

*В. Н. Ашанин, А. А. Мельников, С. А. Цуриков*

## **ИЗМЕРИТЕЛЬ МГНОВЕННОГО МАССОВОГО РАСХОДА ВОЗДУХА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ АВТОМОБИЛЯ**

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются датчики массового расхода воздуха для электронных систем управления двигателем автомобиля. Предметом исследования является микропроцессорный измеритель мгновенного массового расхода воздуха, в котором реализован ультразвуковой способ измерения. Целью работы является расширение функциональных возможностей и повышение точности измерителя мгновенного массового расхода воздуха за счет использования способа измерения фазового сдвига ультразвуковых волн, распространяющихся по и против воздушного потока.

*Материалы и методы.* Исследования метрологических характеристик разработанного средства измерения с реализацией натурного макета чувствительного элемента и схемотехнического решения на основе виртуального лабораторного комплекса NI ELVIS.

*Результаты.* Разработаны конструкция ультразвукового датчика, структурная и принципиальная схемы электронного микропроцессорного блока обработки информации и алгоритм функционирования измерителя массового расхода воздуха в штатном и внештатном режимах. Устройство может быть использовано в составе электронных систем автоматического управления бензиновым двигателем внутреннего сгорания транспортного средства.

*Выводы.* Микропроцессорный измеритель мгновенного массового расхода воздуха обеспечивает возможность измерять массовый расход воздуха в двух направлениях с повышенной точностью, используя результаты измерений мгновенного значения температуры и плотности воздушной среды.

**Ключевые слова:** электронный блок управления, измеритель расхода воздуха, ультразвуковой преобразователь, фазовый сдвиг ультразвуковых волн, метрологические характеристики.

*V. N. Ashanin, A. A. Mel'nikov, S. A. Tsurikov*

## **INSTANTANEOUS MASS AIR CONSUMPTION METER FOR CAR ENGINE CONTROL SYSTEMS**

### **Abstract.**

*Background.* The research object is the mass air consumption meters for electronic systems of car engine control. The research subject is a microprocessor instantaneous mass air consumption meter that features the method of ultrasound measurement. The aim of the work is to expand functional capacities and to improve accuracy of the instantaneous mass air consumption meter by using the method of ultrasound waves' phase shift measurement that spread up and down the air flow.

*Materials and methods.* The authors researched metrological characteristics of the developed measurement device with realization of a full-size sensing element sample and schematic solution on the basis of the NI ELVIS virtual laboratory complex.

*Results.* The authors developed an ultrasound sensor's construction, structural and principal schemes of an electronic microprocessor unit of data processing and a functioning algorithm for the mass air consumption meter in normal and extreme modes. The device can be used as a part of electronic systems of gasoline internal-combustion engine control.

*Conclusions.* The microprocessor instantaneous mass air consumption meter provides an opportunity to measure mass air consumption in both directions with improved accuracy using the results of instantaneous temperature and air density measurements.

**Key words:** electronic control unit, air consumption meter, ultrasonic transducer, phase shift of ultrasonic wave, metrological characteristics.

### Введение

Для определения нагрузки бензинового двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автомобиля большинство современных электронных систем управления содержат термоанемометрические датчики массового расхода воздуха [1, 2]. К их основным недостаткам следует отнести низкие надежность функционирования и точность измерения массового расхода. Это связано с расположением чувствительного элемента датчика в потоке всасываемого воздуха, что приводит к сильному влиянию на работоспособность и показания датчика различных загрязнений. Кроме того, анемометрические датчики не могут определять направление воздушного потока, что ухудшает характеристики датчика при сильно пульсирующих потоках, когда наряду с прямыми потоками возникают и обратные воздушные потоки [1, 3].

В связи с этим создание точного и надежного расходомера, определяющего мощностные, экологические и экономические характеристики ДВС автомобиля, является актуальной задачей.

### 1. Конструкция и принцип работы расходомера

Повысить метрологические и эксплуатационные характеристики измерителя расхода воздуха возможно при использовании ультразвуковых методов. С этой целью в большинстве промышленных и бытовых ультразвуковых расходомеров используется времяпролетный принцип измерения с применением двух и более ультразвуковых преобразователей [4, 5].

В этом случае точность измерения скорости воздушного потока в основном определяется точностью измерения времен распространения ультразвуковых сигналов, излученных по и против потока [5]. Недостатком подобных технических решений является невысокая точность измерения из-за сильной зависимости скорости ультразвука от температуры. Данный способ вычисления расхода газа или жидкости приемлем для бытовых устройств, где параметры потока меняются незначительно. Кроме того, существующие ультразвуковые расходомеры жидкостей и газов, применяемые в промышленности, измеряют объемный, а не массовый расход, как того требует система управления ДВС автомобиля. Если применить его для автомобильного расходомера, то будет значительная погрешность при изменении температуры всасываемого воздуха.

С целью повышения метрологических характеристик измерителя массового расхода воздуха предлагается использовать в качестве информативно-

го сигнала не время распространения ультразвуковых сигналов [5], а фазовый сдвиг между ультразвуковыми волнами, распространяющимися по потоку воздуха и против него.

В этом случае конструктивно ультразвуковой датчик (рис. 1) состоит из трех ультразвуковых преобразователей, один из которых является источником (излучающим ультразвуковым преобразователем – ИУЗП), а два других – приемниками ультразвуковых импульсов (принимающими ультразвуковыми преобразователями – ПУЗП1,2), двух усилителей напряжения У1,2 и двух фазовых детектора ФД1,2.

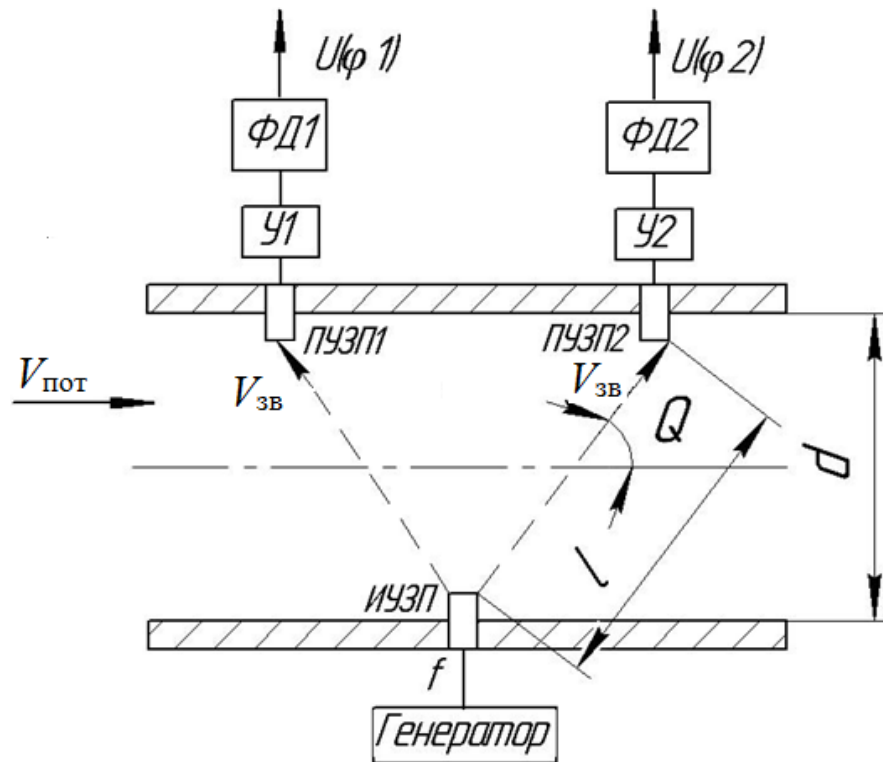


Рис. 1. Конструкция ультразвукового датчика расходомера

Время прохождения ультразвуковым сигналом воздушного потока зависит от длины пути  $l$  в потоке, которое определяется диаметром трубопровода  $d$ , углом ввода ультразвука в поток  $\theta$ , а также скоростью ультразвука в воздушном потоке  $V_{зв}$  и скоростью движения потока  $V_{пот}$ .

Исходными данными для вычисления массового расхода воздуха являются фазовые сдвиги сигналов с принимающих ультразвуковых преобразователей:

$$\varphi_1 = \frac{l}{V_{зв} - V_{пот} \cos \theta} \cdot \omega, \quad \varphi_2 = \frac{l}{V_{зв} + V_{пот} \cos \theta} \cdot \omega,$$

где  $\omega$  – частота ультразвуковых колебаний.

В результате совместного решения приведенных выше уравнений можно определить скорость потока воздуха:

$$V_{\text{пот}} = \frac{l \cdot \omega \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)}{2\varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \cos \Theta}.$$

Как видно из полученной формулы, скорость потока воздуха зависит от сдвига фаз  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и не зависит от скорости ультразвука в воздушном потоке  $V_{\text{зв}}$ . Параметры  $l$ ,  $\omega$ ,  $\cos \theta$  являются константами, определяемыми конструкцией ультразвукового датчика.

Определив скорость потока воздуха  $V_{\text{пот}}$ , можно определить объемный расход воздуха  $W$  по формуле

$$W = V_{\text{пот}} \cdot S = V_{\text{пот}} \cdot \pi \frac{d^2}{4},$$

где  $S$  – площадь сечения трубопровода.

Масса  $m$  расходуемого воздуха во входном коллекторе ДВС связана с его плотностью  $\rho$  и объемом  $W$

$$m = W \cdot \rho.$$

Плотность воздуха можно найти по известной формуле

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T},$$

где  $p$  – абсолютное давление;  $M$  – молярная масса;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура, К.

Для измерения абсолютного давления в разработанном измерителе используется промышленный датчик абсолютного давления. Температура воздуха вычисляется по температурной зависимости скорости ультразвука на основе эмпирической формулы [4]:

$$V_{\text{зв}} = V_{\text{зв}}(0^\circ) + 0,59 \cdot T_C,$$

где  $V_{\text{зв}}(0^\circ)$  – скорость звука в воздухе при  $0^\circ\text{C}$ , равная 331 м/с;  $T_C$  – температура по шкале Цельсия.

Результатом несложных преобразований является конечная формула для вычисления мгновенного массового расхода воздуха:

$$m = \frac{l\omega(\varphi_1 - \varphi_2)}{2\varphi_1\varphi_2 \cos \theta} \pi \frac{d^2}{4} \frac{pM}{R \cdot \left[ 1,695 \cdot \left( \frac{l\omega(\varphi_1 + \varphi_2)}{2\varphi_1\varphi_2} - V_{\text{зв}}(0^\circ) \right) + 273 \right]}.$$

## 2. Реализация и экспериментальные исследования расходомера

В соответствии с полученной формулой для вычисления массового расхода воздуха разработана структурная схема ультразвукового измерителя мгновенного массового расхода воздуха, представленная на рис. 2.

В штатном режиме синусоидальный сигнал поступает с генератора на излучающий ультразвуковой преобразователь. Ультразвуковая волна, проходя через поток воздуха, поступает на принимающие ультразвуковые преобразователи, находящиеся по направлению потока воздуха и против. В зависимости от скорости потока воздуха изменяются фазы ультразвуковых волн.

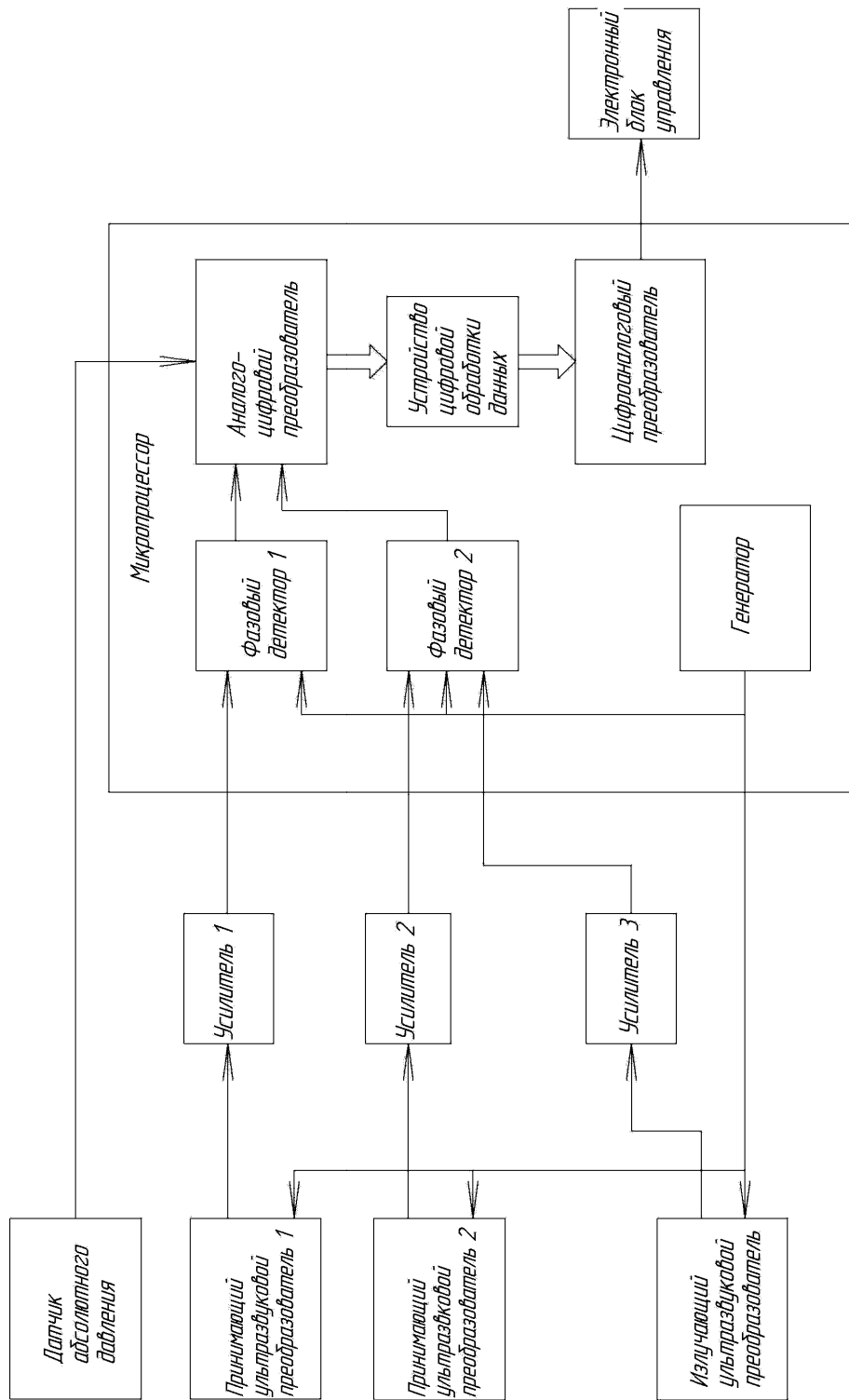


Рис. 2. Схема электрическая структурная ультразвукового измерителя мгновенного массового расхода воздуха

Переменное напряжение с ультразвуковых преобразователей усиливается и передается на блок вычисления фазового сдвига относительно сигнала с генератора. Полученные значения преобразуются в цифровой код и поступают на блок определения мгновенного массового расхода. Полученный расход преобразуется в электрическое напряжение и передается в электронный блок управления ДВС автомобиля.

С целью обеспечения функционирования измерителя расхода воздуха во внештатных режимах предусмотрены дополнительные режимы работы при выходе из строя одного из ультразвуковых преобразователей.

При выходе из строя одного из ПУЗП расходомер будет работать по принципу времяпролетного измерения скорости потока воздуха. При выходе из строя ИУЗП расходомер также будет работать по времяпролетному принципу, но излучение и прием ультразвуковой волны будет поочередно осуществляться принимающими ультразвуковыми преобразователями с отражением ультразвуковой волны от противоположной стенки расходомера.

Принципиальная схема ультразвукового измерителя расхода реализована на основе 32-разрядного микропроцессора типа ST32F103RET6 (рис. 3). Сигнал с ультразвуковых преобразователей усиливается операционным усилителем МСР6004 и обрабатывается микропроцессором *DD1*. Измерение абсолютного давления *DA3* производится датчиком типа *HP03S*. Стабилизатор напряжения выполнен на микросхеме *DA2* типа *MCP1703T*. На выходе микропроцессора формируется электрическое напряжение, которое передается в электронный блок управления ДВС автомобиля.

Экспериментальные исследования были проведены на основе разработанного макетного образца чувствительного элемента датчика и реализованной цепи обработки сигнала с ультразвуковых преобразователей на основе лабораторного комплекса NI Elvis (рис. 4). Вычисление массового расхода воздуха происходит по программе, составленной в программной среде LabView (рис. 5). При проведении лабораторного эксперимента к трубопроводу с ультразвуковыми пьезоэлементами, являющимися чувствительной частью датчика массового расхода воздуха, присоединялся вентилятор, создающий поток воздуха с регулируемой скоростью.

Экспериментальные данные зависимости массового расхода воздуха  $m$  от разности фаз  $\Delta\varphi$  представлены в табл. 1. На рис. 6 представлен график данной зависимости.

Для более точного определения передаточной функции ультразвукового датчика мгновенного массового расхода воздуха необходимо использование датчика потока воздуха с нормированными метрологическими характеристиками, с точностными параметрами выше, чем у разработанного датчика во всем диапазоне изменения воздушного потока, т.е. от 0 до 500 кг/ч.

Второй возможный путь аттестации датчика предполагает сравнение показаний разрабатываемого датчика с эталонным (образцовым) датчиком, имеющим точность преобразования не менее чем в 2 раза превосходящую точность разрабатываемого датчика.

В расходомерах, в которых используется способ определения массового расхода через скорость ультразвуковой волны, исходящий ультразвуковой сигнал принимается с некоторым запаздыванием, зависящим от уровня фонового шума ДВС, что является причиной повышения погрешности измерения.

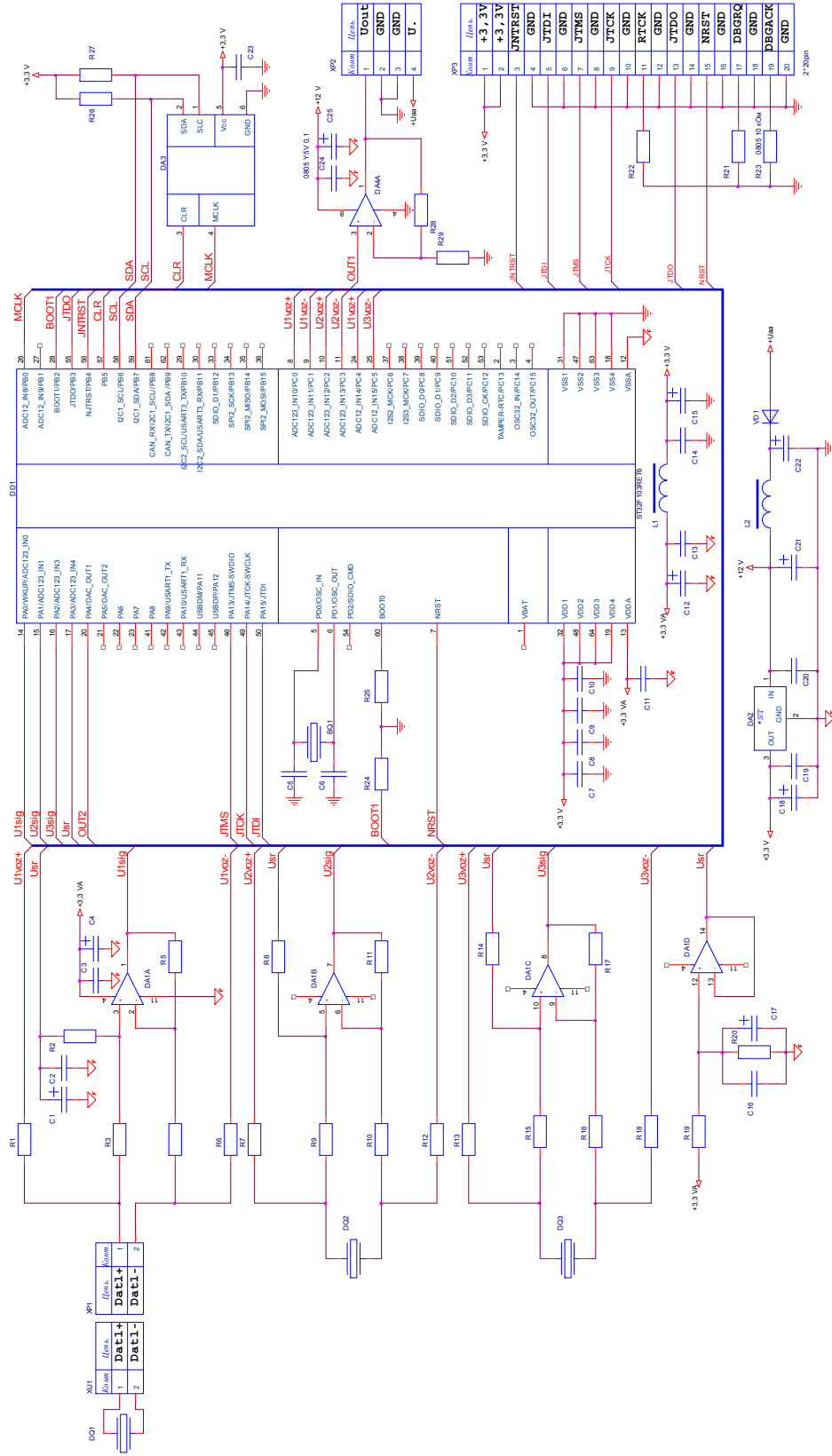


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема ультразвукового измерителя мгновенного массового расхода воздуха

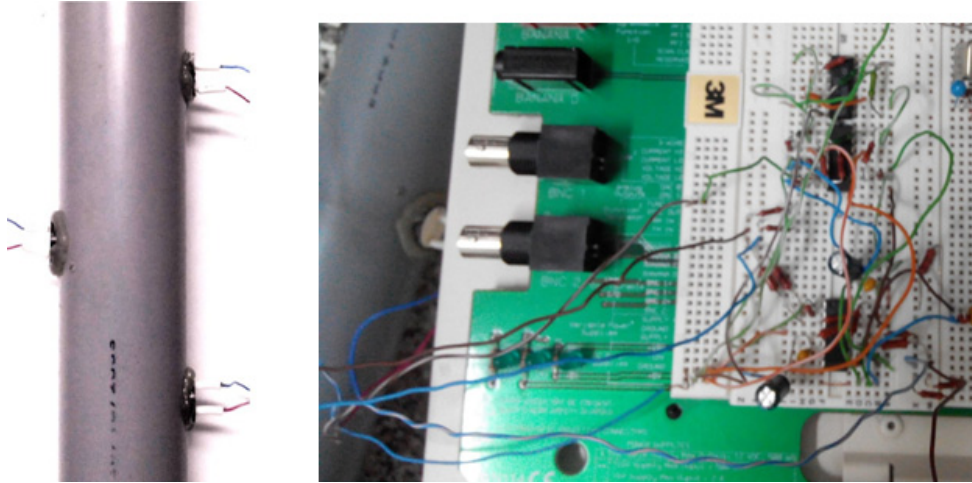


Рис. 4. Макеты чувствительного элемента ультразвукового датчика и электронного блока обработки сигнала с ультразвуковых преобразователей

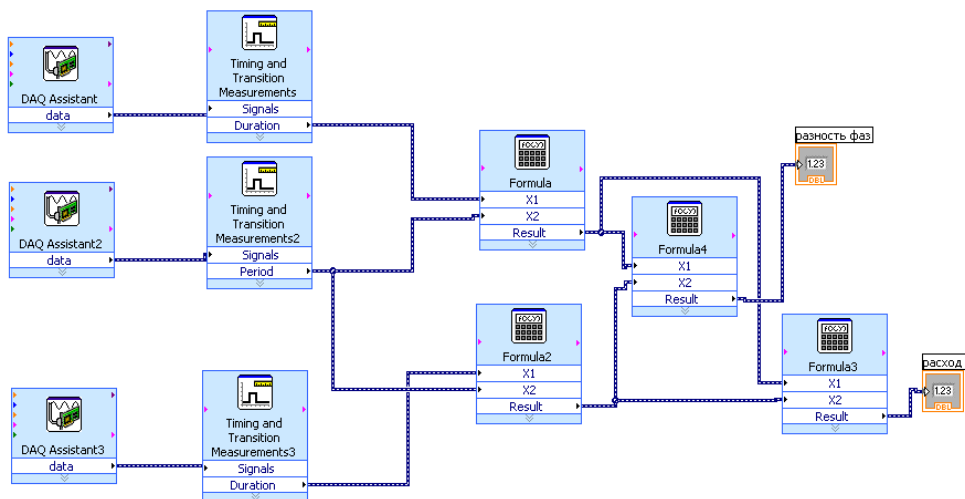


Рис. 5. Блок-схема программы для вычисления массового расхода воздуха на основе лабораторного комплекса NI Elvis

Таблица 1

Зависимость массового расхода от разности фаз

Δφ, град	m, кг/ч
0	0
121,74	3
284,15	7
446,7	11
609,53	15
772,7	19
977,3	24

Конструкция и принцип действия данного расходомера исключают фактор влияния шума ДВС. Это объясняется следствием того, что ультразву-



ковые волны распространяются непрерывно и скорость потока определяется через изменение фазы, а не через время распространения импульса ультразвуковой волны. Также отличием от применяемых датчиков является то, что температура воздуха вычисляется из температурной зависимости скорости ультразвука, что обеспечивает меньшую погрешность измерения.

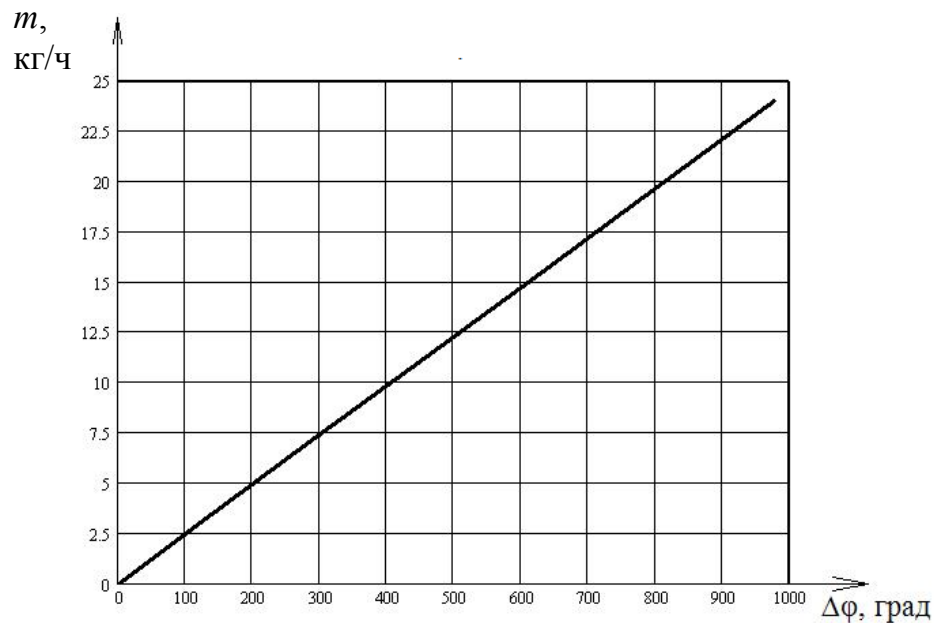


Рис. 6. Зависимость массового расхода воздуха от разности фаз

### Заключение

Новизна и оригинальность представленной идеи заключается в возможности измерять массовый расход воздуха в двух направлениях с повышенной точностью, используя результаты измерений мгновенного значения температуры и плотности воздушной среды.

Несомненным достоинством разработанного расходомера, является повышенная надежность работы.

### Список литературы

1. Системы управления бензиновыми двигателями : пер. с нем. – М. : За рулем, 2005. – 432 с.
2. Автомобильный справочник : пер. с англ. – М. : За рулем, 1999. – 896 с.
3. **Васильев, П. А.** Блок управления впрыском топлива и зажиганием ЭЛАРА-М автомобилями ГАЗ и УАЗ / П. А. Васильев и др. // Автотракторное электрооборудование. – 2002. – № 3. – С. 12–14.
4. **Мельников, А. А.** Ультразвуковые преобразователи в средствах измерения / А. А. Мельников, А. А. Мельников. – М. : Спутник, 2010. – 154 с.
5. Патент РФ № 2375682. Датчик ультразвукового расходомера / Адоньев В. Г., Мосин С. Т. – 2009. – БИ № 34.

### References

1. *Sistemy upravleniya benzinovymi dvigatelyami: per. s nem.* [System of gasoline engine control: translation from German]. Moscow: Za rulem, 2005, 432 p.

2. *Avtomobil'nyy spravochnik: per. s angl* [Automobile reference book: translation from English]. Moscow: Za rulem, 1999, 896 p.
3. Vasil'ev P. A. et al. *Avtotraktorное электрооборудование* [Autotractor electrical equipment]. 2002, no. 3, pp. 12–14.
4. Mel'nikov A. A. *Ul'trazvukovye preobrazovateli v sredstvakh izmereniya* [Ultrasound transducers in measuring means]. A. A. Mel'nikov. Moscow: Sputnik, 2010, 154 p.
5. Patent Russian Federation No. 2375682. Ultrasound flowmeter's sensor. Adon'ev V. G., Mosin S. T. 2009, bull No. 34.

---

***Ашанин Василий Николаевич***

кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и транспортного электрооборудования, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

***Ashanin Vasily Nikolaevich***

Candidate of engineering sciences, professor, head of sub-department of electrical engineering and transport electrical equipment, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Мельников Анатолий Аркадьевич***

ведущий инженер, кафедра электротехники и транспортного электрооборудования, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

***Mel'nikov Anatoliy Arkad'evich***

Leading engineer, sub-department of electrical engineering and transport electrical equipment, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Цуриков Сергей Александрович***

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

***Tsurikov Sergey Aleksandrovich***

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 621.317.39

**Ашанин, В. Н.**

**Измеритель мгновенного массового расхода воздуха для системы управления двигателем автомобиля / В. Н. Ашанин, А. А. Мельников, С. А. Цуриков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 120–129.**