УДК 536.5.08

ПРОЦЕСС ИЗМЕРЕНИЙ КАК ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Г.Д. Симбирский, доц., к.т.н.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. *Предложена универсальная методика выполнения косвенных измерений, основанная на параметрической идентификации измерительных устройств. В качестве примера рассмотрена параметрическая идентификация измерителя высоких (до 2200 °С) температур газовых потоков.*

Ключевые слова: *косвенные измерения, параметрическая идентификация, фильтр Калмана.*

ПРОЦЕС ВИМІРЮВАНЬ ЯК ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Г.Д. Симбірський, доц., к.т.н.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. *Запропоновано універсальну методику виконання непрямих вимірювань, що базується на параметричній ідентифікації вимірювальних пристроїв. Як приклад розглянуто параметричну ідентифікацію вимірювача високих (до 2200 °С) температур газових потоків.*

Ключові слова: *непрямі вимірювання, параметрична ідентифікація, фільтр Калмана.*

THE PROCESS OF MEASURING AS THE PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE MEASURING DEVICE

G. Symbirskyi, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. *The universal method of performing indirect measurements based on parametric identification of measuring devices is offered. As an example there is considered the parametric identification (up to 2200 °S) of the gas streams high temperature meter.*

Key words: *indirect measurements, parametric identification, Kalman filter.*

Введение

В современной практике исследований различных физических процессов и явлений большинство методов измерений являются косвенными, т. е. искомые физические величины определяются (восстанавливаются) по непосредственно измеряемым в ходе эксперимента другим физическим величинам при помощи различных методик.

Например, измерение температуры газового потока в двигателе внутреннего сгорания термоэлектрическим преобразователем (термопарой) заключается в фиксации электрического напряжения на выходе данного измерительного устройства с последующим вычислением по определенным зависимостям температуры чувствительного элемента термопары и дальнейшим восстановлением искомой температуры газа с учетом различных поправок. Данные зависимости составляют уравнение измерения измерительного устройства.

Известно, что теплофизический эксперимент является одним из наиболее сложных разделов измерительной техники. Это обусловлено сложностью (часто невозможностью) учета всех факторов теплообмена измерительного устройства с исследуемой средой (особенно с газообразной). Надо учитывать, что погрешности измерения высоких (до 2000 °С) температур от всех факторов такого теплообмена могут достигать 200–300 °С.

Уравнения измерения в теплофизическом эксперименте практически всегда имеют нелинейный вид и часто являются неустойчивыми, т. е. дают отрицательный результат даже при сравнительно небольших погрешностях непосредственных измерений.

В современных тепловых двигателях к вышеперечисленным проблемам добавляются следующие: высочайший уровень рабочих температур, нестационарность исследуемых процессов, значительные температурные градиенты и высокие требования к изменению условий обтекания и прочностных свойств конструкции.

Задачи косвенных измерений, в том числе и задачи теплофизического эксперимента, часто рассматривают как обратные задачи (ОЗ). Интерес к ОЗ постоянно возрастает, что вызывается как потребностями практики, так и активным развитием методов и средств вычислительной техники. В частности, в теплоэнергетике, включая тепловые двигатели, широко применяются методы ОЗ, как при экспериментальных исследованиях температурного состояния рабочих тел и элементов конструкции, так и при оптимальном проектировании последних.

Анализ публикаций

Учитывая вышеизложенное, процесс косвенных измерений сводится к решению обратной задачи. В монографии [1] показано, что наиболее эффективным является экстремальный подход к решению ОЗ, состоящий в минимизации квадратичных функционалов. Подход может быть реализован как метод параметрической идентификации измерительного устройства (ИУ), заключающийся в получении на основе экспериментальных данных оптимальных оценок $\hat{\mathbf{\Theta}}$ некоторого вектора $\mathbf{\Theta}$ искомых параметров взаимодействия ИУ с окружающей средой, входящих в его математическую модель.

Некоторые случаи успешного применения этого метода для решений различных ОЗ приведены в работах [2–6], а информацию о характере и перспективах его использования в различных отраслях науки и техники можно найти в обзоре [7].

Однако указанная методология, на наш взгляд, недостаточно широко используется при разработке и реализации современных методов технических измерений.

Цель и постановка задачи

Задачами данного исследования являются:
1) последовательно и в доступной форме изложить методологию представления процесса косвенных измерений как параметрическую идентификацию измерительного устройства;
2) в качестве иллюстрации особенностей применения указанной методологии выполнить параметрическую идентификацию устройства для измерения высоких температур газовых потоков.

Большинство известных методов идентификации параметров разработано для линейных стационарных систем. Для нелинейных систем теория этих методов развита недостаточно для их выбора по готовым рекомендациям для той или иной системы. Ниже будет приведен пример идентификации параметров измерительного устройства с нелинейной математической моделью.

Теоретическое обоснование методологии

Будем предполагать, что имеется математическая модель измерительного устройства (далее – модель), позволяющая для моментов времени $\tau_k = k{\cdot}\Delta\tau$ (k = 1, 2, … n) рассчитывать значения измеряемых параметров

$$\mathbf{Y}_k = f(\mathbf{\Theta}_k), \qquad (1)$$

где $\mathbf{Y}_k$ – вектор измерений; $\mathbf{\Theta}_k$ – вектор искомых параметров; k – номер шага измерений.

Информацию об объекте на k-м шаге дает вектор измерений

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{\Psi}_k + \mathbf{\varepsilon}_k,$$

где $\mathbf{\Psi}_k$ – действительные значения измеряемых физических величин; $\mathbf{\varepsilon}_k$ – шум измерений.

Известно, что шум в измерениях является одним из факторов, способных вызывать неустойчивость решения ОЗ, т. е. сделать невозможным успешное проведение измерений. Для учета влияния шума на этапах постановки и решения ОЗ будем использовать общепринятое для большинства измерений допущение, что составляющие ε_{ik} вектора $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ являются нормально распределенными случайными величинами с нулевыми математическими ожиданиями, одинаковой дисперсией σ^2 и некоррелированными между собой. Такое допущение представляется вполне оправданным при однородных измерениях температур, выполняемых с помощью одних и тех же первичных и регистрирующих преобразователей. Это позволяет представить основную характеристику случайного вектора $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ – его ковариационную $(m \times m)$-матрицу $\mathbf{R}$ – в виде

$$\mathbf{R} = \sigma^2 \mathbf{I},$$

где $\mathbf{I}$ – единичная $(m \times m)$-матрица; $\mathbf{R}$ – ковариационная матрица шумов измерений.

В модели ИУ необходимо выделить $(r \times 1)$-вектор $\boldsymbol{\Theta} = [\Theta_j]_{j=1}^{r}$ искомых параметров. Процедуру выделения $\boldsymbol{\Theta}$ в модели, описывающей устройство измерения во взаимосвязи с окружающей средой, называют параметризацией ИУ.

По модели измерительного устройства рассчитывается прогноз вектора измерений $\mathbf{Y}_k$ в зависимости от вектора искомых параметров $\boldsymbol{\Theta}$ при $\boldsymbol{\varepsilon}=0$

$$\hat{\mathbf{Y}}_k(\boldsymbol{\Theta}) = \left[y_{ik}(\boldsymbol{\Theta}) \right]_{i=1}^{m}.$$

В таком случае параметрическая идентификация заключается в определении оптимальных оценок $\hat{\boldsymbol{\Theta}}$ вектора $\boldsymbol{\Theta}$ по n значениям вектора измерений $\mathbf{Y}_k$ в модели (1). Для этих целей наиболее распространенным методом является минимизация по $\boldsymbol{\Theta}$ следующей квадратичной функции невязки [1, 7]

$$\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\Theta}) = \sum_{k=1}^{n} \left[\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_k(\boldsymbol{\Theta}) \right]^{\mathrm{T}} \mathbf{R}^{-1} \left[\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_k(\boldsymbol{\Theta}) \right]. \quad (2)$$

Таким образом, параметрическая идентификация измерительного устройства может быть сведена к хорошо изученному в математической и технической литературе обобщенному методу наименьших квадратов (МНК) [7]. Его достоинством является то, что он не требует априорных знаний о статистических свойствах оценок $\hat{\boldsymbol{\Theta}}$, дает несмещенные оценки $\hat{\boldsymbol{\Theta}}$ и обеспечивает минимальную дисперсию оценок в случае, если модель линейна, а шум измерений распределен по нормальному закону.

Для минимизации $\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\Theta})$ предлагается использовать следующий модифицированный алгоритм фильтра Калмана по искомым параметрам $\boldsymbol{\Theta}$ [3]. В этом алгоритме оптимальные оценки вектора искомых параметров $\hat{\boldsymbol{\Theta}}_k$ на k-м шаге измерений определяются следующим образом

$$\hat{\boldsymbol{\Theta}}_k = \hat{\boldsymbol{\Theta}}_{k-1} + \mathbf{K}\left[\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_k(\hat{\boldsymbol{\Theta}}_{k-1}) \right], \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T \left[\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R} \right]; \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k-1} - \mathbf{K}\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k-1}; \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_k = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\Theta}} \hat{\mathbf{Y}}_k(\hat{\boldsymbol{\Theta}}_{k-1}). \quad (6)$$

В приведенном выше алгоритме $\mathbf{P}_k$ и $\mathbf{P}_{k-1}$ – ковариационные матрицы ошибок оценок, диагональные элементы которых являются дисперсиями ошибок оценок искомых параметров [3], а $\mathbf{H}_k$ – матрица функций чувствительности вектора прогноза измерений к искомым параметрам на k-м шаге.

Практическое применение методологии

Предлагаемый выше подход был реализован нами при измерениях высоких (до 2200 °С) температур газовых потоков адаптивным редукционным проточным термопреобразователем (АРПТ) [9, 10].

Термопреобразователь, изготовленный в виде проточного зонда, вводится в газовую среду, а температура исследуемого газового потока $T_{\text{г}}$ на входе в охлаждаемый канал устройства рассчитывается по непосредственно измеряемым температурам газа в канале T_1 и T_2 в двух точках по его оси.

Уравнение измерения метода АРП имеет вид

$$\vartheta_{\text{г}} = \vartheta_1 \left(\vartheta_1 / \vartheta_2 \right)^{A}, \quad (7)$$

где $\vartheta_г$ – температура исследуемого газового потока на входе в термопреобразователь; A – коэффициент преобразования метода; ϑ_1 и ϑ_2 – температуры газа в двух сечениях охлаждаемого канала устройства.

Изменяя скорость течения газа в канале устройства, можно определить A

$$A = \left[ln(\vartheta_{22}/\vartheta_{21})/ln(\vartheta_{12}/\vartheta_{11}) - 1\right]^{-1}, \quad (8)$$

где ϑ_{11}, ϑ_{21}, ϑ_{12} и ϑ_{22} – температуры газа в двух сечениях канала для двух значений скорости течения газа W_1 и W_2.

Особенностью метода является то, что при малых изменениях скорости потока газа в канале устройства (необходимое условие для постоянства характеристик течения газа в канале) температуры ϑ_{11} и ϑ_{21} отличаются от ϑ_{12} и ϑ_{22} на величины, сравнимые с шумом измерений. Так как логарифмы отношений близких величин стремятся к нолю, формула (8) имеет свойство неустойчивости из-за деления ноля на ноль. При этом обработка результатов измерений с использованием обычных статистических методов не дает положительных результатов.

Для решения этой проблемы при диагностировании высокотемпературных газовых потоков нами было предложено применить в методе АРПТ алгоритм параметрической идентификации (3)–(6) с использованием в качестве модели преобразованных уравнений измерения (7) для двух значений скорости газа в канале устройства

$$\begin{cases} ln\vartheta_{11} = ln\vartheta_Г - Aln(\vartheta_{11}/\vartheta_{21}); \\ ln\vartheta_{12} = ln\vartheta_Г - Aln(\vartheta_{12}/\vartheta_{22}). \end{cases} \quad (9)$$

Вектор искомых параметров будет иметь следующий вид

$$\mathbf{\Theta} = \begin{bmatrix} ln\vartheta_Г \\ A \end{bmatrix}.$$

Вектор измерений для k-го шага запишем как

$$\mathbf{Y}_k = \begin{bmatrix} \vartheta_{11k} + \varepsilon_{11k} \\ \vartheta_{12k} + \varepsilon_{12k} \end{bmatrix}.$$

Тогда матрица функций чувствительности вектора измерений к искомым параметрам примет вид

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & -ln(\vartheta_{11k}/\vartheta_{21k}) \\ 1 & -ln(\vartheta_{12k}/\vartheta_{22k}) \end{bmatrix}.$$

Сходимость алгоритма оптимального оценивания в применении к модели (9) и векторам параметров и измерений была исследована нами в широких диапазонах возможных значений измеряемой температуры газа $\vartheta_г$ и коэффициента преобразования A, начальных оценок $\vartheta_{г_0}$ и A_0, длины выборки измерений N и др. На рис. 1 представлены выборки температур ϑ_{11}, ϑ_{21}, ϑ_{12} и ϑ_{22} в двух сечениях канала термопреобразователя для двух значений скорости течения газа W_1 и W_2 и движение определяемой оценки $\vartheta_г$.

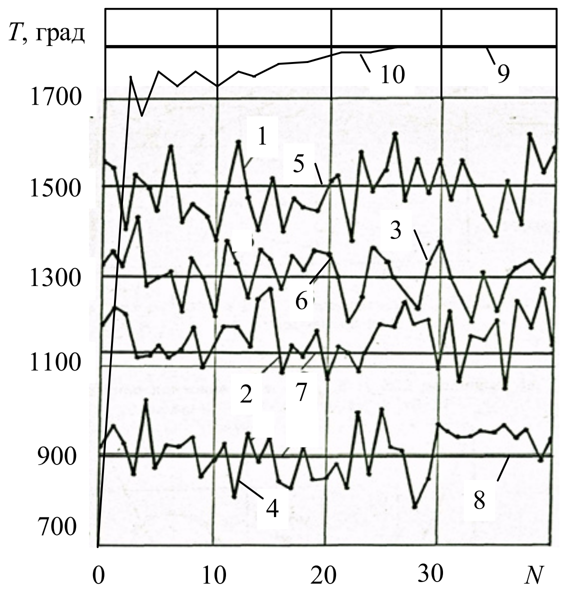

Рис. 1. Выборки температур газа в сечениях канала термопреобразователя для численного эксперимента: 1, 3 – температуры газа в канале устройства для сечений 1 и 2 при скорости W_1 газа в канале; 2, 4 – то же при скорости W_2 газа в канале; 5, 6, 7, 8 и 9 – эталонные значения температур ϑ_{11}, ϑ_{21}, ϑ_{12}, ϑ_{22} и $\vartheta_г$; 10 – движение оценки $\vartheta_г$

Для проведения численного эксперимента при различных исходных (эталонных) значениях $\vartheta_г$, A и вариаций скорости W потока газа в канале по формулам (8) и (9) находились температуры газа ϑ_{11}, ϑ_{12}, ϑ_{21} и ϑ_{22} в канале термопреобразователя. Эталонные значения температур ϑ_{11}, ϑ_{21}, ϑ_{12}, ϑ_{22} и $\vartheta_{г}$ для рис. 1 равны соответственно 1500, 1142, 1300, 900 и 1823 градусам. Количество измерений в данном случае равно 40. Суммированием эталонных значений с генерируемыми датчиками случайных чисел при различных дисперсиях σ величинами ε_{11k}, ε_{12k}, ε_{21k} и ε_{22k} рассчитывались выборки температур, которые являлись исходными данными для численного эксперимента.

В подавляющем большинстве случаев наблюдалась устойчивая сходимость процедуры параметрической идентификации для $N \geq 35$ с точностью до 0,2 %. Таким образом, предложенный для адаптации РПТ алгоритм позволяет существенно снизить влияние стохастичности исходной измерительной информации, а также ее объем. Можно говорить о том, что, например, для данного устройства предложенная методология является практически единственной возможностью для проведения измерений.

Выводы

Результаты численного моделирования показали, что предложенная методология представления процесса измерений как параметрической идентификации измерительного устройства на примере адаптивного редукционного проточного термопреобразователя позволяет при минимальном объеме измерительной информации проводить измерения с высокой точностью. В некоторых случаях такое представление процесса измерений является практически единственной возможностью для проведения последних.

Литература

1. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем: учеб. пособие / О.М. Алифанов, П.Н. Вабищевич, В.В. Михайлов и др. – М.: Логос, 2001. – 400 с.
2. Симбирский Д.Ф. Оптимальные оценки в тепловых измерениях / Д.Ф. Симбирский // Инж.-физ. журн. – 1975. – Т. 28, №2. – С. 240–248.
3. Симбирский Д.Ф. Температурная диагностика двигателей (пленочная термометрия и оптимальные оценки) / Д. Ф. Симбирский. – К.: Техника, 1976. – 208 с.
4. Симбирский Г.Д. Повышение точности, предела измерений и быстродействия проволочных термопар / Г.Д. Симбирский // Эффективность сжигания топлив и экология. – Х.: ИПМаш АНУ, 1993. – С. 81–94.
5. Симбирский Д.Ф. Точность и планирование параметрической идентификации теплопереноса в технических объектах / Д.Ф. Симбирский, С.В. Епифанов, Г.Д. Симбирский // Проблемы машиностроения. – 2012. – Т. 15, № 3. – С. 25–34.
6. Симбирский Г. Д. Реализация в системе Matlab цифрового фильтра Калмана для параметрической идентификации измерительных устройств // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології в науці та освіті: міжнар. наук.-метод. конф.: тез. докладів. – Х.: ХНАДУ. – 2013. – С. 78–79.
7. Мацевитый Ю.М. Параметрическая и функциональная идентификация тепловых процессов / Ю.М. Мацевитый, Н.В. Гайшун, В.Т. Борухов, А.О. Костиков // Проблемы машиностроения. – 2011. – Т. 14, №3. – С. 40–47.
8. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 957 с.
9. Симбирский Г. Д. Метод измерения высоких (до 2500 К) температур газовых потоков на основе адаптивных редукционных проточных термопреобразователей : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.14.05 «Методы и способы измерения тепловых величин» / Г.Д. Симбирский. – Х., 1993. – 19 с.
10. Симбирский Г.Д. Экспериментальные исследования температурных полей в высокотемпературных газовых потоках / Г.Д. Симбирский, А.А. Завалий, Д.Ф. Симбирский, А. И. Скрипка // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 9 (56). – С. 22–26.

Рецензент: О. П. Алексеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 23 марта 2015 г.