

**Измерение скорости воздушного потока с использованием
ультразвуковых преобразователей**

А.П. Панов, А.Н. Серов

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

duha_v@mail.ru

При работе с системами управления подвижными объектами возникает необходимость в учете продольной и поперечной составляющей скорости воздушного потока. С этой целью используются устройства измерения скорости воздушного потока на основе акустического метода. Измерители данного типа отличаются малой инерционностью и отсутствием подвижных частей. Однако большие габариты и наличие элементов конструкции, подверженных существенной деформации при механическом воздействии, затрудняют их применение в составе подвижных объектов. В работе проанализирован алгоритм устройства измерения скорости воздушного потока с использованием ультразвуковых преобразователей. Показано, что уменьшение габаритов устройств данного типа без совершенствования методов определения времени прохождения ультразвукового импульса между излучателями и проведения периодической калибровки изделия приводит к уменьшению точности измерения. Разработана структурная схема и рассмотрены основные элементы вычислительного устройства, определяющего продольную и поперечную составляющие скорости воздушного потока, с использованием четырех ультразвуковых преобразователей. Натурные испытания устройства с расстоянием между чувствительными элементами 60 мм в аэродинамической трубе показали, что данная конструкция позволяет определять скорость воздушного потока с предельной абсолютной погрешностью измерения 2,5 м/с. Существенный вклад в формирование этой погрешности вносят элементы конструкции, затеняющие измерительную область, но обеспечивающие требуемые прочностные характеристики. Предложенный алгоритм компенсации ошибок на базе метода аппроксимации тригонометрическими функциями снижает предельную абсолютную погрешность измерения до 1,2 м/с. Дальнейшее повышение характеристик устройства измерения требует проведения дополнительных работ по поиску формы блока чувствительных элементов и совершенствования алгоритмов компенсации ошибок.

Ключевые слова: вычислительное устройство; воздушный поток; ультразвук; погрешность измерения; система управления

Для цитирования: Панов А.П., Серов А.Н. Измерение скорости воздушного потока с использованием ультразвуковых преобразователей. – 2018. – Т. 23. – № 5. – С. 486–494. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-5-486-494

Measurements of Air Flow Velocity Using Ultrasonic Transducers

A.P. Panov, A.N. Serov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

duha_v@mail.ru

Abstract: For operation of the control systems for mobile objects there is a need to consider the longitudinal and transverse component of the air velocity. In present work it has been proposed to use a measuring device of the airflow velocity on the basis of the acoustic method, which is characterized by low inertia and the lack of moving parts. However, big size and the existence of the construction elements, subjected to considerable distortion under mechanical impact, complicate their implementation as the parts of mobile objects. The operation of the algorithm for the device measuring the airflow velocity using the ultrasonic transducers has been analyzed. It has been shown that reducing the dimensions of devices leads to a decrease in the accuracy of measurement without improving the methods for determining the time of passage of the ultrasonic pulse between the transducers and periodic calibration of the device. The block diagram of the computing device of determining 2 components of the airflow velocity with using 4 ultrasonic transducers has been developed and the main elements of the computing device have been considered. The laboratory tests have shown that the device allows determining the velocity of the airflow with a maximum absolute measurement error of 2.5 m/s. The structural elements of the device that obscure the measurement area have a significant effect upon this error formation, but provide the required strength characteristics. The proposed error compensation algorithm based on the method of approximation by trigonometric functions has permitted to reduce the measurement error to 1.2 m/s. Further improvement of the characteristics of the device requires an additional work to find the shape of the block of the sensing elements and an improvement of the error compensation algorithms.

Keywords: computing device; airflow; ultrasound; measurement error; control system, algorithm

For citation: Panov A.P., Serov A.N. Measurements of air flow velocity using ultrasonic transducers. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 5, pp. 486–494. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-5-486-494

Введение. Проектирование систем управления (СУ) [1], входящих в состав подвижных объектов, требует учета ряда метеорологических факторов. Продольная и поперечная составляющие скорости воздушного потока (ветра) оказывают существенное влияние на точностные и динамические характеристики СУ [2]. Устройства, отвечающие за измерение данных параметров состояния атмосферы, основаны на различных физических явлениях [3].

В настоящей работе рассматривается построение вычислительного устройства, обеспечивающего определение продольной и поперечной составляющих скорости воздушного потока, на базе акустических методов измерения. Основными преимуществами устройств подобного типа являются отсутствие подвижных механизмов и практически полное отсутствие инерции. Анализ работ [4–7] показал, что для вычислительных устройств, использующих акустические методы измерения, характерны большие расстояния между ультразвуковыми преобразователями (УЗП) (до 120 мм), а также наличие конструктивных решений, не позволяющих обеспечить требуемую механическую стойкость и прочность конструкции. Использование устройств с такими конструктивными особенностями позволяет уменьшить ошибку определения скорости воздушного потока за счет увеличения расстояния между УЗП и уменьшения влияния элементов конструкции обтекателя на характер течения воздушного потока в измерительной области. Однако увеличение внешних габаритов является существенным недостатком при использовании устройства в составе ряда подвижных объектов.

Алгоритм определения скорости воздушного потока с использованием акустического метода измерения. К акустическим измерителям скорости воздушного потока (АИСВП) относятся приборы, принцип работы которых основан на измерении эффекта, возникающего при прохождении акустических (ультразвуковых) колебаний через исследуемую среду и зависящего от скорости воздушного потока [8]. Классификация АИСВП представлена на рис. 1.

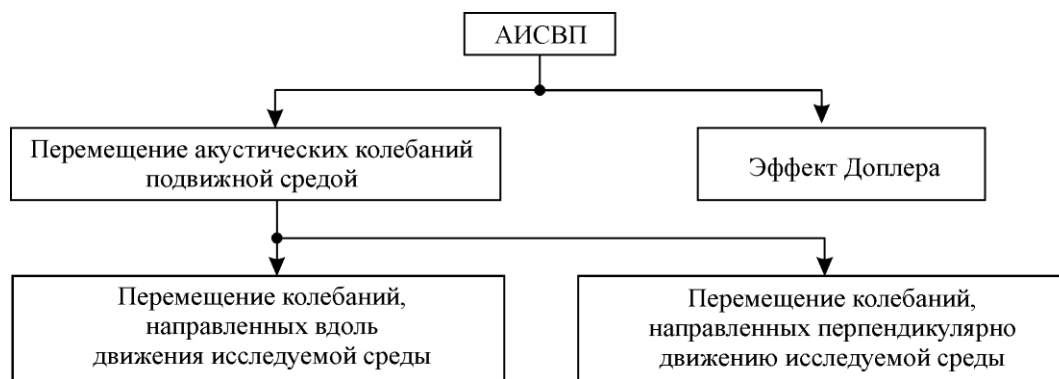


Рис. 1. Классификация АИСВП

Fig. 1. Classification of acoustic devices measuring of the air flow velocity

В настоящее время большое распространение получили АИСВП, основанные на перемещении акустических колебаний подвижной средой. Это обусловлено высокими точностными характеристиками и длительным применением данного метода измерения.

Функционирование АИСВП, работающих по принципу перемещения колебаний, направленных перпендикулярно движению среды, основано на измерении смещения ультразвукового луча, обусловленного движением потока. Данный способ имеет следующие недостатки, затрудняющие его применение для создания мобильного устройства измерения скорости воздушного потока: малый диапазон измеряемых скоростей; высокая чувствительность к внешним воздействиям (температуре окружающей среды, вибрации корпуса).

Функционирование АИСВП, работающих по принципу перемещения колебаний, направленных вдоль движения исследуемой среды, основано на измерении времени прохождения ультразвукового импульса от передающего УЗП к принимающему. На рис. 2 представлена схема работы одного канала АИСВП, представляющего собой два УЗП, направленных друг на друга.

Распространение фронта звуковой волны в подвижной среде соответствует движению расширяющейся со скоростью звука сферы, характерной для этой среды, центр которой перемещается со скоростью самой среды [9]. Из этого следует, что проекция скорости акустического импульса на линию, соединяющую приемник и передатчик, определяется исходя из соотношения

$$U_{q_{12}} = V_{q_{12}} + \sqrt{c^2 - V_{q_{12\perp}}^2}, \quad (1)$$

где $U_{q_{12}}$ – проекция скорости акустического импульса на ось, соединяющую приемник и передатчик; \vec{q}_{12} – единичный вектор, направленный вдоль оси, соединяющей приемник и передатчик; $V_{q_{12}}$ – проекция скорости воздушного потока, сонаправленная с \vec{q}_{12} ; $V_{q_{12\perp}}$ – проекция скорости воздушного потока, направленная перпендикулярно \vec{q}_{12} ; c – скорость звука в неподвижной среде.

На практике применение формулы (1) затруднено необходимостью учета скорости звука в неподвижной среде, которая зависит от температуры, атмосферного давления, влажности и поперечной составляющей скорости воздушного потока. Для устранения из расчетов неизвестных параметров используют излучение ультразвуковых импульсов навстречу друг другу [3]:

$$\begin{cases} U_{q_{12}} = V_{q_{12}} + \sqrt{c^2 - V_{q_{12\perp}}^2}, \\ U_{q_{21}} = V_{q_{21}} + \sqrt{c^2 - V_{q_{21\perp}}^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\vec{q}_{12} = -\vec{q}_{21}$; $V_{q_{12}} = -V_{q_{21}}$; $V_{q_{12\perp}}^2 = V_{q_{21\perp}}^2$.

Используя систему уравнений (2), получаем формулу для вычисления проекции скорости воздушного потока на ось, соединяющую УЗП1 и УЗП2:

$$V_{q_{12}} = 0,5L \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right), \quad (3)$$

где L – расстояние между УЗП1 и УЗП2; t_{12} , t_{21} – время прохождения ультразвукового импульса от УЗП1 к УЗП2 и от УЗП2 к УЗП1 соответственно.

Формула (3) определяет основной алгоритм измерения скорости воздушного потока вдоль оси расположения двух УЗП.

Погрешность алгоритма измерения скорости воздушного потока. С помощью уравнения (3) и формулы погрешности функции нескольких переменных [10] определим погрешность измерения скорости воздушного потока:

$$\Delta V_{q_{12}} = \left| \frac{\partial V_{q_{12}}}{\partial t_{12}} \right| \Delta t_{12} + \left| \frac{\partial V_{q_{12}}}{\partial t_{21}} \right| \Delta t_{21} + \left| \frac{\partial V_{q_{12}}}{\partial L} \right| \Delta L, \quad (4)$$

$$\frac{\partial V_{q_{12}}}{\partial t_{12}} = -\frac{0,5L}{t_{12}^2}, \quad \frac{\partial V_{q_{12}}}{\partial t_{21}} = \frac{0,5L}{t_{21}^2}, \quad \frac{\partial V_{q_{12}}}{\partial L} = 0,5 \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right),$$

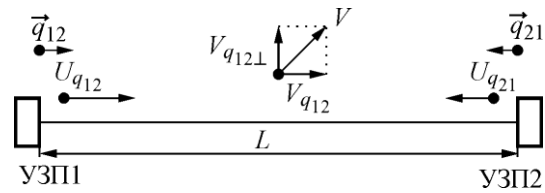


Рис.2. Схема работы измерительного канала АИСВП

Fig.2. The measuring channel of the acoustic device of measuring air flow velocity

где $\Delta V_{q_{12}}$ – абсолютная погрешность измерения скорости воздушного потока; $\Delta t_{12}, \Delta t_{21}$, – абсолютные погрешности определения времени прохождения ультразвукового импульса в прямом и обратном направлении соответственно; ΔL – абсолютная погрешность измерения расстояния между УЗП1 и УЗП2.

Поскольку измерение параметров t_{12} и t_{21} осуществляется идентичными средствами, то можно считать, что погрешности их измерения также одинаковы ($\Delta t_{12} = \Delta t_{21} = \Delta t$). Тогда выражение (4) будет иметь вид

$$\Delta V_{12} = 0,5L \left(\frac{1}{t_{12}^2} + \frac{1}{t_{21}^2} \right) \Delta t + 0,5 \left| \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right| \Delta L.$$

Время прохождения ультразвукового импульса в прямом и обратном направлении соответственно равно: $t_{12} = \frac{L}{U_{q_{12}}}$, $t_{21} = \frac{L}{U_{q_{21}}}$,

тогда

$$\Delta V_{q_{12}} = \frac{U_{q_{12}}^2 + U_{q_{21}}^2}{2L} \Delta t + \frac{|U_{q_{12}} - U_{q_{21}}|}{2L} \Delta L.$$

Используя выражения (2) и (3), получаем

$$\Delta V_{q_{12}} = \frac{V_{q_{12}}^2 + 2(c^2 - V_{q_{12\perp}}^2)}{2L} \Delta t + \frac{|V_{q_{12}}|}{L} \Delta L. \quad (5)$$

Так как

$$V_{q_{12}}^2 - V_{q_{12\perp}}^2 \leq V^2, \quad |V_{q_{12}}| \leq |V|,$$

то уравнение (5) сводится к следующему неравенству:

$$\Delta V_{q_{12}} \leq \frac{V^2 + 2c^2}{2L} \Delta t + \frac{|V|}{L} \Delta L. \quad (6)$$

Неравенство (6) позволяет заключить, что погрешность измерения скорости воздушного потока акустическим методом увеличивается при возрастании скорости движения воздуха V . Увеличение расстояния между УЗП1 и УЗП2 позволяет снизить требования по точности измерения времени прохождения акустических импульсов и расстояния между преобразователями. Влияние изменения параметра L может быть скомпенсировано на этапе периодической калибровки устройства измерения скорости воздушного потока. При построении АИСВП необходимо учитывать, что выражение (6) получено при условии, когда элементы конструкции рассматриваемого средства измерения не оказывают влияния на характер течения воздушного потока. Таким образом, можно заключить, что задача построения компактного АИСВП сводится к трем основным условиям: 1) увеличение точности измерения времени прихода сигнала, т.е. совершенствование приемного тракта УЗП и разработка новых алгоритмов выделения начала акустического импульса на фоне шумов и переотражений; 2) поиск формы обтекателя, минимально искажающей воздушный поток и при этом обеспечивающей требуемые прочностные характеристики; 3) коррекция влияния элементов конструкции АИСВП с использованием методов цифровой обработки сигналов.

Определение продольной и поперечной составляющей скорости воздушного потока требует использования как минимум двух измерительных каналов, расположенных под углом относительно друг друга в горизонтальной плоскости.

Структурная схема вычислительного устройства. Для определения продольной и поперечной составляющей скорости воздушного потока разработано вычислительное устройство с использованием четырех УЗП, попарно направленных друг на друга. Структурная схема данного устройства представлена на рис.3.

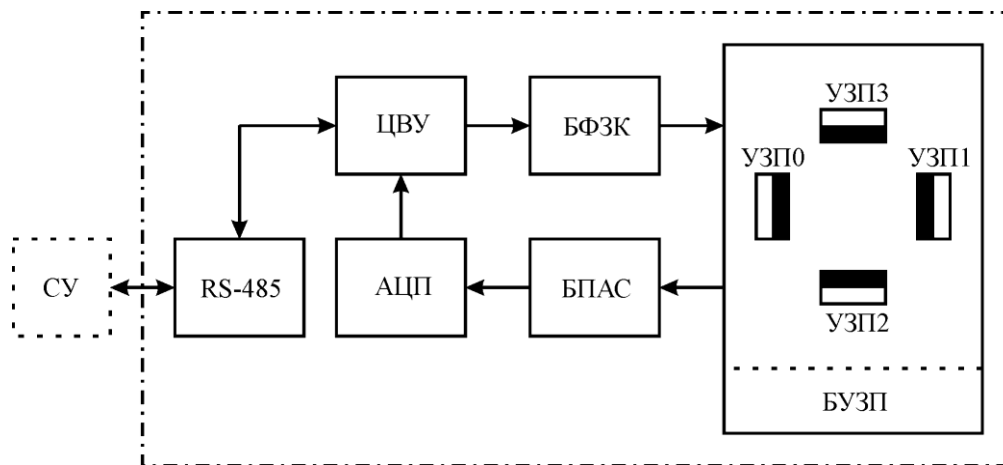


Рис.3. Структурная схема вычислительного устройства, определяющего продольную и поперечную составляющую скорости воздушного потока с использованием четырех УЗП

Fig.3. The block diagram of the computing device that determines the longitudinal and transverse component of the air flow velocity with use 4 ultrasonic transducers

Основными элементами данного устройства являются:

- блок ультразвуковых преобразователей (БУЗП), предназначенный для формирования измерительной области (крепление УЗП, обеспечение прочности конструкции АИСВП, минимизация искажений воздушного потока);
- блок формирования задающих колебаний (БФЗК), отвечающий за формирование пачки прямоугольных импульсов с частотой заполнения, равной 40 кГц. Ввиду того что УЗП непосредственно контактирует с окружающей средой, в состав БФЗК также введен повышающий трансформатор, позволяющий обеспечить гальваническую развязку УЗП от остальной схемы АИСВП;
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- блок приема акустических сигналов (БПАС), предназначенный для аналоговой фильтрации принятого сигнала, а также для приведения его уровня к диапазону измерения АЦП;
- цифровое вычислительное устройство (ЦВУ), обеспечивающее управление БФЗК и АЦП, осуществление общения с внешней системой управления по последовательному каналу, цифровую фильтрацию и хранение осциллограммы принятого сигнала, определение времени прихода ультразвукового сигнала, вычисление продольной и поперечной скорости воздушного потока.

Исследование работы алгоритмов АИСВП при проведении натуральных испытаний. Для проверки работы рассматриваемого вычислительного устройства измерения продольной и поперечной составляющих скорости воздушного потока выбран БУЗП с диагональным расположением ультразвуковых преобразователей.

Внешний вид БУЗП представлен на рис. 4. В горизонтальной плоскости расстояние между противоположными УЗП составляет 60 мм. На рис. 5 представлены результаты испытаний АИСВП в аэродинамической трубе при скорости воздушного потока 25 м/с.



Рис.4. Внешний вид БУЗП с диагональным расположением чувствительных элементов
Fig.4. The block of the ultrasonic transducers with a diagonal location of the sensitive elements

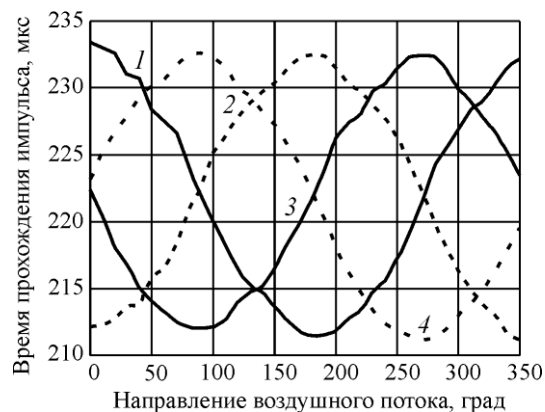
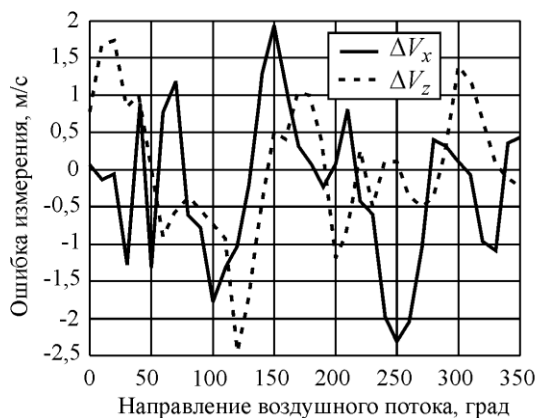


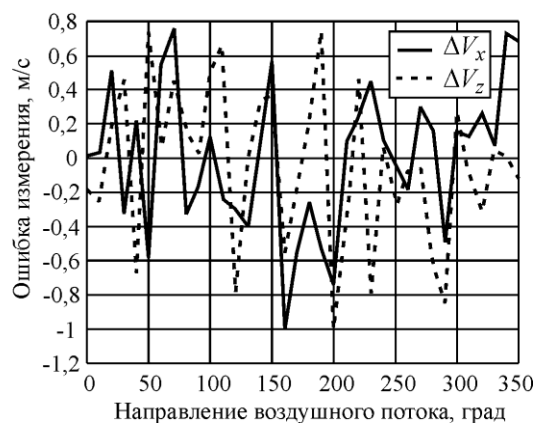
Рис.5. Зависимость времени прохождения ультразвукового импульса между УЗП от направления воздушного потока: 1 – от УЗП0 к УЗП1; 2 – от УЗП1 к УЗП0; 3 – от УЗП2 к УЗП3; 4 – от УЗП3 к УЗП2

Fig.5. The dependence of the time of passage of the ultrasonic pulse between the ultrasonic transducers (UT) from the air flow direction: 1 – from UT0 to UT1; 2 – from UT1 to UT0; 3 – from UT2 to UT3; 4 – from UT3 to UT2

Видны искажения, возникающие, когда направление воздушного потока приближается к 45° , что объясняется областью затенения, создаваемой опорной колонной. На основании результатов испытания и формулы (3) получены значения продольной и поперечной составляющей скорости воздушного потока и вычислены ошибки измерения для каждого из углов обдува (рис.6,а). Максимальная ошибка измерения компонент скорости воздушного потока составляет 2,5 м/с, а направление воздушного потока, при котором уменьшается точность измерения, соответствует областям затенения.



а



б

Рис.6. Ошибки измерения продольной ΔV_x и поперечной ΔV_z составляющих скорости воздушного потока при скорости ветра 25 м/с до (а) и после (б) коррекции по углу

Fig.6. Errors in measuring the longitudinal ΔV_x and transverse ΔV_z components of the air flow velocity at a wind speed of 25 m/s before (a) and after (b) correction by angle

С целью повышения точностных характеристик исследуемого АИСВП разработан алгоритм компенсации ошибок измерения с промежуточной коррекцией по углу. Основной особенностью данного метода является использование аппроксимации тригонометрическими функциями [11, 12] для построения поправочных функций

определения направления и модуля скорости и направления воздушного потока. Результаты работы алгоритма компенсации ошибок представлены на рис. 6, б, из которого видно, что применение корректирующего алгоритма позволяет снизить максимальную ошибку измерения продольной и поперечной составляющих скорости воздушного потока с 2,5 до 1,2 м/с.

Заключение. Расчет погрешностей определения скорости воздушного потока при использовании акустического метода показал, что уменьшение габаритов подобных устройств невозможно без повышения точности измерения времени прохождения ультразвукового импульса от одного УЗП до другого. Также необходимо проведение периодической калибровки изделия для устранения влияния деформации его корпуса. Проведенные натурные испытания в аэродинамической трубе показали, что разработанная конструкция блока УЗП обеспечивает измерение скорости воздушного потока с ошибкой 2,5 м/с. Алгоритм компенсации ошибок, разработанный на базе метода аппроксимации тригонометрическими функциями, позволяет уменьшить ошибку измерения скорости воздушного потока до 1,2 м/с.

Дальнейшее повышение точности работы устройства измерения скорости воздушного потока требует проведения дополнительных исследований по поиску оптимальной формы блока чувствительных элементов с использованием компьютерного моделирования, испытаний в аэродинамической трубе и разработки новых алгоритмов вычисления скорости воздушного потока. Наличие цифрового интерфейса передачи информации обеспечивает сопряжение устройства измерения с внешней системой управления без использования дополнительных преобразователей.

Литература

1. **Панов А.П., Савченко Ю.В., Серов А.Н.** Мобильный измеритель состояния атмосферы, предназначенный для работы в сложных условиях эксплуатации // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Саратов, 2016. – Т. 2. – С. 497–503.
2. **Панов А.П., Серов А.Н., Мочегов И.Н.** Микропроцессорный комплекс определения скорости и направления воздушного потока с чувствительным элементом на основе горячего цилиндра // Изв. вузов. Электроника. – 2016. – Т. 21. – №4. – С. 341–346.
3. **Кремлевский П.П.** Расходомеры и счетчики количества веществ. Кн. 2. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
4. WMT700 Руководство пользователя. Серия ультразвуковых датчиков ветра Vaisala WINDCAP WMT700. – URL: <http://www.vaisala.ru/ru/products/windsensors/Pages/WMT700.aspx> (дата обращения: 06.02.2018).
5. TheTriSonica. – URL: <http://www.apptech.com/products/ultrasonic-anemometers/trisonica> (дата обращения: 06.02.2018).
6. Windsensor&accessories. – URL: <http://www.youngusa.com/products> (дата обращения: 06.02.2018).
7. **Тихомиров А.А.** Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – №7. – С. 585–600.
8. **Ермаков М.С.** Разработка алгоритма определения параметров ветра ультразвуковым методом // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 3 (49). – С. 56–61.
9. **Блохинцев Д.И.** Акустика неоднородной движущейся среды. – М.; Л.: ОГИЗ. Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1946. – 220 с.
10. **Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М.** Численные методы. – 6-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 636 с.
11. **Дубошин Г.Н.** Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. – М.: Наука, 1976. – 864 с.
12. **Субботин Ю.Н., Черных Н.И.** Равномерная аппроксимация кривизны гладких плоских кривых с использованием частных сумм ряда Фурье // Тр. института математики и механики УрО РАН. – 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 253–256.

Поступила 01.03.2018 г.; принята к публикации 19.06.2018 г.

Панов Андрей Павлович – инженер-электроник Научно-исследовательского института вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), duha_v@mail.ru

Серов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), AndreySerov@yandex.ru

References

1. Panov A.P., Savchenko YU.V., Serov A.N. Measuring atmospheric condition, designed for operation in rough conditions. *Actual problems of electronic instrument engineering: Proceedings of the International scientific and technical conference*. Saratov, 2016, vol. 2, pp. 497–503. (In Russian).
2. Panov A.P., Serov A.N., Mochegov I.N. Microprocessor complex with a sensitive element based on hot cylinder for speed and direction of airflow determining. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2016, vol. 21, no. 4, pp. 341–346. (In Russian).
3. Kremlëvskiy P.P. *Flow meters and counters number of substances. Book 2*, St. Petersburg, Polytechnic Publ., 2004, 412 p. (In Russian).
4. *WMT700 User manual. The series of ultrasonic wind sensors Vaisala WINDCAP WMT700* Available at: <http://www.vaisala.ru/ru/products/windsensors/Pages/WMT700.aspx> (accessed 06.02.2018).
5. *TheTriSonica*. Available at: <http://www.apptech.com/products/ultrasonic-anemometers/trisonica> (accessed: 06.02.2018).
6. *Windsensor&accessories*. Available at: <http://www.youngusa.com/products> (accessed: 06.02.2018).
7. Tikhomirov A.A. *Ultrasonic anemometers and thermometers for measuring air flow velocity and temperature pulsations. Review. Optics of the atmosphere and ocean*. Novosibirsk, Publishing house of the Siberian branch of the RAS, 2010, vol. 23, no. 7, pp. 585–600. (In Russian).
8. Ermakov M.S. Development of an algorithm for determining wind parameters by ultrasonic method. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of management processes*, 2017, no. 3 (49), pp. 56–61. (In Russian).
9. Blokhintsev D.I. *Acoustics of the inhomogeneous moving medium*. Moscow, 1946. 220 p. (In Russian).
10. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. *Numerical methods*. 6th ed. Moscow, Binom. Knowledge laboratory Publ., 2008, 636 p. (In Russian).
11. Duboshin G.N. *Reference manual on celestial mechanics and astrodynamics*. Moscow, 1976. 864 p. (In Russian).
12. Subbotin YU.N., Chernykh N.I. Uniform approximation of the curvature of smooth plane curves using partial sums of the Fourier series. *Trudy instituta matematiki i mekhaniki UrO RAN = Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 253–256. (In Russian).

Submitted 01.03.2018; Accepted 19.06.2018.

Information about the authors:

Andrey P. Panov – Electronics Engineer of Scientific Research Institute of Computing Means and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), duha_v@mail.ru

Andrey N. Serov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Scientific Research Institute of Computing Means and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), AndreySerov@yandex.ru