

АЛГОРИТМЫ ОПЕРАТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА НА ОСНОВЕ МЕТОДА СТОХАСТИЧЕСКОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Ткаченко В.Н., Яремко И.Н.

Донецкий национальный технический университет,
кафедра автоматики и телекоммуникаций

E-mail: tkachenko@iamm.ac.donetsk.ua

Abstract. Tkachenko V., Jaremko I. Algorithms of operating identification of parameters of external heat exchange on the basis of a method of stochastic approximating. On the bases of stochastic approximation method algorithms of on-line identification are proposed. Velocity of convergence is investigated for different errors of metal temperature measurements. Analysis of imitation modelling results is realised.

Постановка проблемы. В системах управления нагревом металла необходимо иметь возможность оперативной адаптации параметров математической модели. Но процесс получения информации о температуре нагрева опытного сляба довольно трудоемкий и практически не поддается автоматизации. Возникает необходимость в разработке более простых алгоритмов настройки модели, использующих минимальное количество точек измерений температуры металла.

Анализ методов решения проблемы. После начальной настройки необходимо обеспечить адаптацию параметров модели в реальном масштабе времени. Такие алгоритмы могут быть основаны на методе стохастической аппроксимации [1]. Но в рамках стохастической аппроксимации не имеется рекомендаций по выбору скорости сходимости вычислительного процесса. Поэтому возникает необходимость и в исследованиях сходимости при использовании этих алгоритмов и методов.

В статье предложены алгоритмы оперативной идентификации параметров внешнего теплообмена на основе метода стохастической аппроксимации.

Алгоритмы оперативной подстройки параметров внешнего теплообмена на основе стохастической аппроксимации. Для математического моде-

лирования процесса нагрева массивных в теплофизическом смысле тел широкое распространение получила следующая простейшая одномерная модель:

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$-\lambda(T)\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} = \sigma_1(\tau)\{[U_1(\tau)]^4 - [T(0,\tau)]^4\} + \alpha_1(\tau)[U_1(\tau) - T(0,\tau)], \quad (2)$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T(s,\tau)}{\partial x} = \sigma_2(\tau)\{[U_2(\tau)]^4 - [T(s,\tau)]^4\} + \alpha_2(\tau)[U_2(\tau) - T(s,\tau)] \quad (3)$$

$$T(x,0) = T_0(x). \quad (4)$$

где $T(x,\tau)$ — температура в точке x в момент времени τ , $0 \leq x \leq s$,

s — характерный размер тела;

$\lambda(T)$, $C(T)$, $\rho(T)$ — коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотности материала соответственно (рассматриваются как функции температуры);

$\sigma_1(\tau)\sigma_2(\tau)$, $\alpha_1(\tau), \alpha_2(\tau)$ — коэффициенты радиационного и конвективного теплообмена снизу (1), сверху (2);

$U_1(\tau)$, $U_2(\tau)$ — температура рабочего пространства.

Математическая модель (1)–(4), включающая квазилинейное уравнение теплопроводности (1), нелинейные граничные условия (2), (3), задает распределение температуры $T(x,\tau)$ по сечению тела и времени и позволяет более точно описать процесс нагрева с учетом зависимости теплофизических характеристик материала от температуры.

Предположим, что через некоторые промежутки времени $\Delta\tau_i$ измеряется температура поверхности T_i^* металла в какой-либо точке по длине зоны теплообмена либо на выдате из печи. В управляющей вычислительной машине параллельно процессу нагрева металла моделируется процесс с помощью математической модели (1)–(2), на входы которой подаются входы реального процесса. Необходимо по отклонениям измеряемой температуры поверхности от рассчитываемой на УВМ подстраивать параметры модели, сводящие отклонение $\varepsilon_i(\tau) = T_i^*(\tau) - T_i(\tau)$ к нулю.

Оперативная подстройка параметров заключается в уточнении свободных членов функций $\sigma_1(\tau), \sigma_2(\tau)$, полученных в результате решения задачи начальной настройки параметров. Поскольку измерение осуществляется в од-

ной точке, то величина корректировки $\Delta\sigma_i$ на каждом такте измерений соответствует сразу обеим функциям.

В соответствии с методом стохастической аппроксимации алгоритм настройки параметров имеет вид:

$$\begin{aligned}\sigma_1^i(\tau) &= \sigma_1^i(\tau) + \Delta\sigma_i, \\ \sigma_2^i(\tau) &= \sigma_2^i(\tau) + \Delta\sigma_i, i = 1, 2, \dots \\ \Delta\sigma_i &= k_i \varepsilon_i \frac{\partial T(\tau, l^*, x^*)}{\partial \sigma}\end{aligned}\tag{5}$$

где $\frac{\partial T(\tau, l^*, x^*)}{\partial \sigma}$ — функция чувствительности температуры металла к параметрам;

l^*, x^* — координаты съема температуры металла в печи;

k_L — последовательность чисел.

Последовательность k_i в соответствии с методом стохастической аппроксимации должна удовлетворять следующим условиям [1]:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} k_i = 0, \sum_{i=1, \infty} k_i = \infty, \sum_{i=1, \infty} (k_i)^2 < \infty.$$

Алгоритм (5) допускает упрощение за счет отказа от расчета производной, что в общем случае снижает скорость сходимости к истинному значению.

Исследованиями установлено [2], что функции чувствительности $\frac{\partial T}{\partial \sigma}$ слабо

зависят от изменения величин σ , и скорость сходимости алгоритма в основном определяется скоростью сходимости последовательностью k_i . В качестве измеренных температур принимались рассчитанные по модели с аддитивной случайной погрешностью в виде "белого шума" с нулевым средним и дисперсией, отражающей погрешность измерений температуры поверхности металла. Критерием точности подстройки параметров и окончания процесса подстройки служит фильтр скользящего суммирования:

$$F_L = \frac{1}{n} \sum_{j=L-n}^L k_j \varepsilon_j.$$

Исследование эффективности алгоритмов подстройки. В рамках теории стохастической аппроксимации не имеется рекомендаций по выбору скорости сходимости последовательности k_i . Для алгоритма (5) были проведены ис-

следования сходимости последовательности $k_i = \gamma/i$, $i = 1, 2, \dots$; γ — параметр, определяющий скорость сходимости. Моделирование процесса подстройки параметров позволило установить основные особенности траекторий движения подстраиваемого параметра к истинному значению. Для γ в интервале $0 \leq \gamma \leq 0,5$ значения последовательности так быстро уменьшаются, что подстраиваемый параметр не успевает войти в δ -окрестность истинного значения (рис. 1).

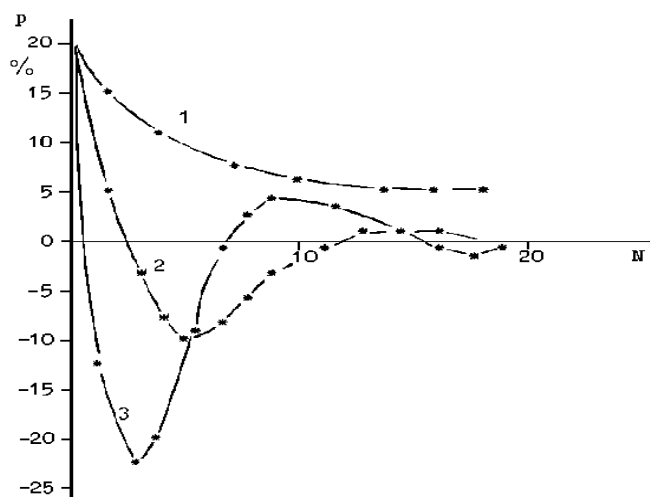


Рисунок 1 — График сходимости подстраиваемого параметра

Для γ в интервале $1,0 \leq \gamma \leq 2,0$ подстраиваемый параметр плавно движется к истинному значению и после 15–20 итераций совершает колебания с малой амплитудой постепенно входя в δ -окрестность решения. И для $\gamma > 3,0$ траектория подстройки представляет собой медленно затухающие колебания с большой амплитудой. В этом случае для получения требуемой точности необходимо не менее 200 итераций.

Для совершенствования алгоритмов подстройки с целью сокращения количества итераций необходимо, чтобы в процессе подстройки элементы последовательности медленно изменялись вдали от истинного значения и быстро уменьшались, когда получено хорошее приближение параметров. Достичь такой сходимости удастся за счет изменения последовательности по следующим алгоритмам:

$$k_i = \begin{cases} \frac{\gamma}{i-1}, & \text{если } \text{SIGN}[\varepsilon_{i-1}] = \text{SIGN}[\varepsilon_i] \\ \frac{\gamma}{i}, & \text{если } \text{SIGN}[\varepsilon_{i-1}] \neq \text{SIGN}[\varepsilon_i] \end{cases} \quad (6)$$

В соответствии с алгоритмом (6) обеспечивается постоянство элементов последовательности k_i , если сохраняется знак невязки, и быстрое изменение k_i в случае частых перемен знака, свидетельствующих о близости подстраиваемого параметра и истинному значению. В начале процесса подстраиваемый параметр быстро движется к истинному значению при постоянном знаке невязки и постоянном значении k_i . Помеха влияет при этом лишь на скорость движения. Затем вблизи истинного значения параметра начинает сказываться влияние помехи и на направление движения подстраиваемого параметра. Алгоритм начинает ошибаться, происходит частая смена знака невязки и более быстрое уменьшение элементов последовательности k_i , обеспечивающее снижение влияния помехи на процесс подстройки.

Исследована эффективность алгоритма (6) при различном среднем квадратическом отклонении (с.к.о.) помехи измерения температуры металла. В таблице 1 приведены результаты исследования процесса подстройки параметров, свидетельствующие, что необходимое число итераций увеличивается с ростом с.к.о. помехи измерения температуры металла и существенно зависит от начального значения γ последовательности.

Таблица 1 — Результаты исследования процесса подстройки параметров

С.К.О. Помехи измерений (°С)	Начальное значение параметра γ последовательности	Погрешность подстройки параметра (%)	Количество итераций (N)
5.0	0.5	0.29	28
5.0	1.0	0.15	69
5.0	2.0	0.16	71
5.0	3.0	0.15	93
20.0	1.0	0.70	97
20.0	2.0	0.09	165
50.0	1.0	0.24	207
50.0	2.0	0.32	528
100.0	1.0	1.55	512

Достоинством алгоритма (6) является его успешная работа для более широкого интервала начальных значений γ , что очень важно, когда не удается достаточно точно определить вероятностные характеристики помехи измерения.

Выводы.

1. На основе метода стохастической аппроксимации предложены алгоритмы оперативной идентификации параметров внешнего теплообмена математической модели нагрева металла. Имитационным моделированием исследована скорость сходимости алгоритмов при различной погрешности измерений температуры металла.

2. Предложен модифицированный алгоритм оперативной адаптации, имеющий слабую зависимость скорости сходимости от начального значения параметра последовательности, который может быть использован в системах управления нагревом металла.

Литература

1. Ткаченко В.Н., Яремко И.Н. Автоматизированная система управления отделением нагревательных колодцев// Наукові праці донецького державного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, Випуск 20: Донецьк: ДонНТУ, 2000. — С.107–113.
2. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л. Идентификация систем управления. — М.: Наука, 1974. — 246 с.
3. Растрингин Л.А., Маджаров Н. Е. Введение в идентификацию объектов управления. – М.: Энергия, 1977, - 215с.
4. Ткаченко В.Н., Яремко И.Н. Подсистема оперативного прогноза теплового состояния слитков на участке нагревательных колодцев// Научные труды ДонНТУ. Серія: Вычислительная техника и автоматика, Випуск 25, 2001. — С.130–134.
5. Прядкин Л.Л., Ткаченко В.Н. Исследование параметрической чувствительности математических моделей процесса нагрева тел.//Моделирование и оптимизация технологических процессов металлургического производства. — Киев: ИК АН УССР, 1978. — С. 32–45.

Сдано в редакцию:

Рекомендовано к печати: д.т.н., проф. Бессараб В.И.