

УПРАВЛЕНИЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕМ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ

Борислав Сергеевич Соловьев

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, аспирант, тел. +7 (952) 944-90-80, e-mail: b.solovev.2013@stud.nstu.ru; Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», 640004, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, инженер сектора №112

Владимир Сергеевич Крылов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, преподаватель кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. +7 (923) 223-39-97, e-mail: basnivova@mail.ru

Предложена динамическая модель для анализа данных и использования в управлении нагревателями трехзонных электрических печей сопротивления для воспроизведения реперных точек температурной шкалы МТШ-90. Разработан программный комплекс для мониторинга и управления печами как в ручном, так и в автоматическом режиме.

Ключевые слова: анализ данных, математическая модель, оптимальное управление, минимизация функционала, реперные точки, трехзонные печи

CONTROLLING THE REPRODUCTION OF TEMPERATURE SCALE FIDUCIALS USING A MATHEMATICAL MODEL AND DATA ANALYSIS

Borislav S. Solov'ev

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russia Postgraduate Student, phone: +7 (952) 944-90-80, e-mail: b.solovev.2013@stud.nstu.ru; West Siberian branch of FSUE "VNIIFTRI", 4, Dimitrova Prospekt, Novosibirsk, 630004, Russia, Engineer of Sector №112.

Vladimir S. Krylov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Lecturer, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: +7 (923) 223-39-97, e-mail: basnivova@mail.ru

A dynamic model is proposed for data analysis and use in the control of heaters of three-zone electric resistance furnaces for reproducing the reference points of the temperature scale ITS-90. A software package has been developed for monitoring and controlling furnaces both in manual and automatic modes.

Keywords: data analysis, mathematical model, optimal control, functional minimization, fixed points, three-zone furnaces

Введение

В настоящее время адекватное описание многих реальных процессов осуществляется стохастическими математическими моделями. Имея хорошее описание какого-либо процесса, можно более точно прогнозировать результат тех или иных решений в управлении этим процессом. Привлечение современных интеллектуальных методов анализа данных позволит повысить качество прогнозирования и управления поведением рассматриваемых систем. Разработанные методы могут быть реализованы в виде программного продукта, который можно использовать в целом ряде прикладных задач.

В данной работе рассматривается, как динамическая система, трехзонная электрическая печь сопротивления, предназначенная для воспроизведения реперных точек температурной шкалы МТШ-90 [1] – фазовых переходов затвердевания чистых металлов.

В рамках совершенствования процесса передачи единицы температуры при помощи реперных точек МТШ-90, в Западно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ», ранее «СНИИМ» (Сибирский научно-исследовательский институт метрологии), с 2008 г. проводились научно-исследовательские работы по восстановлению ресурса и замене аппаратуры САУРТ-М, в результате которых разработаны методика воспроизведения реперных точек с контролем градиента температуры по высоте ампулы и арматура для ампул реперных точек, выполненных в кварцевом чехле, имеющая интегрированные датчики температуры на уровне верхнего и нижнего торцов ампулы, создана аппаратура для реализации реперных точек с контролем градиента температуры по высоте ампулы.

Актуальность

Необходимость контроля и поддержания минимального градиента температуры по высоте ампул вызвана двумя основными причинами. Известно, что значение градиента температуры по высоте влияет на длительность плато затвердевания – чем меньше градиент, тем симметричнее происходит смещение границы раздела фаз внутри ампулы при реализации фазового перехода затвердевания, и тем дольше этот процесс будет происходить. Кроме того, слишком большой градиент температуры по высоте ампулы может привести к разрушению кварцевого чехла. Починка оборудования и замена кварцевых чехлов по стоимости превышает 1 млн рублей. Если в процессе плавления и затвердевания металла градиент по высоте ампулы склонен к самостоятельному уменьшению, то в процессе нагрева и охлаждения ампулы контроль и поддержание градиента является исключительно задачей аппаратуры управления воспроизведением [2].

Используемое ранее ПО никак не исключало возникновение градиента температур по высоте ампулы, что часто приводило к ее разрушению и к увеличению затрат на ремонт. Соответственно, возникла необходимость создания ПО для управления с минимизацией градиента температуры по высоте ампулы.

Цель работы

Целью работы являлась разработка, внедрение и практическая апробация приложения, выполняющего функции панели оператора для реализации автоматического, на основе анализа данных, управления и ручного управления воспроизведением реперных точек температурной шкалы – точек затвердевания индия, олова и цинка (табл. 1) на основе задачи управления динамической системой.

Таблица 1

Примеры используемых значений из МТШ-90 [3, 5]

| Наименование реперной точки МТШ-90 | Воспроизводимая температура, °С |
|------------------------------------|---------------------------------|
| Точка затвердевания индия | 156,5985 |
| Точка затвердевания олова | 231,9280 |
| Точка затвердевания цинка | 419,5270 |

Постановка задачи

Имеются шесть датчиков температуры, находящиеся в определенных местах печи (рис. 1): три – непосредственно на нагревателях, один – в ампуле с металлом, и два – вблизи верхнего и нижнего торцов ампулы.

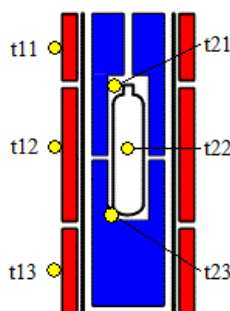


Рис. 1. Схема расстановки датчиков внутри трехзонной печи

Оператор имеет возможность управлять системой, подавая сигналы на изменение мощности нагревателей. Задача оператора – создать условия для воспроизведения реперной точки температурной шкалы – фазового перехода затвердевания металла, при этом сохраняя безопасный для целостности ампулы градиент температуры по ее высоте.

Методы решения

Как альтернатива применению ПИД-регулятора, был предложен подход с использованием динамической дискретной модели, в которой состояние системы описывается вектором:

$$t(k) = \{t_{11}(k), t_{12}(k), t_{13}(k), t_{21}(k), t_{22}(k), t_{23}(k)\}^T, \quad (1)$$

где $t_{11}(k)$ – температура на верхнем нагревателе в момент времени k ;
 $t_{12}(k)$ – температура на центральном нагревателе в момент времени k ;
 $t_{13}(k)$ – температура на нижнем нагревателе в момент времени k ;
 $t_{21}(k)$ – температура на верхнем торце ампулы в момент времени k ;
 $t_{22}(k)$ – температура внутри ампулы в момент времени k ;
 $t_{23}(k)$ – температура на нижнем торце ампулы в момент времени k ;

Предложена следующая зависимость компонент состояния друг от друга:

$$t_{1i}(k+1) = A(k) \cdot t_{1i}(k) + B(k) \circ u_i(k), \quad (2)$$

$$t_{2i}(k+1) = C(k) \cdot t_{2i}(k) + D(k) \cdot t_{1i}(k). \quad (3)$$

В ходе опытной эксплуатации на предоставленном оборудовании была разработана математическая динамическая модель процесса нагрева/плавления.

В ходе исследования наборов невязок (разность показаний модели и реальных данных) было решено исключить несколько зависимостей: зависимость температур нагревателей друг от друга, зависимость температур от нагревателей.

Далее была проведена работа по реструктуризации зависимости температур ампулы друг от друга. Например – зависимость температур ампулы от разности температур на ее поверхности. Зависимость температур ампулы от нагревателей тоже была преобразована в разности.

В связи с достижением достаточного качества прогноза состояния значений температур для управления мощностью, подаваемой на нагреватели, итоговая модель имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} t_{11}(k+1) \\ t_{12}(k+1) \\ t_{13}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(k) \cdot t_{11}(k) \\ a_2(k) \cdot t_{12}(k) \\ a_3(k) \cdot t_{13}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1(k) \cdot u_1(k) \\ b_1(k) \cdot u_2(k) \\ b_1(k) \cdot u_3(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} t_{21}(k+1) \\ t_{22}(k+1) \\ t_{23}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}(k) \cdot t_{21}(k) + c_{12}(k) \cdot (t_{22}(k) - t_{21}(k))^+ + c_{13}(k) \cdot (t_{23}(k) - t_{21}(k))^+ \\ c_{21}(k) \cdot (t_{21}(k) - t_{22}(k))^+ + c_{22}(k) \cdot t_{22}(k) + c_{23}(k) \cdot (t_{23}(k) - t_{22}(k))^+ \\ c_{31}(k) \cdot (t_{21}(k) - t_{23}(k))^+ + c_{32}(k) \cdot (t_{22}(k) - t_{23}(k))^+ + c_{33}(k) \cdot t_{23}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1(k) \cdot (t_{11}(k) - t_{21}(k))^+ \\ d_2(k) \cdot (t_{12}(k) - t_{22}(k))^+ \\ d_3(k) \cdot (t_{13}(k) - t_{23}(k))^+ \end{bmatrix} \quad (5)$$

где u_i – компонента управления, физической интерпретацией которой является мощность, подаваемая на i -й нагреватель (в %), $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$, $D(k)$ – матрицы зависимостей текущей температуры от температуры в предшествующий отрезок времени и от текущих значений мощности.

В данном выражении используется условное обозначение «положительного усечения» заданной величины:

$$A^+ = \max(A, 0) = \begin{cases} A, & A > 0 \\ 0, & A \leq 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Работа с моделью в реальном времени разбивается на две подзадачи – оценка параметров модели ($A(k), B(k), C(k), D(k)$) и оценка вектора подаваемой мощности (управление) $U(k)$.

При работе с готовым набором данных, а так же на реальном оборудовании, имеется возможность накапливать получаемые данные в ходе всей работы, что предоставляет возможность оценивать матрицы зависимостей.

На каждую итерацию (единицу времени) имеется набор температур и подаваемая на тот момент мощность. Соответственно, можно оценить зависимости температур (вектор $A(k)$, вектор $B(k)$, матрица $C(k)$, вектор $D(k)$). Оценка проводится на основе минимизации невязки уже имеющихся значений и значений, получаемых от модели.

После получения оценок матриц появляется возможность оценить вектор управления $U(k)$ с учетом минимизации среднего градиента температур на ампуле.

Для решения задачи оценивания матриц и векторов A , B , C , D , U можно использовать такие методы как:

- *trust-constr* – поиск локального минимума в доверительной области;
- *SLSQP* – последовательное квадратичное программирование с ограничениями, ньютоновский метод решения системы Лагранжа;
- *TNC* – усеченный метод Ньютона с ограничениями;
- *L-BFGS-B* – метод Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно, реализованный с уменьшенным потреблением памяти.

Все предложенные методы имеют устойчивые программные реализации. Например, в библиотеке *scipy* в языке программирования Python [4].

Для решения задачи в указанной постановке существует ряд методов и алгоритмов, которые применимы в динамических дискретных моделях для минимизации функционала:

$$\max_{k \in [0, N]} (|t_{21}(k) - t_{23}(k)|) \xrightarrow{U_0, U_1, \dots, U_{N-1}} \min, \quad (7)$$

где N – количество временных интервалов на протяжении всей работы установки, U_k – вектор управления в момент времени k (k из $[0, N-1]$).

Описание разработанного приложения

В ходе работы был разработан программный комплекс, использующий клиент-серверную архитектуру на основе технологии сокетов TCP/IP, состоящий из несколько частей.

1. Драйверы многоканального измерителя температуры и цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Данная часть программного комплекса отвечает за снятие показаний с датчиков температур и за подачу мощности на нагреватели установки [6]. Разработано с использованием языка C.

2. Сервер данных, который осуществляет информационное взаимодействие между программами комплекса в режиме реального времени. На сервер программами передаются результаты измерений температуры, уставки, вычисленные значения мощности нагревателей и другие параметры, а также считываются ранее переданные данные, снабженные меткой времени получения. Разработано с использованием языка C.

3. Оболочка оператора – программное приложение, с которым взаимодействует оператор. Оболочка обеспечивает возможность просмотра текущих значений параметров процесса, в том числе в виде графиков температуры и мощности. В этой же оболочке созданы функции ручного управления мощностью нагревателей и управления динамической системой в автоматическом режиме на основе анализа данных согласно разработанной математической модели. Разработано с использованием языка Python 3.8 [7].

Поскольку мониторинг температуры при воспроизведении реперной точки – это основной инструмент анализа состояния процесса, у оператора есть возможность наблюдать графики температуры и мощности в реальном времени (рис. 2).

«Легенда» указана в правой части окна, с возможностью отключать отображения одного или нескольких графиков. Красный цвет обозначает верхние датчики/мощность, зеленый – центральные, синий – нижние. Штрих-чертой указаны показания температурных датчиков на нагревателях, сплошной – градиентные датчики и контрольный датчик, пунктирной – датчик мощности.

В результате внедрения разработанного приложения были получены следующие результаты:

– сократилось время воспроизведения реперной точки в среднем на один час;

– увеличилась длительность затвердевания для реперных точек индия и цинка примерно на полчаса;

– повысилась производительность эталонов 0-го разряда при градуировке термометров пропорционально увеличению длительности затвердевания.

За все время апробации не было зафиксировано градиента температур по высоте ампулы более 6 градусов, что положительно повлияет на длительность службы используемого оборудования.

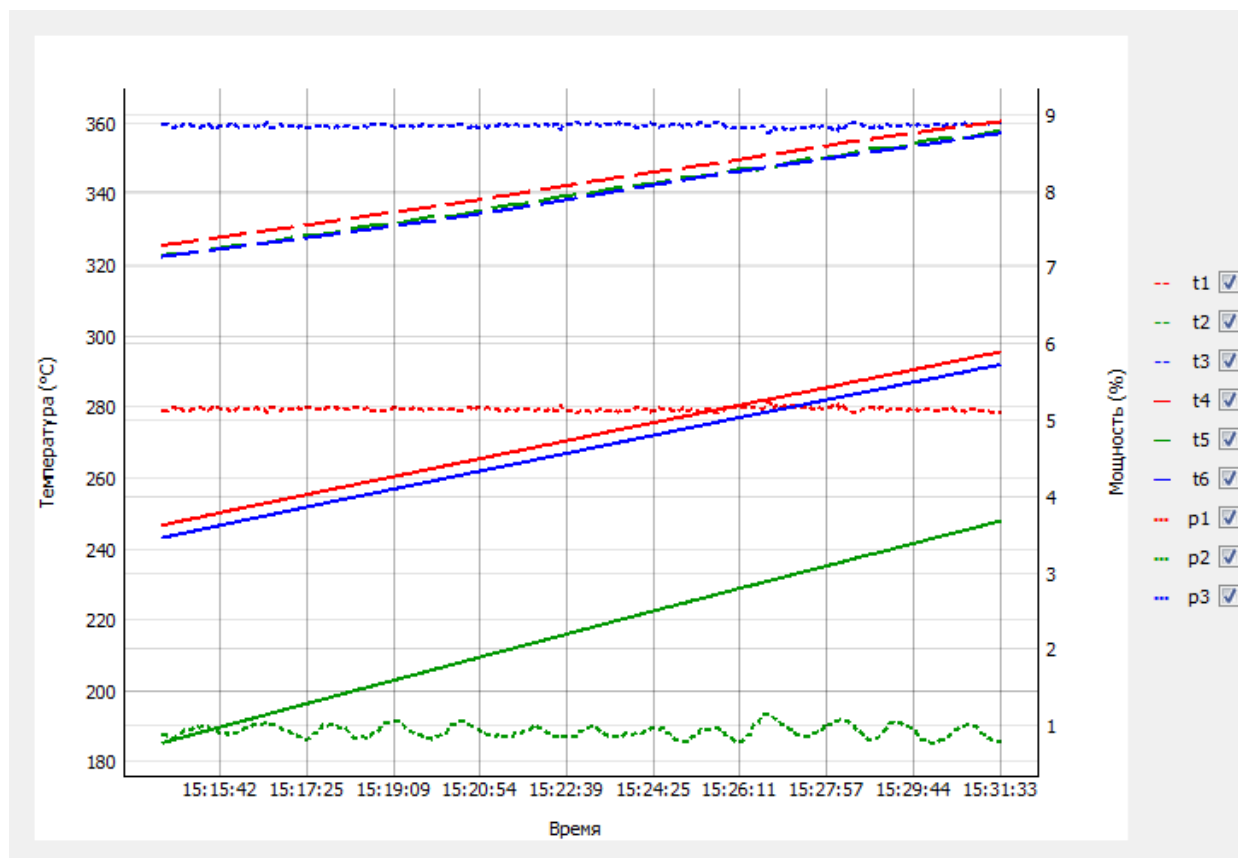


Рис. 2. Пример отрисовки графиков температуры и мощности

Заключение

В ходе работы был разработан программный комплекс, включающий в себя все необходимые программные компоненты для управления аппаратурой для воспроизведения реперных точек температурной шкалы МТШ-90 – фазовых переходов затвердевания чистых металлов. Предложена математическая динамическая модель для описания процесса воспроизведения, которая успешно опробована в автоматическом управлении аппаратурой. Итоговый программный комплекс, реализованный на основе предложенной математической модели, успешно опробован в автоматическом управлении аппаратурой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Развитие Международной температурной шкалы [Электронный ресурс] / temperatures.ru Информационный портал // URL: http://temperatures.ru/pages/razvitie_mejdunarodnoi_temperaturnoi_shkaly.
2. 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
3. Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990. – BIPM, 1990 [Электронный ресурс] / bipm.org // URL: <https://www.bipm.org/utls/common/pdf/ITS-90/ITS-90-Techniques-for-Approximating.pdf> (дата обращения: 31.10.2020).

4. Scipy [Электронный ресурс] / Информационный портал // URL: scipy.org (дата обращения: 25.10.2020)
5. Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990: – BIPM, 1990 [Электронный ресурс] / bipm.org // URL: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/its-90/SInf_Chapter_1_Introduction_2013.pdf (дата обращения: 03.11.2020).
6. Уидроу Б., Стирнс С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с., ил.
7. Соловьев Б. С. Динамическая модель управления воспроизведением реперных точек температурной шкалы / Б. С. Соловьев, В. С. Карманов, Д. А. Гривастов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 30 нояб.– 4 дек. 2020 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 272–275.

© Б. С. Соловьев, В. С. Крылов, 2021