

Автоматизация процесса измерения параметров чувствительных элементов датчиков расхода газа

В.Т. Рябов¹, Н.А. Дюжев², Д.В. Новиков²

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

²*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*

novikov@unicm.ru

Изучение характеристик и погрешностей сенсоров представляет собой не менее сложную задачу, чем их разработка и изготовление. Для коррекции конструкции макетов сенсоров, а также для точной начальной градуировки готовых датчиков требуется точное исследование работы сенсоров.

Описан стенд для исследования чувствительных элементов датчиков расхода газа, в которых используется термоанемометрический и калориметрический режим измерения. Показано, что средства автоматического управления расходом газа и динамической фиксации результатов измерения позволяют обрабатывать и записывать результаты в миллисекундных интервалах времени, исследовать работу чувствительных элементов в импульсном режиме и имитировать работу микропроцессорной схемы обработки сигнала на аппаратном и программном уровне. Предлагаемый стенд дает возможность проводить измерения при разных температурах газа и температуре окружающей среды от -40 до $+60$ °С, контролировать атмосферное давление, позволяет задавать расход газа в диапазоне 0–119 л/мин.

Описанный стенд предназначен для разработки компактных датчиков расхода природного газа, которые могут заменить объемные диафрагменные счетчики размерного ряда G1,6, G2,5 и G4. Стенд позволяет проводить комплексные измерения сенсоров в одном месте и значительно сокращает время проведения испытаний разрабатываемых преобразователей.

Ключевые слова: автоматизированный стенд; МЭМС; расход газа; расходомер.

Для цитирования: Рябов В.Т., Дюжев Н.А., Новиков Д.В. Автоматизация процесса измерения параметров чувствительных элементов датчиков расхода газов // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 1. – С. 62–71. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-62-71

Automation of Process of Measuring Parameters of Sensitive Elements of Gas Consumption Actuators

V.T. Ryabov¹, N.A. Djuzhev², D.V. Novikov²

¹Moscow State Technical N.E. Bauman University, Moscow, Russia

²National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

novikov@unicm.ru

Currently, the sensors and actuators based on the MEMS products are increasingly used in a variety of applications. In the process of developing new products of the nano and microsystem equipment it is necessary to reliably determine the parameters of the obtained samples.

The stand for investigation of the MEMS-flow converters, operating in the anemometric and calorimetric modes, has been presented. The study on dependences of the MEMS-converter of gas flow on gas flow, temperature and thermoresistors parameters occurs in the millisecond time intervals and is completely automated, which makes it easy to collect the measurement statistics. The high speed of interrogation makes it possible to understand the transient processes that occur when the thermistors are heated and cooled, and to determine the optimum pulse duration for the measurement. Due to the fact that the stand uses a climatic chamber, the measurements can be carried out at different gas temperatures, which is quite important when making a corrective compensation of the temperature error of the converter. In addition, the stand permits to develop the schemes of preliminary analog processing of the converter signals. The proposed stand makes possible measurement at various temperatures of gas and environment from –40 up to 60 °C. It controls the atmospheric pressure, permits to specify the gas consumption in the 0–119 l/min range.

The automated stand significantly reduces the time for execution of the tests on the converters being developed and makes it possible to quickly obtain the transient characteristic of MEMS-converters for installation into an assembly.

Keywords: automated stand; mems; gas flow; flowmeter.

For citation: Ryabov V.T., Djuzhev N.A., Novikov D.V. Automation of process of measuring parameters of sensitive elements of gas consumption actuators // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 1. – P. 62–71. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-62-71

Введение. Объемные диафрагменные счетчики размерного ряда G1,6, G2,5 и G4 [1], широко используемые для измерения количества потребляемого в бытовых и производственных целях газа, имеют сравнительно большие габариты, что ограничивает их применение. Предлагаемый стенд предназначен для исследования и разработки компактных датчиков расхода природного газа, способных заменить объемные счетчики.

Тепловые первичные преобразователи на основе МЭМС-технологий служат основой для разработки компактных датчиков (счетчиков) расхода газа. Их выгодно отличает от объемных счетчиков высокая точность измерения массового расхода газа, малые габариты и высокая надежность, отсутствие подвижных частей, возможность одновременного измерения нескольких параметров потока, низкая стоимость производства благодаря групповой обработке. Однако они требуют питания нагревателя и измерительных схем и характеризуются сравнительно узким диапазоном измеряемого потока

газа. Динамический режим работы преобразователя, когда нагрев осуществляется короткими импульсами тока определенной скважности, может снизить расход энергии.

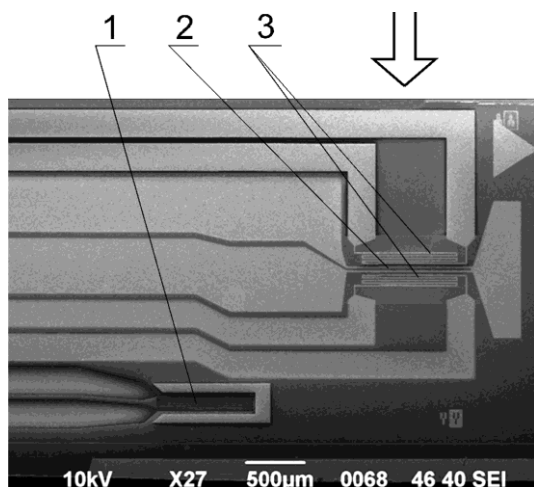


Рис.1. Топология чувствительного элемента (МЭМС-преобразователя) датчика расхода газа: 1 – терморезистор контроля окружающей среды; 2 – нагреватель; 3 – терморезисторы
 Fig.1. Sensor topology (MEMS transducer) of the gas flow meter: 1 – environmental thermistor; 2 – heater; 3 – two thermistors

элементов предназначен для решения задачи оптимизации конструкции МЭМС-преобразователей, для отработки схем предварительной аналоговой обработки сигналов чувствительного элемента и алгоритмов их последующей цифровой обработки в счетчике. Отличительной особенностью стенда является полная автоматизация исследования процессов теплообмена и возможность автоматической фиксации результатов в файл в миллисекундных интервалах времени. Для этого, помимо пневмосистемы, стенд оснащен инструментальным промышленным компьютером с устройствами цифрового и аналогового ввода-вывода и с программным обеспечением, написанным в среде Labview. Набор специальных аппаратных согласователей стыкует компьютер с МЭМС-преобразователем. Согласователи формируют управляемое компьютером непрерывное и импульсное питание терморезисторов преобразователя и согласовывают по уровню снимаемые с них сигналы со средствами аналогового ввода. Пневматическая схема стенда с указанием управляющих и контролируемых сигналов представлена на рис.2.

Сжатый воздух (имитатор газа) подается через ресивер RSV, осушитель DRY и редуктор RD к двум установленным параллельно регуляторам расхода газа RRG1 и RRG2 фирмы Massflow. Они управляются от компьютера сигналами аналогового управления au_RRG1 и au_RRG2 и обеспечивают подачу газа соответственно до 5 л/мин и до 117 л/мин. Фактический расход контролируется сигналами аналогового контроля ac_RRG1 и ac_RRG2. Эти регуляторы сертифицированы в Российской Федерации как средства измерения и имеют относительную погрешность не более $(\pm 0,5 + 0,1) \%$ шкалы. Два параллельно включенных регулятора используются для повышения точности задания и измерения потока в области малых расходов. Регуляторы расхода газа позволяют автоматически управлять расходом вплоть до 123 л/мин (ANR), что с запасом охватывает диапазоны номинального расхода счетчиков размерного ряда G1–G4.

Описание образцов. Образцы МЭМС-преобразователей представляют собой кремниевый кристалл, топология которого приведена на рис.1. Способы размещения образцов в потоке газа и некоторые результаты исследования описаны в работе [2].

МЭМС-преобразователи измеряются в двух режимах: калориметрическом и термоанемометрическом. Калориметрический режим измерения расхода реализуется, если импульс тока подать на нагреватель. О величине скорости потока судят по разности температур измерительных терморезисторов (см. рис.1). Термоанемометрический режим фиксирует падение температуры нагревателя за счет тепла, уносимого потоком газа в зависимости от его скорости [3–5]. В качестве нагревателей могут быть использованы и измерительные терморезисторы [6].

Описание стенда. Автоматизированный стенд для исследования чувствительных

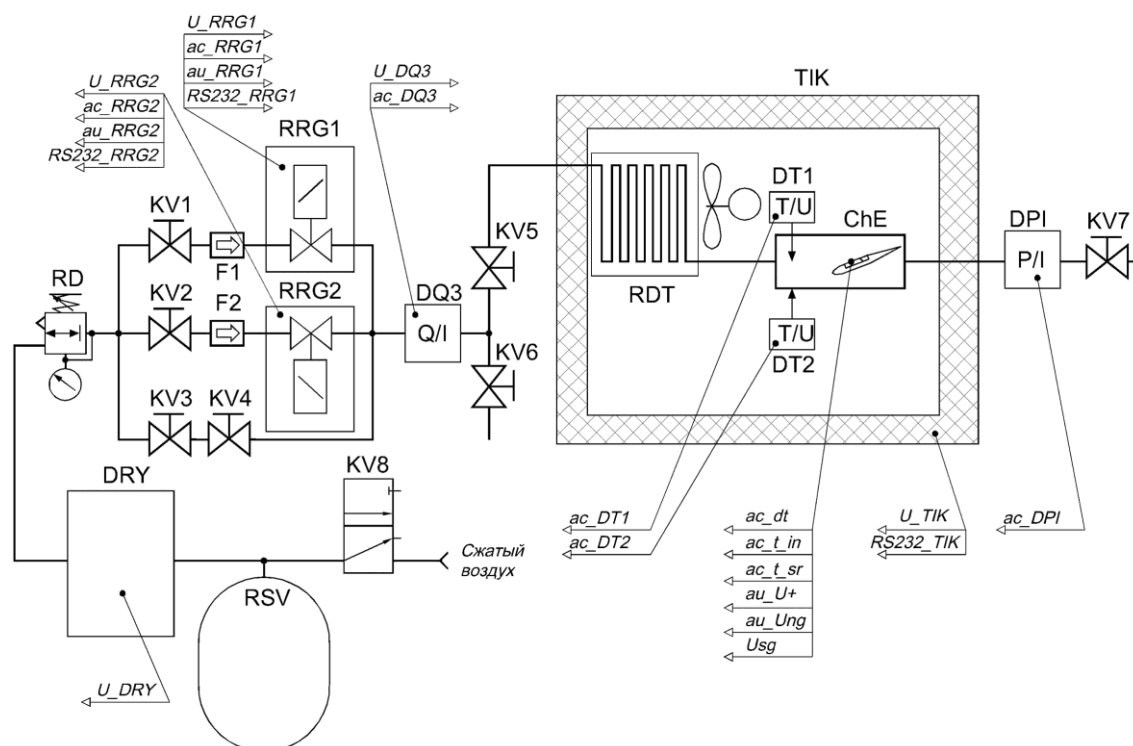


Рис. 2. Пневматическая схема стенда
Fig.2. Pneumatic diagram of the stand

Для исследования счетчиков с большим расходом предусмотрено ручное управление потоком. При этом открывается шаровый кран KV3 и настройка производится краном KV4. Расход газа контролируется по измерителю расхода DQ3 типа FMT400-VTS-DN25 фирмы АВВ. В этом случае максимальный расход составит до 120 л/мин. Далее поток разветвляется. Через клапан KV5 он поступает в радиатор RDT, размещенный в температурной испытательной камере Т-70/100, затем – в измерительный канал, в котором на специальном крыле установлен испытуемый МЭМС-преобразователь ChE [2]. Температура потока газа и корпуса измерительного канала контролируется термоэлектрическими преобразователями ДТПЛ 021-0,5/1,5 и нормирующими преобразователями НПТ-1.00.1.1 (DT1 и DT2 соответственно) фирмы ОВЕН. Выходные сигналы ac_DT1 и ac_DT2 (токовые в пределах 4–20 мА) обеспечивают в заданном диапазоне от –40 до +60 °С погрешность не более ±0,5 °С.

Как показали исследования, радиатор RDT и входящий в состав камеры вентилятор обеспечивают установление температуры потока от нормальной (+20 °С) до минимальной (–40 °С) или максимальной (+60 °С) не более чем за 1 ч во всем диапазоне автоматически задаваемых потоков. При этом заданная температура камеры, ее фактическая температура, измеряемая встроенным датчиком, температура, фиксируемая с помощью размещенного в камере дополнительного терморезистивного преобразователя (на рис.2 не показан), а также датчиками DT1 и DT2, различаются не более чем на 1 °С. На выходе потока газа установлен датчик избыточного давления DPI, выдающий токовый сигнал ac_DPI, регистрируемый информационно-управляющей системой стенда. Для ручного управления избыточным давлением внутри измерительного канала используется клапан KV7.

Исследуемый МЭМС-преобразователь ChE через аппаратные согласователи связан с информационно-управляющей системой стенда сигналами ac_dt, ac_t_In и ac_t_sr.

Они фиксируют разность температур терморезисторов, температуру нагревателя и кристалла. Сигналы аналогового управления au_U+ и au_Ung управляют токами терморезисторов и нагревателя МЭМС-преобразователя, а напряжение U_{sg} служит для формирования этих токов. Внешние дополнительные устройства для термостабилизации потока газа при расходах более 123 л/мин (ANR) (на рис.2 не показаны) подключаются с помощью клапана KV6.

Основу управляющей системы стенда составляет станция технологического управления IPC-SYS2-1-A5 (вычислительная станция WS) фирмы Fastwel, укомплектованная платой MOXA CP-118U для создания до 8 дуплексных каналов RS-232, платой аналогового вывода PCI-1720U-AE, многофункциональной платой ввода-вывода PCI-1741S-AE и платой релейных выходов PCL-735AE. Один из каналов RS-232 связывает вычислительную станцию с испытательной камерой ТИК и позволяет дистанционно управлять ею. Два канала использованы для дистанционной настройки регуляторов расхода газа RRG1 и RRG 2 (см. рис.2). Канал RS-232_VM служит для связи с универсальным вольтметром GW Instek GDM-8246/RS, который позволяет дополнительно проверять управляющие и контрольные каналы станции. Плата аналогового вывода PCI-1720U-AE фирмы Advantech содержит четыре 12-разрядных канала цифроаналогового преобразования и формирует аналоговые управляющие сигналы на RRG (au_RRG1 , au_RRG2) и согласователь МЭМС-преобразователя (au_U+ , au_Ung). Многофункциональная плата PCI-1741S-AE той же фирмы, помимо 16 каналов аналогового контроля и одного канала аналогового управления, содержит 16 каналов дискретного управления и дискретного контроля. В информационно-управляющей системе стенда используются только 9 из 16 каналов аналогового контроля. Преобразование 16-разрядное, частота оцифровки до 200 кГц. Плата релейных выходов PCL-735 используется для дистанционного открытия и закрытия встроенных клапанов регуляторов расхода газа (на рис.2 и 3 не показаны).

Программное обеспечение (ПО) стенда разработано в среде Labview. Для его написания применяются стандартные драйверы фирмы Advantech, поставляемые в комплекте с платами PCI-1720, PCI-1741 и PCL-735. При аналогово-цифровом преобразовании оказалась достаточной длительность 50 мкс, поэтому использовались драйверы с программным обнаружением конца преобразования. Для работы с различными согласователями, регуляторами расхода и другими элементами стенда создана библиотека приборов, структурирующая и унифицирующая разработку ПО. Результаты работы ПО записываются в унифицированные текстовые файлы, непосредственно открываемые в Excel.

На рис.3 показан скриншот программы испытания чувствительного элемента, совмещающего термоанемометрический и калориметрический режимы измерения расхода, что позволяет расширить диапазон измерения. При этом нагреватель, находящийся в центре мембраны (см. рис.1), не используется. В качестве нагревателя применяются терморезисторы, расположенные последовательно по потоку, на которых измеряется перепад температур и падение температуры терморезистора-нагревателя, стоящего первым по потоку.

Оператор вводит обозначения чувствительных элементов МЭМС-преобразователя. Все они предварительно обмеряются, и в базу данных заносятся сопротивление терморезисторов R_InOut , резистора среды R_sg и температурный коэффициент сопротивления. Измерительные каналы платы PCI-1741 настраиваются автоматически, и оператор лишь визуально контролирует настройку Config Ch1, Config Ch2, (см. рис.3).

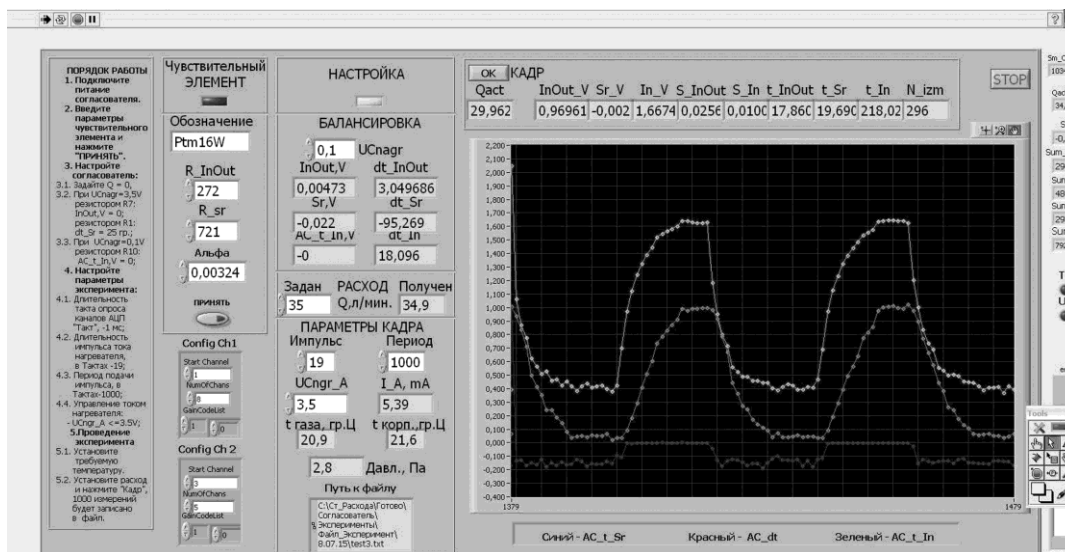


Рис.3. Скриншот программы исследования МЭМС-преобразователя, совмещающего калориметрический и термоанемометрический методы измерения
 Fig.3. Screenshot of MEMS-transducer research program combining calorimetric and thermo-anemometric methods of measurement

Балансировка проводится один раз при нормальной температуре (20 °С). После балансировки задаются параметры кадра измерений. Температурный кадр включает в себя 1000 измерений при каждом из задаваемых далее расходах. Заранее устанавливаются период и длительность импульса и управляющее напряжение U_{Cngr_A} , определяющее ток резистора-нагревателя в импульсе I_A , mA.

Кнопка «КАДР» запускает снятие кадра, при этом идет программное сканирование импульсов подачи тока на нагреватель. На рис.3 отображены: сигнал, снимаемый с резистора среды AC_t_Sr (синий); сигнал разности температур AC_dt (красный); сигнал с резистора-нагревателя AC_t_In (зеленый). Осциллограммы синхронизируются импульсом тока длительностью 19 мс, после завершения которого в течение 21 мс фиксируется остывание нагревателя. Переходный процесс при подаче импульса на нагреватель исследуемого чувствительного элемента длится не более 11–12 мс, для регистрации установившейся температуры в импульсе достаточно 19 мс, остывает нагреватель на мембране за 13–15 мс.

Программа фиксирует версию, дату и время испытания, обозначение испытуемого МЭМС-преобразователя и его параметры, а также следующие параметры температурного кадра: температуру газа t_g и канала преобразователя t_k ; избыточное давление в канале P_g ; ток нагревателя I_ng ; длительность импульса и цикла. Испытания МЭМС-преобразователя записываются при различных расходах, одна строка для заданного расхода формируется за 2 мин. При этом проводится 1000 измерений и фиксируются средний актуальный расход Q_{act} , сигналы от перепада температур терморезисторов $InOut$, от терморезисторов среды Sr и нагревателя In . Далее регистрируются среднеквадратичные отклонения параметров и расчетные значения температур, соответствующие измеренным сигналам с терморезисторов. Снятие полного температурного кадра для 10 различных расходов занимает около 25 мин.

Набор температурных кадров, снятых при различных температурах, позволяет исследовать параметры чувствительного элемента в зависимости от температуры измеряемого газа. На рис.4 показана графическая иллюстрация результатов обработки температурных кадров, снятых при температуре -40; 0; 20; 50 °С.

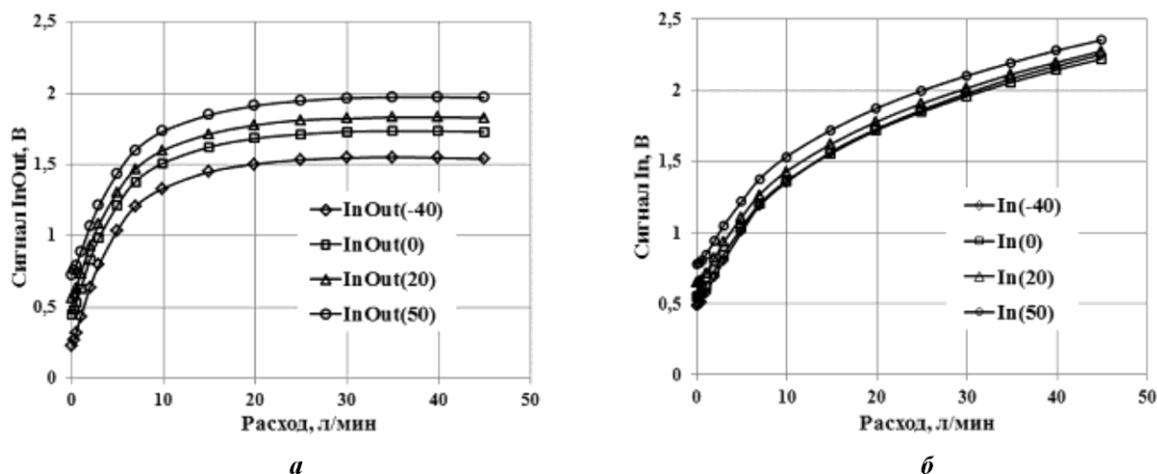


Рис.4. Зависимости сигнала перепада температур InOut и сигнала падения температуры нагревателя In от расхода газа при разной температуре среды
 Fig.4. Dependence of the signal of temperature difference InOut and the heater temperature drop signal In from the flow temperature

Температура потока существенно влияет как на разность температур терморезисторов-нагревателей t_{InOut} , так и на падение температуры нагревателя. Из рис.4 видно, что при изменении температуры газа на 90 °С (от -40 до +50 °С) возникает относительная погрешность около 35 %. Для уменьшения температурных погрешностей следует использовать аппаратную или алгоритмическую термокомпенсацию сигнала МЭМС-преобразователя.

Помимо исследования зависимостей параметров терморезисторов МЭМС-преобразователей от потока, температуры и давления газа, стенд позволяет макетировать счетчики расхода, обрабатывать схемы предварительной аналоговой обработки сигналов преобразователя и алгоритмы их последующей цифровой обработки. На рис.5 показан скриншот программы, которая имитирует работу счетчика, использующего только калориметрический режим измерения расхода газа в диапазоне до 42 л/мин.

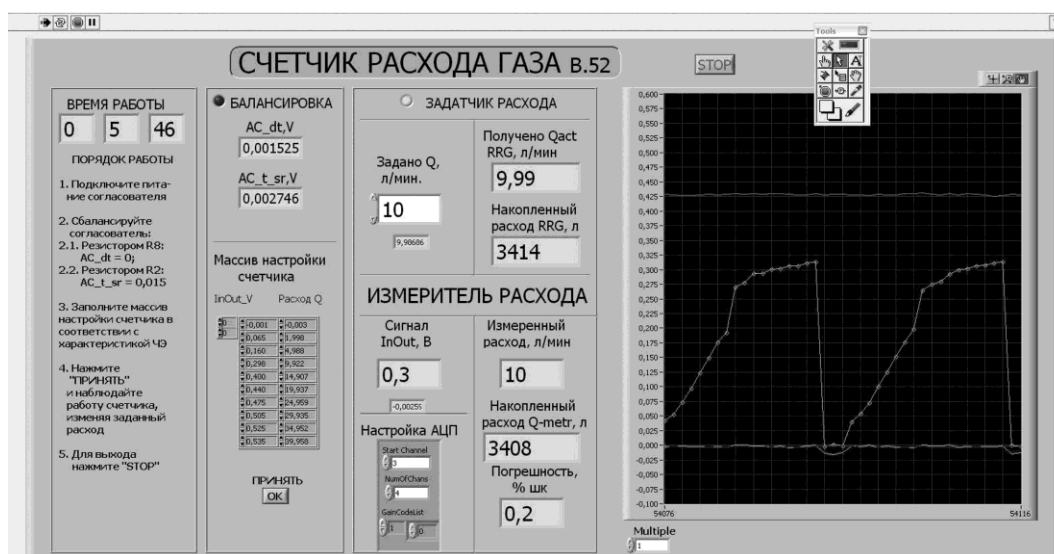


Рис.5. Скриншот программы моделирования счетчика расхода газа с МЭМС-преобразователем
 Fig.5. Screenshot of the flow meter simulation program with MEMS transducer

Аналоговая схема первичной обработки сигнала чувствительного элемента счетчика проста. Сначала схема аналоговой обработки сигнала балансируется в импульсном режиме при нулевом расходе. Для расчета расхода в зависимости от перепада температур резисторов InOut использована аппроксимация снятых на автоматизированном стенде зависимостей кубическим сплайном. Для МЭМС-преобразователя по кадру испытаний формируется двумерный массив настройки счетчика (см. рис.5), который затем вводится в программу имитатора. После нажатия кнопки «ПРИНЯТЬ» приступают к испытаниям, в процессе которых можно изменять заданный расход (аналоговый управляющий сигнал на RRG). При этом фактический расход (аналоговый контрольный сигнал с RRG) посекундно интегрируется, суммируя накопленный расход. Параллельно измеряется, обрабатывается и суммируется расход, рассчитанный по сплайновой таблице МЭМС-преобразователя. Накопленные расходы сигнала с RRG и преобразователя сравниваются, и рассчитывается относительная погрешность (в %) по отношению к накопленному расходу с RRG.

Анализ полученных результатов. В диапазоне 10–15 л/мин калориметрический режим измерения дает хорошие результаты. Порог чувствительности составляет 0,1 л/мин, погрешности относительно счетчика на основе RRG не превышают 1 %. Однако погрешности при расходах более 20–25 л/мин превышают нормативные, заданные стандартом [1] для типоразмера счетчика G1.

Расширить диапазон измерений потока МЭМС-преобразователя можно, если для измерения малых потоков применять калориметрический режим, в котором показателем потока является перепад температур между терморезисторами, стоящими последовательно по потоку газа. Для больших потоков целесообразнее термоанемометрический режим, в котором поток газа связывается с падением температуры нагревателя Δt_{In} . Для исследуемого преобразователя, если поток менее 10 л/мин, следует применять калориметрический режим, если поток более 10 л/мин – термоанемометрический, причем верхний предел измерения расхода превосходит максимальный поток типоразмера G4.

Если расход превышает 10 л/мин на сигналах, фиксирующих разность температур резисторов InOut и падения температуры на входном резисторе Δt_{In} , появляются заметные искажения. На рис.6 показаны сигналы с моста резисторов InOut при расходах газа 2 и 20 л/мин. Очевидно, причина этих искажений – колебания мембраны МЭМС-преобразователя. Период оцифровки сигнала InOut составляет 1 мс, а частота собственных колебаний мембраны 30 кГц. Этим объясняется то, что сигнал имеет вид ломаной линии.

Колебания мембраны, возникающие при расходах газа более 10 л/мин, заметно повышают случайные погрешности измерения в течение импульса, но усредняются со временем. Поэтому следует либо аппаратно интегрировать сигналы, либо оцифровывать их 8–10 раз за импульс для эффективного усреднения. Целесообразно предусмотреть средства демпфирования колебаний, суще-

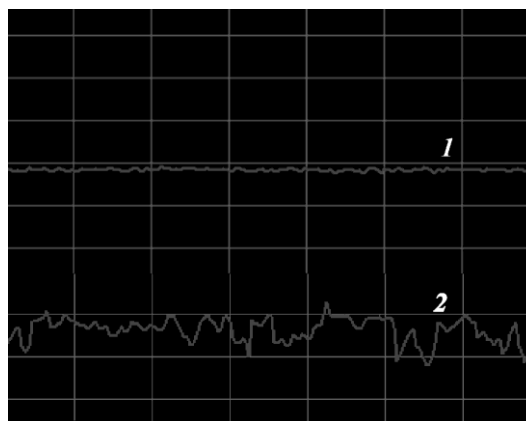


Рис.6. Осциллограммы сигнала перепада температур на резисторах InOut при различных расходах газа: 1 – 2 л/мин; 2 – 20 л/мин

Fig.6. Oscillograms of the temperature difference signal on InOut resistors at different flow rates: 1 – 2 l/min; 2 – 20 l/min

ственно не увеличивающие теплоотвод от нагревателей на корпус кристалла. Процессы сорбции влаги, содержащейся в воздухе, между импульсами и десорбции во время импульса также существенно искажают результаты измерений. Если для испытаний используется сжатый воздух, его предварительно следует осушать. Это можно реализовать охлаждением потока до температур, меньших, чем температура потока, используемого для исследования МЭМС-преобразователя. Поэтому в пневматической схеме стенда предусмотрен вымораживатель влаги DRY (см. рис.2).

Заключение. Представленный автоматизированный стенд для исследования чувствительных элементов датчиков расхода газа может быть эффективно использован не только при разработке, но и при их серийном производстве, во-первых, для формирования партии приборов и выборочной корректировки массива настройки счетчика, во-вторых, для нахождения и корректировки коэффициентов алгоритмической компенсации температурных погрешностей. Стенд позволяет проводить измерения образцов в диапазоне расходов 0–119 л/мин.

Литература

1. ГОСТ Р 50818-95. Счетчики газа объемные диафрагменные. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1996.
2. *Djuzhev N., Novikov D., Ryabov V.* Application of the streamlined body for properties amplification of thermoresistive MEMS gas flow sensor // *Solid State Phenomena*. – 2016. – Vol. 245. – P. 247–252.
3. MEMS-based gas flow sensors / *Yu-Hsiang Wang, Chang-Pen Chen, Chih-Ming Chang et al.* // *Microfluid Nanofluid*. – 2009. – N. 6. – P. 333–346.
4. *Dariush Javan, Ebrahim Abbaspour.* Design and simulation of a micromachined gas flow meter // *Iranian Conf. on Electrical Engineering (Tehran, 11–13 May 2004)*. – 2004. – P. 1–6.
5. *Сажин О.В., Первушин Ю.В.* Микросенсор потока теплового типа для датчика массового расхода воздуха // *Научное приборостроение*. – 2011. – Т. 21. – № 3. – С. 52–61.
6. *Yang-Qing Wu, Su-Ying Yao.* MEMS thermal mass flow meter with double-heater structure // *Intern. Conf. of Electron Devices and Solid-State Circuits (Tianjin, 17–18 Nov. 2011)*. – 2011. – P. 1, 2.

Поступила 06.06.17; принята к публикации 09.11.2017.

Рябов Владимир Тимофеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), v_ryabov@mail.ru

Дюжнев Николай Алексеевич – кандидат физико-математических наук, директор Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), djuzhev@unicm.ru

Новиков Дмитрий Владимирович – младший научный сотрудник Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), novikov@unicm.ru

References

1. GOST R 50818-95. *Schetchiki gaza ob"emnye diafragmennye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [Diaphragm volumetric gas meters. General technical requirements and test methods]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1996. (In Russian).
2. Djuzhev N., Novikov D., Ryabov V. Application of the streamlined body for properties amplification of thermoresistive MEMS gas flow sensor. *Solid State Phenomena*, 2016, vol. 245, pp. 247–252.

3. Yu-Hsiang Wang, Chang-Pen Chen, Chih-Ming Chang et al. MEMS-based gas flow sensors. *Microfluid Nanofluid*, 2009, no. 6, pp. 333–346.
4. Dariush Javan, Ebrahim Abbaspour. Design and Simulation of a Micromachined Gas Flow meter. *Iranian Conf. on Electrical Engineering*, 2004, pp. 1–6.
5. Sazhin O.V., Pervushin Yu.V. Mikrosensor potoka teplovogo tipa dlya datchika massovogo raskhoda vozduha [Flow micro sensor of thermal type for air mass flow meter, Scientific instrument building]. *Nauchnoe priborostroenie – Scientific Instrumentation*, 2011, vol. 21, no. 3, pp. 52–61. (In Russian).
6. Yang-Qing Wu, Su-Ying Yao. MEMS thermal mass flow meter with double-heater structure. *Intern. Conf. of Electron Devices and Solid-State Circuits*, 2011, pp. 1–2.

Submitted 06.06.2017; accepted 09.11.2017

Ryabov Vladimir T. – Cand. Sci (Tech), associate professor of Electronic Technologies in Mechanical Engineering Department, Bauman Moscow State Technical University (Russia, 105005, Moscow Baumanskaya 2-ya st., 5), v_ryabov@mail.ru

Dyuzhev Nikolay A. – Cand. Sci (Phys.-Math.), director of «Microsystems Technology and Electronic Component Base» center, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), djuzhev@unicm.ru

Novikov Dmitry V. – junior scientist of «Microsystems Technology and Electronic Component Base» center, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), novikov@unicm.ru