С.А.Кочарян, Г.Н.Солопченко
S.A.Kocharjan, G.N.Solopchenko

# МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

# METROLOGICAL ASSURANCE OF DYNAMIC TEMPERATURE MEASUREMENTS

Санкт-Петербург, Россия, ВНИИМ им. Д.И.Менделеева,
Санкт-Петербургский государственный технический университет

Обсуждаются методы и средства метрологического обеспечения измерения температуры в динамическом режиме, а также методики обработки данных. Предлагается способ уменьшения погрешностей, вызванных несовершенством тестовых испытательных сигналов. Описаны аналоговые средства повышения быстродействия датчиков переменной температуры.

The methods and means for metrological assurance of the temperature measurements in dynamical regime are described. The method of the error decrease which arises from not ideal test signal is proposed. The analogue means for decreasing of the temperature sensor responce time are presented.

Для метрологического обеспечения измерений быстропеременной температуры в России существует государственный специальный эталон ГЭТ 116-78 и поверочная схема, установленная ГОСТ 8.312-78. Этот эталон и стандарт разработан и изготовлен в 1978 году группой сотрудников ВНИИМ им. Д.И.Менделеева под руководством проф. А.Н.Гордова. С помощью этого эталона определяется полная динамическая характеристика малогабаритного малоинерционного датчика переменной температуры, который затем служит для определения полных динамических характеристик рабочих датчиков. Эталон воспроизводит прямоугольный тестовый сигнал переменной температуры водного потока следующим образом.

В направлении сверху вниз через 8 отверстий, разделенных тонкими перегородками, изливаются два потока воды с температурой $\mathbf{t_1^o}$ и $\mathbf{t_2^o}$. Температура потоков измеряется образцовыми термометрами с абсолютной погрешностью в $\mathbf{0{,}1^o C}$. Эти потоки чередуются и периодически попадают на чувствительный элемент малоинерционного образцового датчика температуры, который вращается под этими потоками, попадая попеременно в потоки с разными температурами. Чувствительный элемент образцового малоинерционного датчика представляет собой горячий спай термопары, диаметр которого равен примерно 0,2 мм. Холодный спай этой термопары расположен в массивном теле датчика, его постоянная времени намного больше постоянной времени горячего спая и не успевает реагировать на быстрые изменения температуры потоков, пересекаемых датчиком.

Таким образом за один оборот датчика на его выходе фиксируется 8 переходных процессов в виде выходного сигнала напряжения, который после усиления попадает на вход АЦП и затем - в память компьютера, задачей которого является математическая обработка этого сигнала с целью определения параметров **K** и **T** одной из приведенных выше полных динамических характеристик образцового датчика. Измерения мгновенных значений выходного сигнала выполняются с частотой 10000 1/с, то есть с дискретностью 0.0001 с. Количество отсчетов дискретных значений каждой переходной характеристики: от 100 до 150.

Амплитуда периодического прямоугольного сигнала температуры, действующего на входе датчика, может регулироваться в пределах от 0.1°С до 3.0°С. В таком узком диапазоне изменения температуры статическая градуировочная характеристика датчика может считаться линейной. Скорость вращения датчика регулируется в диапазоне от 8 об/мин до 80 об/мин, за счет чего частота прямоугольных импульсов на входе датчика изменяется в пределах от 1 Гц до 10 Гц.

Из-за частичного перемешивания, происходящего на границе потоков, из-за конечных размеров горячего спая, переноса частиц воды из потока в поток, а также из-за конечной скорости перемещения датчика фронты прямоугольных импульсов температуры неидеальны. Искажение фронта сигнала примерно эквивалентно действию апериодического звена первого порядка. Инерционность электронного усилителя пренебрежимо мала по сравнению с инерционностью датчика, и ее влияние не учитывается.

На обработку поступает весь выходной сигнал датчика температуры. Методами идентификации определяются параметры динамического звена, реакция которого на тестовый

**@2002, электронная версия подготовлена ЗАО АВТЭКС Санкт-Петербург, http://www.autex.spb.ru**

сигнал записывается в предположении идеальной формы тестового входного сигнала. Затем из полученной экспериментальной модели исключаются мешающие параметры, обязанные своим появлением несовершенству тестового сигнала.

Если математическая модель датчика температуры описывается характеристиками

$$H(t)=K\left(1-e^{-\frac{t}{T}}\right),\ h(t)=\frac{K}{T}e^{-\frac{t}{T}},\ K(j\omega)=\frac{K}{1+j\omega T},\ K(p)=\frac{K}{1+Tp},\ A(\omega)=\frac{K}{\sqrt{1+T^2p^2}},$$

где **K** - статический коэффициент преобразования, **T** - постоянная времени, то выходной сигнал датчика с несовершенным входным сигналом может быть описан, как отклик на идеальный ступенчатый перепад динамического звена с передаточной функцией

$$K_1(p)=\frac{K}{(1+Tp)(1+T_1p)},$$

где $T_1$ - постоянная времени некоторого фиктивного звена, описывающая искажение фронта входного сигнала.

Этой передаточной функции соответствуют:

- переходная характеристика

$$H(t)=\frac{K}{T-T_1}\cdot\int_0^t\left(T\cdot\exp\left(-\frac{t}{T}\right)-T_1\cdot\exp\left(-\frac{t}{T_1}\right)\right)\cdot dt, \qquad (1)$$

- квадрат амплитудно-частотной характеристики

$$A^2(\omega)=\left|K(j\omega)\right|^2=\frac{K^2}{(1+T^2\omega^2)(1+T_1^2\omega^2)}. \qquad (2)$$

В докладе приводятся результаты идентификации параметров этих звеньев. Идентификация параметров по переходной характеристике осуществлялась методом Ньютона-Рафсона, идентификация по квадрату АЧХ - методом дробно-рациональной аппроксимации с необходимым предварительным преобразованием входного сигнала по схеме: численное дифференцирование → преобразование Фурье → возведение в квадрат. Полученные результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Статистические характеристики оценок параметров динамических характеристик эталонного датчика температуры

| Метод определения параметра | Ньютона - Рафсона | | | Дробно-рациональная аппроксимация АЧХ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Параметр / Характеристика | **K** В/град | **T** с | $T_1$ с | **K** В/град | **T** с | $T_1$ с |
| Среднее арифметическое | 4,584 | 0.00281 | 0.00089 | 4,583 | 0.0027 | 0.00096 |
| СКО | 0,016 | 0.00019 | 0.00028 | 0.0165 | 0.00022 | 0.00027 |
| Границы интервала неопределенности (доверительного интервала Q=0.95) | 4,57; 4,587 | 0.002728; 0.002888 | 0.0007; 0.001 | 4,576; 4,59 | 0.002608; 0.00279 | 0.00085; 0.00107 |
| Характеристика относительной погрешности | < 1,5% | < 3% | < 13,5% | 1,5% | < 3,5% | < 12% |

Из этой таблицы очевидна близость результатов и действие коэффициента $T_1$, который подлежит исключению, как мешающий, вызванный несовершенством фронтов тестового сигнала.

Таким образом на специальном эталоне определяется динамическая метрологическая характеристика образцового малогабаритного датчика. Для передачи единиц мгновенных значений и соответствующих моментов времени вниз, на одну ступень поверочной схемы во ВНИИМ разработан, создан и функционирует большой гидрофизический бассейн с затопленной струей, подогретой по сравнению с температурой воды бассейна. В определенном месте этой струи, размер

которого не превышает нескольких литров, образуется турбулентность и соответствующие изменения температуры в виде стационарного случайного процесса. В этот объем кроме малоинерционного малогабаритного образцового датчика температуры может быть помещен рабочий датчик температуры, и иногда даже не один. Находясь в одном и том же поле действия указанной стационарной турбулентности и имея на входе случайный процесс с одной и той же характеристикой, на выходе эти датчики имеют различные процессы, с неодинаковыми характеристиками. Пусть сигнал на выходе рабочего датчика температуры есть **y(t)**, его преобразование Фурье - **y(jω)**, спектральная плотность - $S_y(\omega)$. Пусть сигнал на выходе образцового датчика $y_0(t)$, его преобразование Фурье - $y_0(j\omega)$, спектральная плотность - $S_{y0}(\omega)$. Пусть также комплексные частотные характеристики рабочего и образцового датчиков суть соответственно **K(jω)** и $K_0(j\omega)$. Тогда

$$K(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{y_0(j\omega)} \cdot K_0(j\omega) \quad \text{и} \quad A^2(\omega) = |K(j\omega)|^2 = \frac{S_y(\omega)}{S_{y0}(\omega)} \cdot |K_0(j\omega)|^2 .$$

Применяя к этим выражениям дробно-рациональную аппроксимацию, получим значения параметров **K** и **T** рабочего датчика.

С целью уменьшения постоянной времени датчика в докладе предлагается включить на его выходе вместо простого линейного усилителя усилитель с отрицательной обратной связью, которая обладает комплексной частотной характеристикой, идентичной КЧХ датчика. Тогда передаточная функция указанного усилителя имеет вид

$$K'_{УС} = \frac{K_0}{1 + K_0 \cdot \beta(p)},$$

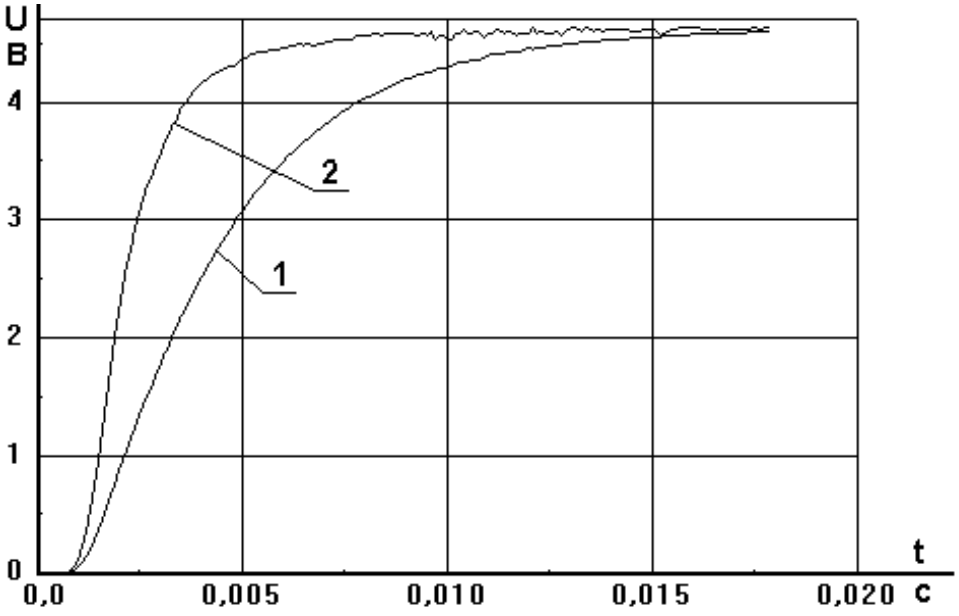
где $K_0$ - коэффициент усиления усилителя без обратной связи, $\beta(p) = \dfrac{K}{1 + Tp}$ - передаточная функция отрицательной обратной связи, параметры которой **K** и **T** - суть параметры, определенные по результатам идентификации датчика температуры.

После подстановки и последующего упрощения получим:

$$K'_{УС} = \frac{K_0}{1 + K_0 \cdot \beta(p)} = \frac{K_0(1 + Tp)}{1 + K \cdot K_0 + Tp} = \frac{1 + Tp}{K + (1 + Tp)/K_0}.$$

При $K_0 \to \infty$ $K'_{УС} = \dfrac{1 + Tp}{K}$, то есть этот коэффициент будет обратен передаточной функции датчика, что было бы замечательно, если бы эта задача в принципе была бы хорошо обусловленной. Однако в силу плохой обусловности подобного рода задач это далеко не так, и поэтому для получения устойчивого решения приходится выполнять регуляризацию, которая в данном благоприятном случае сводится лишь к регулированию коэффициента усиления $K_0$.

Для проверки данного факта было выполнено математическое моделирование такого устройства. Результат моделирования представлен на рисунке. Удовлетворительный результат был получен при коэффициенте усиления $K_0 = 4{,}5$. При дальнейшем увеличении коэффициента усиления устойчивость решения начинает пропадать. Из рисунка следует, что таким образом быстродействие последовательного соединения датчика температуры и усилителя с описанной обратной связью может быть повышено примерно в два раза.




Переходные процессы до (кривая 1) и после (кривая 2) коррекции

Таким образом, в докладе показана двухступенчатая иерархическая схема метрологического обеспечения измерений быстропеременной температуры турбулентных водных потоков с передачей единиц измерения температуры к рабочему датчику через образцовый малогабаритный малоинерционный датчик в гидрофизическом бассейне с затопленной струей.