

**ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДАТЧИКА РАСХОДА ВОЗДУХА****М.И. Колоколов**

maxkol12@mail.ru

SPIN-код: 6970-1785

**А.А. Кудря**

Anton.Kudrya@gmail.com

SPIN-код: 7733-5271

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Аннотация**

Описаны основные принципы проектирования датчика расхода воздуха. Выполнена классификация термоанемометрических датчиков. Рассмотрены основные принципы работы таких датчиков. Приведена простейшая схема устройства чувствительного элемента в термоанемометрическом датчике расхода, а также схема управления чувствительным элементом. Описаны метод постоянного тока для измерения расхода воздуха и метод постоянной температуры для измерения расхода воздуха. Проведена симуляция работы датчика расхода воздуха с использованием двух методов. Сделаны вывод, что зависимость выходного напряжения датчика от изменения сопротивления чувствительного элемента является линейной.

**Ключевые слова**

Термоанемометрия, классификация термоанемометрических датчиков, чувствительный элемент, метод постоянного тока, метод постоянной температуры, принцип работы термоанемометрических датчиков, схема управления чувствительным элементом, симуляция работы датчика расхода воздуха

Поступила в редакцию 08.12.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

**Введение.** Термоанемометрия — технология измерения скорости потоков газов или жидкостей, основанная на принципе изменения сопротивления тонкой проволоки при ее охлаждении в потоке газа или жидкости. На сегодняшний день это единственная технология, позволяющая выражать скорость в виде аналогового сигнала.

Основное преимущество измерений данного вида — отсутствие подвижных частей в составе датчика и незначительное влияние наличия самого датчика на проходящий поток.

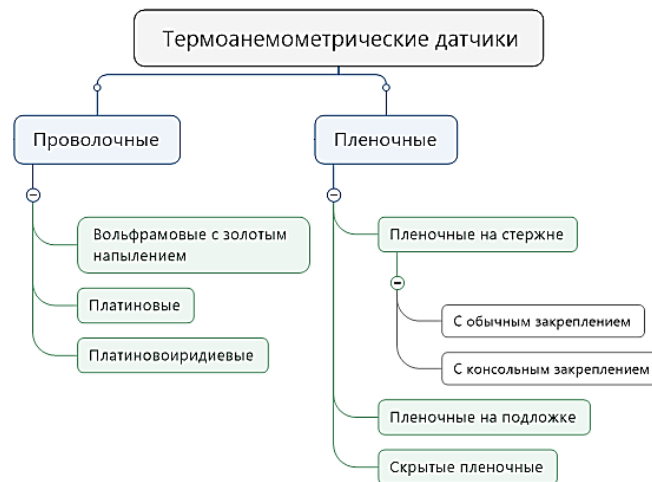
**Обзор литературы.** Разработка термоанемометрического датчика расхода — очень трудоемкий высокотехнологичный процесс. Существует множество различных конструкций чувствительных элементов. Доктор инженерных наук из университета в Сан-Жозе в Бразилии К. Эгути в своей статье [1] описывает конструкцию самодельного чувствительного элемента из проволоки толщиной 25 мкм. Проволочные датчики достаточно дешевы в изготовлении относительно датчиков других типов, при этом они обеспечивают качественные измерения. Проволочный чувствительный элемент рассматривали также авторы работ [2–5]. Все они в той или иной степени анализировали достоинства проволочных чувствительных элементов по сравнению с элементами других типов.

Отметим, что проволоку диаметром от 20 мкм можно купить в свободном доступе, а для изготовления пленочных чувствительных элементов требуется дорогостоящее оборудование. Но американский инженер К. Дженсен в своих исследованиях [6] пишет, что использование пленочных чувствительных элементов оправдано при высоких скоростях потока воздуха или жидкости, в которых будет использоваться датчик. Так, проволочный чувствительный элемент может выдерживать скорости потока до 350 м/с, а пленочный до 500 м/с, об этом говорят французский ученый Д. Бестион и американский инженер К. Дженсен [2, 6].

Российские исследователи А.П. Адамова и др. считают чувствительные элементы на базе монокристаллического кремния с пьезорезистивными резисторами одними из самых перспективных типов чувствительных элементов [7]. Такие датчики при использовании их на борту летательного средства можно расположить во множестве мест благодаря их габаритам. Чувствительные элементы на базе кристалла очень дороги в изготовлении, но обладают существенными преимуществами.

В работе [8] предложена конструкция чувствительного элемента на базе кристалла с температурной компенсацией. Благодаря такой конструкции можно уменьшить место, занимаемое чувствительным элементом в трубопроводе. Так, для температурной компенсации требуется поместить в трубопровод два чувствительных элемента: один — датчик расхода, второй — датчик температуры, а при использовании кристалла эти два чувствительных элемента объединяются на одной подложке.

**Классификация термоанемометрических датчиков.** Классификация термоанемометрических датчиков представлена на рис. 1.



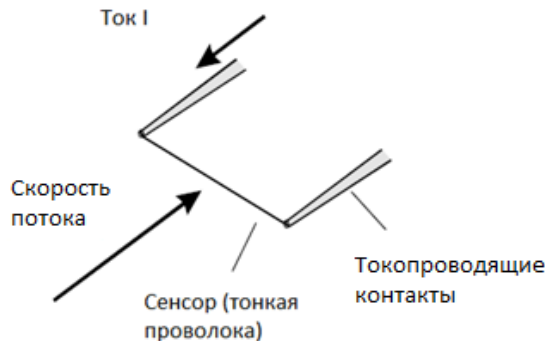
**Рис. 1.** Классификация термоанемометрических датчиков

Все термоанемометрические датчики расхода воздуха можно подразделить на пленочные и проволочные. К проволочным относятся те датчики, в которых в качестве чувствительного элемента используется тонкая проволока из какого-

либо материала. Этими материалами могут быть чистая платина, платиноиридиевый сплав, вольфрам с золотым напылением и т. д. Чаще всего используют вольфрамовые и платиноиридиевые чувствительные элементы.

Среди пленочных чувствительных элементов различия имеются не только в материале пленки, но и в конструкционном исполнении. Существует три вида пленочных датчиков: с пленочным чувствительным элементом на стержне, на подложке и скрытые пленочные чувствительные элементы. Пленочные датчики на стержне характеризуются тем, что пленка наносится на стержень из кварца. Такие чувствительные элементы могут закрепляться между двумя токопроводящими контактами или при помощи консольного закрепления, когда один конец чувствительного элемента жестко закреплен, а второй конец не закреплен. Пленочные датчики на подложке представляют собой тонкую металлическую пленку, нанесенную на плоскую кварцевую подложку. В скрытых пленочных датчиках чувствительный элемент закрепляется в стенке трубопровода и не влияет на прохождение потока воздуха, но с помощью таких датчиков можно определить только наличие или отсутствие потока воздуха.

**Принцип работы термоанемометрического датчика расхода.** *Основные принципы работы термоанемометрического датчика расхода.* Базовым принципом работы является передача теплоты от нагретой проволоки к потоку газа. Передача теплоты зависит от скорости потока газа. Простейшая схема устройства чувствительного элемента представлена на рис. 2.



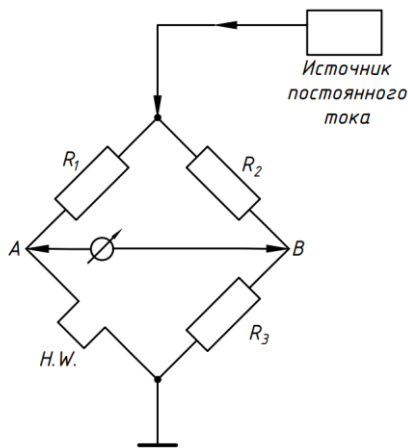
**Рис. 2.** Простейшая схема устройства чувствительного элемента в термоанемометрическом датчике расхода

Во время работы датчика через проволоку течет ток  $I$ , соответственно вырабатывается количество теплоты  $Q = I^2 R$ . Это количество теплоты должно быть уравновешено потерями теплоты в окружающую среду. При изменении скорости потока газа коэффициент передачи теплоты изменится, соответственно изменится и температура проволоки, установится новое состояние равновесия.

Существует два метода построения управляющей схемы для получения данных с датчика, которые будут рассмотрены далее. Рассматривать будем упрощенный вариант, когда управляющая схема состоит из источника постоянного тока, измерительного узла и калибровочного узла.

**Метод постоянного тока для измерения расхода воздуха.** В качестве измерительного узла схемы используется тонкая проволока, а в качестве калибровочного — резистор с переменным сопротивлением.

После сборки датчика осуществляют его однократную калибровку. Для этого сопротивление калибровочного резистора  $R_3$  подбирают так, чтобы разность напряжений между точками  $A$  и  $B$  была нулевой. Пример управляющей схемы приведен на рис. 3.

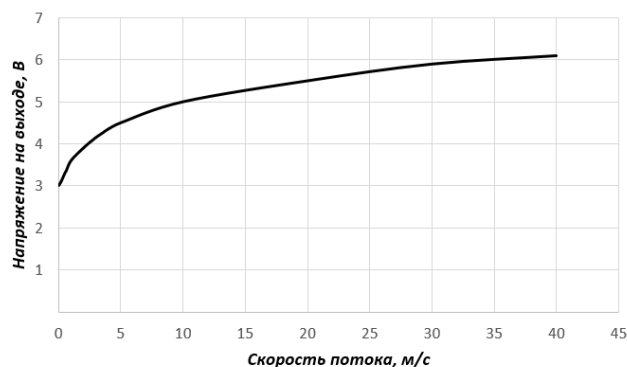


**Рис. 3.** Схема управления чувствительным элементом датчика расхода

При использовании данного метода через проволоку поддерживается постоянный ток. Когда поток газа проходит через участок трубопровода, в котором установлен датчик расхода, происходит передача теплоты от проволоки к газу (проволока обозначена на рис. 3 как  $H.W.$ ). Если тепловой поток уменьшается, то сопротивление проволоки тоже уменьшается. Таким образом, на выходе появляется несбалансированное напряжение, равное разности падений напряжений между точками  $A$  и  $B$ .

Скорость потока воздуха при применении метода постоянного тока определяется через изменение сопротивления проволоки. Данный метод очень чувствителен к изменению потока газа. При низкой скорости потока есть шанс перегорания проволоки, а при высокой скорости датчик не может обеспечить достаточную точность.

Изменяя скорость потока и измеряя напряжение на выходе схемы, можно получить калибровочную кривую зависимости напряжения от скорости потока. Пример такой кривой приведен на рис. 4.



**Рис. 4.** Пример калибровочной кривой зависимости напряжения от скорости потока для метода постоянного тока

В случае необходимости обнаружения очень быстрых изменений скорости потока будет наблюдаться задержка, обусловленная тепловой инерцией чувствительного элемента (тонкой проволоки). Зависимость погрешности измерения  $K$  от частоты изменения скорости потока  $f$  приведена на рис. 5.

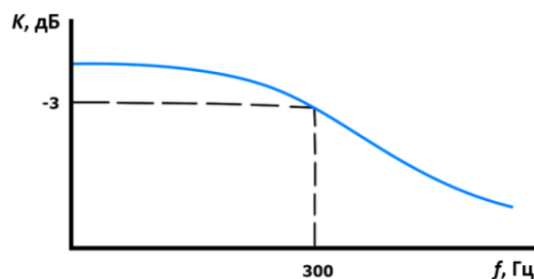


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения от частоты изменения скорости потока

Примерная частота изменения скорости потока, при которой погрешности в измерениях будут малозначительными, составляет  $f_{\max} = 300$  Гц. Такая характеристика чувствительного элемента получается путем тестирования при помощи прямоугольного импульса.

**Метод постоянной температуры для измерения расхода воздуха.** Применение данного метода наиболее распространено в датчиках расхода воздуха, поскольку он является наиболее точным. Здесь, как и в ранее описанном методе, используется мостовая схема соединения резисторов и чувствительного элемента. Упрощенный пример схемы приведен на рис. 6.

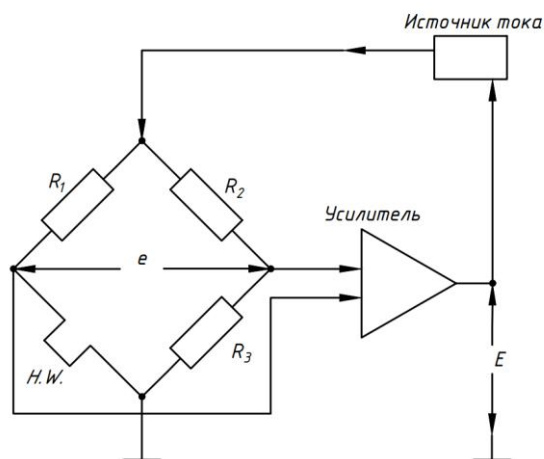


Рис. 6. Пример схемы для метода постоянной температуры

В данном случае выбирают постоянные сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , а также резистора с переменным сопротивлением  $R_3$ . Соотношение сопротивлений резисторов должно быть следующим:

$$\frac{R_1}{R_w} = \frac{R_2}{R_3}, \quad (1)$$

где  $R_w$  — сопротивление нагретой проволоки (обозначена на рис. 6 как  $H.W.$ ).

Метод основан на поддержании постоянной температуры проволоки. Принимается во внимание тот факт, что сопротивление является функцией от температуры. Как и в предыдущем методе, сопротивление переменного резистора должно быть подобрано так, чтобы разница напряжений на входах операционного усилителя была равна нулю.

Изменение скорости потока газа изменяет температуру проволоки, а соответственно и ее сопротивление. Таким образом появляется разность напряжений на входах операционного усилителя. Эта разность усиливается на операционном усилителе и далее через обратную связь поддерживает температуру проволоки, а соответственно и ее сопротивление. В результате этого изменяется ток. Эти изменения тока могут быть определены для последующего вычисления скорости потока воздуха.

В отличие от предыдущего метода, поскольку температура проволоки поддерживается постоянной, задержки из-за тепловой инерции практически отсутствуют, но имеются задержки в изменении тока, протекающего через проволоку.

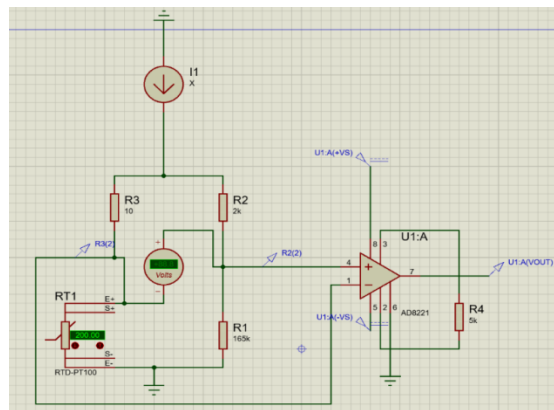


Рис. 7. Внешний вид схемы датчика расхода воздуха для метода постоянной температуры

**Симуляция работы датчика расхода воздуха. Датчик расхода воздуха на методе постоянной температуры.** При использовании данного метода считают, что температура нагрева чувствительного элемента остается постоянной. Сопротивление резистора  $R_1$  подобрано так, чтобы при температуре максимального нагрева проволоки ( $200^\circ$ ) разница напряжений между точками, к которым подключен вольтметр, была равна нулю. Номинальное сопротивление проволоки в симуляции составляет 470 Ом. Для начала симуляции необходимо, чтобы ток был равен 1 мА. Затем ток постепенно увеличивают до 10 мА, что симулирует увеличение тока через чувствительный элемент для поддержания в ней постоянной температуры при воздействии потока воздуха. Внешний вид схемы показан на рис. 7. За-

зависимость выходного напряжения операционного усилителя от тока приведена на рис. 8. Зеленым цветом на рисунке обозначено изменение напряжение на выходе инструментального усилителя, а красным цветом — изменение разности напряжений на датчике. Моделирование схемы выполнено в программной среде Proteus.

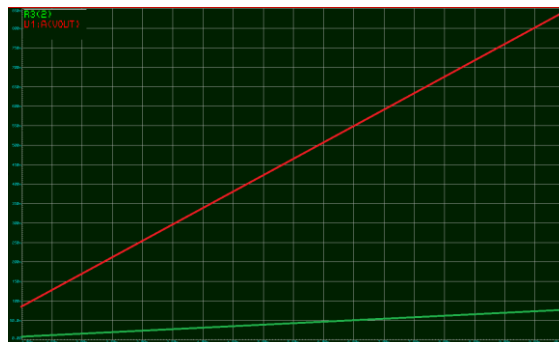


Рис. 8. График зависимости выходного напряжения инструментального усилителя от изменения тока через проволоку

**Датчик расхода воздуха на методе постоянного тока.** В данном методе ток, протекающий через чувствительный элемент, поддерживался равным 5 мА. С помощью изменения сопротивления от 470 до 600 Ом симулировали нагрев и охлаждение чувствительного элемента. Результаты симуляции приведены на рис. 9 и 10. Как и в предыдущей симуляции, зеленым цветом на графике обозначено изменение напряжение на выходе инструментального усилителя, а красным цветом — изменение разности напряжений на датчике. Моделирование схемы выполнено в программной среде Proteus.

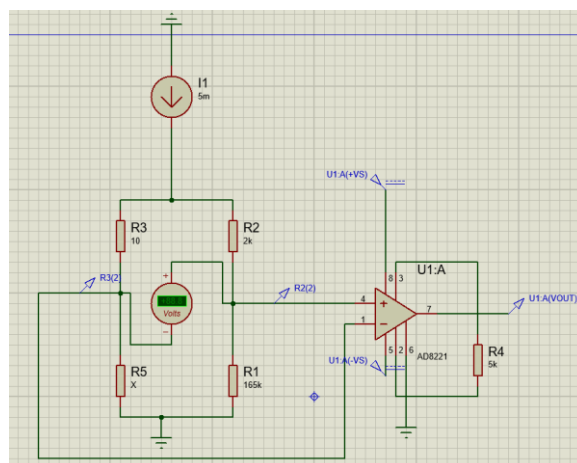
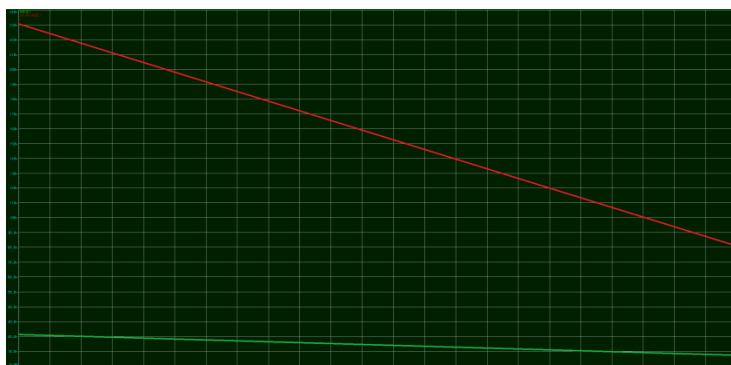


Рис. 9. Внешний вид схемы датчика расхода воздуха для метода постоянного тока

**Заключение.** Существует несколько методов реализации датчика расхода: метод постоянного тока и метод постоянной температуры. Они отличаются

друг от друга точною и принципами работы. Метод постоянной температуры более распространен, поскольку не оказывает негативных эффектов на чувствительный элемент.



**Рис. 10.** Зависимость выходного напряжения инструментального усилителя от изменения сопротивления проволоки

Чувствительный элемент должен обладать не слишком низким сопротивлением, чтобы обеспечить достаточную точность вычислений.

После сборки датчика необходимо выполнить его первоначальную калибровку и установить зависимость выходного напряжения от скорости потока.

По результатам симуляций можно сделать выводы, что представленные в методах постоянного тока и постоянной температуры схемы работают правильно, а зависимость выходного напряжения датчика от изменения сопротивления чувствительного элемента является линейной.

## Литература

- [1] Eguti C., Del Rio Viera E. Development of a basic circuit of a hot-wire anemometer. *Proc. ENCIT*, 2004. URL: [https://www.researchgate.net/publication/324673924\\_DEVELOPMENT\\_OF\\_A\\_BASIC\\_CIRCUIT\\_OF\\_A\\_HOT-WIRE\\_ANEMOMETER](https://www.researchgate.net/publication/324673924_DEVELOPMENT_OF_A_BASIC_CIRCUIT_OF_A_HOT-WIRE_ANEMOMETER)
- [2] Bestion D., Gaviglio J., Bonnet J.P. Comparison between constant-current and constant-temperature hot-wire anemometers in high-speed flows. *Rev. Sci. Instrum.*, 1983, vol. 54, no. 11, art. 1513. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1137279>
- [3] Popiolek Z., Jørgensen F.E., Melikov A.K., et al. Assessment of uncertainty in measurements with low velocity thermal anemometers. *Int. J. Vent.*, 2007, vol. 6, no. 2, pp. 113–128. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2007.11683771>
- [4] Prajapati H., Deshmukh N.N. Design and development of thin wire sensor for transient temperature measurement. *Measurement*, 2019, vol. 140, pp. 582–589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.020>
- [5] Gao Y., Ramirez B.C., Hoff S.J. Omnidirectional thermal anemometer for low airspeed and multi-point measurement applications. *Comput. Electron. Agric.*, 2016, vol. 127, pp. 439–450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.06.011>
- [6] Jensen K.D. Flow measurements. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2004, vol. 26 no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782004000400006>



- [7] Адамов А.П., Адамова А.А., Цивинская Т.А. Сенсоры для систем контроля герметичности корпуса летательного аппарата. *Надежность и качество сложных систем*, 2018, № 4, с. 134–141. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2018-4-15>
- [8] Власов А.И., Журавлева Л.В., Сергеева Н.А. и др. Анализ применения средств оценки массового расхода в энергосберегающих системах. *Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах. Тез. док. 2-ой Межд. конф.* Тамбов, Изд-во Першина Р.В., 2015, с. 63–65.

**Колоколов Максим Игоревич** — студент кафедры «Конструирование и технология электронной аппаратуры», МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Кудря Антон Андреевич** — студент кафедры «Конструирование и технология электронной аппаратуры», МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Власов Андрей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технология электронной аппаратуры», МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Колоколов М.И., Кудря А.А. Комплексная судебная экспертиза: проблемы правового регулирования. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 02(55). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-02-677>

---

**AIR FLOW SENSOR DESIGN PRINCIPLES**
**M.I. Kolokolov**

maxkol12@mail.ru

SPIN-code: 6970-1785

**A.A. Kudrya**

Anton.Kudrya@gmail.com

SPIN-code: 7733-5271

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation****Abstract**

The paper describes the basic principles of designing an air flow sensor. The classification of hot-wire sensors is carried out. The basic principles of operation of such sensors are considered. The simplest diagram of the probe in the hot-wire anemometer flow sensor, as well as the probe control circuit are presented. A constant current method for measuring air flow and a constant temperature method for measuring air flow are described. The simulation of the air flow sensor operation was carried out using two methods. It is concluded that the dependence of the output voltage of the sensor on the change in the probe resistance is linear.

**Keywords**

Hot-wire anemometry, classification of hot-wire sensors, probe, direct current method, constant temperature method, operating principle of hot-wire sensors, probe control circuit, simulation of the air flow sensor

Received 08.12.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

**References**

- [1] Eguti C., Del Rio Viera E. Development of a basic circuit of a hot-wire anemometer. *Proc. ENCIT*, 2004. URL: [https://www.researchgate.net/publication/324673924\\_DEVELOPMENT\\_OF\\_A\\_BASIC\\_CIRCUIT\\_OF\\_A\\_HOT-WIRE\\_ANEMOMETER](https://www.researchgate.net/publication/324673924_DEVELOPMENT_OF_A_BASIC_CIRCUIT_OF_A_HOT-WIRE_ANEMOMETER)
- [2] Bestion D., Gaviglio J., Bonnet J.P. Comparison between constant-current and constant-temperature hot-wire anemometers in high-speed flows. *Rev. Sci. Instrum.*, 1983, vol. 54, no. 11, art. 1513. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1137279>
- [3] Popiolek Z., Jørgensen F.E., Melikov A.K., et al. Assessment of uncertainty in measurements with low velocity thermal anemometers. *Int. J. Vent.*, 2007, vol. 6, no. 2, pp. 113–128. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2007.11683771>
- [4] Prajapati H., Deshmukh N.N. Design and development of thin wire sensor for transient temperature measurement. *Measurement*, 2019, vol. 140, pp. 582–589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.020>
- [5] Gao Y., Ramirez B.C., Hoff S.J. Omnidirectional thermal anemometer for low airspeed and multi-point measurement applications. *Comput. Electron. Agric.*, 2016, vol. 127, pp. 439–450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.06.011>
- [6] Jensen K.D. Flow measurements. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2004, vol. 26 no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782004000400006>
- [7] Adamov A.P., Adamova A.A., Tsivinskaya T.A. Sensors for control systems of tightness of the case of the aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability & Quality of Complex Systems], 2018, no. 4, pp. 134–141. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2018-4-15> (in Russ.).

- [8] Vlasov A.I., Zhuravleva L.V., Sergeeva N.A., et al. [Analysis of using assessment tools for mass flow rate in energy-saving systems]. *Aktual'nye problemy energosberezheniya i energoeffektivnosti v tekhnicheskikh sistemakh. Tez. dok. 2-oy Mezhd. konf.* [Actual Problems of Energy Saving and Energy Efficiency in Technical Systems. Abs. 2<sup>nd</sup> Int. Conf.]. Tambov, Izd-vo Pershina R.V., 2015, pp. 63–65 (in Russ.).

**Kolokolov M.I.** — Student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Kudrya A.A.** — Student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Vlasov A.I., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Kolokolov M.I., Kudrya A.A. Air flow sensor design principles. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 02(55). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-02-677.html> (in Russ.).