

## РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Романченко А.Ф.(romanchenko@rambler.ru), Кудрин А.Н.

Уфимский технологический институт сервиса

Уровень внедрения средств измерений в производственную практику во многом зависит от их функциональных возможностей, т.е. от возможности контролировать как можно большее число входных воздействий различного физического характера, с последующей обработкой результатов измерений на базе микропроцессорной техники.

Применение термоанемометров [1] перспективно не только для измерения скорости движения или расхода газа, но и для промежуточных преобразований различных неэлектрических параметров в электрический сигнал, в том числе при компенсационных методах измерения в системах автоматического управления и регулирования. Под термоанемометром обычно подразумевают термоанемометрический преобразователь, включающий входной пневматический преобразователь, приемные теплочувствительные и нагревательные элементы, а также выходную электрическую цепь. Входом такого преобразователя является массовый расход газа, а выходом — электрический сигнал в виде тока, сопротивления или других электрических параметров.

С целью повышения чувствительности, снижения расхода газа и потребляемой мощности, обеспечения требуемых выходных характеристик во входном канале термоанемометрического преобразователя можно использовать различные дросселирующие или управляющие элементы, изменяющие величину скорости или направление потока. Термоанемометрические преобразователи, у которых входные каналы содержат подобные конструктивные элементы, называются струйными термоанемометрами..

Пневмоэлектрические приборы контроля размеров с термоанемометрами представлены, в основном, устройствами, в которых пневматический сигнал вначале преобразуется в перемещение, а затем посредством электроконтактного, индукционного, фотоэлектрического или тензометрического датчика — в электрический сигнал.

На рис. 1 приведена схема пневмоэлектрического датчика размерного контроля с термоанемометрическим преобразователем (ТАП) струйного типа.

Терморезистор 3 установлен в такое место измерительной камеры 2, при котором поступающий через входное сопло 1 воздух его обтекает только частично.

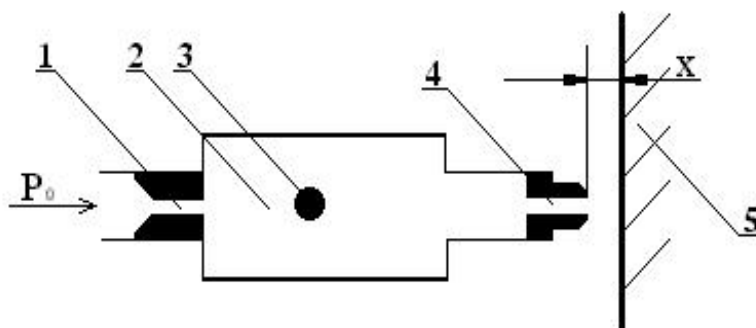


Рис. 1. Схема пневмоэлектрического датчика с терморезистором

Перемещение поверхности 5, вызывающее изменение зазора  $X$ , приводит к изменению расхода газа ( $P_0 = \text{const}$ ) через сопло 4, а следовательно, и к изменению скорости обдува терморезистора 3.

Недостатком струйных ТАП является необходимость введения в цепь преобразования (см. рис.2) звена, осуществляющего функциональную связь контролируемого изменения механической характеристики  $\Delta X$  в соответствующее изменение условий теплообмена  $\Delta H$  термоанемометрического элемента (ТЭ). А изменение условий теплообмена  $\Delta H$  ТЭ связано с соответствующим изменением среднеобъемной температуры  $\Delta T$ , а следовательно, и с его электрическим сопротивлением  $\Delta R_T$ .

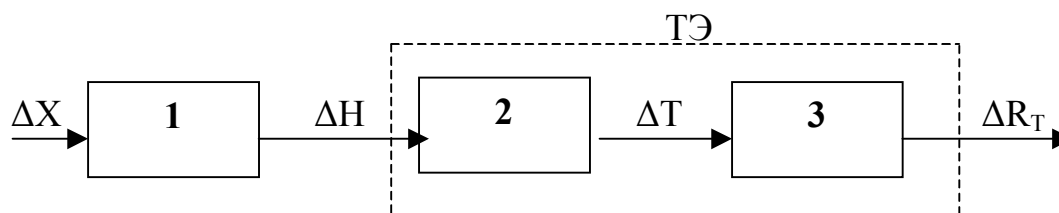


Рис. 2. Структурная схема ТАП при измерении параметра, непосредственно не связанного с коэффициентом рассеяния  $\Delta H$

Техническая сложность реализации звена 1 таких измерительных систем ограничивает их практическое применение.

При совершенствовании термоанемометрических методов измерений следует иметь в виду, что изменение среднеобъемной температуры ТЭ, вследствие изменения условий теплообмена, приводит к изменению не только его электрических характеристик (электрического сопротивления  $\Delta R_T$ ), но и изменяет геометрические размеры, характер действия внутренних сил, внутренние напряжения в теле ТЭ и т. д.

Использование взаимосвязи изменений среднеобъемной температуры  $\Delta T$  ТЭ с изменением геометрических и силовых факторов, действующих в конструкциях ТЭ, позволяет:

- предложить принципиально новые конструкции [2-8] термоанемометрических ТЭ, позволяющих согласовать малую инерционность с механической прочностью;
- расширить функциональные возможности [9,10] термоанемометрических методов измерений, за счет возможности использования ТЭ при измерении механических параметров (линейные перемещения, прогибы и т. д.).

Термоанемометрические датчики нестационарного энергетического состояния позволяют решить задачу измерения механических характеристик, например, перемещения элементов, без изменения конструктивных особенностей и схем включения в измерительную цепь.

Действительно, при организации нестационарного энергетического состояния ТЭ датчика в виде биметаллической пластины [7,8], частота  $f$  коммутации энергетического состояния зависит не только от значения коэффициента рассеяния  $H$  датчика, но и от пространственного положения  $\Delta l$  [9,10] элементов конструкции (ЭК) термоанемометрического датчика относительно ТЭ. При этом ТЭ периодически перемещается (прогибается), за счет импульсного поступления энергии от источника  $E$  через ключ  $Kл$  (см. рис. 3).

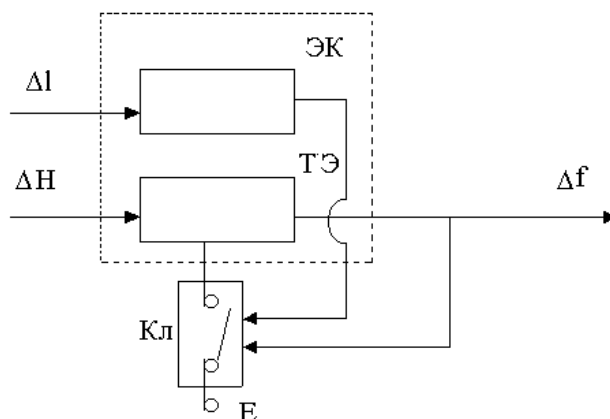


Рис. 3. Обобщенная функциональная схема ТАП с биметаллическим ТЭ

Перспективным является использование взаимосвязи изменения коэффициента рассеяния и линейного положения элементов конструкции ТЭ. Такие принципы организации измерительного процесса реализуют термоанемометрические методы с биметаллическими ТЭ [3-8].

Принципиальная схема термоанемометрического преобразователя линейного перемещения с термоанемометрическим датчиком нестационарного энергетического состояния представлена на рис.4.

Термочувствительный элемент в виде биметаллической пластины 1 закреплен на державке 2 основания 3.

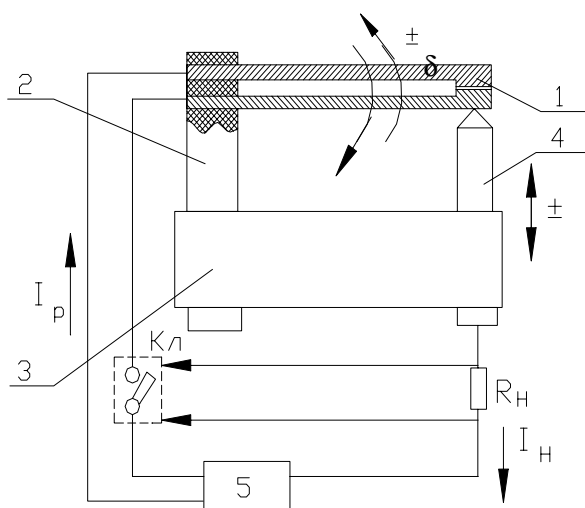


Рис.4. Принципиальная схема термоанемометрического преобразователя с биметаллическим ТЭ

Конец биметаллической пластины контактирует с токоподводом 4, который через сопротивление  $R_n$  соединен с источником питания 5. С источником питания соединена через ключ «Кл» и цепь биметаллической пластины 1.

Электрический ток  $I_p$ , протекающий в цепи биметаллической пластины 1, обеспечивает ее разогрев, а ток нагрузки  $I_n$  позволяет контролировать наличие контакта токоподвода 4 с биметаллической пластиной 1.

При импульсном подключении тока  $I_p$ , с помощью ключа «Кл», биметаллическая пластина 1 разогревается и начинает прогибаться. Величина прогиба  $\delta$  однозначно связана с температурой нагрева  $T$  биметаллической пластины.

При достижении нагрева пластины температурного значения  $T_1$  ток разогрева  $I_p$ , с помощью ключа «Кл», отключается и пластина начинает остывать. Достижение биметаллической пластиной положения контакта 4 при остывании осуществляется при температуре пластины  $T_2$ . В этом случае, электрическая цепь контакта 4 замыкается и ток нагрузки  $I_n$ , протекая через электрическое сопротивление  $R_n$ , подает сигнал на ключ «Кл» для замыкания цепи разогрева биметаллической пластины.

Очевидно, что частота колебаний пластины  $f_n$  будет зависеть от скорости ее остывания и разогрева, а следовательно, от условий теплообмена пластины 1 с окружающей средой и положения токоподвода 4 относительно пластины 1.

В реальных конструкциях биметаллический ТЭ может быть выполнен в виде П-образной биметаллической пластины (см. рис. 5), где две одинаковые биметаллические пластины 1 и 2 соединены между собой перемычкой 3.

При формировании математической модели процессов, протекающих в ТЭ при коммутации энергетического состояния, необходимо иметь в виду, что геометрические размеры и материал биметаллической пластины, как правило, известны.

Пластина прогревается внутренними источниками энергии, объемная плотность которых является функцией координаты  $X$  и времени  $t$ .

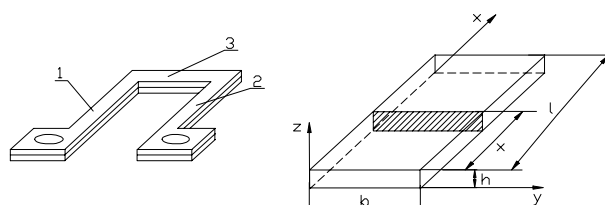


Рис.5. Принципиальная схема биметаллического ТЭ

На поверхности пластины происходит теплообмен с окружающей средой. Считая, что в пределах сечения пластины температура  $T$  не меняется, имеем следующее уравнение теплопроводности в частных производных для стержня с боковым теплообменом

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha \cdot u}{S} \cdot T + F(x, t) + \frac{\alpha^* \cdot u}{S} \cdot T_{cp.}, \quad (1)$$

где  $\alpha^*$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности стержня;  
 $u$  – периметр сечения;  
 $S$  – площадь сечения;  
 $F(x, t)$  – мощности источников энергии на единицу объема;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\rho$  – удельный вес;  
 $c$  – удельная теплоемкость;  
 $T_{cp.}$  – температура среды.

При достаточно массивных токоподводах можно допустить, что температура торцевых сечений стержня равна  $T_{cp.}$ , тогда граничные условия имеют вид:

$$T(0; t) = T(l; t) = T_{cp.}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина стержня.

Начальные условия принимаются в виде

$$T(x; 0) = T_{cp.}. \quad (3)$$

Для расчета выходных характеристик ТЭ с прямым нагревом постоянным током, решение уравнения (1) находится методом конечных разностей.

Разностная схема для вычисления температуры по ТЧЭ в любой момент времени

$$T_{i,j+1} = \frac{1}{\kappa_0} (T_{i-1,j} + T_{i+1,j}) + \left(1 - \frac{2}{\kappa_0}\right) \cdot T_{i,j} - K_2 (T_{i,j} - T_{cp.}) + K_1, \quad (4)$$

где

$$i = 1, 2 \dots N; j = 1, 2 \dots m - 1, m, m + 1 \dots;$$

$$t = \Delta t \cdot j; x = \Delta x \cdot i; l = N \cdot \Delta x;$$

$$T_{i,j} = T_{cp.}; T_{0,j} = T_{N,j} = T_{cp.};$$

где

$$K_0 = \frac{\Delta x^2 \cdot c \cdot \rho}{\lambda \cdot \Delta t} \text{ - параметр, характеризующий точность вычислений;}$$

$$K_1 = \frac{\Delta t \cdot r^*}{c \cdot \rho \cdot S} \cdot I_P^2 \text{ - коэффициент, характеризующий интенсивность}$$

нагрева ТЧЭ током разогрева  $I_P (r^* \text{ – удельное электрическое сопротивление});$

$$K_2 = \frac{U \cdot \Delta t}{S \cdot c \cdot \rho} \cdot \alpha^* \text{ - коэффициент, характеризующий теплообмен ТЭ с}$$

окружающей средой.

Уравнение в конечных разностях для вычисления перемещения конца ТЭ в любой момент времени имеют вид:

$$\delta_{j+1} = \sum_{i=1}^{N/2} K_3 (\Delta x)^2 \cdot \left(\frac{N}{2} - i\right) \cdot \left[\frac{T_{i,j} + T_{i-1,j}}{2} - T_{cp.}\right]; \quad (5)$$

$$\delta_{j=0} = 0.$$

В уравнении (5)  $K_3$  – биметаллический коэффициент.

Совокупность коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$  в уравнениях (4, 5) характеризует параметры ТЭ, условия его теплообмена с окружающей средой и интенсивность разогрева.

Сочетания конкретных значений коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$ , с учетом условий (2) и (3), определяют переходные характеристики прогиба  $\delta$  при нагреве и остывании пластины, т. е. функциональную зависимость  $\delta=F(t)$ .

Изменение времени остывания  $t_{ост}$  ТЭ в виде пластины, при неизменных условиях теплообмена с окружающей средой, за счет перемещения  $\Delta l$  токоподвода 4, приводит к изменению частоты выходного сигнала термоанемометрического датчика (см. рис. 6).

Таким образом, функциональные возможности термоанемометрических датчиков нестационарного энергетического состояния расширяются за счет обеспечения возможности измерения линейные перемещения элементов конструкции датчика.

С целью повышения стабильности колебаний ТЭ в виде пластины, чувствительности по изменению контролируемого параметра, часто необходимо стабилизировать время остывания  $t_{ост}$ . ( $t_{ост}=const$ ) за счет периодических тепловых воздействиях на пластину.

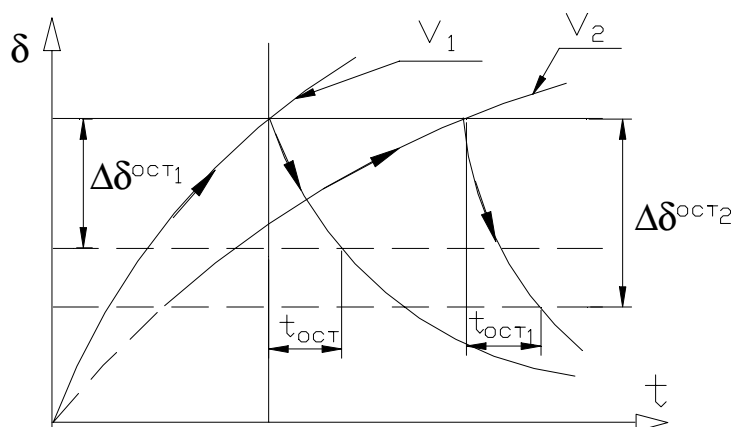


Рис. 6. Структура формирования выходного импульса прогиба  $\delta$  ТЭ при  $t_{ост}=const$

При измерении линейного положения токоподвода, приводящего к изменению  $\delta_{ост}$ , часто можно обеспечивать установку “нулевой” (начальной) частоты колебания пластины, а также компенсацию температурных погрешностей.

Алгоритм расчета выходных характеристик термоанемометрических преобразователей механических перемещений, на базе термоанемометрических датчиков нестационарного энергетического состояния, представлен на рис.7.

О возможностях термоанемометрических датчиков при измерении линейных перемещений можно судить на примере применения биметаллической пластины с размерами (20 – 0.6 – 0.5) мм, на которой достигается частота коммутации  $f = 1000$  Гц в спокойной воздушной среде. Чувствительность датчика по перемещению механического элемента (токоподвода), при токе разогрева  $J = 2,9$  ампер, составляет  $S = 50$  Гц/мм. За счет выбора геометрических размеров, тока разогрева, условий теплообмена обеспечивается требуемая чувствительность по контролируемому механическому параметру.

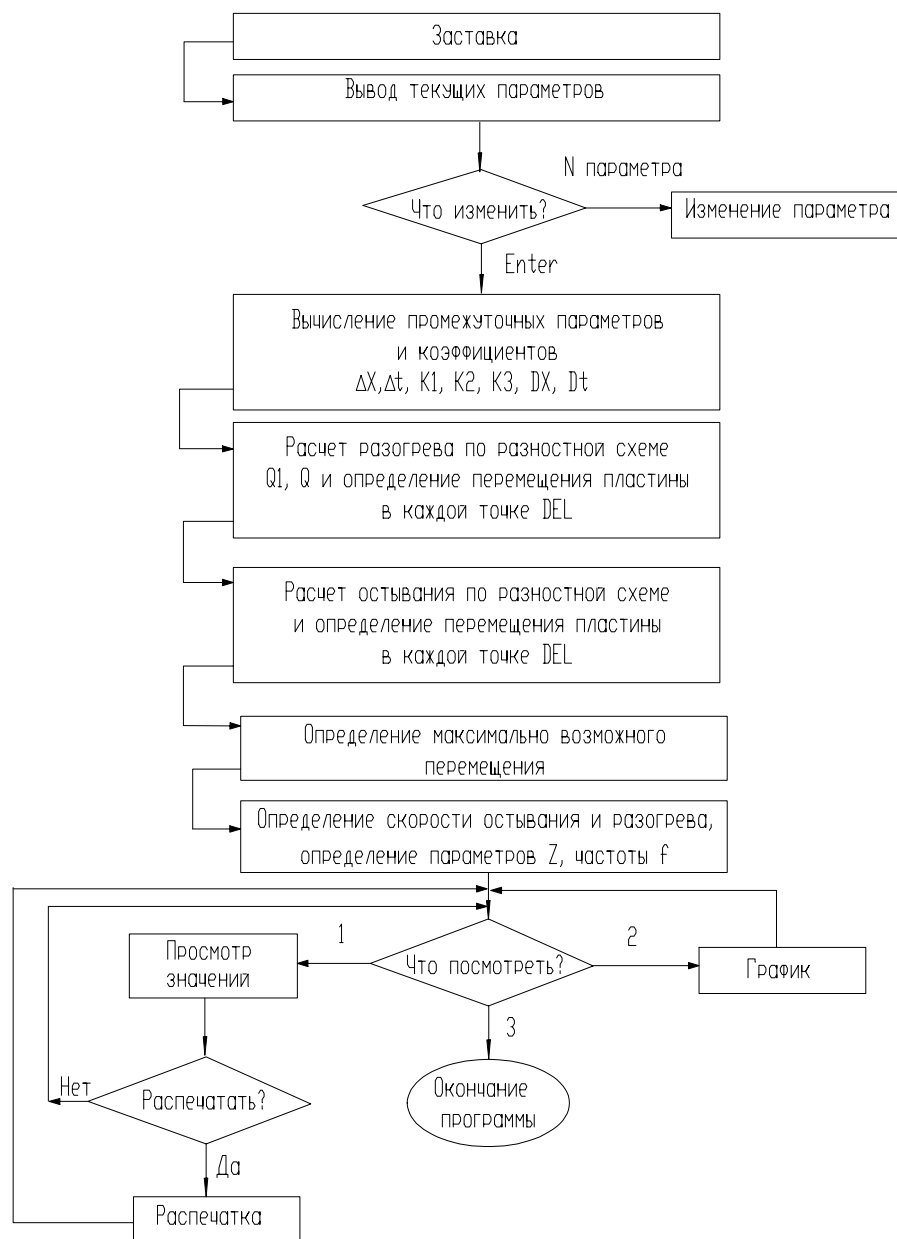


Рис.7. Алгоритм расчета выходных характеристик термоанемометрических преобразователей линейных перемещений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ференц В.А. Полупроводниковые струйные термоанемометры. М.: Энергия, 1972, 113 с.
2. Романченко А.Ф., Ахметов Р.Р., Вежнин В.П. Термоанемометрический преобразователь А.С.638896 (СССР), 1978, Б.И. № 47.
3. Романченко А.Ф., Ахметов Р.Р., Вежнин В.П. Термоанемометрический преобразователь. А.С.634211 (СССР), 1978, Б.И. № 43.
4. Романченко А.Ф., Ахметов Р.Р. Термоанемометрический преобразователь А.С.636537 (СССР), 1978, Б.И. № 45.
5. Романченко А.Ф., Ахметов Р.Р., Вежнин В.П. Термоанемометрический преобразователь. А.С.634211 (СССР), 1978, Б.И. № 43.

6. Романченко А.Ф., Ахметов Р.Р. Термоанемометрический преобразователь. А.С.645087 (СССР), 1979, Б.И. № 4.
7. Романченко А.Ф., Деньгина А.А., Данилов В.И., Игбаев Ч.Р., Сорокин В.А. Термоанемометрический датчик. А.С.775701 (СССР), 1980, Б.И. № 40.
8. Романченко А.Ф., Клишо А.Р. Термоанемометрический датчик. А.С.909641 (СССР), 1982, Б.И. № 8.
9. Романченко А.Ф., Кудрин А.Н. О перспективах расширения функциональных возможностей термоанемометрических методов измерений //Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления «Датчик 2000» /Материалы 12 науч.тех.конф., Москва, МГИЭМ, 2000., С. 56.
10. Романченко А.Ф. Информационно-измерительные системы нестационарного энергетического состояния. Уфа, 2000, 174 С.