

# МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА MICROPROCESSOR SYSTEMS

УДК 551.508.5

## Микропроцессорный комплекс определения скорости и направления воздушного потока с чувствительным элементом на основе горячего цилиндра

*А.П. Панов, А.Н. Серов, И.Н. Мочегов*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

## Microprocessor Complex with a Sensitive Element Based on Hot Cylinder for Speed and Direction of Airflow Determining

*A.P. Panov, A.N. Serov, I.N. Mochegov*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow*

Предложен вариант построения микропроцессорного комплекса определения скорости и направления воздушного потока. Приведена структура чувствительного элемента на основе горячего цилиндра. Рассмотрено распределение температуры по поверхности нагретого чувствительного элемента при поперечном обтекании воздушным потоком. Приведены результаты исследования на точность и быстродействие микропроцессорного комплекса. Указаны дальнейшие пути повышения основных характеристик устройства.

*Ключевые слова:* микропроцессорный комплекс; воздушный поток; горячий цилиндр.

A variant of the microprocessor complex construction for speed and air-flow direction determining has been suggested. The structure of the sensor element based on the hot cylinder has been presented. The temperature distribution over the heated surface of the sensor element with cross airflow has been considered. The results of the studies on the accuracy and speed of the microprocessor complex have been presented. Further ways to improve the basic characteristics of the device have been indicated.

*Keywords:* microprocessor; air flow; wind; hot cylinder.

**Введение.** Для работы ряда систем управления требуется информация о продольной и поперечной составляющих скорости воздушного потока (ветра) [1]. Устройства,

обеспечивающие измерение скорости и направления воздушного потока, основываются на различных физических явлениях и представляют собой разные конструкции. Основные методы измерения можно разделить на пять групп [2]:

- методы, основанные на использовании энергии потока (переменный перепад давления; измерение крутящего момента);
- тепловые методы, в которых измеряется температура нагретого тела, помещаемого в поток, и температура потока, нагреваемого нагревателем;
- методы, основанные на введении в поток невесомой метки и измерении ее скорости (впрыскивание порции вещества иного состава);
- акустические методы;
- оптические методы.

В настоящей работе для определения скорости и направления воздушного потока предлагается использовать тепловой метод. Устройства, основанные на данном методе, имеют ряд преимуществ: отсутствуют подвижные части, они устойчивы к внешним вибрациям и характеризуются относительно простой конструкцией.

**Принципы функционирования анемометров с чувствительным элементом на основе нагретого тела.** При применении теплового метода определения скорости воздушного потока наиболее широкое применение получили устройства с чувствительным элементом на основе горячей нити. Существуют два основных способа измерения скорости воздушного потока с помощью подобных устройств [3]: 1) поддержание постоянного тока через металлическую нить и измерение скорости воздушного потока в зависимости от изменения температуры чувствительного элемента; 2) при управлении током через нить поддержание ее температуры постоянной и определение скорости воздуха по мощности, затрачиваемой на нагрев чувствительного элемента. В обоих случаях металлическая нить применяется одновременно в качестве нагревателя и датчика температуры. Измерение температуры основано на зависимости между сопротивлением металла и его температурой, измерение скорости воздушного потока – на эффекте изменения коэффициента теплоотдачи при обтекании нагретого тела воздушным потоком. Связь между температурой нагревателя, коэффициентом теплоотдачи и количеством энергии, затрачиваемой на поддержание постоянной температуры тела, находится из уравнения теплового баланса и определяется формулой [4]:

$$T_y = \frac{P}{SK_{\text{тп}}},$$

где  $T_y = |T_n - T_{o.c}|$  – установившаяся разница между температурой окружающей среды и нагревателя при заданной мощности нагревателя;  $T_n$  – температура нагревателя;  $T_{o.c}$  – температура окружающей среды;  $S$  – площадь нагревателя;  $K_{\text{тп}}$  – коэффициент теплопередачи;  $P$  – количество теплоты, выделяемое нагревателем.

Основным недостатком устройств, построенных с использованием чувствительного элемента на основе горячей нити, является невозможность определения направления воздушного потока.

**Устройство микропроцессорного комплекса.** Для определения скорости и направления воздушного потока разработан микропроцессорный комплекс с использованием чувствительного элемента на основе горячего цилиндра. Структурная схема микропроцессорного комплекса приведена на рис. 1.

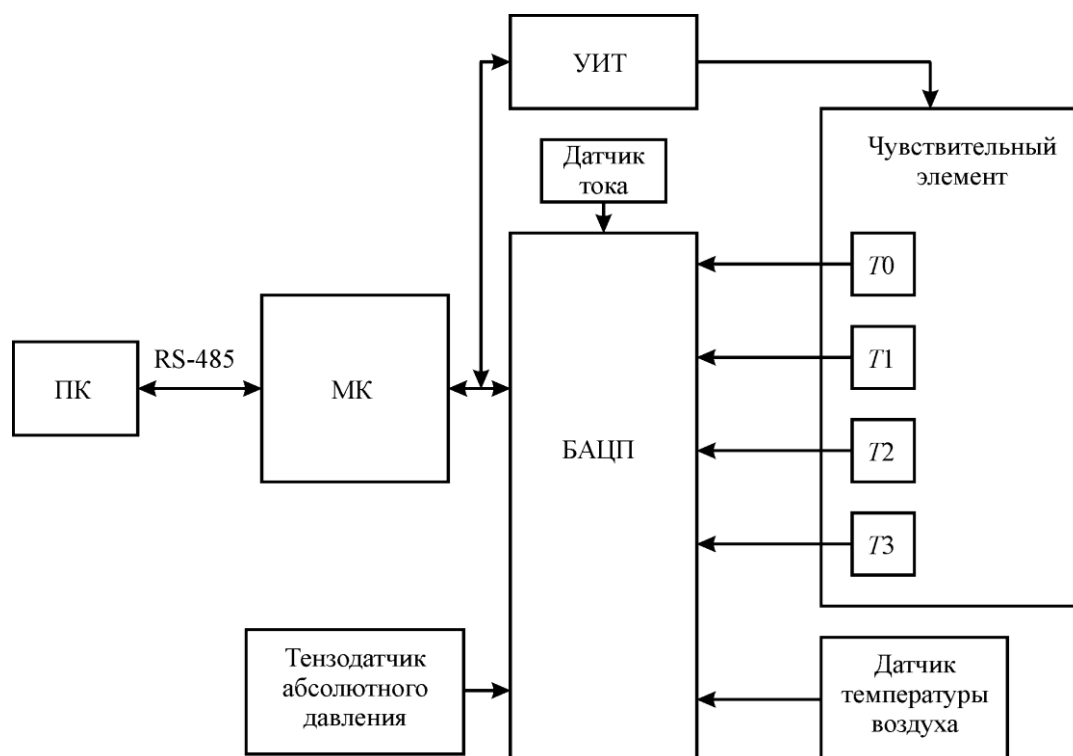


Рис.1. Структурная схема микропроцессорного комплекса

Основными элементами микропроцессорного комплекса являются чувствительный элемент, в состав которого входят датчики температуры  $T_0$  –  $T_3$ ; тензодатчик абсолютного давления; датчик температуры воздуха; блок аналого-цифрового преобразования (БАЦП); управляемый источник тока (УИТ); датчик тока; микроконтроллер (МК); персональный компьютер (ПК).

Чувствительный элемент – это цилиндр, на который нанесен меандр из термочувствительного материала (меди). Меандр представляет собой четыре одинаковых, последовательно соединенных датчика температуры  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , которые позволяют определить температуру поверхности соответствующих секторов цилиндра. Структура чувствительного элемента приведена на рис. 2.

При работе чувствительный элемент нагревается до температуры, превышающей окружающую температуру на  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это обеспечивает как повышение чувствительности датчиков температуры, так и защиту его от обледенения при работе на низких температурах. При отсутствии воздушного потока градиент температуры однороден по всей поверхности цилиндра и все датчики имеют одинаковое сопротивление. При появлении воздушного потока происходит перераспределение тепла и, как следствие, изменяются показания датчиков. Применение цилиндра в качестве чувствительного элемента обеспечивает симметричную картину распределения температуры по его

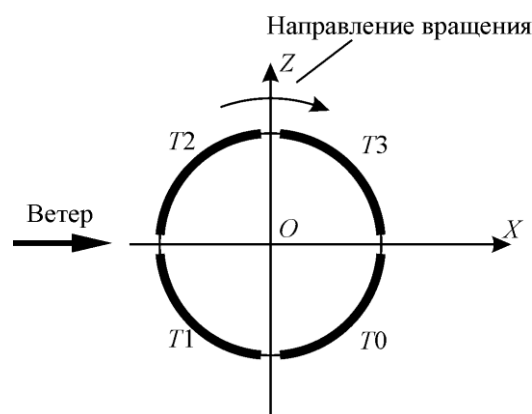


Рис.2. Структура чувствительного элемента

поверхности с минимальной температурой в точке, направленной навстречу воздушному потоку. Сигналы с датчиков температуры, расположенных по окружности цилиндра, определяют направление воздушного потока. Количество энергии, необходимое для поддержания требуемой температуры, используется для определения скорости воздушного потока в окрестности датчика.

Поскольку коэффициент теплоотдачи чувствительного элемента зависит не только от скорости воздушного потока, но и от атмосферного давления и окружающей температуры, в состав микропроцессорного комплекса входят тензодатчик абсолютного давления и датчик температуры воздуха. Для возможности коррекции показаний датчики расположены на расстоянии от горячего цилиндра.

УИТ состоит из цифроаналогового преобразователя и усилителя мощности. Данный блок задает ток через терморезисторы, что позволяет поддерживать постоянный перегрев измерительного цилиндра. Точное значение протекающего тока определяет датчик тока, показания которого поступают на БАЦП. Этот блок служит для преобразования аналогового сигнала с датчиков температуры  $T_0 - T_3$ , датчика тока и датчика температуры в двоичный код. Результаты преобразования поступают в МК для последующей обработки. В состав БАЦП входят источники опорных напряжений и многофункциональные аналого-цифровые преобразователи (АЦП). В качестве 24-разрядного АЦП применяется микросхема AD7190 (изготовитель Analog Devices), имеющая такие функциональные возможности, как встроенный инструментальный усилитель с программируемым коэффициентом усиления и блок цифровой фильтрации. Микросхема AD7190 позволяет существенно уменьшить размеры устройства, а также обеспечивает легкий переход на другой тип датчиков температуры  $T_0 - T_3$ . Управляющие входы АЦП и УИТ объединены в общую шину для передачи информации по интерфейсу SPI.

МК отвечает за обработку данных, полученных с датчиков, выдачу управляющих команд на УИТ, вычисление скорости и направления воздуха, а также передает результаты измерений на ПК. МК позволяет использовать цифровую фильтрацию сигналов, полученных с датчиков, а также применять различные алгоритмы для вычисления скорости и направления воздушного потока.

**Экспериментальное исследование чувствительного элемента.** Для определения зависимости распределения температуры по поверхности чувствительного элемента проведена его продувка при различных углах атаки набегающего потока воздуха. Направление вращения датчика во время проверки указано на рис. 2. Результаты данного

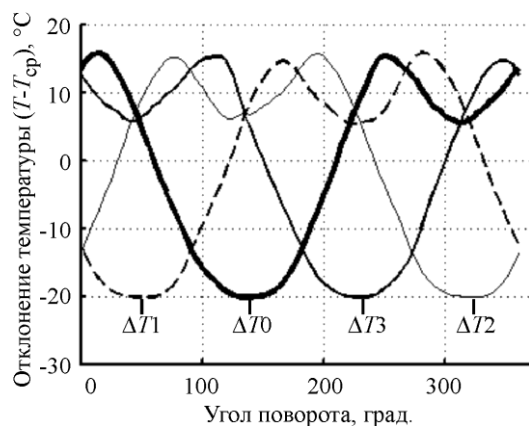


Рис.3. Распределение температуры по поверхности при поперечном обтекании горячего цилиндра

исследования представлены на рис. 3. Поскольку средняя температура цилиндра поддерживается постоянной и не зависит от направления ветра, на рисунке изображено отклонение показаний датчиков температуры  $T_0 - T_3$  от среднего значения.

Рассмотрим результаты на примере датчика температуры  $T_0$ . Наименьшую температуру он показывает при угле поворота чувствительного элемента на  $135^\circ$ , что соответствует лобовому столкновению центра датчика  $T_0$  с потоком воздуха (см. рис. 2). В окрестности от этой точки, составляющей  $\pm 115^\circ$ , температура воз-

растает по параболическому закону. При повороте чувствительного элемента на больший угол показания датчика вновь начинают убывать (см. рис. 3, участок  $[250^\circ; 315^\circ]$ ). Данный эффект обусловлен срывом воздушного потока и, как следствие, увеличением теплоотдачи в зоне турбулентного течения. Изменение закона распределения температуры в зоне турбулентного течения оказывает существенное влияние на точность определения направления ветра. Для повышения точности следует либо увеличивать число измерительных элементов на поверхности цилиндра, либо выравнивать воздушный поток с помощью внешнего обтекателя.

Приведем соответствующие значения скорости ветра и мощности, затрачиваемой на поддержание заданного перегрева чувствительного элемента:

| Мощность, Вт | Скорость ветра, м/с |
|--------------|---------------------|
| 1,508.....   | 0                   |
| 4,934.....   | 6                   |
| 5,115.....   | 6,5                 |
| 5,328.....   | 7                   |
| 5,543.....   | 7,5                 |

Данная зависимость аппроксимируется с необходимой точностью полиномом второго порядка, что позволяет проводить калибровку чувствительного элемента по трем точкам.

На основе полученных данных разработан алгоритм определения направления и скорости воздушного потока, результат работы которого представлен на рис. 4.

Таким образом, среднее квадратичное ошибки определения направления ветра составляет  $3^\circ$ ; максимальная ошибка измерения модуля скорости ветра не превышает  $0,3$  м/с; время включения (прогрева) составляет 3 мин; переходной процесс при резком изменении скорости воздушного потока от 0 до 7 м/с занимает 8 с.

**Вывод.** В ходе выполнения работы рассмотрены основные элементы микропроцессорного комплекса определения скорости и направления воздушного потока. Проведенные исследования показали принципиальную возможность построения датчика воздушного потока с чувствительным элементом на основе горячего цилиндра. Установлено, что для повышения точности определения направления ветра необходимо увеличивать число датчиков температуры на поверхности измерительного элемента либо проводить исследования по поиску оптимальной формы обтекателя. Наличие цифрового выхода в полученном устройстве позволяет обеспечить сопряжение микропроцессорного комплекса с различными системами управления без применения дополнительных преобразователей.

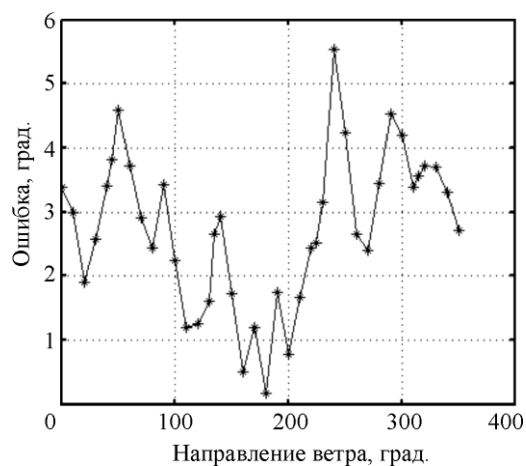


Рис. 4. Зависимость ошибки определения направления ветра от угла поворота датчика

### Литература

1. Серов А.Н., Панов А.П., Мочегов И.Н. Особенности построения датчиков ветра, работающих в составе объектов специального назначения // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2014. – №12. – Ч. 2. – С. 163–172.

2. **Шкундин С.З., Кремлева О.А., Иванников А.Л.** Состояние и перспективы развития анемометрии в угольной промышленности. – URL: [http://www.sirsensor.ru/index.php?P=c\\_art\\_3](http://www.sirsensor.ru/index.php?P=c_art_3) (дата обращения: 08.12.2015).
3. **Прандтль Л.** Гидроаэромеханика. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
4. **Кремлевский П.П.** Расходомеры и счетчики количества веществ. Кн. 2. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.

Статья поступила  
18 декабря 2015 г.

**Панов Андрей Павлович** – аспирант кафедры вычислительной техники МИЭТ, инженер-электроник НИИ вычислительных систем и систем управления (НИИ ВС и СУ) МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование систем измерения состояния атмосферы. **E-mail: duha\_v@mail.ru**

**Серов Андрей Николаевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ ВС и СУ МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование специализированных вычислительных устройств и систем управления объектами специального назначения.

**Мочегов Илья Николаевич** – аспирант кафедры инженерной графики МИЭТ. *Область научных интересов:* методология проектирования систем измерения параметров среды, компьютерное моделирование физических процессов.

### **Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»**

Полные тексты статей журнала с 2009 по 2013 гг. доступны на сайте  
Научной электронной библиотеки: [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)