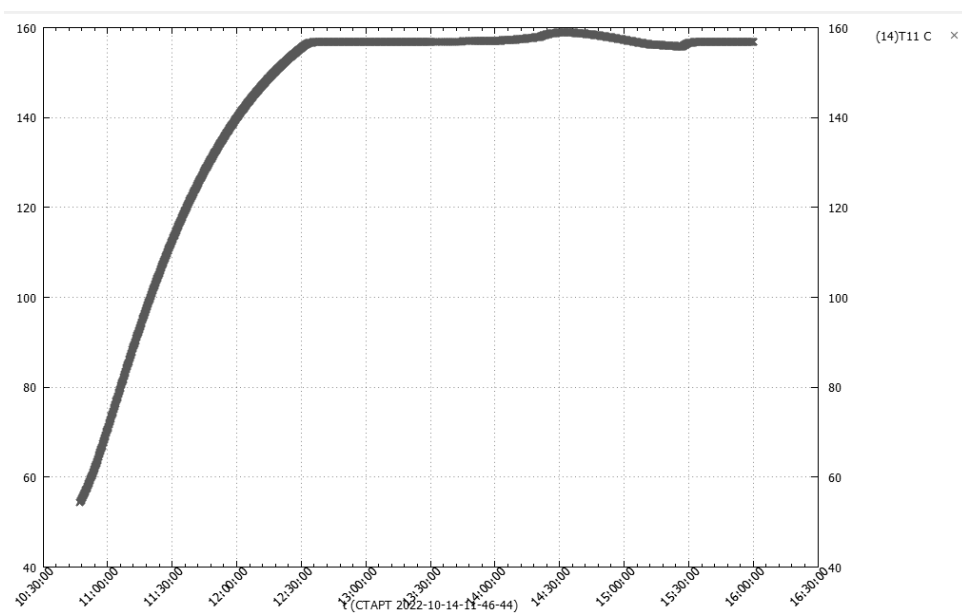


Рис. 16. Переходный процесс на контрольном датчике в результате использования созданного регулятора для реперной точки индия

Fig. 16. The transient process on the control sensor as a result of using the created regulator for the indium fixed point

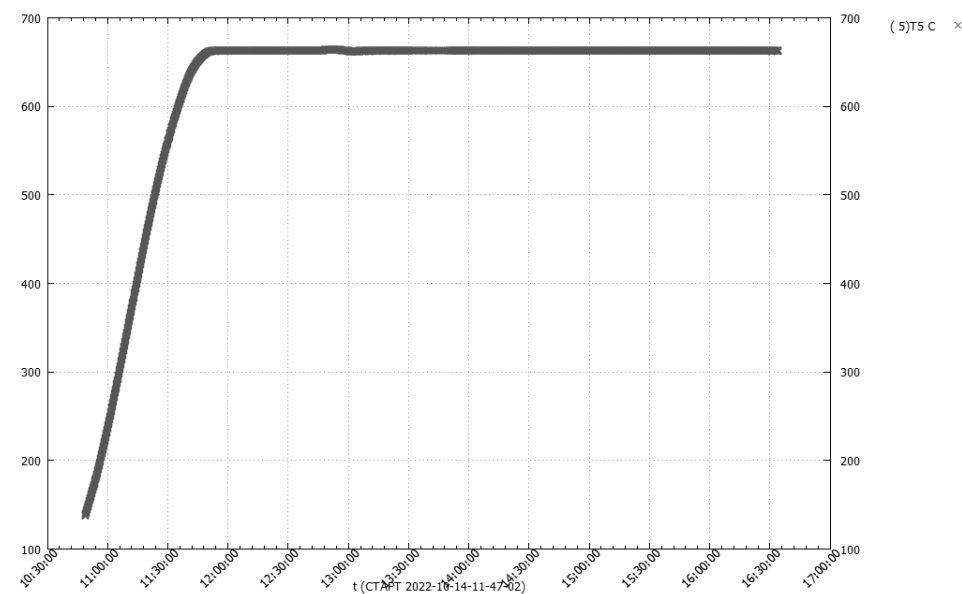


Рис. 17. Переходный процесс на контрольном датчике в результате использования созданного регулятора для реперной точки алюминия

Fig. 17. The transient process on the control sensor as a result of using the created regulator for the fixed point of aluminum



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом настоящей работы является синтез регулятора с изменяющейся структурой и коэффициентами. Данный регулятор учитывает характеристики объекта и позволяет за счет своей многоканальности и управления по градиенту температур компенсировать тепловые потоки в ампуле с металлом.

Регулятор реализован и интегрирован в программный комплекс печи государственного вторичного эталона единицы температуры в Западно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ» (ранее – ФГУП «СНИИМ») для воспроизведения реперных точек температурной шкалы от 156,5985 °C до 1084,62 °C.

Разработанная система управления заменила вышедшую из строя систему, основанную на методе локальных уставок, с худшими показателями качества.

По результатам исследования реализованной системы были получены следующие конкретные данные. Время переходного процесса от начала нагрева до начала затвердевания составило: 5 часов для реперной точки индия с температурой 156,5985 °C; 3 часа для реперной точки цинка с температурой 419,527 °C; 2 часа для реперной точки алюминия с температурой 660,323 °C. В качестве сравнения, например, для реперной точки цинка ранее требовалось затратить времени на 1,5 часа (всего 4,5 часа) больше, что свидетельствует об эффективности разработанной системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Supplementary information for the International Temperature Scale of 1990. – Repr. of the 1990 first ed. – BIPM, 1997.
2. Исследование структуры внутренней границы раздела фаз в ячейке реперной точки затвердевания индия / А.Г. Иванова, А.И. Походун, С.Ф. Герасимов, В.М. Фуксов // Измерительная техника. – 2016. – № 1. – С. 52–54.
3. Куинн Т. Температура: пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 448 с.
4. Горбылев А.А., Гривастов Д.А. Эффективное управление вертикальным градиентом температуры ампул при воспроизведении реперных точек температуры затвердевания металлов // Приборы. – 2013. – № 11. – С. 51–56.
5. Fluke. Печи реперных точек 9114, 9115A, 9116A. – URL: [https://dipaul.ru/catalog/element/pech\\_repernykh\\_tochek\\_fluke\\_9115a/](https://dipaul.ru/catalog/element/pech_repernykh_tochek_fluke_9115a/) (дата обращения: 29.05.2023).
6. Isotech. Medium Temperature Furnace. – URL: <https://isotech.co.uk/products/medium-temperature-furnace/> (accessed: 29.05.2023).
7. Походун А.И. Автоматизированная установка «Цинк-9» Техническое описание и инструкция по эксплуатации Х I.456.200 ТО. – СПб.: НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 1987.
8. Метрологическое оборудование. Печи для реализации реперных точек температурной шкалы МТШ-90 ПРТ 50-700, ПРТ 600-1100-2 ПРТ 50-700, ПРТ 600-1100-2 / АО НПП «Эталон». – [https://omsketalon.ru/sites/default/files/prt\\_50\\_700\\_prt\\_600\\_1100\\_2.pdf](https://omsketalon.ru/sites/default/files/prt_50_700_prt_600_1100_2.pdf) (дата обращения: 29.05.2023).
9. Малышев Ю.О. Реализация реперных точек МТШ-90 в печи ПРТ 50-500 // Эталонные и рабочие средства измерения в области теплофизики. Энергоаудит тепловых измерений / АО НПП «Эталон». – Омск, 2012. – С. 37–42. – URL: [https://omsketalon.ru/sites/default/files/sbornik\\_statey\\_2012.pdf?ysclid=lb9rnarpft328610400](https://omsketalon.ru/sites/default/files/sbornik_statey_2012.pdf?ysclid=lb9rnarpft328610400) (дата обращения: 29.05.2023).
10. Соловьев Б.С., Карманов В.С., Гривастов Д.А. Динамическая модель управления воспроизведением реперных точек температурной шкалы // Наука. Технологии. Инновации: в 9 ч.,

Новосибирск, 30 ноября – 4 декабря 2020 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 272–275.

11. Автоматическое управление электротермическими установками: учебник для вузов / под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

12. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.

13. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Основы градиентной теплотометрии. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 215 с.

14. Жмудь В.А. Замкнутые системы автоматического управления: учебное пособие. – Новосибирск: Юрайт, 2017. – 270 с.

15. Востриков А.С., Французова Г.А., Гаврилов Е.Б. Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования. – 5-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 476 с.

*Чикильдин Геннадий Павлович*, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – идентификация динамических объектов, вычислительная математика, цифровая обработка сигналов. E-mail: chikildin@gmail.com

*Цибина Алена Ивановна*, магистрант второго года обучения кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления, исследования и синтез ПИД-регуляторов. E-mail: alena.ts1@mail.ru

*Chikildin Gennady P.*, PhD (Eng.), associate professor, Department of Automation, Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is identification of dynamic objects, numerical mathematics, and digital signal processing. E-mail: chikildin@gmail.com

*Tsibina Alena I.*, second year masters degree student at the Automation Department, Novosibirsk State Technical University. The main field of her scientific research is the automatic control theory, research and synthesis of PID controllers. E-mail: alena.ts1@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-2-23-42

### ***Synthesis of a three-channel PID controller for controlling a three-zone medium-temperature furnace\****

*A.I. TSIBINA<sup>a</sup>, G.P. CHIKILDIN<sup>b</sup>*

*Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*

*<sup>a</sup> alena.ts1@mail.ru    <sup>b</sup> chikildin@gmail.com*

#### **Abstract**

Currently, in metrological laboratories there is a need to transfer temperature units from standards of the highest category by reproducing the fixed points of the international temperature scale. The reproduction process of fixed point involves heating, melting, overheating and solidification of the metal and can sometimes take more than one working day. The purpose of this work was to create and practically test an algorithm that takes into account heat flows in a three-zone furnace for uniform heating and relatively fast reaching the solidification area.

---

\* Received 02 March 2023.

Over the past twenty years, several algorithms have been used making it possible to go through all four stages within one working day. This paper describes a practically tested algorithm for controlling three-zone furnaces for reproducing the fixed points of the temperature scale in the range from 156.5985 °C to 1084.62 °C. It takes into account the requirements for maintaining the minimum temperature gradient along the height of the fixed point cell. This algorithm has been used in the furnaces of the West Siberian branch of FSUE "VNIIFTRI".

The controller model is based on the principles of automatic control theory using a multi-channel discrete proportional-integral-derivative or PID controller. The model was modified in accordance with the system structure. The main idea is to represent the model of a three-zone furnace as a three-channel control object with mutual influence between the channels. The corresponding controller model is a three-channel control system. In each channel of it there is a PID controller. Depending on the phase of the playback process, the three-channel controller changes its structure and tunes its coefficients. Such a structure made it possible to achieve sufficient productivity of the furnace.

**Keywords:** three-zone furnace, fixed point, international temperature scale, PID controller, transient process, three-channel control system, system quality requirements, temperature gradient

## REFERENCES

1. *Supplementary information for the International Temperature Scale of 1990*. Repr. of the 1990 first ed. BIPM, 1997.
2. Ivanova A.G, Pokhodun A.I, Gerasimov S.F, Fuksov V.M. Study of the inner phase interface structure in an indium freezing fixed point cell. *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 75–79. DOI: 10.1007/s11018-016-0920-6. Translated from *Izmeritel'naya tekhnika*, 2016, no. 1, pp. 52–54.
3. Quinn T.J. *Temperature*. Academic Press, 1983. 416 pl. (Russ. ed.: Kuinn T. *Temperatura*. Moscow, Mir Publ., 1985. 448 p.).
4. Gorbylev A.A., Grivastov D.A. Effektivnoe upravlenie vertikal'nym gradientom temperatury ampul pri vosproizvedenii repornykh toчек temperatury zatverdevaniya metallov [Efficient control of the vertical temperature gradient of cells when reproducing the fixed points of the solidification temperature of metals]. *Pribory = Instruments*, 2013, no. 11, pp. 51–56.
5. Fluke. Pechi repornykh toчек 9114, 9115A, 9116A [Fixed Point Furnaces 9114, 9115A, 9116A]. Available at: [https://dipaul.ru/catalog/element/pech\\_repornykh\\_toчек\\_fluke\\_9115a/](https://dipaul.ru/catalog/element/pech_repornykh_toчек_fluke_9115a/) (accessed 29.05.2023).
6. Isotech. *Medium Temperature Furnace*. Available at: <https://isotech.co.uk/products/medium-temperature-furnace/> (accessed 29.05.2023).
7. Pokhodun A.I. *Avtomatizirovannaya ustanovka «Tsink-9»* [Installation automated "Zinc-9"]. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii X I.456.200 TO. St. Petersburg, D.I. Mendeleyev Institute for Metrology, 1987. (In Russian, unpublished).
8. JSC NPP "Etalon". *Metrological equipment. Furnaces for the implementation of fixed points of the temperature scale ITS-90 PRT 50-700, PRT 600-1100-2*. (In Russian). Available at: [https://omsketalon.ru/sites/default/files/prt\\_50\\_700\\_prt\\_600\\_1100\\_2.pdf](https://omsketalon.ru/sites/default/files/prt_50_700_prt_600_1100_2.pdf) (accessed 29.05.2023).
9. Malyshev Yu.O. Realizatsiya repornykh toчек MTSh-90 v pechi PRT 50-500 [Implementation of MTSh-90 fixed points in the PRT 50-500 furnace]. *Etalonnye i rabochie sredstva izmereniya v oblasti teplofiziki. Energoaudit teplovykh izmerenii* [Reference and working measuring instruments in the field of thermal physics. Energy audit of thermal measurements]. JSC NPP "Etalon". Omsk, pp. 37–42. Available at: [https://omsketalon.ru/sites/default/files/sbornik\\_statey\\_2012.pdf?ysclid=lb9rnarfft328610400](https://omsketalon.ru/sites/default/files/sbornik_statey_2012.pdf?ysclid=lb9rnarfft328610400) (accessed 29.05.2023).
10. Solov'ev B.S, Karmanov V.S, Grivastov D.A. [Dynamic model for controlling the reproduction of fixed points of the temperature scale]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovations]. Collection of scientific papers, Novosibirsk, November 30 – December 4 2020, pt. 2, pp. 272–275. (In Russian).

11. Svenchanskii A.D., ed. *Avtomaticheskoe upravlenie elektrotermicheskimi ustanovkami* [Automatic control of electrothermal installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 416 p.
12. Denisenko V.V. *Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of technological process, experiment, equipment]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2009. 608 p.
13. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V. *Osnovy gradientnoi teplometrii* [Fundamentals of Gradient Thermal Measurement]. St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2012. 215 p.
14. Zhmud V.A. *Zamknutye sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Closed-loop systems of automatic control]. Novosibirsk, Yurait Publ., 2017. 270 p.
15. Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A., Gavrilov E.B. *Osnovy teorii nepreryvnykh i diskretnykh sistem regulirovaniya* [Fundamentals of the theory of continuous and discrete control systems]. 5th ed, rev. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 476 p.

Для цитирования:

Цибина А.И., Чикильдин Г.П. Синтез трехканального ПИД-регулятора для управления трехзонной среднетемпературной печью // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 2 (90). – С. 23–42. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-2-23-42.

For citation:

Tsibina A.I., Chikildin G.P. Sintez trekhkanal'nogo PID-regulyatora dlya upravleniya trekhzonnoi srednetemperaturnoi pech'yu [Synthesis of a three-channel PID controller for controlling a three-zone medium-temperature furnace]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 2 (90), pp. 23–42. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-2-23-42.