

## ГЕНЕРАТОР ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ РАСХОДА ГАЗА

М.М. Мордасов, Е.В. Подшивалина, А.П. Савенков

*Кафедра «Автоматизированные системы и приборы»,  
ГОУ ВПО «ТГТУ»; savencow@yandex.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** двухдиафрагмовый звукообразующий элемент; зависимость частоты от расхода; регулирование расхода; резонатор; спектр сигнала; форма сигнала.

**Аннотация:** Приведена схема генератора гармонических колебаний расхода газа с обратной связью, и дано описание принципа его работы. Установлена возможность использования двухдиафрагмового звукообразующего элемента в качестве датчика расхода в генераторе гармонических колебаний с обратной связью. Представлены результаты исследований двухдиафрагмового звукообразующего элемента.

---

В ряде работ [1, 2] предложен аэрогидродинамический бесконтактный метод измерения вязкости жидкостей, согласно которому об измеряемой величине судят по параметрам вынужденных колебаний поверхности контролируемой жидкости. Для получения вынужденных колебаний целесообразно использовать струю, скорость газа в которой изменяется по гармоническому закону. Это необходимо для обеспечения линейности системы «струя газ–жидкость», изменение свойств которой положено в основу метода измерения вязкости [3].

Генераторы гармонических колебаний расхода газа, выполненные по схеме без обратной связи [3, 4], обладают рядом недостатков, таких как неконтролируемое увеличение погрешности генератора во время его эксплуатации и сложность реализации, обусловленная наличием механических частей, требующих высокой точности изготовления.

Нами разработан генератор гармонических колебаний расхода газа с обратной связью, не имеющий указанных выше недостатков. Составной частью такого генератора является первичный измерительный преобразователь расхода. Традиционные расходомеры обладают большими габаритами, низким быстродействием и сложностью преобразования выходного сигнала в электрический. В рассматриваемом генераторе для исключения указанных недостатков применен преобразователь расхода на основе двухдиафрагмового звукообразующего элемента [5, 6].

В статье приводятся результаты исследования двухдиафрагмового звукообразующего элемента, как датчика расхода в генераторе гармонических колебаний.

Схема генератора гармонических колебаний с обратной связью представлена на рис. 1, временная диаграмма его работы – рис. 2.

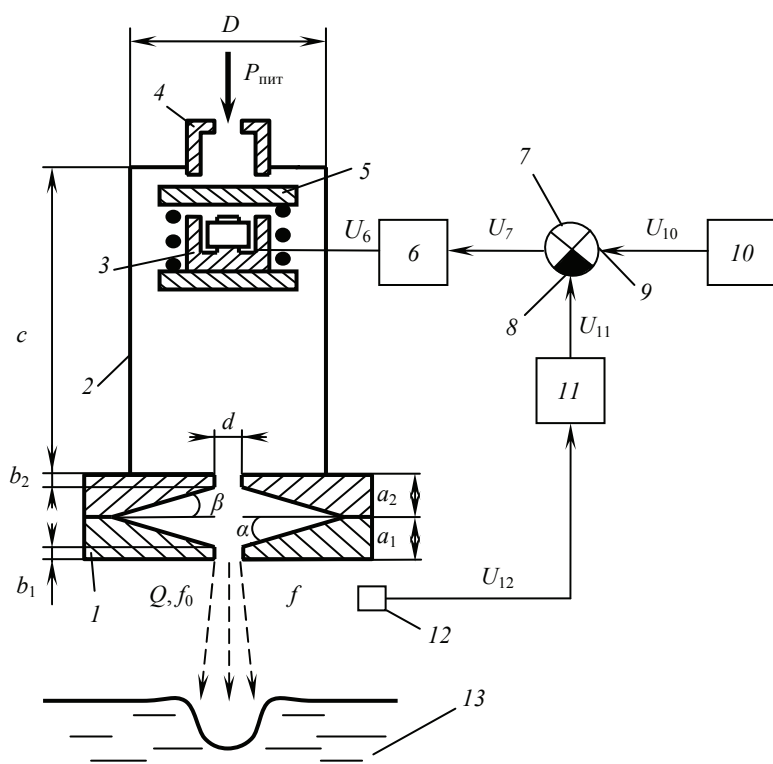


Рис. 1. Функциональная схема генератора гармонических колебаний расхода газа

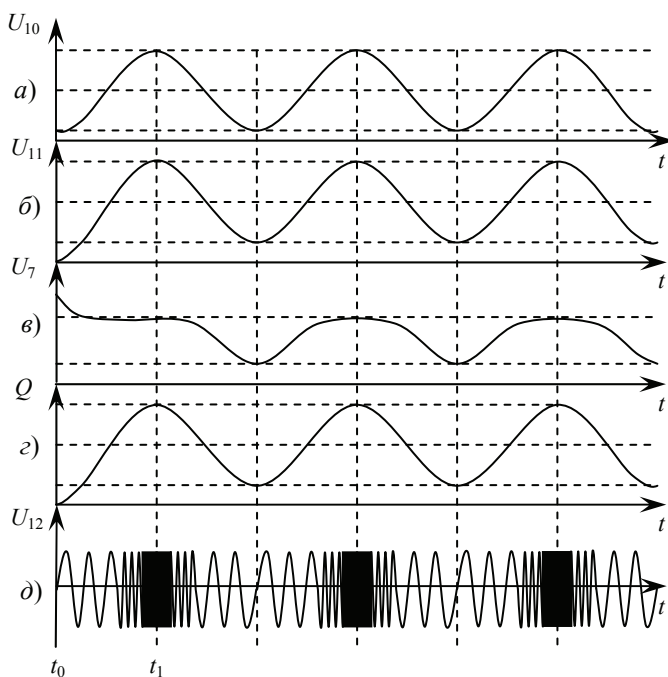


Рис. 2. Временная диаграмма работы генератора гармонических колебаний расхода газа

В верхний торец (см. рис. 1) резонатора 2 двухдиафрагмового звукообразующего элемента 1 вмонтирована трубка 4, составляющая с якорем 5 электромагнита 3 элемент типа «сопло–заслонка». На вход трубки 4 подается давление питания  $P_{\text{пит}}$ . Электромагнит 3 обеспечивает перемещение якоря 5 и изменение проводимости элемента «сопло–заслонка», которое позволяет регулировать расход газа на выходе двухдиафрагмового звукообразующего элемента 1, расположенного над поверхностью жидкости 13. При прохождении газа через звукообразующий элемент 1 формируется струя, деформирующая поверхность жидкости 13.

В исходный момент времени  $t_0$  на обмотку электромагнита 3 не подается напряжение, и сжатый воздух не поступает на вход двухдиафрагмового звукообразующего элемента 1. На его выходе звуковые колебания отсутствуют, а электретный микрофон 12 воспринимает слабые сигналы, соответствующие внешней акустической обстановке. Сигнал  $U_{11}$  на выходе преобразователя 11 «частота–напряжение» равен нулю (см. рис. 2, б).

На выходе генератора 10 формируются гармонические колебания напряжения установленной частоты  $f_0$  (см. рис. 2, а). На вход 9 сумматора 7 поступает заданное напряжение  $U_{10}$  с выхода генератора 10. При отсутствии напряжения  $U_{11}$  в момент времени  $t_0$  значение напряжения  $U_7$ , поступающего с выхода сумматора 7 на вход усилителя мощности 6, равно значению  $U_{10}$  (см. рис. 2, в). На выходе усилителя 6 формируется мощный электрический сигнал  $U_6$ , под действием которого электромагнит 3 притягивает якорь 5, обеспечивая приток воздуха из трубки 4 в полость резонатора 2 и на вход двухдиафрагмового звукообразующего элемента 1, на выходе которого формируются акустические колебания с частотой  $f$ , зависящей от расхода газа  $Q$  через него (см. рис. 2, з, д).

Микрофон 12 преобразует акустические колебания в колебания напряжения, а на выходе преобразователя 11 «частота–напряжение» формируется сигнал  $U_{11}$ , пропорциональный частоте  $f$  акустических колебаний (см. рис. 2, б, д). Этот сигнал поступает на вход 8 сумматора 7, а сигнал  $U_7$ , равный разности напряжений  $U_{10}$  и  $U_{11}$ , с выхода сумматора 7 поступает на вход усилителя 6. Появление сигнала  $U_{11}$  обеспечивает уменьшение сигнала  $U_6$  на выходе усилителя 6 до значения, при котором выполняется равенство  $U_{10} = U_{11}$  (например, в момент времени  $t_1$ ). С течением времени изменяются значения напряжений  $U_{10}$ ,  $U_7$ ,  $U_6$ ,  $U_{11}$ , положение якоря 5 расхода газа  $Q$  и частоты  $f$ . Посредством цепи отрицательной обратной связи, состоящей из электретного микрофона 12, преобразователя 11 и сумматора 7, на выходе генератора расхода формируются гармонические колебания установленной в генераторе 10 частоты  $f_0$  (см. рис. 2).

Функции, выполняемые блоками 7, 10 и 11, могут быть реализованы в микроконтроллере, осуществляющем управление работой генератора (или всего бесконтактного аэрогидродинамического устройства контроля вязкости). В случае такой реализации устройства точность работы этих блоков превышает любые предъявляемые требования, поэтому качество работы генератора гармонических колебаний расхода определяется, в основном, точностью работы датчика расхода – звукообразующего элемента 1.

Для исследования двухдиафрагмового звукообразующего элемента нами использованы: источник питания сжатым газом, регулятор расхода, ротаметр типа РМ-04Г УЗ, микрофон типа WM-60АТ, персональный компьютер со звуковой картой и установленной программой Cool Edit для обработки звуковых файлов. Исследуемый преобразователь имеет следующие размеры:  $a_1 = (2,00 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$  м,  $a_2 = (4,80 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$  м,  $b_1 = (1,20 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$  м,  $b_2 = (1,00 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$  м,  $\alpha = 10,0^\circ \pm 0,1^\circ$ ;  $\beta = 30,0^\circ \pm 0,1^\circ$ ;  $c = (88,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$  м; диаметры  $d$  и  $D$  составляют соответственно  $\varnothing 2,5H10$  и  $\varnothing 20H10$ .

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость частот основных спектральных составляющих выходного сигнала двухдиафрагмового звукообразующего элемента от расхода газа  $Q$ . Для измерения расхода  $Q$  возможно использовать участок зависимости  $f(Q)$ , соответствующий изменению величины  $Q$  в диапазоне от  $15 \cdot 10^{-6}$  до  $35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ . Для этого диапазона характерна линейная зависимость частоты  $f$  основного тона звукообразующего элемента от расхода  $Q$  и его наивысшая чувствительность.

Поскольку сигнал, генерируемый двухдиафрагмовым звукообразующим элементом, имеет сложный спектральный состав, одним из важных вопросов при разработке датчиков расхода на его основе является возможность измерения частоты  $f$  его основного тона стандартным методом [7]. Наибольшие затруднения вызывают участки зависимости  $f(Q)$  в диапазонах изменения расхода  $Q$  от  $(14,0 \dots 18,5) \cdot 10^{-6}$  и  $(34,5 \dots 36,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Для того чтобы определить насколько сложно измерить частоту сигнала двухдиафрагмового звукообразующего элемента, нами проанализирована его форма. На рис. 4 представлены осциллограммы и спектрограммы акустического сигнала на выходе двухдиафрагмового звукообразующего элемента для различных значений расхода газа  $Q$ . Графики построены в соответствии с изменением напряжения на выходе микрофона. Для наглядного представления формы сигналов малой амплитуды (при  $Q = 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ) кривые осциллограмм нормализованы.

В акустическом сигнале двухдиафрагмового звукообразующего элемента при величине расхода  $Q = 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  присутствуют две гармонические составляющие с амплитудами на частотах 1,75 и 5,11 кГц (см. рис. 4, II, а), значительно превышающими амплитуды других составляющих. Измерение частоты сигнала, в котором присутствуют только эти спектральные компоненты, не вызывает затруднений. Однако форма сигнала звукообразующего элемента усложняется присутствием гармонических составляющих малой амплитуды и более высокой частоты (см. рис. 4, I, а, диапазон изменения времени  $(0 \dots 2,4) \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ). Присутствие

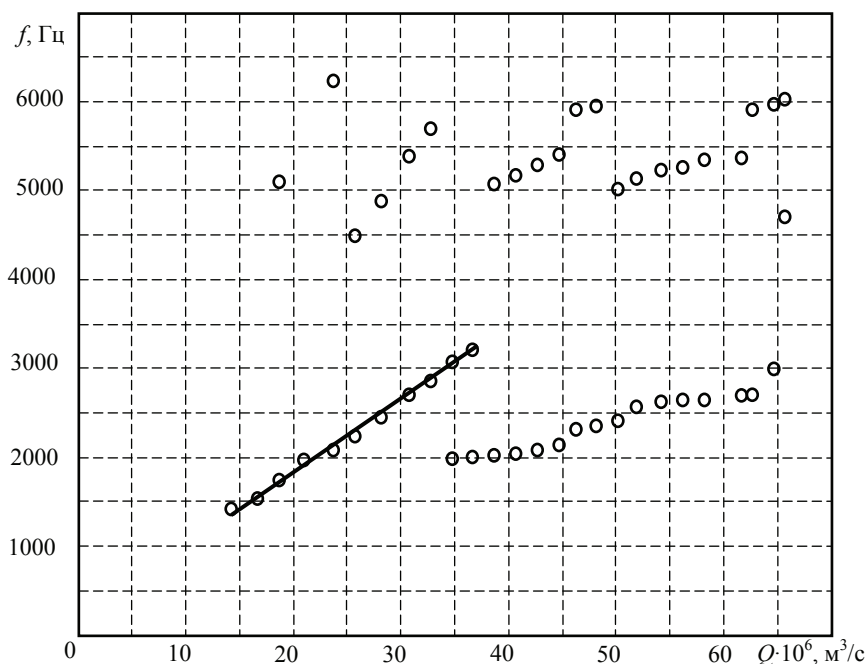
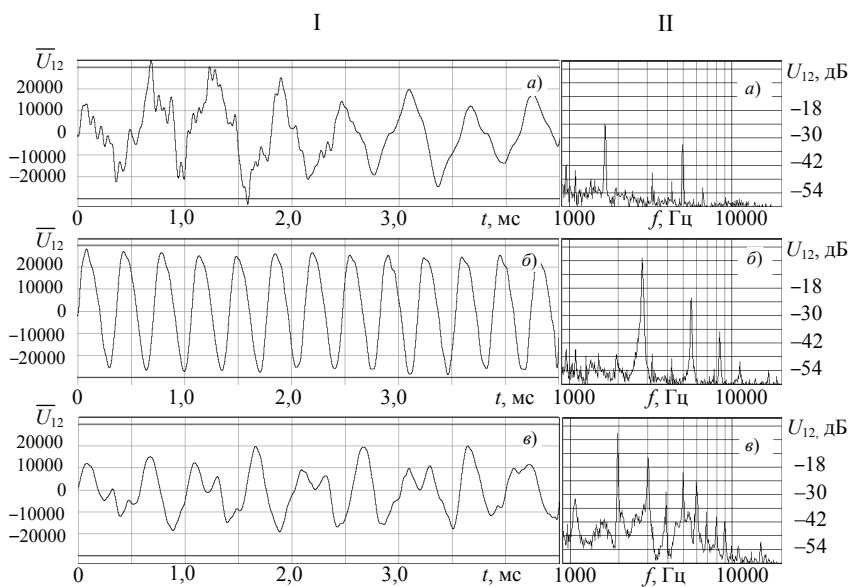


Рис. 3. Зависимость частот  $f$  основных спектральных составляющих сигнала двухдиафрагмового звукообразующего элемента от расхода  $Q$  газа



**Рис. 4. Осциллограммы (I) и спектрограммы (II) акустического сигнала двухдиафрагмового звукообразующего элемента при различных значениях расхода газа  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ :**  
 $a - 18,5 \cdot 10^{-6}$ ;  $b - 32,5 \cdot 10^{-6}$ ;  $e - 34,5 \cdot 10^{-6}$

этих гармоник приводит к тому, что кривая осциллограммы в отдельных случаях пересекает ось времени четыре раза за период основной спектральной составляющей (1,75 кГц). Результат измерения частоты такого сигнала будет неоднозначным. Для повышения точности измерения частоты возможно применение аналоговой и цифровой фильтрации сигнала, простейших алгоритмов отсеивания неинформативных значений частоты и преобразователей аналогового сигнала в дискретный на основе триггеров Шмидта. Например, после применения аналогового фильтра второго порядка с частотой среза 3 кГц форма сигнала становится такой, какая показана на рис. 4, I, *a* в диапазоне изменения времени  $(2,4 \dots 4,5) \cdot 10^{-3}$  с. Измерение частоты сигнала такой формы не вызывает затруднений. При расходах  $Q$  меньших  $18,5 \cdot 10^{-6}$   $\text{м}^3/\text{с}$ , форма и спектральный состав сигнала соответствуют рассмотренным выше.

В диапазоне изменения расхода  $Q$  от  $18,5 \cdot 10^{-6}$  до  $32,5 \cdot 10^{-6}$   $\text{м}^3/\text{с}$  сигнал на выходе исследуемого двухдиафрагмового звукообразующего элемента имеет стабильную форму, близкую к форме гармонического сигнала (см. рис. 4, I, *b*).

При увеличении расхода газа  $Q$  через звукообразующий элемент до  $34,5 \cdot 10^{-6}$   $\text{м}^3/\text{с}$  и более акустический сигнал на его выходе приобретает сложную форму (см. рис. 4, I, *e*). Наибольшую амплитуду имеет гармоническая составляющая с частотой 2 кГц. Расчеты показали, что эта частота соответствует частоте основного резонанса резонатора 2 двухдиафрагмового звукообразующего элемента 1 (см. рис. 1), представляющего собой трубу с закрытым торцом. В таких условиях измерение информативного сигнала с частотой 3,07 кГц, попадающего на линейный участок зависимости  $f(Q)$  (см. рис. 3) без применения спектрального анализа, не представляется возможным.

Таким образом, исследуемый двухдиафрагмовый звукообразующий элемент целесообразно использовать в качестве датчика расхода в диапазоне от  $14,5 \cdot 10^{-6}$  до  $32,5 \cdot 10^{-6}$   $\text{м}^3/\text{с}$ . Генератор, схема которого представлена на рис. 1, по-

звolyет получать пневматические сигналы любой формы при условии изменения расхода газа в этом диапазоне. Форма пневматического сигнала  $Q(t)$  полностью определяется формой сигнала  $U_{10}(t)$  на выходе генератора  $I0$  (см. рис. 1).

Настоящая статья является первой работой по этой теме. В качестве направлений дальнейших исследований рассматриваемого датчика расхода необходимо отметить следующее:

- определение влияния конструктивных параметров звукообразующего элемента на верхний, нижний пределы и диапазон измерения, что позволит выбрать оптимальную конструкцию датчика;
- определение чувствительности датчика к изменению влияющих величин, таких как температура, плотность и вязкость газа.

#### *Список литературы*

1. Пат. 2211444 Российская Федерация, G01N 11/16. Способ измерения вязкости жидкости по её колебаниям / Мищенко С.В., Мордасов Д.М., Мордасов М.М. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2001115897/28 ; заявл. 08.06.2001 ; опубл. 27.08.2003, Бюл. № 32. – 4 с.
2. Мордасов, М.М. Бесконтактный неразрушающий аэрогидродинамический контроль вязкости жидкостей / М.М. Мордасов, А.П. Савенков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т. 74, № 2. – С. 22–25.
3. Савенков, А.П. Бесконтактный струйный деформационный метод и устройство контроля вязкости жидкостей : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 : защищена 03.12.2009 / Савенков Александр Петрович. – Тамбов, 2009. – 202 с.
4. Прусенко, В.С. Пневматические датчики и вторичные приборы / В.С. Прусенко. – 2-е изд., перереб. и доп. – М. ; Л. : Энергия, 1965. – 192 с. – (Б-ка по автоматике ; Вып. 125).
5. А.с. 570413 СССР, В 06В 1/20, G 01N 29/00. Пневноакустический преобразователь / В.К. Савицкий (СССР). – № 2326468-10 ; заявл. 23.02.76 ; опубл. 30.08.77, Бюл. № 32. – 2 с.
6. Мордасов, Д.М. Струйно-акустические эффекты в методах неразрушающего контроля веществ / Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов. – М. : Физматлит, 2009. – 112 с.
7. Измерения в промышленности : справ. изд. В 3-х кн. Кн. 1 / Под. ред. П. Профоса ; пер. с нем. под ред. Д.И. Агейкина. – М. : Металлургия, 1990. – 384 с.

---

## **Harmonic Oscillator of Gas Consumption**

**M.M. Mordasov, E.V. Podshivalina, A.P. Savenkov**

*Department “Automated Systems and Devices”, TSTU; savencow@yandex.ru*

**Key words and phrases:** consumption regulation; dependence of frequency on consumption; resonator; signal spectrum; signal form; two-diaphragm sound forming element.

**Abstract:** The paper presents the scheme of harmonic oscillator of gas consumption with reverse feedback and the description of its working principle. The possibility of applying two-diaphragm sound-forming element as the flow sensor in the harmonic oscillator with reverse feedback is found out. The results of the research into two-diaphragm sound-forming element are presented.

## **Generator der harmonischen Schwingungen des Gasverbrauchs**

**Zusammenfassung:** Es ist das Schema des Generators der harmonischen Schwingungen des Gasverbrauchs mit der Rückverbindung und die Beschreibung des Prinzips seines Funktionierens angeführt. Es ist die Möglichkeit der Benutzung des zweimembranischen schallbildenden Elementes als Sensor des Verbrauchs im Generator der harmonischen Schwingungen mit der Rückverbindung festgestellt. Es sind die Erzeugnisse der Untersuchungen des zweimembranischen schallbildenden Elementes dargelegt.

---

## **Générateur des oscillations harmonieuses des dépenses du gaz**

**Résumé:** Est cité le schéma du générateur des oscillations harmonieuses des dépenses du gaz avec un lien inverse et la description du principe de son fonctionnement. Est établie la possibilité de l'utilisation de l'élément formant le son à deux diaphragmes en qualité du capteur de la dépense dans le générateur des oscillations harmonieuses avec un lien inverse. Sont présentés les résultats des études de l'élément formant le son à deux diaphragmes.

---

**Авторы:** *Мордасов Михаил Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы и приборы»; *Подшивалина Елена Викторовна* – студентка; *Савенков Александр Петрович* – ассистент кафедры «Автоматизированные системы и приборы», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ».

---