УДК 621.182:621.311.22

А.В. Ткаченко
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра автоматики и телекоммуникаций
E-mail: avtkachenko@mail.ru

АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТОПКЕ КОТЛОАГРЕГАТА СКД

Abstract
Tkachenko A.V. Algorithms of identification for parameters of mathematical model of heat and mass transfer in furnace of supercritical boiler. *Model of heat and mass transfer in furnace of supercritical boiler is considered. Most sensitive parameters of model are selected for identification. Algorithm of identification based on gradient optimization is build. Algorithm of online correction of parameters based on method of stochastic approximation is proposed.*
Keywords: *parametric identification, stochastic approximation, super-critical boiler.*

Анотація
Ткаченко О.В. Алгоритми ідентифікації параметрів математичної моделі тепломасоперенесення в топці котлоагрегата НКТ. *Розглядається модель тепломасоперенесення в топці котлоагрегата НКТ. Для ідентифікації обрані найбільш чутливі параметри моделі. Алгоритм ідентифікації заснований на градієнтній оптимізації. Для оперативного підстроювання параметрів запропонований метод стохастичної апроксимації.*
Ключові слова: *параметрична ідентифікація, стохастична апроксимація, котлоагрегат НКТ.*

Аннотация
Ткаченко А.В. Алгоритмы идентификации параметров математической модели тепломассопереноса в топке котлоагрегата СКД. *Рассматривается модель тепломассопереноса в топке котлоагрегата СКД. Для идентификации выбраны наиболее чувствительные параметры модели. Алгоритм идентификации основан на градиентной оптимизации. Для оперативной подстройки параметров предложен метод стохастической аппроксимации.*
Ключевые слова: *параметрическая идентификация, стохастическая аппроксимация, котлоагрегат СКД.*

Введение. Успешность использования математической модели зависит от ее адекватности реальному процессу. Этап идентификации математической модели технологического процесса является наиболее важным этапом создания математической модели. Под задачами идентификации понимают в широком смысле задачи определения математической модели (структуры), в узком смысле — определение значений параметров модели на основе результатов измерений функционирующего технологического объекта.

В работе [1] предложена модель нагрева конструкций испарительной части котлоагрегата, труб и пароводяной смеси. Модель предложено использоваться в системе прогностического управления пусковым режимом работы. Цель управления — выполнение директивных графиков, которые обеспечивают наиболее эффективный режим пуска котлоагрегата, а именно, максимальную скорость прогрева оборудования с учетом ограничений на безопасность. Задача параметрической идеентификации модели тепломассопереноса в рабочем пространстве котлоагрегата оказывается достаточно сложной в математическом плане и представляет собой классический пример некорректной задачи [2].

Газо-воздушный тракт котлоагрегата СКД приведен на рис. 1. Тепло выделяющееся при сжигании топлива передается текущей в трубах пароводяной смеси. Трубы выполнены из стали марки 12Х1МФ. Технические характеристики труб различных зон нагрева пароводяной смеси используются при расчете модели и приведены в табл. 1.

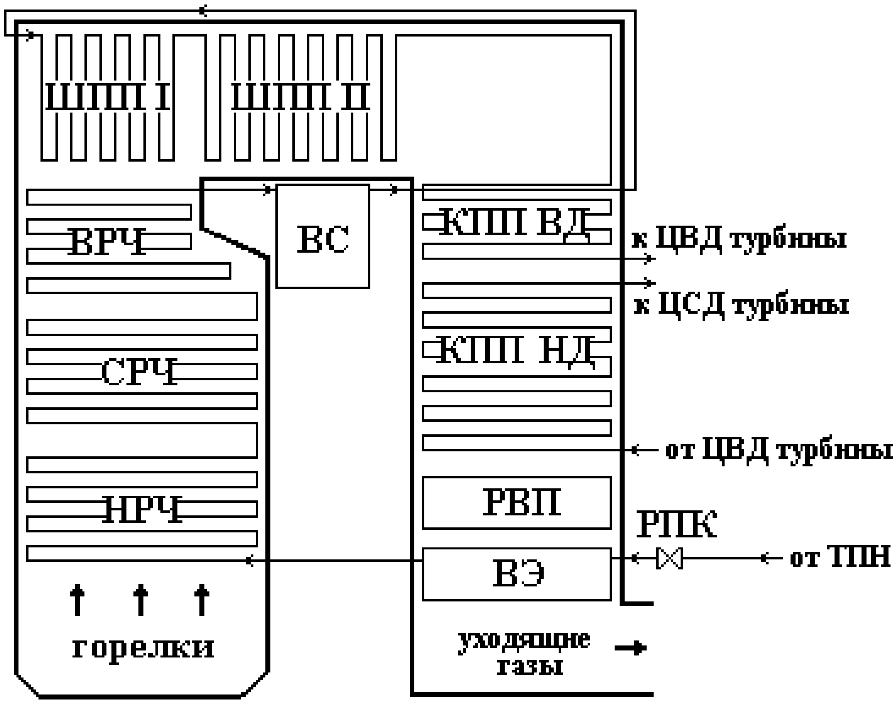

Рисунок 1 — Газо-воздушный тракт котлоагрегата СКД энергоблока 300МВт

Таблица 1 — Технические параметры труб испарительного тракта

Наименование конструкции котла	Диаметр * толщина труб (мм)	Средняя длина труб (м)	Кол-во труб на нитку (шт.)
НРЧ и подовый экран	36*6	88,3	105
СРЧ I	32*6	28,9	207
СРЧ II	32*6	30,5	207
ВРЧ	32*6	33,2	207
ПК	38*6	39,4	180

Для численного решения системы уравнений модели тепломассопереноса в топке котлоагрегата разработанной в (1) использован метод кончено-разностной аппроксимации. В соответствии с методом область непрерывного изменения аргумента заменяется конечным множеством точек, называемым сеткой. Частные производные по пространственным координатам и времени заменяются в узлах сетки их разностными аппроксимациями вида $\partial T(i)/\partial\tau = (T(i+1)-T(i))/\Delta\tau$. Применяя явную схему решения, выразим значения неизвестных распределений температур из их значений в предыдущий момент времени. Тогда из уравнения, описывающего передачу тепла внутри стенки котла, получим:

$$T_k(i+1,x,y) = \frac{\Delta\tau\,\lambda_k}{C_k\rho_k\Delta x^2}\left(T_k(i,x+1,y) - 2T_k(i,x,y) + T_k(i,x-1,y)\right) + T_k(i,x,y) \qquad (1)$$

где x=1..s–1 — пространственная координата по ширине стенки, Δx — шаг аппроксимации по координате x, $\Delta\tau$ — шаг аппроксимации по времени, y — пространственная координата по высоте топки.

Из граничных условий, описывающих теплообмен с факелом и окружающей средой соответственно, получим:

$$T_k(i+1,s,y) = \left(\frac{2\Delta x}{\lambda_k}\left(\alpha_{fk}\left(T_f(i,y) - T_k(i,s,y)\right)\right) + 4T_k(i+1,s-1,y) - T_k(i+1,s-2,y)\right)/3 \qquad (2)$$

$$T_k(i+1,0,y) = 2\Delta x\,\alpha_{ok}\left(T_{okr} - T_k(i,0,y)\right) + 4T_k(i+1,1,y) - 3T_k(i+1,2,y)\,. \qquad (3)$$

Уравнение, описывающее температуру трубы, преобразовывается следующим образом:

$$T_t(i+1,y) = \frac{\Delta\tau}{S_tC_t\rho_t}\left(\alpha_{ft}\left(T_f(i,y) - T_t(i,y)\right) - \alpha_{ts}\left[T_t(i,y) - T_s(i,y)\right]\right) + T_t(i,y) \qquad (4)$$

Для уравнения описывающего температуру факела

$$\begin{aligned} T_f(i+1,y) = {} & \frac{\Delta\tau}{m_fC_f}\left(-\alpha_{ft}\left(T_f(i,y) - T_t(i,y)\right) - \alpha_{fk}\left(T_f(i,y) - T_k(i,s,y)\right)\right) \\ & - v_f\,\frac{T_f(i,y+1) - T_f(i,y)}{\Delta y} + T_f(i,y). \end{aligned} \qquad (5)$$

Для пароводяной смеси схема расчета имеет вид:

$$T_s(i+1,\xi) = \Delta\tau\left(\frac{\alpha_{ts}}{c\rho}\left[T_t(i,\xi) - T_s(i,\xi)\right] - v\,\frac{T_s(i,\xi+1) - T_s(i,\xi)}{\Delta\xi}\right) + T_s(i,\xi), \qquad (6)$$

где ξ — координата по длине трубопровода, $\Delta\xi$ — шаг по этой координате.

Целью статьи является разработка методов и алгоритмов идентификации параметров математической модели (1)–(6), которая описывает тепломассоперенос между факелом, конструкциями котлоагрегата, пакетами труб с пароводяной смесью. Данная модель является сильно упрощенной по сравнению с реальным физическим процессом. Однако, по сравнению с более простыми типами моделей, принятыми для использования в автоматике, эта модель имеет ряд преимуществ т.к. учитывает пространственную протяженность топки и пароводяного тракта, начальное тепловое состояние оборудования и инерционность его прогрева, нелинейности физических свойств воды при сверхкритических параметрах и т.п.

Идентификация параметров тепломассопереноса в топке котлоагрегата.

Всю совокупность параметров модели можно разделить на 2 группы, первую из которых образуют теплофизические параметры металла труб и других материалов конструкций топочного пространства. Параметры по гидродинамической части модели весьма детально представлены в справочниках «Международной Ассоциацией по Свойствам Воды и Водяного Пара», которые содержат библиотеки функций для расчета теплофизических характеристик воды и пара.

Вторую группу образуют параметры теплообмена на границах различных сред, теоретический расчет которых весьма затруднителен. Эти параметры в привязке к конкретному объекту должны быть определены в результате решения задачи идентификации по данным измерений в режимах промышленной эксплуатации. Такими параметрами в модели являются четыре суммарных коэффициента теплопередачи:

α_{ft} — между факелом и трубами;

α_{fk} — между факелом и стенами котла;

α_{ts} — между трубами и пароводяной смесью;

α_{ok} — между стеной котла и окружающей средой.

Коэффициент α_{ok} имеет наименьшее влияние на температуру пара до встроенной задвижки. Измерения температуры поверхности наружной стенки котла не производятся. Значит α_{ok} можно взять из теплотехнических соображений в пределах 30–50Вт/м^2. Будем решать задачу параметрической идентификации коэффициентов α_{ft}, α_{fk}, α_{ts}.

Обозначим измерения температуры стенки трубы $T_t(\tau_i, y_k)$, где τ_i — момент времени измерения, y_k — координаты по высоте, на которых расположены датчики (k=1..9). Температуру стенки трубы, рассчитанную при помощи модели, в тех же точках по высоте, обозначим $T_t^*(\tau_i, y_k)$. Аналогично для температуры пароводяной смеси получим измеренную температуру $T_s(\tau_i, y_j)$ и температуру, рассчитанную при помощи модели $T_s^*(\tau_i, y_j)$ (j=1..3).

Тогда решение задачи идентификации сводится к минимизации суммы квадратов разности между измеряемыми и расчетными температурами

$$\min E(\alpha_{ft}, \alpha_{ts}, \alpha_{ts}) = \sum_{i=1}^{L} E_i = \sum_{i=1}^{L} \left(\sum_{k=1}^{M} \left[T_T(i, y_k) - T_T^*(i, y_k) \right]^2 + \sum_{j=1}^{N} \left[T_S(i, y_j) - T_S^*(i, y_j) \right]^2 \right) \quad (7)$$

где E_i — суммарная ошибка в i-момент времени;

L — количество моментов времени, используемых для настройки;

M — количество датчиков температуры трубы;

N — количество датчиков температуры пароводяной смеси;

Для минимизации (7) можно применить метод наискорейшего спуска [1] в соответствии с которым приближение параметра a_j^{k+1} строится по формуле

$$a_j^{(k+1)} = a_j^{(k)} - \beta^{(k)} \frac{\partial E}{\partial a_j}, \quad \text{j=(1..m)}, \quad (8)$$

где k — номер итерации, m — число неизвестных параметров, a_j^k — j-ый параметр теплопередачи, β_k — параметр спуска, определяющийся из условия минимизации функционала (3) на k-ой итерации методом одномерного поиска

$$\beta^{(k)} = \arg\min_{\forall \beta_k \in [0,+\infty]} \left(E\left(a_j^{(k)} - \beta^{(k)} \frac{\partial E}{\partial a_j} \right) \right). \quad (9)$$

Использование алгоритмов, реализующих метод наискорейшего спуска (8)–(9), приводит к вычислительно-емкому процессу из-за необходимости вычислять градиент численно.

Ускорения сходимости можно добиться, если использовать не классическую процедуру градиентного спуска, а ее эвристическую модификацию. Алгоритм адаптивного шага основывается на поведении знаков градиентов. Такой метод, примененный для настройки нейронных сетей, описан в [5]. Он не требует сложных вычислений и не зависит от величин производных. Приращение на каждом шаге вычисляется индивидуально для каждого веса. Приращение вычисляется по формуле

$$\Delta_l^{(k)} = \begin{cases} \eta^{+}\Delta_l^{(k-1)}, & если\ \dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k-1)} \dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k)} > 0 \\ \eta^{-}\Delta_l^{(k-1)}, & если\ \dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k-1)} \dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k)} < 0 \\ \Delta_l^{(k-1)}, & если\ \dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k-1)} \dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k)} = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

где $0 < \eta^{-} (= 0.5) < 1 < \eta^{+} (= 1.2)$.

Величина приращения усиливается коэффициентом η^{+} в том случае, когда алгоритм сходится к минимуму и производная не меняет знак. Это ускоряет процесс на плоских участках и замедляет поиск, в случае пропуска локального минимума.

Значения весов модифицируются в соответствии с направлением убывания градиента

$$\Delta a_l^{(k)} = \begin{cases} \Delta_l^{(k)} sign\left[\dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k)} \right], & если\ \dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k-1)} \dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k)} \geq 0 \\ -\Delta_l^{(k)}, & если\ \dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k-1)} \dfrac{\partial E(a)}{\partial a_l}^{(k)} < 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$a_j^{(k)} = a_j^{(k-1)} + \Delta a_l^{(k)}, \qquad j=(1..m), \quad (12)$$

где SIGN[] — функция, определяющая знак.

Следует отметить что постановка (7) является упрощенной т.к. предполагает значения коэффициентов теплопередачи константами. Очевидно, что изменение конструкции труб и характеристик факела по высоте значительно влияют на идентифицируемые коэффициенты теплопередачи.

Представим α_{ft}, α_{fk} и α_{ts} как некоторые функции от координаты по высоте. Из предположений о характере изменения коэффициентов теплообмена по высоте топки более адекватной является аппроксимация зависимости в виде параболической функции:

$$\begin{aligned}\alpha_{ft} &= a_2 * y_i^2 + a_1 * y_i + a_0 \\ \alpha_{ts} &= a_5 * y_i^2 + a_4 * y_i + a_3 \ . \\ \alpha_{fk} &= a_8 * y_i^2 + a_7 * y_i + a_6\end{aligned} \tag{13}$$

Тогда целевой функционал (7) необходимо минимизировать по новым параметрам

$$\min E(a_0,..., a_8). \tag{14}$$

Метод стохастической аппроксимации для оперативной настройки параметров.

Рассмотренный алгоритм идентификация параметров подходит для расчета в пакетном режиме off-line по результатам измерений нескольких пусков энергоблока. В процессе работы энергоблока возникает необходимость произвести корректировку значений коэффициентов теплопередачи. Алгоритмы коррекции параметров должны быть разработаны как часть системы управления реального времени. Работа в системе реального времени накладывает серьезные ограничения на сложность и вычислительную емкость алгоритмов коррекции. Подходящими для решения этой задачи являются алгоритмы стохастической аппроксимации [6]. Первым рекуррентным алгоритмом стохастической аппроксимации является процедура Роббинса-Монро, определяющая корень вещественной функции, которая известна с некоторой ошибкой. Предполагается, что производная функции ограничена и имеет постоянный известный знак.

Под оперативной подстройкой параметров будем понимать уточнение свободных членов a_0, a_3, a_6 функций (13), полученных в результате решения задачи начальной настройки параметров. В соответствии с методом стохастической аппроксимации и с учетом особенностей функции (7), которую нужно минимизировать , алгоритм настройки имеет вид:

$$\begin{aligned}\Delta a^i_j &= k_i \frac{\partial E_i}{\partial a_j} \\ a^i_j &= a^{i-1}_j + \Delta a^i_j \\ j &= 0,3,6,\end{aligned} \tag{15}$$

где i—момент времени, в который производится подстройка, k_i— некоторая последовательность чисел.

Последовательность k_i в соответствии с методом стохастической аппроксимации должна удовлетворять следующим условиям [5]:

$$\lim_{i\to\infty} k_i = 0, \qquad \sum_{i=1}^{\infty} k_i = \infty, \qquad \sum_{i=1}^{\infty} (k_i)^2 < \infty \tag{16}$$

Улучшения сходимости алгоритма также можно добиться, если использовать алгоритм в следующем виде [6]:

$$\Delta a^i_j = k_i sign\left[\nabla E_i\right]. \tag{17}$$

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 удается за счет изменения последовательности по следующим алгоритмам:

$$k_i = \begin{cases} \dfrac{A}{i-1}, & если \quad sign[E_{i-1}] = sign[E_i] \\ \dfrac{A}{i}, & если \quad sign[E_{i-1}] \neq sign[E_i] \end{cases} \tag{18}$$

В соответствии с (18) обеспечивается постоянство элементов k_i, если сохраняется знак ошибки, 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 ошибки и более быстрое уменьшение элементов последовательности k_i, обеспечивающее снижение влияния помехи на процесс подстройки.

Выводы.

1. В модели тепломассопереноса и гидродинамики в рабочем пространстве котлоагрегата СКД выбраны параметры, которые необходимо идентифицировать как функции по пространственной координате.
2. Алгоритм идентификации заключается в минимизации функционала (7) или ему аналогичного, с последующей оценкой адекватности полученной модели.
3. Выбор вида функции для аппроксимации идентифицируемых параметров является задачей дальнейшего исследования, решение которой позволит использовать модель в системе прогностического управления.
4. Из-за отсутствия измерений температуры стенки котла и факела применить метод наименьших квадратов не удается. Идентификацию параметров необходимо производить при помощи градиентных процедур.
5. Использование алгоритмов стохастической аппроксимации позволяет подстраивать параметры модели в процессе ее использования в системе управления.

Литература

1. Ткаченко А.В. Прогностическое управление пуском котла сверхкритического давления энергоблока ТЭС. // Труды VII международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» — Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2008 — С. 1814–1825.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач — М.: Наука, 1974. — 224 с., ил.
3. Растригин Л.А., Маджаров Н.Е. Введение в идентификацию объектов управления. — М.: Энергия, 1977. — 215 с.
4. Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Идентификация систем управления. — М.: Наука, 1974. — 246 с.
5. Riedmiller M. “A direct method for faster backpropagation learning”, Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN ’93), Vol. 1, San Francisco, 1993. — PP. 586–591.
6. Граничин О.Н. Введение в методы стохастической оптимизации и оценивания: Учеб. пособие. — СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2003. — 131 с.

Здано в редакцію:
23.02.2009р.

Рекомендовано до друку:
д.т.н, проф. Скобцов Ю.О.