

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Д.А. Чупис,

аспирант Донецкого национального технического университета



*Рассмотрена проблема метрологического обеспечения динамических измерений. Предложена методика экспериментального определения динамических характеристик термопреобразователей скорости и температуры в динамических условиях эксплуатации. Проведена экспериментальная апробация предложенной методики.*

*The problem of metrological provision of dynamic measurements is studied. The method of experimental determination of the velocity and temperature measuring device dynamic characteristics in dynamic conditions of operation is proposed. The experimental validation of methodology was carried out.*

### Введение

Для современного этапа развития метрологии и измерительной техники характерен переход от измерений постоянных величин (характеристик свойств и состояний объектов) к измерениям переменных величин (характеристик процессов, то есть закономерных изменений свойств и состояний объектов) [1]. Автоматические методы управления технологическими процессами, решение научно-исследовательских и инженерных измерительных задач требуют достоверного знания статических и динамических характеристик элементов соответствующих измерительных систем.

По различным оценкам, технологические процессы, связанные с управлением температурой, занимают около половины всех задач по регулированию. В подавляющем большинстве случаев для проведения тепловых измерений используют контактные методы, что связано с необходимостью учета термической инерции теплоприемника (первичного измерительного преобразователя – ПИП), то есть способности ПИП менять температуру под действием переменной температуры внешней среды не мгновенно, а по истечении некоторого промежутка времени. В течение этого времени внутри тела происходит соответствующее изменение общей энтальпии (теплосодержания) и температурного поля тела. С этим свойством контактных измерителей сталкиваются и при кратковременных

измерениях, не допускающих достижения теплового равновесия термоприемника и окружающей среды [2]. Термическая инерция является свойством всех физических тел, и, следовательно, безинерционный приемник контактного типа не может быть создан. Кроме того, инерционные свойства термопреобразователей зависят от условий теплообмена с внешней средой и требуют нормирования для конкретных внешних условий среды, которые, по сути, также являются динамическими. Поэтому необходимо учитывать динамические характеристики термопреобразователей в динамических условиях эксплуатации.

### Изложение основного материала исследования

Теоретическое рассмотрение вопросов об изменении теплового состояния тел под воздействием тех или иных внешних условий базируется на решении (с соответствующими начальными и граничными условиями) основного уравнения теплопроводности.

Характерными для СИ температуры являются динамические характеристики, математическая модель которых описывается дифференциальными уравнениями первого и второго порядков.

Так, например, проволочный термопреобразователь без защитной оболочки описывается уравнением первого порядка:

$$\frac{dU(t)}{dt} + \frac{\alpha_k S}{mc} U(t) = \frac{\alpha_k S}{mc} \theta(t),$$

где  $U(t)$  – температура ИП;  $S$  – площадь поверхности ИП;  $m$  – масса ИП,  $c$  – удельная теплоемкость материала датчика;  $\alpha_k$  – коэффициент конвективного теплообмена;  $\theta(t)$  – измеряемая температура.

Полупроводниковый термисторный термопреобразователь в защитной оболочке описывается уравнением второго порядка:

$$\frac{d^2U(t)}{dt^2} + (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 \alpha_k) \frac{dU(t)}{dt} + \beta_1 \beta_3 \alpha_k U(t) = \beta_1 \beta_3 \alpha_k \theta(t);$$

$$\beta_1 = k_0 S_e / c_e; \quad \beta_2 = k_0 S_e / c_{o6}; \quad \beta_3 = S_{o6} / c_{o6},$$

где  $c_e$ ,  $c_{o6}$  – полные теплоемкости чувствительного элемента ИП и оболочки;  $S_e$ ,  $S_{o6}$  – площади чувствительного элемента ИП и оболочки.

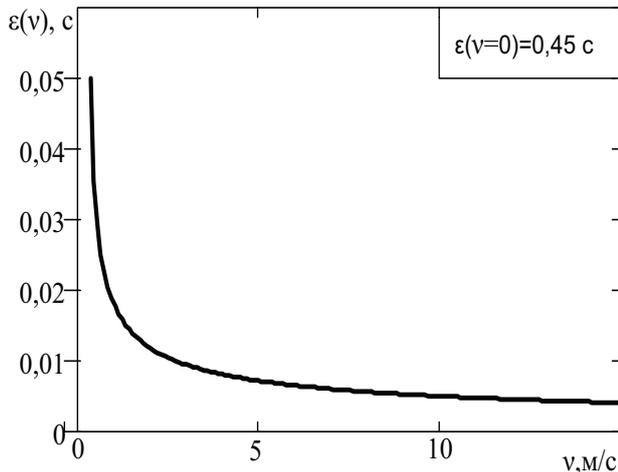


Рис. 1. Математическая модель зависимости значения показателя тепловой инерции  $\epsilon$  миниатюрного проволочного термопреобразователя от условий теплообмена

Одно из простейших решений дает случай, соответствующий переходу в некоторый начальный момент ( $\tau = 0$ ) температуры среды, окружающей тело, скачком из одного стационарного состояния  $t_0$  в другое, тоже стационарное  $t_c$ . При этом для упрощения задачи приходится вводить допущение, что в течение всего рассматриваемого процесса ( $\tau > 0$ ) коэффициент теплоотдачи остается постоянным. Такой процесс перехода тела из одного теплового состояния в другое принято называть переходным.

На рис. 1 показаны полученная посредством математического моделирования зависимость значения показателя тепловой инерции  $\epsilon$  миниатюрного проволочного термопреобразователя (характерный размер – 8 мкм) от условий теплообмена ПИП и значение  $\epsilon$  при отсутствии вынужденной конвекции. Как видно из рисунка, в зависимости от условий теплообмена одного и того же ПИП значение  $\epsilon$  может изменяться на порядок. Поэтому применение косвенных (электрических и других) тестовых воздействий и для нормирования, и контроля динамических характеристик (ДХ) термопреобразователей в большинстве случаев чревато получением не адекватных действительности результатов.

В соответствии с ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 [3, 4], прямые методы предпочтительны при определении ДХ. Поэтому возможность и достижимая точность воспроизведения физических моделей тестовых воздействий с заданной точностью может являться определяющим фактором при выборе номенклатуры нормируемых ДХ.

С точки зрения экспериментального определения, переходная характеристика является одной из наиболее удобных динамических характеристик [1]. При подаче на вход СИ испытательного ступенчатого сигнала единичного размера  $1(t)$  можно с помощью прямых измерений выходного сигнала получить отсчеты (или запись) переходной характеристики  $h(t)$ .

Для проведения экспериментальных исследований по определению динамических характери-

стик термопреобразователей предложена и реализована следующая методика. При помощи аэродинамической трубы (АТ) создается стратифицированный двухслойный поток воздуха с заданными значениями скоростей и температур  $V_1 T_1$  и  $V_2 T_2$  соответственно. Исследуемый термопреобразователь помещают в рабочую часть ядра потока АТ, при помощи автоматического координатного устройства скачкообразно перемещают термопреобразователь из одной страты среды в другую (рис. 2) и регистрируют переходную функцию термопреобразователя.

Технические характеристики использованной АТ следующие:

|  |               |
|--|---------------|
| Форма рабочей зоны                                 | прямоугольная |
| Диапазон скорости потока, м/с                      | от 0,5 до 10  |
| Диапазон температур потока, °С                     | от 20 до 80   |
| Переходная зона между двумя потоками, мм, не более | 2             |

Для того чтобы переходная область между стратами не влияла на результат измерения, время перемещения датчика из одного квазистационарного состояния в другое не должно превышать 0,1 предполагаемой постоянной времени исследуемого датчика. При апробации предложенной методики для перемещения датчика использовалось координатное устройство, обеспечивающее время перемещения не более 10 мс, что позволяет исследовать датчики, ожидаемая постоянная времени которых 0,1 с и более.

Для практической проверки разработанной методики исследована зависимость постоянной времени термисторного термоанемометра постоянной температуры от скорости окружающего потока. В качестве чувствительного элемента датчика исследуемого анемометра использован термистор фирмы “EPCOS” модель G540. Согласно технической документации на этот элемент, характеристикой тепловой инерции является постоянная времени  $\tau$ . При скорости окружающего потока  $v = 0$  нормированное значение составляет 3 с. Зависимость  $\tau(v)$  не нормирована. При использовании датчика в большинстве технологических процессов

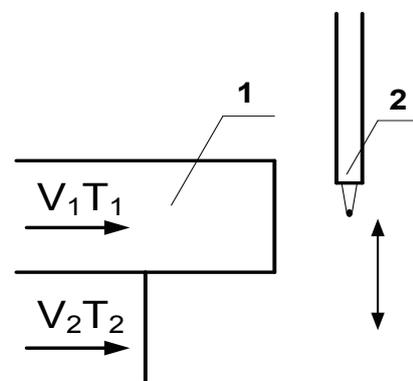


Рис. 2. Схема определения динамических характеристик термопреобразователей: 1 – стратифицированный поток воздуха с заданными значениями скорости  $V$  для каждого слоя; 2 – исследуемый датчик

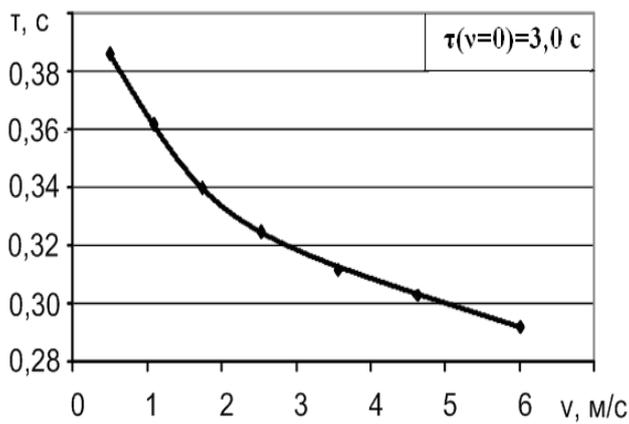


Рис. 3. Экспериментальная зависимость инерционных свойств термопреобразователя от условий теплообмена

$v \neq 0$ . Поэтому фактическая постоянная времени отлична от паспортной и должна быть определена экспериментально для конкретных условий работы.

Значение разности между скоростями слоев потока устанавливалось равным 10 % от средней скорости (значение изменения скорости, характерное для большинства технологических процессов). Постоянная времени  $\tau$  определялась как момент времени, в который переходной процесс диссипирует в  $e$  раз ( $e$  — число Эйлера).

В результате экспериментальных исследований  $\tau(v)$ , проведенных в диапазоне скоростей от 0,5 до 6 м/с, установлено, что в условиях вынужденной конвекции постоянная времени исследуемого первичного преобразователя в значительной мере отличается от паспортной (рис. 3). Это подтверждает необходимость определения инерционных свойств

термопреобразователей для конкретных динамических условий эксплуатации.

### Выводы

1. Предложена методика динамической градуировки СИ скорости и температуры в динамических условиях эксплуатации. Выполнена экспериментальная апробация предложенной методики.

2. Обоснована возможность проведения динамической градуировки проволочных, термисторных, пленочных термоанемометров, термопар и термометров сопротивления с постоянной времени 0,1 с и более.

### Список литературы

1. Грановский В.А. Динамические измерения: основы метрологического обеспечения / В. А. Грановский. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1984. — 224 с.
2. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры / Н.А. Ярышев. — 2-е изд., перераб. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1990. — 256 с.
3. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань: ДСТУ ГОСТ 8.009:2008. — [Чинний від 2008-10-01]. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 38 с.
4. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормування і визначення динамічних характеристик аналогових засобів вимірювань. Основні положення: ДСТУ ГОСТ 8.256:2008. — [Чинний від 2008-10-01]. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 9 с.