

УДК 62.50

Б.А. Скороход, профессор, д-р техн. наук,

А.С. Бегун, ассистент

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: AntonBegun@rambler.ru

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОЙ ПЕЧЬЮ

Предложен адаптивный алгоритм управления нагревом электровакуумной печи, обеспечивающий подъём температуры в соответствии с заданным эталонным режимом нагрева и произвольной загрузкой печи.

1. Постановка задачи. Объект управления представляет собой серийно выпускаемую однокамерную электровакуумную печь [1] нагревателем которой является спираль, питающаяся от напряжения промышленной сети 220 В, 50 Гц. Для измерения температуры используется термопара.

Целью статьи является разработка системы управления, которая должна обеспечивать подъём температуры электровакуумной печи в соответствии с заданным технологическим режимом. При этом имеются определенные требования, предъявляемые к системе управления, обусловленные спецификой производства. Прежде всего предполагается, что в производстве используются несколько печей, функционирующих независимо, и на каждой из них должен быть воспроизведен один и тот же технологический процесс. Вместе с тем печи обладают различными геометрическими параметрами, а загрузки в каждой из них могут существенно отличаться. Кроме того, при достаточно больших температурах, нагретые объекты внутри камеры начинают излучать тепловую энергию самостоятельно, что может приводить к существенным изменениям свойств печи как объекта управления. Таким образом, спроектированная система управления должна адаптироваться к указанным, изменяющимся свойствам объекта управления. Рассматриваемый технологический процесс представляет собой многочасовой нагрев, выполняемый в соответствии с заданным эталонным режимом. При этом определяющим фактором является необходимость высокоточного отслеживания эталонной кривой нагрева на заключительных этапах технологического процесса. Так, ошибка отслеживания здесь не должна превышать 0,5 % от общего диапазона изменения температуры в печи 840°C (что составляет 4,2°C). Помимо этого, важной характеристикой является время, необходимое для выполнения технологического процесса. Представляется, что оно может быть существенно уменьшено за счет более эффективного использования ресурсов на начальной стадии нагрева. И, наконец, обязательным требованием к разрабатываемым алгоритмам управления и программному обеспечению является их универсальность, т.е. они должны быть идентичны для различных печей. Поставляемая вместе с печами, система управления не удовлетворяет указанным требованиям, что обуславливает необходимость создания специализированных аппаратных и программных средств.

В настоящее время создана цифровая система управления нагревом электровакуумной печи на базе контроллера и внешнего программного обеспечения. Регулирование температуры в системе осуществляется на основе использования в законе управления ПИД - регулятора – линейной комбинации сигнала ошибки, интеграла и производной от нее – коэффициенты которого подбирались вручную – путём многочисленных и многочасовых экспериментов с реальным объектом. При этом обнаружилось, что в системе присутствует нежелательное перерегулирование. Более того, найденные коэффициенты регулятора используются на нескольких печах различной конструкции со всеми возможными загрузками, представляющими собой материалы разной теплоёмкости, что приводит к различной точности работы печей. Таким образом, действующая система управления нуждается в модернизации. Один из вариантов такой модернизации содержится в работе [2]. В основу разработки были положены следующие соображения. При конструировании системы управления на основе ПИД - регулятора не использовалась модель объекта. Вместе с тем известно, что построение законов управления, основанных на предварительно сконструированной математической модели, может позволить существенно улучшить характеристики системы управления. Для рассматриваемой задачи проблема состоит в том, что построение такой модели на основе физических законов и определение её параметров, учитывая вышесказанное, представляет собой весьма сложную задачу. Поэтому в [2] предлагается искать математическое описание объекта в классе моделей авторегрессии и скользящего среднего (ARX) и использовать его в регуляторе, основанном на алгоритме со скользящим окном. Идея алгоритма управления заключается в минимизации критерия качества, использующего прогноз поведения объекта управления на определённое число шагов вперёд. В данной работе продолжены эти исследования, т.е. предложены алгоритмы управления с настройкой параметров системы управления непосредственно в темпе реального времени, что позволяет улучшить характеристики системы.

2. Алгоритм управления. В качестве модели объекта управления была использована ARX - модель типа «1 вход – 1 выход» [3]

$$A(q)y(t) = B(q)v(t - nk) + e(t), \quad (1)$$

где $A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$, $B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1}$; na, nb – порядки полиномов $A(q), B(q)$; q – оператор задержки; nk – запаздывание сигнала управления; $v(t)$ – управление в системе (мощность, потребляемая нагревателем); a_i, b_i – коэффициенты $A(q), B(q)$ соответственно; $y(t)$ – выход системы (температура в печи) в момент времени t ; $e(t)$ – случайный процесс типа белого шума с интенсивностью σ^2 , обусловленный неточным заданием модели и возмущениями в системе.

Параметры модели (1) a_i, b_i оценивались с использованием метода наименьших квадратов (МНК), а величины na, nb, nk выбирались на основе сравнения функций потерь

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta_k^2}$$

для конкурирующих ARX-моделей с диапазонами возможных значений $na = \overline{1,5}$, $nb = \overline{1,5}$, $nk = \overline{1,5}$. Здесь $\delta_k = \hat{y}(t_k) - y(t_k)$ – рассогласование между оценкой МНК $\hat{y}(t_k)$ и измеренным выходом $y(t_k)$ системы в момент времени t_k , где N – объём выборки измерений выхода системы.

После того как ARX-модель (1) для описания объекта была получена, рассматривалась собственно задача управления в следующей постановке.

Перейдем от ARX-модели к модели пространства состояния, заданной в канонической наблюдаемой форме

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) = Cx(t) + e(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $x \in R^{na \times 1}$ – вектор состояния, $u(t) = v(t - nk)$,

$$A = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ -a_3 & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 1 \\ -a_{na} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_{nb} \end{bmatrix} \quad C = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0].$$

Введём критерий качества

$$J(t) = \sum_{k=N_1}^{N_2} \|\hat{y}(t+k|t) - r(t+k|t)\|_{Q_1(k)}^2 + \sum_{i=0}^{N_3-1} \|\Delta \hat{u}(t+i|t)\|_{Q_2(i)}^2, \quad (3)$$

где N_1 – начальный горизонт прогноза (положим $N_1=1$); N_2 – горизонт прогноза выхода, N_3 – горизонт управления, причём $N_3 \leq N_2$; $\hat{y}(t+k|t)$ – прогноз выхода системы на k -шагов вперёд; $r(t+k|t)$ – желаемая траектория выхода; $\Delta \hat{u}(t+i|t) = \hat{u}(t+i|t) - \hat{u}(t+i-1|t)$ – приращение прогнозируемого сигнала управления $\hat{u}(t|t)$ на i -м шаге прогноза $\Delta \hat{u}(t+i|t) = 0$ для $N_3 \leq i \leq N_2$; Q_1 – матрица штрафов рассогласования траектории и предсказанного выхода системы, Q_2 – матрица штрафов изменений в сигнале управления.

Свяжем управление в системе (2) и приращения прогнозирующего управления в функционале (3). Имеем

$$\begin{aligned} \hat{u}(t|t) &= u(t-1) + \Delta \hat{u}(t|t), \\ \hat{u}(t+1|t) &= u(t-1) + \Delta \hat{u}(t|t) + \Delta \hat{u}(t+1|t), \\ &\vdots \\ \hat{u}(t+N_3-1|t) &= u(t-1) + \Delta \hat{u}(t|t) + \Delta \hat{u}(t+1|t) + \dots + \Delta \hat{u}(t+N_3-1|t), \end{aligned} \quad (4)$$

где $u(t-1)$ – известный сигнал управления, рассчитанный на предыдущем шаге работы алгоритма со скользящим окном.

Используя (3), выражения (4) и полагая $\Delta \hat{u}(t+i|t) = 0, i = \overline{N_3, N_2}$, нетрудно получить соотношения [4] для прогноза поведения решений (3)

$$\begin{aligned}
\hat{x}(t+1|t) &= Ax(t) + B[u(t-1) + \Delta\hat{u}(t|t)]; \\
\hat{x}(t+2|t) &= A^2x(t) + AB[u(t-1) + \Delta\hat{u}(t|t)] + B[u(t-1) + \Delta\hat{u}(t|t) + \Delta\hat{u}(t+1|t)] \\
&= A^2x(t) + (A+I)Bu(t-1) + (A+I)B\Delta\hat{u}(t|t) + B\Delta\hat{u}(t+1|t); \\
&\vdots \\
\hat{x}(t+N_3|t) &= A^{N_3}x(t) + (A^{N_3-1} + \dots + A+I)Bu(t-1) + (A^{N_3-1} + \dots + A+I)B\Delta\hat{u}(t|t) \\
&\quad + B\Delta\hat{u}(t+N_3-1|t); \\
\hat{x}(t+N_3+1|t) &= A^{N_3+1}x(t) + (A^{N_3} + \dots + A+I)Bu(t-1) + (A^{N_3} + \dots + A+I)B\Delta\hat{u}(t|t) + \\
&\quad + (A+I)B\Delta\hat{u}(t+N_3-1|t); \\
&\vdots \\
\hat{x}(t+N_2|t) &= A^{N_2}x(t) + (A^{N_2-1} + \dots + A+I)Bu(t-1) + (A^{N_2-1} + \dots + A+I)B\Delta\hat{u}(t|t) + \\
&\quad + (A^{N_2-N_3} + \dots + A+I)B\Delta\hat{u}(t+N_3-1|t).
\end{aligned} \tag{5}$$

Требуется выбрать управляющее воздействие из условия минимума критерия качества (3) при ограничениях (5) и

$$u_{\min} \leq \hat{u}(t+i|t) \leq u_{\max}, \tag{6}$$

где $u_{\min}, u_{\max}$ заданы.

В работе [4] показано, что оптимальный закон управления имеет вид

$$u(t) = U(t, \hat{x}(t), u(t-1), R(t)), \tag{7}$$

где $U(\cdot)$ – некоторая функция, определяемая по системе (2), критерию (3) и ограничениям (5),(6); $\hat{x}(t)$ – оценка состояния системы (2), $R(t) = [r(t+1|t), r(t+2|t), \dots, r(t+N_2|t)]^T$ – желаемая траектория выхода системы.

Оценка состояния системы (2) определялась с помощью фильтра Калмана. Интенсивность шума измерений и начальная ковариационная матрица для расчета фильтра полагались равными, соответственно

$$\begin{aligned}
\sigma &= \sqrt{\frac{1}{N-na-nb} \sum_{k=1}^N \delta_k^2}, \\
P(0) &= \lambda I,
\end{aligned}$$

где I – единичная матрица, λ – положительный параметр, определяемый экспериментально.

Итак, алгоритм управления электровакуумной печью включает в себя следующие этапы:

- 1) Идентификация объекта, для чего на вход системы подаётся сигнал близкий по характеристикам к белому шуму, и оцениваются параметры модели (2).
- 2) Восстановление состояния системы с помощью фильтра Калмана по известным измерениям входа и выхода системы, начиная с нулевых начальных условий.
- 3) Расчёт управляющего воздействия (7) системы (2).

Поскольку система управления должна обеспечить высокую точность работы на относительно большом диапазоне изменения температуры в печи (порядка 840 °C), то, для обеспечения требуемых параметров системы, полученной на этапе идентификации модели, оказывается не достаточно. Поэтому на начальном этапе разработки адаптивного алгоритма управления предлагается периодически пересчитывать модель объекта с учётом имеющихся на момент уточнения измерений входа и выхода системы. Для расчёта текущего управления соответственно используется последняя найденная идентифицированная модель объекта.

3. Описание макета и результатов экспериментальных исследований. Для проверки работы предложенного алгоритма и ввиду сложности работы с реальным объектом управления (многочасовой нагрев и остывание, а также непрерывности технологического процесса) был сконструирован макет печи.

В качестве экспериментальной установки взят нагревательный элемент, мощностью 150 Вт/час, питание 220 В, 50 Гц. Для измерения температуры использовалась термопара, подключаемая к терморегулятору ТП403 (абсолютная погрешность измерений составляет 1°C) для снятия реальных значений температуры через СОМ-порт персонального компьютера (ПК). Для формирования управляющего воздействия была собрана схема (см. рисунок 1), позволяющая включать и выключать питание нагревателя в произвольный момент времени. Сигналы включения и выключения формируются предварительно на ЭВМ, а затем с помощью программы выдаются через LPT-порт ПК на схему.

Предложенный макет позволяет проводить исследования по измерению температуры нагревателя при подаче напряжения на нагреватель. На данном этапе проектирования влияние изменения давления в макете не учитывается, оно лишь считается постоянным и равным нормальному атмосферному давлению.

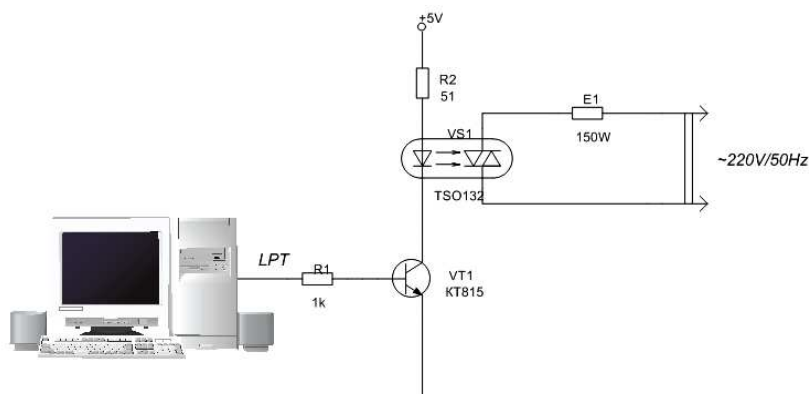


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки (E1 – нагреватель)

Входным параметром системы является мощность, подаваемая за единицу времени на объект управления. В качестве выходного параметра использовалась температура, измеряемая в градусах Цельсия. Интервал снятия данных полагался равным 10 секундам.

При решении задачи идентификации был проведен следующий эксперимент. Подавалось управление случайной длительности относительно середины интервала дискретизации. Длительности интервалов управления выбирались по нормальному закону распределения. Использовалась нормальная случайная величина с математическим ожиданием 5 секунд и среднеквадратическим отклонением 5/3 секунды. Результаты эксперимента изображены на рисунке 2.

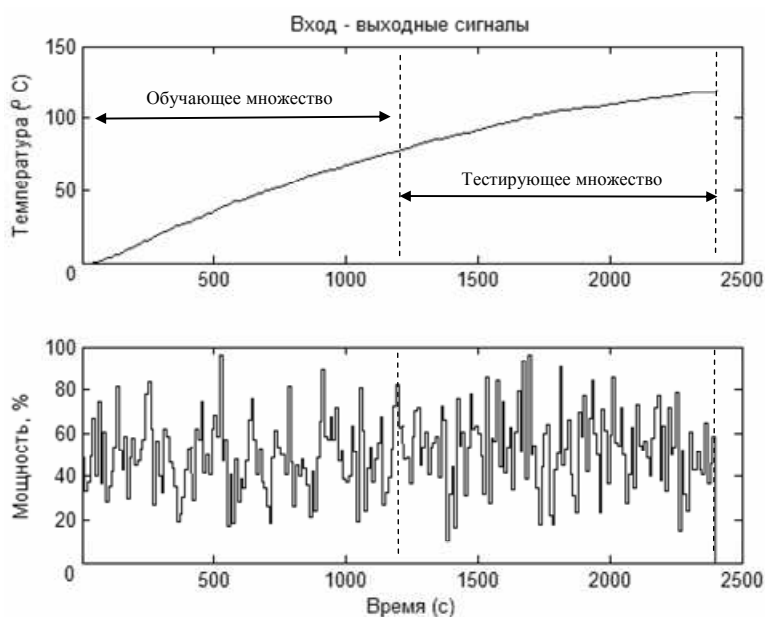


Рисунок 2 – Вход – выходные данные, Power – входная мощность, Temperature – температура объекта

Для построения модели использовались данные из обучающего множества. В результате сравнения конкурирующих моделей была выбрана наилучшая ARX-модель с порядками [5, 5, 1], и минимальной функцией потерь $RMSE=0,1391$, т.е.

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 - 0,4769 \cdot q^{-1} - 0,5704 \cdot q^{-2} - 0,1728 \cdot q^{-3} + 0,0320 \cdot q^{-4} + 0,1920 \cdot q^{-5}, \\ B(q) &= 0,8927 \cdot q^{-1} - 0,0380 \cdot q^{-2} + 1,1880 \cdot q^{-3} + 1,2300 \cdot q^{-4} + 0,9405 \cdot q^{-5}. \end{aligned} \quad (8)$$

На рисунке 3 показана возможность ARX-модели (8) прогнозировать поведение объекта управления на заданное число шагов вперед (точность прогноза указана в процентах), при этом ошибка прогноза представлена на рисунке 4.

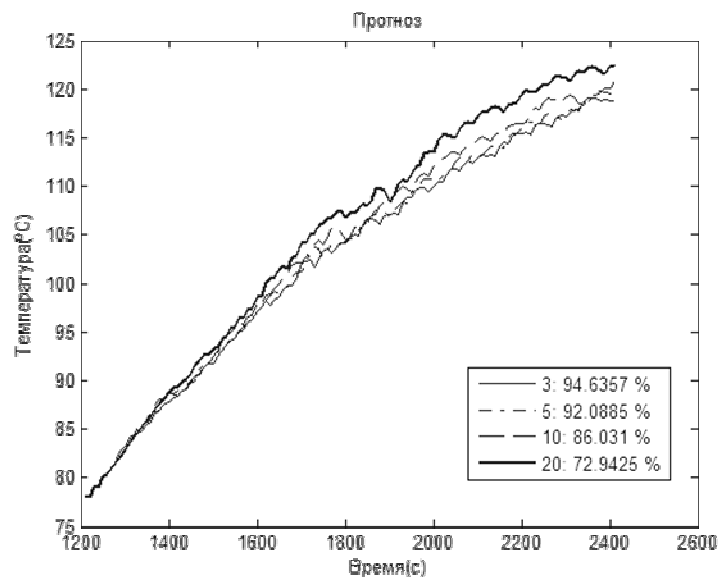


Рисунок 3 – Прогноз ARX модели [5 5 1] на 3, 5, 10, 20 шагов на тестирующем множестве

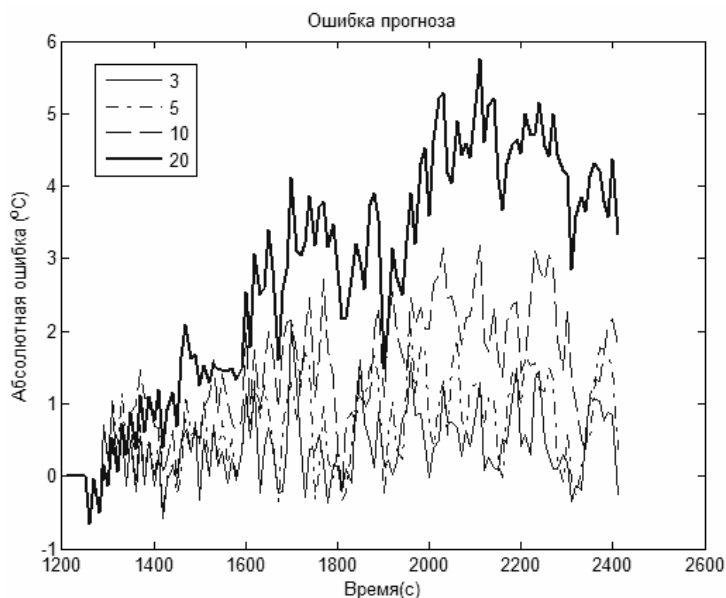


Рисунок 4 – Ошибка ARX модели [5 5 1] на 3, 5, 10, 20 шагов на тестирующем множестве

Видно, что при прогнозе на 10 шагов вперёд (100 секунд) ошибка прогноза не превышает 2 °C, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к точности выхода проектируемой системы.

Для проверки работы предложенного алгоритма идентификации и управления была разработана программа высокого уровня в среде проектирования Borland Delphi 5.0, позволяющая в реальном времени снимать данные с датчика температуры, а так же выдавать рассчитанные сигналы управления на регулятор через рассмотренную ранее схему (см. рисунок 1). Таким образом, сконструирована замкнутая система управления, позволяющая регулировать температуру макета объекта управления.

В проведённом эксперименте мощность задавалась в процентах от максимальной мощности, так, что при подаче к примеру 20 %, в течение 10 секунд управление включено в течение 2 секунд, при этом максимальная мощность, потребляемая нагревателем, может быть неизвестна. Тем самым достигается универсальность предложенного метода идентификации и управления. На рисунке 5 показан процесс поднятия температуры на экспериментальной установке. Сигнал управления изображён на рисунке 6. В данном эксперименте количество точек для идентификации было взято 100 (что составляет 1000 секунд). Горизонт прогноза и порядок системы был принят равным 5. Матрицы штрафов в критерии (5) единичные.

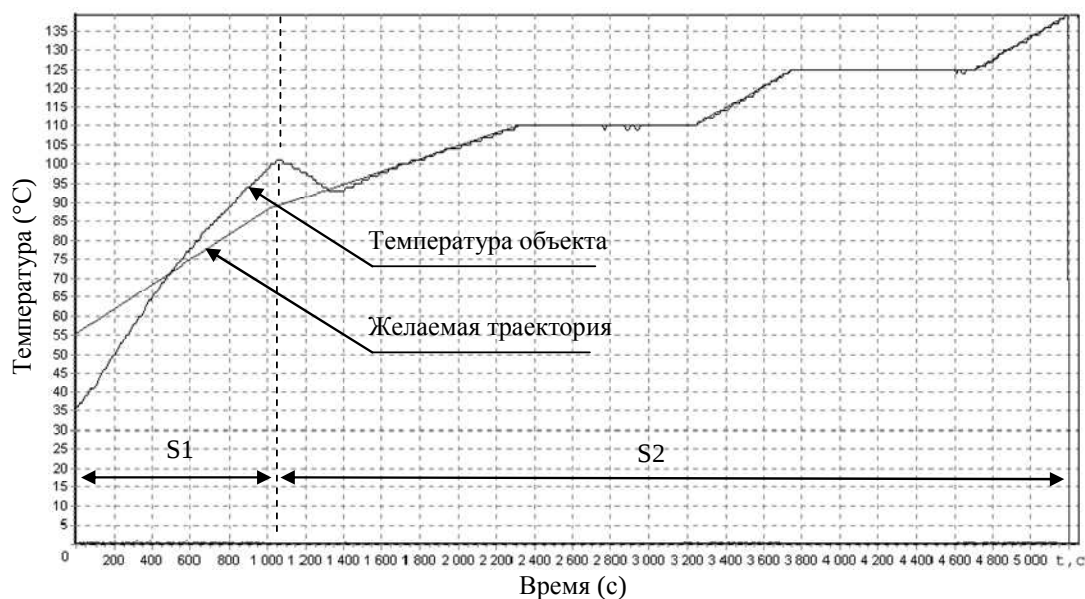


Рисунок 5 – Процесс поднятия температуры макета объекта управления:
S1 – этап идентификации, S2 – работа замкнутой системы с регулятором

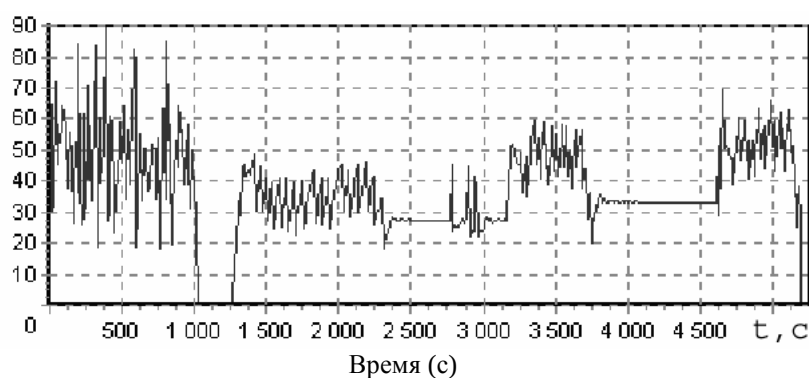


Рисунок 6 – Сигнал управления в системе

Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает подъём температуры объекта в соответствии с заданной желаемой траекторией с заданной точностью, при этом перерегулирование в системе во время выхода на выдержку равно нулю (см. рисунок 5).

Заключение. В результате проведённых исследований алгоритма управления на макете печи было показано, что предложенный адаптивный подход к управлению нагревом печи работоспособен и обеспечивает требуемые показатели по точности и качеству проектируемой системы. В ближайшее время планируется проведение испытаний алгоритма на реальном объекте.

Перспективой дальнейших исследований является разработка адаптивного алгоритма идентификации и управления, который позволит на каждом шаге как уточнять модель объекта, так и вырабатывать сигнал управления в режиме реального времени.

Библиографический список

1. <http://www.vakuotechnika.cz/katalog/va/pz810.htm>.
2. Скороход Б.А. Идентификация характеристик электровакуумной печи и конструирование законов управления / Б.А. Скороход, А.С. Бегун // Системы автоматики и автоматическое управление: матер. Всеукраин. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Севастополь, 13 – 14 мая 2006. — Севастополь, 2006. — С. 3 – 6.
3. Льюнг Л. Теория идентификации систем для пользователя / Л. Льюнг, А.С. Мандель — М.: Наука, 1991. — 431 с.
4. Maciejowski J.M. Predictive control: with constraints / J.M. Maciejowski. — N.Y.: Prentice Hall, 2002. — 331 с.

Поступила в редакцию 05.07.2007 г.