

В.Н. Ткаченко, Н.Н. Чернышев

**АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕЧИ-КОТЛА ДЛЯ
СЖИГАНИЯ СЕРОВОДОРОДНОГО ГАЗА**

Рассматривается динамическая модель тепломассопереноса в топке печи, камере дожигания и смешения. Для идентификации выбраны параметры модели, теоретический расчет которых затруднен. Алгоритм идентификации основан на методе наименьших квадратов. В качестве оперативного алгоритма подстройки параметров предложен метод стохастической аппроксимации. Рис. 2, Ист. 6.

Введение. В теории автоматического управления принципы построения систем управления разрабатываются на основе заданной математической модели объекта. Во многих случаях модель, принятая при проектировании, существенно отличается от реального объекта, что значительно уменьшает или сводит на нет эффективность разработанной системы управления. Поэтому возникает необходимость идентификации разработанной математической модели объекта управления на основании наблюдений, полученных в условиях функционирования объекта по его входным и выходным переменным. Задача идентификации модели формулируется следующим образом: по результатам наблюдений входных и выходных переменных системы должна быть построена оптимальная в некотором смысле модель [1,2,3].

В зависимости от априорной информации об объекте управления различают задачи идентификации в узком и широком смысле. Задача идентификации в узком смысле состоит в оценивании параметров и состояния системы по результатам значений управляющих и выходных переменных, полученных в условиях функционирования объекта. При этом известна структура системы и задан класс моделей, к которому данный объект относится, при этом априорная информация об объекте достаточно представительна. При идентификации в широком смысле априорная информация об объекте отсутствует или очень ограничена. Возникает необходимость выбора структуры системы и задания класса моделей, выбор информативных переменных, оценивание влияния входных переменных на выходные и др.

Метод мокрого катализа, который является одним из основных методов получения серной кислоты из сероводорода на коксохимических предприятиях и состоит из трех этапов: сжигания сероводорода, окисления образующегося диоксида серы на катализаторе и конденсации серной кислоты (см. рис.1). На большинстве установках мокрого катализа, работающих на территории Украины, процесс сжигания сероводородного газа ведут в соответствии с режимом, предложенным А.П. Сергеевым [4]. Суть этого режима заключается в том, что процесс сжигания сероводородного газа ведут при небольшом недостатке воздуха, несгоревшая часть сероводорода и образовавшаяся сера поступают с продуктами горения из печи в камеру дожигания, где окисляются небольшим количеством воздуха. Такой режим позволяет минимизировать в продуктах сжигания количество оксидов азота ухудшающих потребительские свойства серной кислоты. Полученный диоксид серы в камере смешения смешивается с атмосферным воздухом и поступает затем в контактный аппарат.



Рис. 1. Функциональная схема технологической цепочки получения оксида серы (IV) из сероводородного газа

На основании уравнений теплового и материального баланса для каждой технологической операции получены динамические уравнения, описывающие изменение температуры в печи, камере дожигания и камере смешения [5]:

$$V_m c_{n.2.1} \frac{dT_{n.2.1}}{dt} = G_{мон} (c_{мон} T_{мон} + q_{см1}) + G_{возд1} c_{возд} T_{возд} - G_{вод} c_{вод} (T_n - T_{вх}) - G_{нар} c_{нар} (T_{вых} - T_n) - G_{вод} q - G_{n.2.1} c_{n.2.1} T_{n.2.1} - k_m F_1 (T_{n.2.1} - T_{окр}), \quad (1)$$

где V_m – объем топочного пространства печи, m^3 ; $c_{мон}, c_{возд}, c_{вод}, c_{нар}, c_{n.2.1}$ – теплоемкости, соответственно, сероводородного газа, воздуха, пара, воды и продуктов горения в печи, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$; $q_{см1} = \alpha_1 \beta_1 q_{so2} + \alpha_2 \beta_1 q_s + \beta_2 q_{цв}$ – удельная теплотворная способность сероводородного газа и цианистого водорода, kJ/m^3 ; q – удельная теплота парообразования, kJ/kg ; $T_{n.2.1}, T_{мон}, T_{возд}, T_{окр}, T_{вых}, T_{вх}, T_n$ – температура продуктов горения, сероводородного газа, воздуха, воды на входе и выходе печи и температура парообразования, $^\circ C$; F_1 – площадь поверхности теплообмена печь-котла, m^2 ; k_m – коэффициент теплопередачи кладки печи, $kJ/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

$$V_{кд} c_{n.2.2} \frac{dT_{n.2.2}}{dt} = G_{n.2.1} c_{n.2.1} T_{n.2.1} + G_{возд2} c_{возд} T_{возд} + G_{мон} q_{см2} - G_{n.2.2} c_{n.2.2} T_{n.2.2} - k_{кд} F_2 (T_{n.2.2} - T_{окр}), \quad (2)$$

где $V_{кд}$ – объем топочного пространства камеры дожигания, m^3 ; $q_{см2} = \beta_1 (\alpha_2 q_s + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) q_{so2})$ – удельная теплотворная способность сероводородного газа в камере дожигания, kJ/m^3 ; $T_{n.2.2}$ – температура продуктов горения; F_2 – площадь поверхности теплообмена камеры дожига, m^2 ; $k_{кд}$ – коэффициент теплопередачи кладки камеры дожига, $kJ/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

$$V_{кс} c_{c.2.} \frac{dT_{c.2.}}{dt} = G_{n.2.2} c_{n.2.2} T_{n.2.2} + G_{возд3} c_{возд} T_{возд} - G_{c.2.} c_{c.2.} T_{c.2.} - k_{кс} F_3 (T_{c.2.} - T_{окр}), \quad (3)$$

где $V_{кс}$ – объем топочного пространства камеры смешения, m^3 ; $c_{c.2.}$ – теплоемкость газа в камере смешения, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$; $T_{c.2.}$ – температура газа в

камере смешения; F_3 – площадь поверхности теплообмена камеры смешения, м^2 ; $k_{\text{кк}}$ – коэффициент теплопередачи кладки камеры смешения, $\text{кДж}/(\text{м}^2\text{ч}^\circ\text{С})$.

Цель работы. Целью статьи является разработка методов и алгоритмов идентификации параметров математической модели (1)–(3), которая описывает динамические свойства рассматриваемого объекта управления.

Решение задачи идентификации. Совокупность параметров полученной модели можно разделить на две группы. В первую группу входят теплофизические параметры перерабатываемого сероводородного топлива, воздуха, охлаждающей воды, пара и продуктов горения в топочном пространстве которые можно определить, пользуясь справочной литературой. Вторую группу образуют параметры теплообмена на границах различных сред, теоретический расчет которых является приближенным или затруднительным. В случае конкретного объекта управления эти параметры должны быть определены в результате решения задачи идентификации по измеряемым значениям управляемого и управляющего сигналов объекта в режимах промышленной эксплуатации. Такими параметрами в модели являются коэффициенты теплопередачи между внутренней кладкой и окружающей средой печи-котла, камеры дожигания и смешения: k_m – коэффициент теплопередачи кладки печи; $k_{\text{кд}}$ – коэффициент теплопередачи кладки камеры джигга; $k_{\text{кк}}$ – коэффициент теплопередачи кладки камеры смешения.

Решим задачу параметрической идентификации коэффициентов теплопередачи. Параметрическая идентификация позволяет сразу находить значения коэффициентов модели объекта по измеряемым значениям управляемого и управляющего сигналов объекта. Одним из важных преимуществ методов параметрической идентификации является возможность использования рекуррентных алгоритмов, позволяющих проводить текущую идентификацию в реальном времени при номинальных режимах работы объекта [1,2,3]. Эти преимущества определили широкое использование методов параметрической идентификации в задачах управления и автоматизации. К таким методам относятся: метод наименьших квадратов (МНК), метод максимального правдоподобия и метод стохастической аппроксимации.

Воспользуемся МНК для идентификации неизвестных параметров математической модели печи-котла, для этого представим уравнения (1)–(3) в следующем виде

$$\frac{dT_{n,z,1}}{dt} = G_{\text{мон}}a_1 + G_{\text{возд1}}a_2 - G_{\text{вод}}a_3 - G_{n,z,1}T_{n,z,1}a_4 - k_m(T_{n,z,1} - T_{\text{окр}})a_5, \quad (4)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{(c_{\text{мон}}T_{\text{мон}} + q_{\text{см1}})}{V_m c_{n,z,1}}, \quad a_2 = \frac{c_{\text{возд}}T_{\text{возд}}}{V_m c_{n,z,1}}, \quad a_3 = \frac{c_{\text{вод}}(T_n - T_{\text{вх}}) + c_{\text{нар}}(T_{\text{вых}} - T_n) + q}{V_m c_{n,z,1}},$$

$$a_4 = \frac{1}{V_m}, \quad a_5 = \frac{F_1}{V_m c_{n,z,1}} \quad \text{и} \quad G_{n,z,1} = (G_{\text{мон}} + G_{\text{возд1}}).$$

$$\frac{dT_{n,z,2}}{dt} = G_{n,z,1}T_{n,z,1}b_1 + G_{\text{возд2}}b_2 + G_{\text{мон}}b_3 - G_{n,z,2}T_{n,z,2}b_4 - k_{\text{кд}}(T_{n,z,2} - T_{\text{окр}})b_5, \quad (5)$$

$$\text{где } b_1 = \frac{c_{n,z,1}}{V_{\text{кд}}c_{n,z,2}}, \quad b_2 = \frac{c_{\text{возд}}T_{\text{возд}}}{V_{\text{кд}}c_{n,z,2}}, \quad b_3 = \frac{q_{\text{см2}}}{V_{\text{кд}}c_{n,z,2}}, \quad b_4 = \frac{1}{V_{\text{кд}}}, \quad b_5 = \frac{F_2}{V_{\text{кд}}c_{n,z,2}} \quad \text{и}$$

$$G_{n,z,2} = (G_{\text{мон}} + G_{\text{возд1}} + G_{\text{возд2}}).$$

$$\frac{dT_{c.z.}}{dt} = G_{n.z.2}T_{n.z.2}c_1 + G_{\text{возд}3}c_2 - G_{c.z.}T_{c.z.}c_3 - k_{\text{кс}}(T_{c.z.} - T_{\text{окр}})c_4, \quad (6)$$

где $c_1 = \frac{c_{n.z.2}}{V_{\text{кс}}c_{c.z.}}$, $c_2 = \frac{c_{\text{возд}T_{\text{возд}}}}{V_{\text{кс}}c_{c.z.}}$, $c_3 = \frac{1}{V_{\text{кс}}}$, $c_4 = \frac{F_3}{V_{\text{кс}}c_{c.z.}}$ и $G_{c.z.} = (G_{n.z.2} + G_{\text{возд}3})$.

В уравнениях (4)-(6) заменим производную конечной разностью:

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{T_j(i+1) - T_j(i)}{\Delta t}, \quad (7)$$

Подставим выражения (7) в уравнение (4)-(6) и приведя подобные, получим:

$$T_{n.z.1}(i+1) = T_{n.z.1}(i)(1 - G_{n.z.1}(i)\tilde{a}_4) - k_m(T_{n.z.1}(i) - T_{\text{окр}})\tilde{a}_5 + G_{\text{мон}}(i)\tilde{a}_1 + G_{\text{возд}1}(i)\tilde{a}_2 - G_{\text{вод}}(i)\tilde{a}_3, \quad (8)$$

$$T_{n.z.2}(i+1) = T_{n.z.2}(i)(1 - G_{n.z.2}(i)\tilde{b}_4) - k_{\text{кд}}(T_{n.z.2}(i) - T_{\text{окр}})\tilde{b}_5 + G_{n.z.1}(i)T_{n.z.1}(i)\tilde{b}_1 + G_{\text{возд}2}(i)\tilde{b}_2 + G_{\text{мон}}(i)\tilde{b}_3, \quad (9)$$

$$T_{c.z.}(i+1) = T_{c.z.}(i)(1 - G_{c.z.}(i)\tilde{c}_3) - k_{\text{кс}}(T_{c.z.}(i) - T_{\text{окр}})\tilde{c}_4 + G_{n.z.2}(i)T_{n.z.2}(i)\tilde{c}_1 + G_{\text{возд}3}(i)\tilde{c}_2. \quad (10)$$

Структурная схема идентификации с использованием модели объекта представлена на рис. 2.

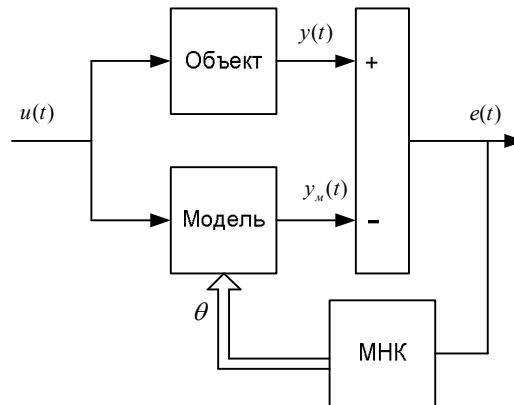


Рис. 2. Структурная схема идентификации

При рассмотрении случая выборочных измерений с постоянным шагом функций непрерывного времени символы u , y , y_m и e обозначают вектора соответствующих измерений переменных состояния. Критерий оценки точности математической модели определяется как квадрат ошибки между измеряемыми и расчетными температурами, что в векторном представлении дает

$$J = \sum_{i=1}^N e^2(i), \quad \text{где } e(i) = T^{\text{объект}}(i) - T^{\text{модель}}(i). \quad (11)$$

Минимум (11) находится из условия $\left. \frac{\partial J}{\partial \theta} \right|_{\theta=\hat{\theta}} = 0$, где θ идентифицируемый

параметр математической модели процесса.

Для (8)-(9) раскроем выражение (11) в виде

$$J_1 = \sum_{i=1}^N (T_{n.z.1}(i+1) - \hat{T}_{n.z.1}(i+1))^2, \quad J_2 = \sum_{i=1}^N (T_{n.z.2}(i+1) - \hat{T}_{n.z.2}(i+1))^2, \\ J_3 = \sum_{i=1}^N (T_{c.z.}(i+1) - \hat{T}_{c.z.}(i+1))^2. \quad (12)$$

Запишем систему уравнений для нахождения k_m , k_{kc} и $k_{кд}$ для этого найдем частные производные:

$$k_m = \frac{\sum_{i=0}^N ((T_{n.z.1}(i) - T_{окр})\tilde{a}_5 (-T_{n.z.1}(i+1) + T_{n.z.1}(i)(1 - G_{n.z.1}(i)\tilde{a}_4) + G_{мон}(i)\tilde{a}_1 + G_{возд}(i)\tilde{a}_2 - G_{вод}(i)\tilde{a}_3))}{\sum_{i=0}^N ((T_{n.z.1}(i) - T_{окр})\tilde{a}_5)^2}, \quad (13)$$

$$k_{кд} = \frac{\sum_{i=0}^N ((T_{n.z.2}(i) - T_{окр})\tilde{b}_5 (-T_{n.z.2}(i+1) + T_{n.z.2}(i)(1 - G_{n.z.2}(i)\tilde{b}_4) + G_{n.z.1}(i)T_{n.z.1}(i)\tilde{b}_1 + G_{возд}(i)\tilde{b}_2 + G_{мон}(i)\tilde{b}_3))}{\sum_{i=0}^N ((T_{n.z.2}(i) - T_{окр})\tilde{b}_5)^2}, \quad (14)$$

$$k_{kc} = \frac{\sum_{i=0}^N ((T_{c.z.}(i) - T_{окр})\tilde{c}_4 (-T_{c.z.}(i+1) + T_{c.z.}(i)(1 - G_{c.z.}(i)\tilde{c}_3) + G_{n.z.2}(i)T_{n.z.2}(i)\tilde{c}_1 + G_{возд}(i)\tilde{c}_2))}{\sum_{i=0}^N ((T_{c.z.}(i) - T_{окр})\tilde{c}_4)^2}. \quad (15)$$

Полученные результаты при использовании МНК теоретически обладают важными с точки зрения практического применения свойствами, а именно: несмещенности получаемых оценок параметров, минимальной дисперсией ошибки, сходимости к истинному значению параметров при стремлении ошибки к нулю. Однако для получения достаточно представительных результатов необходимо выполнить ряд условий: подавать на вход объекта управления большого множества различных гармонических составляющих, что позволяет оценить достаточно большую полосу частот АФХ объекта; объем исследуемой выборки (N) должен быть достаточным для получения представительных оценок.

Оперативная настройка параметров методом стохастической аппроксимации. Рассмотренный алгоритм идентификации предполагает что, вычисление оценок параметров модели θ производится лишь после того как сформирован весь массив измерений входа-выхода объекта. Поэтому представленный алгоритм подходит для решения задачи начальной настройки параметров модели в результате экспериментального расчета на ЭВМ. После начальной настройки необходимо обеспечить адаптацию идентифицируемых параметров модели в реальном масштабе времени. В свою очередь работа в реальном режиме времени, накладывает значительные ограничения на объем и сложность вычислительных процессов связанных с алгоритмами коррекции. Наиболее подходящими для решения поставленной задачи адаптации параметров при наличии ограничений являются метод стохастической аппроксимации (МСА). Несмотря на медленную сходимость оценок, алгоритмы МСА из-за своей простоты находят применение в практических задачах идентификации линейных и нелинейных моделей объектов с независимым аддитивным шумом.

Алгоритмы идентификации параметров математической модели печи-котла для сжигания сероводородного газа 5

Рекуррентные стохастические алгоритмы оценивания и оптимизации разделяются на две группы. Одна группа алгоритмов базируется на прямых измерениях или вычислениях значений градиента функции потерь при различных параметрах, другая - на аппроксимациях градиента, вычисляемых на основании измерений значений функции потерь с помехами. Прототипами первой группы алгоритмов являются процедура Роббинса-Монро, которую можно рассматривать как метод вычисления градиента функции потерь для систем реального времени, основанный на анализе возмущений. Среди алгоритмов второго типа классическими являются: метод стохастической аппроксимации Кифера-Вольфовица и метод случайного поиска [1,6].

Предположим, что через некоторые промежутки времени Δt измеряется температура отходящих газов из печи, камеры дожигания и смешения. В управляющем устройстве (УУ) параллельно процессу управления горением моделируется процесс с помощью математической модели, на входы которой подаются входы реального процесса. Необходимо по отклонениям измеряемых температур газа от рассчитываемой на УУ корректировать параметры модели, сводящие отклонение (11) к нулю.

Оперативная подстройка параметров заключается в уточнении коэффициентов теплопередачи $k_j = [k_m \ k_{\kappa\delta} \ k_{\kappa\epsilon}]$, полученных в результате решения задачи начальной настройки параметров. В соответствии с МСА алгоритм настройки имеет вид:

$$k_j(i) = k_j(i-1) + \Delta k_j(i), \text{ где } \Delta k_j(i) = l(i) \frac{\partial e_j(i)}{\partial k_j}. \quad (16)$$

где $l(i)$ – некоторая последовательность чисел, i - момент времени, в который производится подстройка.

Последовательность $l(i)$ в соответствии с МСА должна удовлетворять следующим условиям [1,3,6]:

$$l(i) \geq 0, \quad \sum_{i=0}^{\infty} l(i) = \infty, \quad \sum_{i=0}^{\infty} l^2(i) < \infty.$$

Сходимость алгоритма зависит от выбора последовательности $l(i)$, поэтому улучшить сходимость можно приняв более упрощенный вариант расчета $\Delta k_j(i)$ равным

$$\Delta k_j(i) = l(i) \text{sign}(\nabla_k e_j(i)). \quad (17)$$

В рамках теории стохастической аппроксимации нет рекомендаций по выбору скорости сходимости последовательности $l(i)$. Для совершенствования алгоритмов настройки параметров модели в реальном масштабе времени и 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. Одним из способов достижения такой сходимости удается за счет изменения последовательности $l(i)$ по следующему алгоритму:

$$l(i) = \begin{cases} \frac{c}{i-1}, & \text{если } \text{sign}(e(i-1)) = \text{sign}(e(i)) \\ \frac{c}{i}, & \text{если } \text{sign}(e(i-1)) \neq \text{sign}(e(i)) \end{cases}, \quad (18)$$

где c - подстраиваемый параметр, $c > 0$.

В соответствии с (18) обеспечивается постоянство элементов $l(i)$, если сохраняется знак ошибки, и быстрое изменение $l(i)$ 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 $l(i)$. Помеха влияет при этом лишь на скорость движения. Затем вблизи истинного значения параметра начинает сказываться влияние помехи и на направление движения подстраиваемого параметра. Если алгоритм начинает работать неверно, происходит частая смена знака ошибки и более быстрое уменьшение элементов последовательности $l(i)$, обеспечивающее снижение влияния помехи на процесс подстройки параметров.

Выводы.

1. В предложенной математической модели теплопереноса в рабочем пространстве печи, камере дожигания и смешения технологии производства серной кислоты методом мокрого катализа выбраны параметры, которые необходимо идентифицировать.
2. В качестве алгоритма параметрической идентификации выбран метод наименьших квадратов с критерием оценки точности математической модели (11).
3. Получены формульные зависимости определения коэффициентов теплопередачи с помощью МНК вида (13) – (15).
4. Для оперативной подстройки параметров модели в процессе ее использования в системе управления, использован метод стохастической аппроксимации обладающий упрощенным алгоритмом, по сравнению с другими методами и требующий меньшего объема вычислений.

Список литературы

1. П. Эйхоффа Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. Пер. с англ. под ред. Н.С. Райбмана. – М.: Мир, 1975. – 681 с.
2. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления: Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 211 с.
3. Yucai Zhu Multivariable system identification for process control Elsevier Science & Technology Books, 2001. – 352 p.
4. Гребенюк А.Ф., Пьянков М.В., Милютин А.В., Черныш А.Ф. Особенности и принципы регулирования режима сжигания сероводородного газа в установках мокрого катализа // Углекислотный журнал. – 2007. - №3-4. – С. 41-44.
5. Ткаченко В.Н., Чернышев Н.Н. Разработка и исследование математической модели технологического процесса производства серной кислоты // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 16 (148). – Донецьк: ДонНТУ. – 2009, С. 22-29.
6. Граничин О.Н. Введение в методы стохастической оптимизации и оценивания: Учеб. пособие. – СПб: Издательство С.-Петербургского университета, 2003. – 131 с.