

УДК 533.6.011.32

**Д.Н. Кузнецов (канд. техн. наук, доц.), В.Н. Лебедев (зав. лаб.),
В.В. Перебейнос (студент)**

ДонНТУ, кафедра «Электронная техника»

ДонНУ, СКТБ «Турбулентность»

E-mail: kuzen2000@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТЕРМОАНЕМОМЕТРА С ТЕРМОПАРОЙ В КАЧЕСТВЕ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

В статье предложена конструкция, схемотехника и принцип работы импульсного термоанемометра на базе термопары. Выполнены исследования разработанного термоанемометра с целью его градуировки и определения основных метрологических характеристик.

Ключевые слова: термопара, импульсный термоанемометр, градуировка, метрологические характеристики.

Актуальность

По данным статистики применимости датчиков в промышленности по виду контролируемых параметров распространенность измерителей скорости и расхода составляет 15 % и они занимают вторую позицию, уступая только датчикам температуры с их 50 %. Среди измерителей скорости достаточно широкую известность получили термоанемометрические преобразователи скорости и расхода газовых потоков. Однако, обладая рядом преимуществ: простота конструкции, низкая стоимость, широкий диапазон, высокая чувствительность, малая инерционность и т.д., классические термоанемометры постоянного тока и температуры имеют общий существенный недостаток — сильную температурную зависимость показаний, что требует выполнения тщательной градуировки при различных температурах газа.

Одним из способов борьбы с температурной зависимостью является использование импульсного режима работы термоанемометра [1,2]. Характеристикой преобразования импульсного термоанемометра (ИТА) является зависимость постоянной времени его термочувствительного элемента от скорости потока газа. Исследования показали, что для термисторного ИТА данная зависимость является слабой функцией температуры, а при соблюдении определенных условий обработки результатов измерений обеспечивается практически полная инвариантность показаний ИТА к изменениям температуры газа [3].

Для расширения температурного диапазона, упрощения процедуры градуировки и улучшения надежности предложено в качестве термочувствительного элемента ИТА использовать термоэлектрический преобразователь. В сравнении с термисторами термопары значительно более надежны и прочны, имеют близкую к линейной температурную характеристику преобразования, а при отсутствии перегрева их выходной сигнал всегда равен нулю.

Задачи исследований

Основными задачами работы являются:

- 1) Разработка схемотехники ИТА на базе термопары.
- 2) Проведение экспериментальной градуировки ИТА.
- 3) Определение основных метрологических характеристик ИТА.

Разработка ИТА

Разрабатываемый ИТА реализует следующий основной алгоритм работы:

- 1) Формирование входного ступенчатого воздействия термопары для ее перегрева на 80...100 °С относительно температуры потока.

- 2) Снятие сигнала нагрева и фиксация переходной характеристики остывания термопары с целью последующего определения ее постоянной времени.

Структурная схема ИТА представлена на рисунке 1. Термопара является первичным измерительным преобразователем и непосредственно помещается в измерительный поток. Схема коммутации и усиления сигнала обеспечивает два режима работы: режим нагрева и режим измерений. В режиме нагрева через термопару пропускается короткий, но достаточно мощный импульс тока, который, согласно эффекту Пельтье, нагревает ее миниатюрный измерительный спай. При этом температура второго спаев практически не изменяется вследствие большой тепловой инерции массивных державок. В режиме остывания термопара генерирует сигнал термоЭДС, пропорциональный разности температур спаев (эффект Зеебека). Микропроцессорный модуль управления и аналогоцифрового преобразования формирует сигналы переключения между указанными режимами, регистрирует кривую остывания термопары и передает результаты измерений в компьютер для их дальнейшей обработки и визуализации.

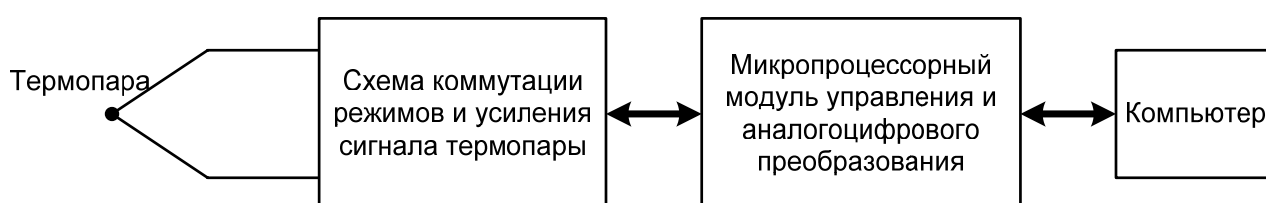


Рисунок 1 — Структурная схема ИТА

Конструкция датчика представлена на рисунке 2. В роли термочувствительного элемента используется миниатюрная термопара типа хромель-алюмель с диаметром проводников порядка 0,2 мм. Свободные концы термопары обжаты массивными латунными державками. Корпус датчика залит эпоксидной смолой.

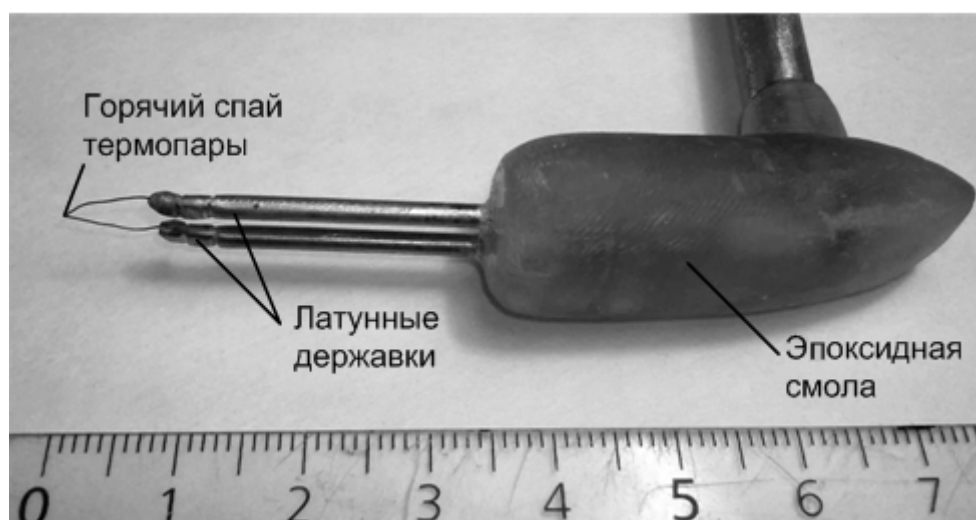


Рисунок 2 — Конструкция датчика ИТА

На рисунке 3 представлена функциональная схема ИТА. Рассмотрим принцип ее работы. Выполнение измерений начинается по команде от компьютера. Микроконтроллер посредством цифроаналогового преобразователя (ЦАП) формирует короткий импульс нагрева термопары амплитудой 2 вольта и длительностью порядка 50 мс. Сигнал с выхода ЦАП поступает на мощный повторитель напряжения, собранный на элементах DA1 и VT1. Нагруз-

кой повторителя является термопара. Электрическое сопротивление термопары невелико и составляет порядка 2 Ом, а ток разогрева достигает 1 А. За короткий интервал времени действия импульса рабочий спай термопары разогревается до температуры порядка 200 °С.

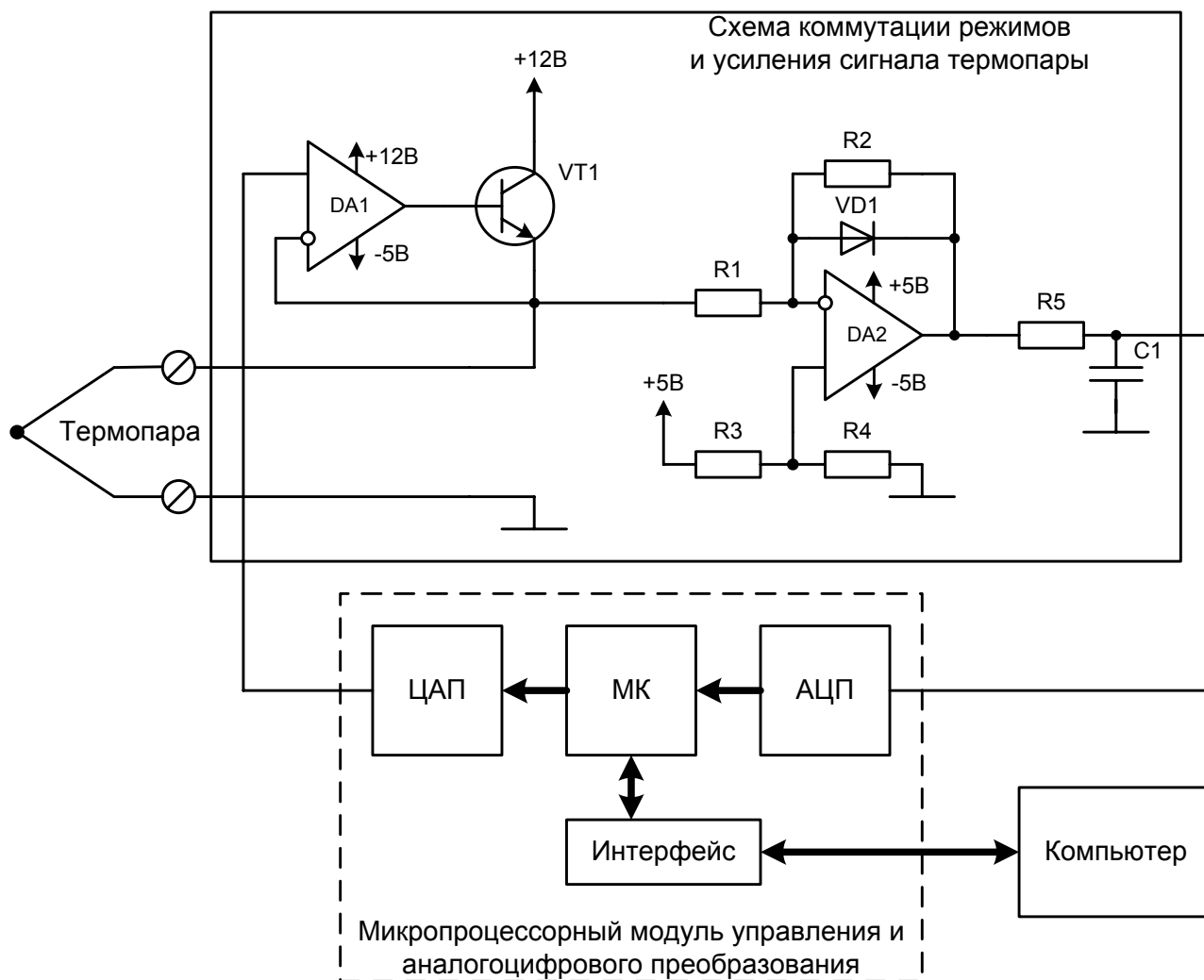


Рисунок 3 — Функциональная схема ИТА

После снятия импульса нагрева транзистор VT1 запирается, и термопара переходит в режим генерации термоЭДС. Измерительный сигнал усиливается инвертирующим усилителем с коэффициентом усиления по напряжению порядка 400, собранным на элементах DA2, R1..R4 и через фильтр нижних частот R5, C1 поступает на аналогоцифровой преобразователь микропроцессорного модуля. Для регистрации переходной характеристики остывания термопары микроконтроллер сохраняет 300 значений с периодом дискретизации 10 мс и выдает полученный массив измерительных данных в компьютер для сохранения и дальнейшей обработки результатов.

В качестве микропроцессорного модуля в работе был использован унифицированный модуль серии FreeDuino на базе микроконтроллера ATmega8 [5]. Программное обеспечение для микроконтроллера разработано в среде CodeVisionAVR на языке Си.

На рисунке 4 приведено рабочее окно программы для компьютера с результатами измерений в спокойном воздухе. Характерный перегиб характеристики остывания термопары на начальном участке, очевидно, обусловлен продолжением нагрева измерительного спая от более горячих проводников. Программа реализована в пакете Delphi 7. Для осуществления

обмена данными между микропроцессорным модулем и компьютером по стандартному USB-интерфейсу использован компонент VaComm. Программа позволяет задавать длительность и амплитуду импульса нагрева, визуализировать измерительные данные в числовом виде и в виде графиков, задавать параметры обработки и определять постоянную времени термочувствительного элемента.

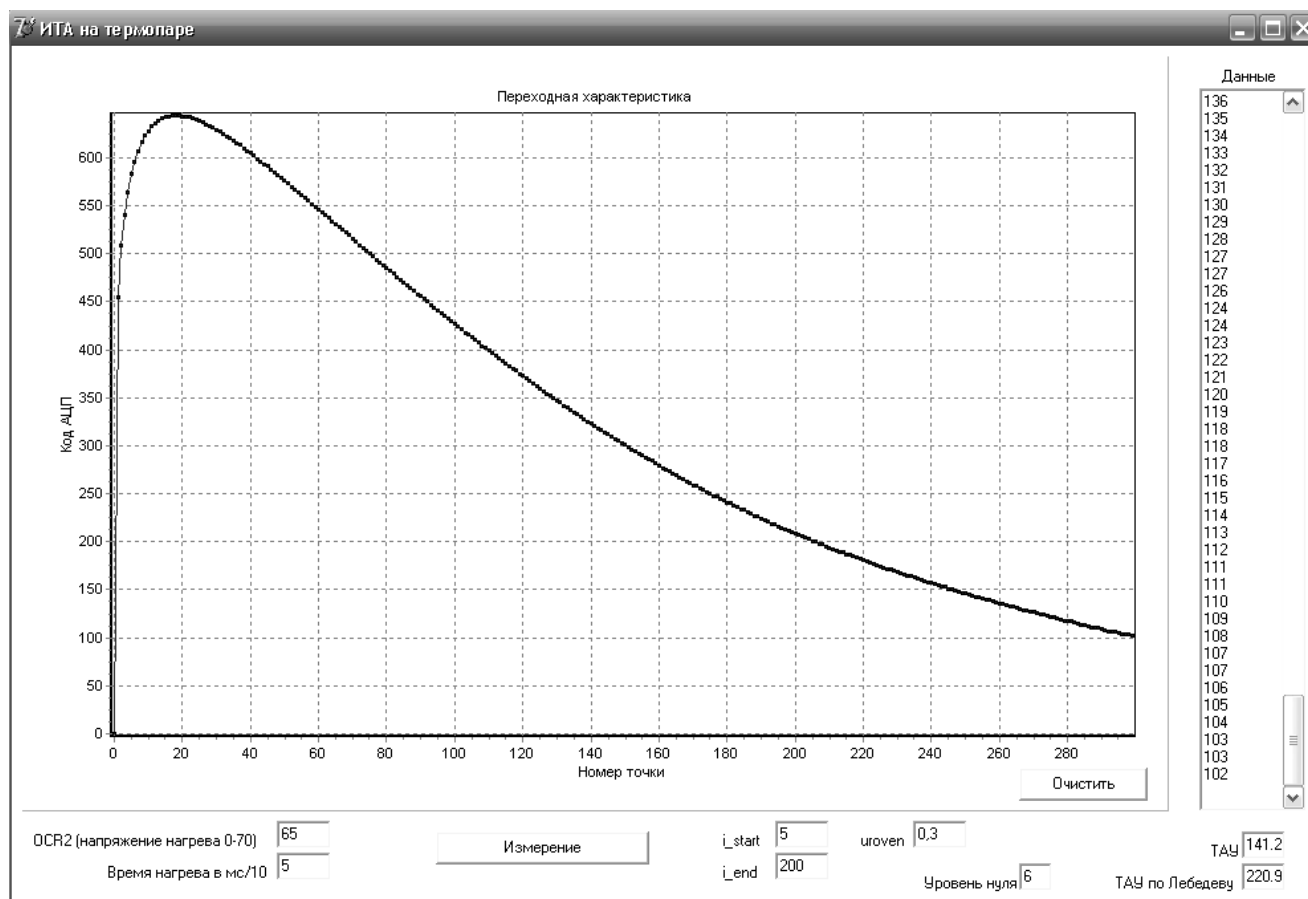


Рисунок 4 — Окно программы для компьютера с полученными результатами измерений

Экспериментальные исследования ИТА

Целью экспериментальных исследований является градуировка ИТА и определение его основных метрологических характеристик: диапазона изменений постоянной времени, чувствительности постоянной времени к изменению скорости потока, воспроизводимости результатов измерений, температурной погрешности показаний.

Исследования проводились на аэродинамическом стенде АДС-200/250 при скоростях воздушного потока от 5 до 35 м/с и температурах потока от 22 до 45 °С. Градуировка выполнялась при трех температурах потока 22, 35 и 45 °С в десяти точках по скорости при каждой температуре. При этом всего было выполнено 30 измерений.

В качестве образцового средства измерения скорости потока в аэродинамической трубе использовалась трубка Пито с допустимым пределом относительной погрешности по давлению $\pm 1\%$. Для измерения давления, создаваемого трубкой Пито, использовался дифференциальный манометр «Метран-44ДД» с пределом 1000 Па и допустимой абсолютной погрешностью $\pm 2,5$ Па. Температура потока измерялась откалиброванным термистором с погрешностью не более $\pm 0,3$ °С.

В результате выполнения эксперимента были получены 30 массивов измерительных данных. На рисунке 5 в качестве примера приведен типовой вид полученных результатов при минимальной и максимальной скоростях потока.

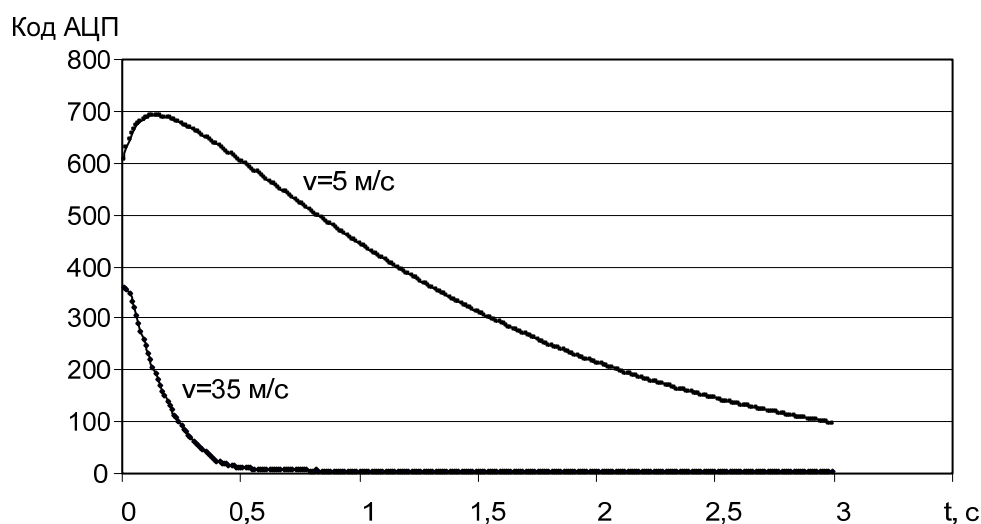


Рисунок 5 — Кривые остывания термопары при минимальной и максимальной скоростях потока

Обработка результатов измерений

Первый этап обработки результатов градуировки ИТА заключался в определении постоянной времени термопары в каждой точке градуировки. Из результатов, представленных на рисунке 5, следует, что в общем случае переходная функция остывания термопары ИТА носит достаточно сложный характер и, очевидно, не может быть хорошо аппроксимирована простой экспоненциальной функцией. В связи с этим возник естественный вопрос относительно того, что именно принять за постоянную времени чувствительного элемента. Нами предложено за постоянную времени принять интервал времени, в течение которого температура термопары после снятия нагрева уменьшается до значения $T_\tau = T_1 + k \cdot (T_1 - T_2)$, где k — уровень определения постоянной времени, T_1 и T_2 — соответственно максимальная и минимальная температуры в интервале временной базы обработки данных $t_{баз}$ (см. рис.6).

На втором этапе обработки экспериментальных данных градуировки ИТА были получены градуировочные кривые — зависимости постоянной времени термопары от скорости потока при различных температурах потока. Из результатов обработки, приведенных на рисунке 7, следует, что с изменением температуры потока происходит смещение градуировочной характеристики ИТА. При этом температурная погрешность результатов измерений скорости составляет порядка $0,5 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

Установлено, что градуировочные характеристики исследуемого ИТА при фиксированной температуре потока хорошо аппроксимируются функцией вида

$$\tau = \frac{A}{B + (\rho v)^n},$$

где τ — постоянная времени термопары; ρv — массовая скорость потока, A , B и n — постоянные коэффициенты.

Погрешность аппроксимации градуировочных характеристик выбранной функцией не превысила 1 %.

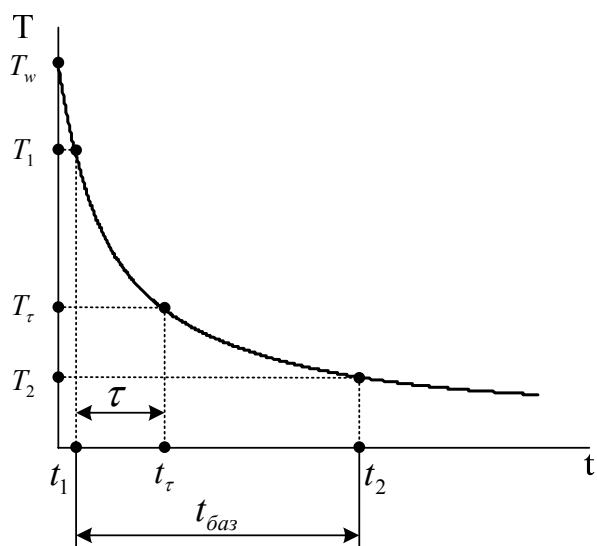


Рисунок 6 — Способ определения постоянной времени термопары

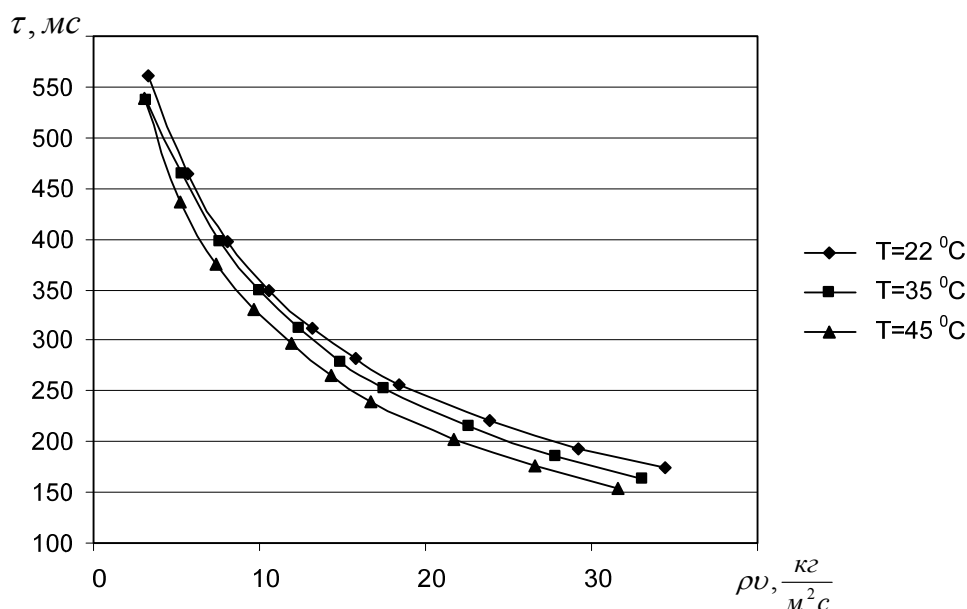


Рисунок 7 — Градуировочные кривые ИТА, полученные при различных температурах потока

Оценка основных метрологических характеристик ИТА

По результатам выполненных исследований были определены следующие основные метрологические характеристики ИТА на базе термопары:

- диапазон изменений постоянной времени термопары $\tau_{\text{max}}/\tau_{\text{min}}$ в диапазоне скоростей потока от 5 до 35 м/с составил около 3,5, что обеспечивает гораздо более высокую чувствительность и помехозащищенность ИТА в сравнении с термоанемометром постоянной температуры, у которого измерительный диапазон при данных условиях не превышает 0,5;
- повторяемость при 40 повторных измерениях не хуже 1%;
- температурная погрешность результатов измерений скорости потока составляет порядка 0,5%/°С, что примерно на порядок лучше, чем у термоанемометра постоянной температуры.

Выводы

1. Использование термопары в роли термочувствительного элемента импульсного термоанемометра в сравнении с термистором позволяет существенно расширить рабочий темпера-

- турный диапазон выполняемых измерений до нескольких сотен градусов Цельсия, повысить надежность и прочность, существенно упростить обработку результатов измерений.
2. Выполненная по результатам исследований оценка основных метрологических характеристик ИТА на термопаре показывает его превосходство по отношению к термоанемометру постоянной температуры по чувствительности в 7 раз и на порядок по температурной погрешности результатов измерений скорости потока.
 3. Малая зависимость показаний ИТА на термопаре от температуры потока позволяет в ряде случаев упростить процедуру градуировки и выполнять градуировку только при одной известной температуре газа, что существенно снижает требования к соответствующим техническим средствам.

Список использованной литературы

1. Перспективы термоанемометрических методов измерения расхода газа или жидкости / М.А. Ураксеев, А.Ф. Романченко, Д.Р. Абдрашитова и др. // Электронный журнал "Исследовано в России". — 2001. — Вып. 51. — С. 587 – 593.
2. Кузнецов Д.Н. Перспективы и некоторые варианты построения термоанемометров с нестационарным режимом разогрева термочувствительного элемента / Д.Н. Кузнецов, Ю.Д. Украинский / Зб. наук. пр. ДоНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. — 2006. — Вип. 107. — С. 159–164.
3. Кузнецов Д.Н. Особенности градуировки термоанемометров с нестационарным режимом разогрева термочувствительного элемента / Д.Н. Кузнецов, Ю.Д. Украинский, А.А. Морозов // Науково-технічний журнал «Радіоелектронні і комп'ютерні системи». — 2008. — Вип. 3(30). — С. 23–28.
4. Кузнецов Д.Н. Электронная система малого аэродинамического стенда градуировки и исследований импульсных термоанемометров / Д.Н. Кузнецов, В.Н. Лебедев, А.Н. Левченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». — 2010. — Вип. 19(171). — С. 121–127.
5. Atmel [Электронный ресурс]: ATmega8 datasheet. — Электронные данные. — Режим доступа: www.atmel.com/Images/doc2486.pdf — Дата доступа: январь 2012. — Загл. с экрана.

Надійшла до редакції:
14.02.2012р.

Рецензент:
д-р техн.наук, проф. Зорі А.А.

D. Kuznetsov, V. Lebedev, V. Perebeinos. Investigation of Pulsed Hot-Wire Anemometer with Thermocouple as a Temperature-Sensitive Element. The article deals with the construction, circuit design and principle of operation of pulsed hot-wire anemometer at the thermocouple.

Keywords: thermocouple, pulsed hot-wire anemometer, metrological characteristics, graduation.

Д.М. Кузнецов, В.М. Лебедев, В.В. Перебийніс. Дослідження імпульсного термоанемометра з термопарою в якості термочутливого елементу. У статті запропонована конструкція, схемотехніка і принцип роботи імпульсного термоанемометра на базі термопари. Виконано дослідження розробленого термоанемометра з метою його градуювання та визначення основних метрологічних характеристик.

Ключові слова: термопара, імпульсний термоанемометр, метрологічні характеристики, градуювання.

© Кузнецов Д.Н., Лебедев В.Н., Перебийнос В.В., 2012