

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Г.Д. Симбирский, доцент, канд. техн. наук, В.К. Лантрат, студент, ХНАДУ

Аннотация. Изложена методика математического моделирования высокотемпературного проволочного измерителя температуры газовых потоков. Она заключается в использовании в качестве модели измерителя уравнения его сложного теплообмена с окружающей средой и цифрового фильтра Калмана для получения оптимальных оценок искомых параметров. Приведены результаты численного и физического экспериментов по проверке.

Ключевые слова: математическое моделирование, фильтр Калмана, измерение высоких температур, параметрическая идентификация.

ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧА

Г.Д. Симбірський, доцент, канд. техн. наук, В.К. Лантрат, студент, ХНАДУ

Анотація. Викладено методику математичного моделювання високотемпературного дріт'яного вимірювача температури газових потоків. Вона полягає в використанні в якості моделі вимірювача рівняння його складного теплообміну з навколишнім середовищем і цифрового фільтра Калмана для отримання оптимальних оцінок шуканих параметрів. Наведено результати чисельного та фізичного експериментів з перевірки запропонованого методу.

Ключові слова: математичне моделювання, фільтр Калмана, вимір високих температур, параметрична ідентифікація.

APPLICATION OF THE KALMAN DIGITAL FILTER FOR PARAMETRIC IDENTIFICATION HIGH-TEMPERATURE THERMOCOUPLE

G.D. Simbirskiy, Docent, PhD, V. K. Lantrat, student, KhNAHU

Abstract. The technique of mathematical modeling of high-temperature wire temperature gauges is described. It consists in using the equation of its complex heat exchange with the environment and the Kalman digital filter as a model of the meter to obtain optimal estimates of the sought parameters. The results of numerical and physical experiments on the verification of the proposed method.

Key words: mathematical modelling, Kalman filter, high temperature measurement, parametric identification.

Введение

При экспериментальных исследованиях, испытаниях и эксплуатации различных теплоэнергетических устройств, в том числе двигателей внутреннего сгорания транспортных средств возникает необходимость в высокоточных (с погрешностью не более 1 %) и малоинерционных (постоянная времени не бо-

лее 0,01 с) измерениях локальных температур газовых потоков в диапазоне температур 1000-2000^oC с достаточными надежностью и ресурсом. Известные высокотемпературные проволочные термопреобразователи (термопары) не удовлетворяют указанным требованиям, как по уровню погрешностей, так и по термостойкости и ресурсу.

Математическое моделирование составляет основу современных экспериментально-расчетных исследований в машиностроении.

Известно, что значительную часть проблематики при математическом моделировании составляют обратные задачи (ОЗ), широко применяющиеся в теплоэнергетике, включая тепловые двигатели. Наиболее эффективным является экстремальный подход к решению ОЗ, состоящий в минимизации квадратичных целевых функционалов.

В настоящей работе предлагается реализовать такой подход в форме метода параметрической идентификации физического процесса в измерительном устройстве (проволочном термопреобразователе). Метод заключается в получении на основе экспериментальных данных оптимальных оценок $\hat{\Theta}$ некоторого вектора Θ искомых параметров, входящих в математическую модель измерительного устройства. Для реализации данного метода нами используется фильтр Калмана.

Анализ публикаций

В настоящее время известен ряд бесконтактных методов измерения высоких температур продуктов сгорания в тепловых двигателях [1], например, пирометрический. Однако, точность измерения метода, особенно при измерении локальных температур газа низкая. Это обусловлено тем, что при измерении температуры пламени по излучению происходит пространственное усреднение температуры вдоль оси визирования пирометра. Неизлучающие горячие или холодные зоны газов принципиально не могут быть измерены пирометрами излучения без специального подкрашивания газа. Кроме того, применение пирометров в ДВС дорогостоящая и технически сложная задача. Поэтому наиболее распространенными остаются контактные методы измерения высоких температур.

Среди множества контактных методов измерения температуры газа (T_r) практически отсутствуют методы и средства измерений, удовлетворяющие полностью перечисленным выше условиям измерений [2]. Те же средства измерений, которые приближаются к этим условиям, очень сложно реализовать в ДВС технически.

Прямые измерения проволочными термопре-

образователями (ТП) не удовлетворяют приведенным выше условиям из-за низкой термической стойкости и высокого уровня методических погрешностей. Известные в настоящее время косвенные методы измерения T_r (двух и более ТП, газодинамический, калориметрический и др. [3]) либо не приводят к повышению точности до требуемого уровня [2, 4], либо находятся на стадии исследования и не могут быть использованы. В связи с этим актуальной является задача повышения точности, быстродействия и предела измерений проволочных ТП, наиболее широко применяемых в качестве штатных.

Из-за высоких температур среды и особенностей конструкции чувствительные элементы (ЧЭ) высокотемпературных проволочных ТП находятся в сложном нестационарном конвективно-лучисто-кондуктивном теплообмене с газовым потоком, с более нагретыми и более холодными его областями, с окружающими элементами и собственной арматурой. В этом случае температурное поле проволочного (цилиндрического) ТП описывается следующим уравнением [4]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [C \rho S d T_{\text{тп}}(x, \tau)] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda S \frac{\partial}{\partial x} [T_{\text{тп}}(x, \tau)] \right] + \alpha [T_g - T_{\text{тп}}(x, \tau)] \Pi + \xi P \{ \varepsilon_{\text{ст-тп}} [T_{\text{ст}}^4 - T_{\text{тп}}^4(x, \tau)] + \varepsilon_{\text{ф-тп}} [T_{\text{ф}}^4 - T_{\text{тп}}^4(x, \tau)] \} \phi_{\text{ф-тп}}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от газа к ЧЭ; $T_{\text{ф}}$ и $T_{\text{ст}}$ – температуры факела и окружающих стенок в градусах Кельвина; $\varepsilon_{\text{ст-тп}}$ и $\varepsilon_{\text{ф-тп}}$ – приведенные коэффициенты черноты систем ”огибающие стенки-ЧЭ” и ”факел-ЧЭ”; ξ – коэффициент Стефана-Больцмана; λ – коэффициент теплопроводности материала ЧЭ; $\phi_{\text{ф-тп}}$ – угловой коэффициент облученности системы ”факел-ЧЭ”; C , ρ и d – теплоемкость, плотность и диаметр ЧЭ соответственно; S и Π – площадь и периметр поперечного сечения ЧЭ.

Как следует из уравнения (1), сложный теплообмен приводит к существенному различию между температурами ЧЭ $T_{\text{тп}}(x, \tau)$ и потока газа T_r , что определяет погрешность измерения последней. Основными составляющими погрешности измерения являются конвективная, характеризуемая температурой газа в точке размещения ТП и коэффициент-

том теплоотдачи α на его поверхности, а также лучистая, определяемая коэффициентом Стефана-Больцмана ξ , приведенными коэффициентами черноты $\varepsilon_{\text{ст-тп}}$ и $\varepsilon_{\text{ф-тп}}$ и температурами окружающих конструкций (стенки) $T_{\text{ст}}$, факела $T_{\text{ф}}$ и термопреобразователя $T_{\text{тп}}$.

Учитывая вышесказанное и проведя математические преобразования, запишем уравнение (1) сложного теплообмена проволочного ТП в следующем виде [4]:

$$\frac{Cp d}{4\alpha} \frac{\partial}{\partial \tau} t_{\text{тп}}(\tau) = t_{\text{г}}(\tau) - t_{\text{тп}}(\tau) - \frac{\xi \varepsilon}{\alpha} [T_{\text{тп}}^4(\tau) - T_{\text{ст}}^4(\tau)], \quad (2)$$

где $t_{\text{г}}$ и $t_{\text{тп}}$ - температуры газа и термопреобразователя в градусах Цельсия; ε - степень черноты ЧЭ.

Отметим, что нелинейный характер дифференциального уравнения (2) относительно $t_{\text{тп}}(\tau)$ затрудняет его решение аналитическим путем.

В условиях существенного лучистого теплообмена ЧЭ термодпар с окружающей средой необходимо применять методы повышения быстродействия и точности измерений для каждого ТП на основе уравнения (2). Это, особенно учитывая обычно имеющие место значительные шумы в $t_{\text{тп}}(\tau)$, является сложной и до последнего времени нерешенной задачей, так как в большинстве из предлагаемых методов рассматривается только случай конвективного теплообмена. В [5] предложено для решения такой задачи использовать методы параметрической идентификации, в частности оптимальный дискретный фильтр Калмана (ФК).

В настоящей работе будет показано, что для этой цели может быть успешно использован экстремальный подход к решению ОЗ математического моделирования [6], состоящий в минимизации квадратичных целевых функционалов. Такой подход может быть реализован в форме метода параметрической идентификации физического процесса или объекта, который заключается в получении на основе экспериментальных данных оптимальных оценок $\hat{\Theta}$ некоторого вектора Θ искоемых параметров теплопереноса, входящего

в его математическую модель [7]. Информацию о характере и перспективах его использования в различных отраслях науки и техники можно найти в представительном обзоре [8].

Известно, что ОЗ относятся к некорректно поставленным задачам математической физики, которым свойственна неустойчивость решений. Поэтому вопросы достоверности и точности получаемых решений, в частности, методом параметрической идентификации имеют первостепенное значение. В технической литературе [9-10] рассматривается параметрическая идентификация как метод решения обратных задач теплопереноса, являющихся наиболее сложной разновидностью ОЗ. В таких ОЗ в качестве уравнений измерения выступают математические модели теплопереноса в технических объектах. Проблемы точности результатов параметрической идентификации различных динамических объектов рассматриваются в работах по теории чувствительности динамических систем, например, в монографии [11].

Методология оптимального планирования параметрической идентификации в завершеном виде изложена, в частности, в монографии [6]. В ее основу положены исследования особенностей информационной матрицы Фишера Φ , составленной из функций чувствительности измеряемых параметров к идентифицируемым, и которые отражают все значимые факторы постановки задачи математического моделирования.

Добиваясь априори желательных свойств матрицы Φ путем выбора значимых факторов проводимых исследований, можно осуществить оптимальное планирование сложного многопланового эксперимента. В работе [12] для обратных задач теплопроводности предложен показатель точности - совместные доверительные интервалы (СДИ) оценок параметров, определяемый как проекции совместных доверительных областей (СДО) на оси многомерного пространства оцениваемых параметров.

Цель исследования и постановка задачи

Исходя из проведенного анализа, нами была сформулирована цель исследований, заключающаяся в создании метода измерения нестационарных высоких температур газа на

основе упомянутого фильтра Калмана для параметрической идентификации проволочного термопреобразователя.

Метод заключается в получении оптимальных (несмещенных, достоверных и состоятельных) оценок параметров математической модели проволочного термопреобразователя (коэффициента теплоотдачи α , степени черноты поверхности ЧЭ ε и температуры газа t_r) в предположении их постоянства во времени по показаниям ТП, искаженным случайными погрешностями – шумами измерений.

В связи с этим ставятся следующие задачи настоящего исследования:

1. Изложить методологию математического моделирования средства измерения, использующую методы параметрической идентификации для получения оценок искоемых параметров процесса измерений;
2. Применить предлагаемую методологию математического моделирования в случае параметрической идентификации проволочного ТП при измерении нестационарных высоких температур газа;
3. Предложить, исследовать и реализовать в виде программного продукта алгоритм параметрической идентификации проволочного измерителя температуры газа;
4. Экспериментально подтвердить справедливость предложенного метода.

Математическое моделирование и параметрическая идентификация проволочного термопреобразователя

В качестве математической модели проволочного ТП используем следующее преобразованное уравнение (2) его теплообмена с окружающей средой:

$$\frac{\partial t_{\text{тп}}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{4\alpha}{C\rho d} t_r(\tau) - \frac{4\alpha}{C\rho d} t_{\text{тп}}(\tau) - \frac{4\xi\varepsilon}{C\rho d} [T_{\text{тп}}^4(\tau) - T_{\text{ст}}^4(\tau)], \quad (3)$$

линейное относительно параметров t_r , α и ε , которые составят (3×1) -вектор искоемых параметров

$$\Theta = [t_r \quad \alpha \quad \varepsilon]^T.$$

Вектор измерения на k -м шаге (в k -й момент

времени) имеет следующий вид:

$$Y_k = \Psi(\Theta, \tau_k) + E_k = [t_{\text{тп}k} + E_k],$$

где $t_{\text{тп}k}$ – измеряемая температура ТП; E_k – случайная погрешность этого измерения в k -й момент времени соответственно, причем E_k определяется как стохастичностью, исследуемого процесса, так и шумами в системе регистрации сигнала ТП; $k=1, 2, \dots, N$ – порядковый номер измерения; N – размер выборки.

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 ε_k являются нормально распределенными случайными величинами с нулевыми математическими ожиданиями, одинаковой дисперсией σ^2 и некоррелированными между собой. Такое допущение справедливо при однородных измерениях температур, выполняемых с помощью одних и тех же первичных и регистрирующих преобразователей. Это позволяет представить основную характеристику случайного вектора ε_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.

Тогда оптимальные оценки $\hat{\Theta}_k$ вектора Θ на каждом шаге последовательно в порядке поступления измерений определяются по следующему алгоритму:

$$\hat{\Theta}_k = \hat{\Theta}_{k-1} + \mathbf{K} [Y_k - \hat{Y}_k(\hat{\Theta}_{k-1})], \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}]^{-1}; \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k-1} - \mathbf{K} \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k-1}; \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_k = \frac{\partial}{\partial \Theta} \hat{Y}_k(\hat{\Theta}_{k-1}), \quad (7)$$

где \mathbf{K} – весовая матрица фильтра; \mathbf{H}_k – $(m \times$

r)-матрица функций чувствительности $h_{ijk} = \frac{\partial y_{ik}}{\partial \theta_j}$, составляющих y_{ik} вектора измерений к искомым параметрам θ_j ($i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, r$; $k=1, 2, \dots, n$), рассчитанная для значений $\hat{\Theta}$ в k -й момент времени; \mathbf{P}_k и \mathbf{P}_{k-1} – ковариационные матрицы ошибок оценок, диагональные элементы которых являются дисперсиями ошибок оценок искомых параметров [5]:

$$\mathbf{P}_{ij} \Big|_{j=1} = \sigma(\Theta_i)^2,$$

а остальные элементы входят в коэффициенты корреляции между i -й и j -й компонентами вектора Θ .

Нелинейный вид уравнения (3) не позволяет получить в аналитической форме функции чувствительности h_{ijk} . В этом случае последние определяются следующим образом:

$$h_{ijk} = \frac{\partial \Psi_{jk}(\hat{\Theta})}{\partial \Theta_i} = \frac{\Psi_{jk}(\hat{\Theta}_{1k}, \dots, \hat{\Theta}_{ik}, \dots, \hat{\Theta}_{rk})}{\Delta \Theta_i} - \frac{\Psi_{jk}(\hat{\Theta}_{1k}, \dots, \hat{\Theta}_{ik} + \Delta \Theta_i, \dots, \hat{\Theta}_{rk})}{\Delta \Theta_i}, \quad (8)$$

где $\Delta \Theta_i$ – выбираемое из опыта малое приращение параметра Θ_i . Т. е. для расчета всех h_{ijk} по формуле (8) необходимо $(1+r)$ раз решить прямую задачу для рассматриваемого случая: один раз для расчета $\Psi_{jk}(\hat{\Theta})$ и r раз – для расчета $\Psi_{jk}(\hat{\Theta}_{1k}, \dots, \hat{\Theta}_{ik} + \Delta \Theta_i, \dots, \hat{\Theta}_{rk})$.

Итак, алгоритм параметрической идентификации рассматриваемого средства измерения заключается в последовательном выполнении вычислений по формулам (4)-(7) для k -го шага в соответствии с поступающими измерениями \mathbf{Y}_k в следующем порядке:

1. По математической модели ТП на основе полученных $(k-1)$ -х оценок параметров определяется прогноз вектора измерений $\hat{\mathbf{Y}}_k(\hat{\Theta}_{k-1})$ путем решения дифференциального уравнения (3), например, методом Рунге-Кутты;
2. По формуле (8) вычисляются составляю-

щие матрицы функций чувствительности \mathbf{H}_k ;

3. По формулам (4)-(7) находится весовая матрица фильтра \mathbf{K} , определяются новые оценки вектора искомых параметров $\hat{\Theta}_k$ и вычисляется ковариационная матрица \mathbf{P}_k ошибок оценок $\hat{\Theta}_k$, которая наряду с $\hat{\Theta}_k$ и измерениями \mathbf{Y}_{k+1} служит основанием для выполнения нового $(k+1)$ -го шага.

Для счета необходимо задаться начальными оценками идентифицируемых параметров

$$\hat{\Theta}_0 = [t_{r0} \quad \alpha_0 \quad \varepsilon_0]^T,$$

вектора искомых параметров Θ и ковариационной матрицей их ошибок

$$\mathbf{P}_0 = \text{diag} \{ P_{11}(0) \quad P_{22}(0) \quad P_{33}(0) \},$$

где $P_{ii}(0)$ – дисперсии ошибок начальных оценок \hat{t}_θ , $\hat{\alpha}_0$ и $\hat{\varepsilon}_0$.

Для исследования сходимости алгоритма (4)-(7) при параметрической идентификации проволочного термопреобразователя и выбора особенностей его реализации в рассматриваемом случае проведен значительный объем численных экспериментов на ПЭВМ, заключавшихся в следующем:

1. Для различных исходных, выбранных в качестве истинных значений t_{r0} , α_0 , ε_0 путем решения уравнения (3) методом Рунге-Кутты находилась температура ЧЭ термопары $t_{\text{тп}}(\tau)$ с учетом его лучистого теплообмена со стенками, имеющими температуру $t_{\text{ст}}$;
2. Суммированием их с генерируемыми датчиком случайных чисел при различных среднеквадратичных отклонениях (СКО) σ величинами \mathbf{E}_k получались выборки $t_{\text{тп}}(\tau)$, составляющие вектор измерений \mathbf{Y}_k и являющиеся исходными данными для численного эксперимента;
3. Проводилось изучение влияния на сходимость алгоритма (4)-(7) вышеперечисленных факторов.

Начальные оценки $\hat{\Theta}_0$ задавались из различных точек пространства существования составляющих вектора Θ с последующим анализом характера и скорости сходимости. При недостаточной сходимости для данной выбо-

рки процедура идентификации повторялась при задании в качестве $\hat{\Theta}_0$ заключительных оценок $\hat{\Theta}_N$ на предыдущей итерации.

Диагональными элементами ковариационной матрицы ошибок начальных оценок \mathbf{P}_0 являлись либо квадраты составляющих вектора начальных оценок искомых параметров $\hat{\Theta}_0$, либо большие положительные числа, либо дисперсии искомых параметров, определяемые по формуле [5]

$$\mathbf{P}_{ij} \Big|_{j=1} = \sigma(\hat{\Theta}_i)^2 = \left(\frac{2}{3} \Delta \hat{\Theta}_0 \right)^2.$$

Численное моделирование проводилось для следующих диапазонов возможных на практике значений физических параметров: $t_{r0} = 800-1200^\circ\text{C}$ для хромель-алюмелевых ТП (ТХА) и $t_{r0} = 1300-1700^\circ\text{C}$ для платина-платинородиевых ТП (ТПР); $\alpha_0 = 1000-2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; $\varepsilon_0 = 0,8-0,9$ для ТХА и $\varepsilon_0 = 0,2-0,3$ для ТПР; $d_{\text{тп}} = 0,1-0,3 \text{ мм}$. Объем выборок измеряемых температур достигал $N=1000$, а шаг измерений $\Delta\tau = 1-100 \text{ мкс}$. За критерий сходимости получаемых оценок \hat{t}_k , $\hat{\alpha}_k$ и $\hat{\varepsilon}_k$ к их эталонным значениям t_{r0} , α_0 , ε_0 были приняты не превышающие 0,1% отличия между ними подряд на 20-30 измерениях.

На первой стадии численных экспериментов была обнаружена неудовлетворительная сходимость оценок $\hat{\Theta}_k$, вызванная, очевидно, значительным отличием (на 3-4 порядка) в числовых значениях искомых параметров. Для устранения такого явления нами была использована операция масштабирования параметра ε по формуле

$$\varepsilon' = \mu \varepsilon,$$

где $\mu = 1 \cdot 10^3$ – масштабный коэффициент. В соответствии с данной формулой в выражении (3) для математической модели проволочного ТП в слагаемое, содержащее ε , был введен множитель $1/\mu$. В результате масштабирования был достигнут заявленный выше критерий сходимости.

Результаты численного эксперимента по проверке предложенного метода измерения быстроизменяющихся температур как параметрической идентификации проволочного

термопреобразователя приведены на рис. 1. Рассматривается пример с платина-платинородиевым ТП диаметром 0,2 мм для $t_{r0} = 1600^\circ\text{C}$; $\alpha_0 = 1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; $\varepsilon_0 = 0,3$; $\rho = 20000 \text{ кг}/\text{м}^3$; $C = 200 \text{ Дж}/(\text{кгК})$. Интенсивность шумов в измерениях определялась дисперсией $\sigma^2 = 400^\circ\text{C}$. Выборка измеряемой температуры $t_{\text{тп}}$ как результат решения уравнения (3) методом Рунге-Кутты (шаг вычислений 1 мс) также приведена на рис. 1 (кривая 1).

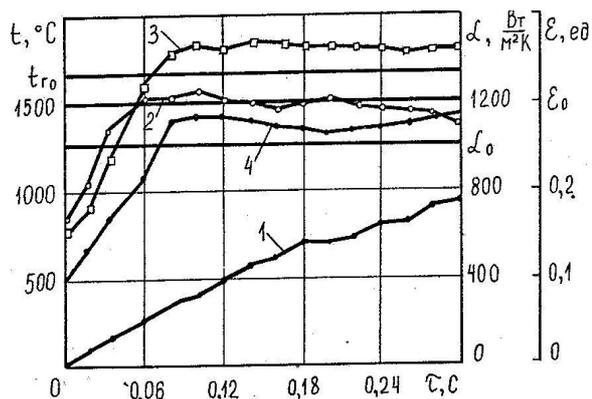


Рис. 1 – Движение оценок \hat{t}_k , $\hat{\alpha}_k$ и $\hat{\varepsilon}_k$ в первой итерации: 1 - $t_{\text{тп}}(\tau)$; 2 - \hat{t}_k ; 3 - $\hat{\alpha}_k$; 4 - $\hat{\varepsilon}_k$.

Проведенные нами исследования позволили сделать вывод о том, что оптимальное число измерений на всем интервале переходного процесса составляет $N=18-20$, а ковариационная матрица ошибок начальных оценок должна быть следующей:

$$\mathbf{P}_0 = \text{diag} \{ 10^3 \quad 10^3 \quad 10^3 \}.$$

На рис. 1 показано движение оценок \hat{t}_k , $\hat{\alpha}_k$ и $\hat{\varepsilon}_k$, полученных в соответствии с вышеприведенными рекомендациями для случая $\hat{t}_0 = 1000^\circ\text{C}$, $\hat{\alpha}_0 = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ и $\hat{\varepsilon}_0 = 0,2$. Окончательные оценки, полученные на всем интервале переходного процесса, при этом составили: $\hat{t}_N = 1575^\circ\text{C}$, $\hat{\alpha}_N = 1450 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ и $\hat{\varepsilon}_N = 0,282$.

Для достижения заявленной точности сходимости (не менее 0,3%) необходимы повторные вычисления (итерации) по алгоритму (4)-(7) с использованием той же измерительной информации, причем вектор $\hat{\Theta}_0$ началь-

ных оценок составляли конечные оценки $\hat{\Theta}_N$ для предыдущей итерации. На рис. 2 приведено движение оценок \hat{t}_N , $\hat{\alpha}_N$ и $\hat{\varepsilon}_N$ по итерациям. Точность сходимости 0,3% была достигнута на 3-й итерации. Конечные оценки искомым параметров на ней составили $\hat{t}_{20} = 1597^\circ\text{C}$, $\hat{\alpha}_{20} = 1496$ и $\hat{\varepsilon}_{20} = 0,295$.

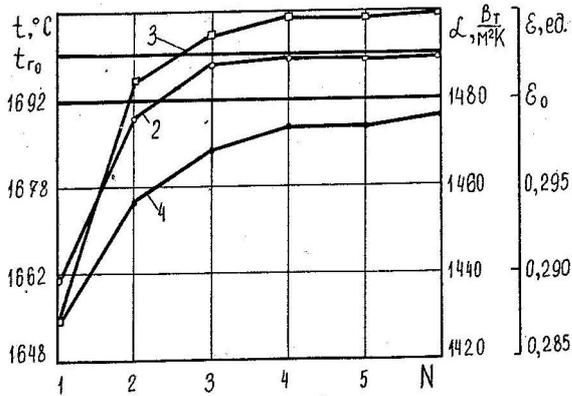


Рис. 2 – Движение оценок \hat{t}_k , $\hat{\alpha}_k$ и $\hat{\varepsilon}_k$ по итерациям: 1 - $t_{\text{тп}}(\tau)$; 2 - \hat{t}_k ; 3 - $\hat{\alpha}_k$; 4 - $\hat{\varepsilon}_k$.

В ходе исследований выяснилось, что оптимальным является вариант задания вектора $\hat{\Theta}_0$, когда его составляющие \hat{t}_0 , $\hat{\alpha}_0$ и $\hat{\varepsilon}_0$ ниже своих эталонных значений.

Экспериментальная проверка метода

Экспериментальные исследования и проверка метода параметрической идентификации проволоочного термопреобразователя при ступенчатом изменении температуры газа были проведены на стенде ВТС-2 ХНАКУ им. Н. Е. Жуковского при участии его сотрудников. Исследования проводились на хромель-алюмелевых ТП, размещенных в охлаждаемом проточной водой экране, являвшемся камерой торможения. Диаметр ЧЭ составлял 0,2-0,3 мм. Температура стенки экрана контролировалась наряду с температурой ЧЭ. Источником высокотемпературной газовой среды была экспериментальная камера сгорания. Измерение и регистрация сигналов проволоочного ТП производились быстродействующим светолучевым осциллографом.

Выборки температур $t_{\text{тп}}(\tau)$ обрабатывались нами в соответствии с предложенной выше методикой. В качестве начальных оценок

были приняты следующие значения параметров: $\hat{t}_0 = 800^\circ\text{C}$, $\hat{\alpha}_0 = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ и $\hat{\varepsilon}_0 = 0,8$. Число шагов для вычислений $N=20$. В результате конечные оценки для первой итерации составили $\hat{t}_{20} = 1185^\circ\text{C}$, $\hat{\alpha}_{20} = 1151$ и $\hat{\varepsilon}_{20} = 0,873$. Расчеты по алгоритму (4)-(7) были проведены для нескольких итераций. За критерий сходимости нами была принята стабилизация оценки \hat{t}_{20} в пределах 2°C . Этот критерий достигался, как правило, на 4-5 итерациях. В целом результаты эксперимента подтвердили перспективность предложенного метода измерения температуры газа как параметрической идентификации проволоочного ТП.

Выводы

Результаты проведенных численных экспериментов позволили сделать следующие выводы:

1. Параметрическая идентификация проволоочного термопреобразователя с применением алгоритма нелинейного фильтра Калмана при скачкообразном воздействии на ТП температуры газа $t_{\text{г}}$ позволяет измерить последнюю с погрешностью, не превышающей 0,3%, а также определить коэффициент теплоотдачи α от ТП к газу и степень черноты ε поверхности чувствительного элемента ТП;
2. Масштабирование ε и другие приемы значительно повышают точность параметрической идентификации;
3. Для удовлетворительной сходимости процедуры идентификации достаточно не более двадцати измерений температуры ТП.

Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают возможность и перспективность применения метода параметрической идентификации первичного ТП для определения параметров его теплообмена со средой непосредственно во время проведения измерений. Использование при этом алгоритма фильтра Калмана значительно повышает точность измерений, а в некоторых случаях является единственным способом проведения измерений.

Предложенную методологию возможно и необходимо использовать при проведении других видов косвенных измерений.

Литература

1. Иванова Г.М. Теплотехнические измерения и приборы / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 460 с.
 2. Симбирский Г. Д. Метод измерения высоких (до 2500 К) температур газовых потоков на основе адаптивных редуцированных 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.
 3. Температурные измерения /О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, В.И. Лах, Н.А. Ярышев. – К.: Наукова думка, 1984. – 494 с.
 4. Точность контактных методов измерения температуры / А.Н. Гордов, Я.В. Малков, Н.Н. Эргард, Н.А. Ярышев. – М.: Изд. стандартов, 1976. – 232 с.
 5. Симбирский Д. Ф. Температурная диагностика двигателей (пленочная термометрия и оптимальные оценки) / Д. Ф. Симбирский. – К.: Техника, 1976. – 208 с.
 6. 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.
 7. Симбирский Г.Д. Планирование и точность численного эксперимента в математическом моделировании [Электронный ресурс] / Г.Д. Симбирский, В. К. Вязеленко / Автомобіль і Електроніка. Сучасні технології: сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2015. – Вып. 8. – С. 157–166.
 8. Мацевитый Ю. М. Параметрическая и функциональная идентификация тепловых процессов / Ю. М. Мацевитый, Н. В. Гайшун, В. Т. Борухов, А. О. Костиков // Проблемы машиностроения.–Х.:ИПМаш НАНУ. - 2011. – Т. 14, №3. – С. 40–47.
 9. Симбирский Д. Ф. Метрология косвенных измерений / Д. Ф. Симбирский // Измерит. техника. – 1983. – № 1. – С. 12–14.
 10. Симбирский Д. Ф. Оптимальный синтез измерительных систем, использующих алгоритмы обратных задач / Д. Ф. Симбирский, А. В. Олейник, С. В. Епифанов// Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии: Тез. докл. 5–го всесоюз. симп. – Новосибирск, 1989. – С. 136–137.
 11. Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
 12. Симбирский Г.Д. Точность и планирование параметрической идентификации теплопереноса в технических объектах / Д.Ф. Симбирский, С.В. Епифанов, Г.Д. Симбирский // Проблемы машиностроения. – Х.: ИПМаш НАНУ. – 2012.– Т. 15, № 3. – С. 25 – 34.
 13. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 957 с.
 14. Симбирский Г.Д. Применение цифрового фильтра Калмана для параметрической идентификации измерительных устройств [Текст] / Г.Д. Симбирский, И.И. Иванов // Информационные процессы и технологии “Информатика – 2013”: материалы VI Международной науч.-практ. конференции молодых ученых и студ., 22–26 апреля 2013 г. Севастополь/ С.В. Доценко (ред.). – Севастополь: Изд-во «Вебер», 2013. –260 с. – С. 176 – 177.
- Рецензент: О.П. Алексеев, профессор, д.т.н., кафедра Компьютерных технологий и мехатроники ХНАДУ.
- Статья поступила в редакцию 02.04.2017 г.