

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА ГАЗА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ ДИАФРАГМЕННОГО РАСХОДОМЕРА

© 2006 А.Г. Гимадиев, А.А. Игонин, В.Н. Илюхин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Предложена методика расчета пульсаций давления и расхода газа в измерительной цепи диафрагменного расходомера для вычисления гармонических составляющих давления газа непосредственно на входе и выходе мерной диафрагмы. Методика может быть использована в алгоритмах коррекции дополнительной пульсационной погрешности измерения расхода газа.

Важность точного измерения расхода энергоносителей, обусловлена необходимостью их экономии и возрастает с объемами потребления. Наиболее распространенными датчиками для измерения расхода природного газа являются расходомеры переменного перепада давления на сужении, принцип действия которых, описан в работе [1]. Данный способ измерения расхода газа применим для потоков, в которых отсутствуют пульсации давления.

Дополнительная абсолютная погрешность диафрагменного расходомера ΔQ , возникающая из-за пульсаций давления и перепада давления газа на диафрагме, складывается из нескольких составляющих:

$$\Delta Q = \Delta Q_{\partial} + \Delta Q_{\text{угл.}} + \Delta Q_{\text{имп.}} + \Delta Q_{\text{мем.}}, \quad (1)$$

где ΔQ - суммарная дополнительная погрешность измерения расхода газа; ΔQ_{∂} - погрешность измерения расхода газа из-за нелинейного осреднения пульсаций давления на мерной диафрагме; $\Delta Q_{\text{угл.}}$, $\Delta Q_{\text{имп.}}$, $\Delta Q_{\text{мем.}}$ - погрешности измерения объемного расхода газа, обусловленная нелинейным осреднением пульсаций давления соответственно на входах в угловые отборы, в импульсные трубки и в полости измерителя переменного перепада давления.

Причинами пульсаций давления могут стать колебания, создаваемые компрессорами, а также автоколебательные процессы в трубопроводной магистрали. При наличии пульсаций давления в газопроводе точность измерения расхода газа снижается из-за нелинейного осреднения пульсаций перепада давления на мерной диафрагме и на элементах измерительной цепи расходомера [2-4].

Коррекцию дополнительной погрешности диафрагменного расходомера можно реализовать, определив ее по эмпирической формуле; в работах [5, 6] предложена эмпирическая аппроксимация зависимости относительной дополнительной погрешности измерения расхода ΔQ_{∂} от относительного действующего значения пульсаций перепада давления на диафрагме $\Delta p_{\text{эфф}}$:

$$\delta Q_{\partial} = \frac{1}{\sqrt{0.5(1 + \sqrt{1 - \Delta p_{\text{эфф}}^2})}} - 1, \quad (2)$$

где $\delta Q_{\partial} = \frac{\Delta Q_{\partial}}{Q_0}$, $\Delta p_{\text{эфф}} = \frac{\Delta p_{\text{эфф}}}{\Delta P_0}$, Q_0 - средний расход газа через стандартную диафрагму; $\Delta p_{\text{эфф}}$, ΔP_0 - абсолютное действующее значение и постоянная составляющая пульсаций перепада давления на диафрагме. Эффективность применения данной формулы ограничена следующим. Во-первых, в ней не учитываются погрешности из-за нелинейного осреднения пульсаций давления в элементах измерительного трубопровода. Во-вторых, погрешность измерения расхода существенно зависит от формы пульсаций давления газа во времени.

В работе [4] предложено внести коррекцию дополнительной погрешности по результатам измерения пульсаций перепада давления на диафрагме. Однако такой подход требует применения дополнительных датчиков пульсаций давления и соответствующей аппаратуры. Учитывая низкочастотный диапазон наблюдающихся в газопроводе пульсаций давления (до 50 Гц), целесообразно рассмотреть возможность использования информации с имеющихся датчиков давления и перепада давления, установленных в конце импульсных трубок. При этом, будут учитываться характери-

ки подводящих каналов и преобразователя перепада давления.

Для численного восстановления значе- ний пульсаций давления на входе и выходе мерной диафрагмы по значениям давления и перепада давления, измеренным установ- ленными в конце импульсных трубок датчи- ками, предлагается математическая модель газовой измерительной цепи, разработанная на основе математической модели, приве- денной в [4]. Принимаются следующие до- пущения:

- нелинейные свойства измерительной цепи проявляются только на мерной диа- фрагме;
- движение газа в импульсных трубках рассматривается согласно ламинарной мо- дели с учетом нестационарности;
- разделительная мембрана преобразова- теля давления, рассматривается как акусти- ческая упругость с учетом эквивалентной массы мембраны и вязкого трения рабочей среды;
- модули входных акустических импе- дансов газовой измерительной цепи суще- ственно больше модулей импедансов газовой магистрали.
- участки трубопровода в местах входа и выхода мерной диафрагмы рассматривают- ся, как идеальные независимые источники пульсаций давления;

При восстановлении пульсаций давле- ния газа на входе и выходе мерной диа- фрагмы (рис. 1) принимается, что изменение давления во времени можно представить в виде суммы постоянной составляющей давления и нескольких основных гармонич- еских составляющих. Давления на входе и выходе диафрагмы можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} p_{ex}^+(t) &= P_{ex,0}^+ + \sum_{i=1}^N p_{ex,i}^+ \exp(j\omega_i t); \\ p_{ex}^-(t) &= P_{ex,0}^- + \sum_{i=1}^N p_{ex,i}^- \exp(j\omega_i t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $P_{ex,0}^+$, $P_{ex,0}^-$ – постоянные составляющие давления; $p_{ex,i}^+$, $p_{ex,i}^-$ – комплексные ампли- туды i -ых гармонических составляющих давления; ω_i – угловая частота i -ой гармо- нической составляющей пульсаций давле-

ния; i – номер гармоники; N – количество учитываемых гармонических составляющих.

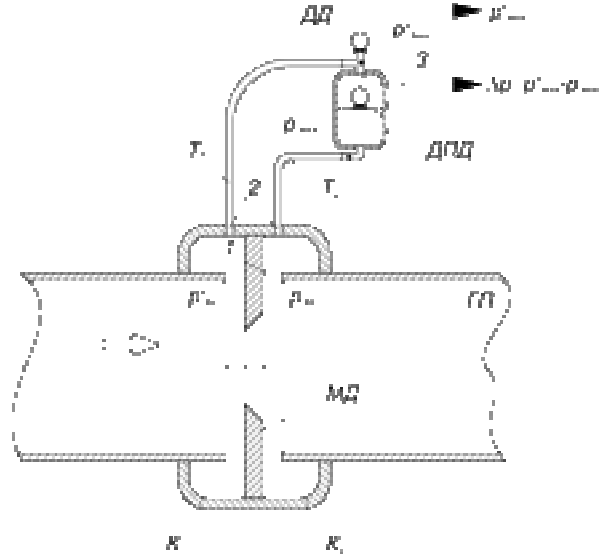


Рис. 1. Схема измерительной цепи диафрагмен- ного расходомера. ГП – газопровод, МД – мерная диафрагма, ДД – датчик давления, ДПП – дат- чик перепада давления, К₁, К₂ – кольцевые поло- сти угловых отборов, П₁, П₂ – полости измерите- ля перепада давления, Т₁, Т₂ – импульсные трубки, М – мембрана измерителя перепада давления.

Давления и расходы газа в измеритель- ной цепи по обе стороны от датчика перепада давления, установленного на импульсных линиях, представим так:

$$\begin{aligned} p_{вых}^+(t) &= P_{вых,0}^+ + \sum_{i=1}^N p_{вых,i}^+ \exp(j\omega_i t); \\ p_{вых}^-(t) &= P_{вых,0}^- + \sum_{i=1}^N p_{вых,i}^- \exp(j\omega_i t), \end{aligned} \quad (4)$$

где $P_{вых,0}^+$, $P_{вых,0}^-$ – постоянные составляющие давления; $p_{вых,i}^+$, $p_{вых,i}^-$ – комплексные ам- плитуды i -ых гармонических составляющих давления в конце импульсных трубок.

Представление элементов газовой из- мерительной цепи в виде электродинамиче- ских аналогов (рис. 2) и исходных сигналов в виде суммы постоянной и гармонических составляющих делает удобным применение комплексной формы гармонических сигна- лов и матриц комплексных коэффициентов четырехполюсников.

Согласно [7], форма А матрицы ком- плексных коэффициентов четырехполюсни- ка применяется при вычислении давления и расхода на выходе четырехполюсника, когда

решается система линейных уравнений, в правой части которой будут известные давление и расход на входе четырехполосника. Форма B матрицы комплексных коэффициентов четырехполосника применяется при вычислении давления и расхода на входе четырехполосника, когда решается система линейных уравнений, в правой части которой будут известные давление и расход на выходе четырехполосника.

Вид систем линейных уравнений с матрицами коэффициентов в форме A для каждого вида четырехполосников рассматриваемой цепи можно найти в [3, 4]. Обозначения матриц комплексных коэффициентов четырехполосников приведены на рис. 2 внутри прямоугольников, обозначающих четырехполосники.

Искомые величины – давления на входе и выходе мерной диафрагмы: p_{ex}^+ и p_{ex}^- . Требуется по значениям давлений в заданных точках газовой измерительной цепи диафрагменного расходомера рассчитать значения давлений на источниках давления – на входе и выходе мерной диафрагмы. Расчет давлений и расходов в газовой цепи по одной гармонической составляющей сводится к трем этапам:

1. Выберем одну гармоническую составляющую пульсаций давления с определенной частотой для дальнейших расчетов. Вычислим для каждого из четырехполосников газовой измерительной цепи диафрагменного расходомера матрицу комплексных коэффициентов [3, 4]. Поделим условно газовую измерительную цепь диафрагменного расходомера сечениями с известными и искомыми давлениями на три части:

- импульсная трубка T_1 с камерой углового отбора K_1 , находящиеся между сечениями с давлениями p_{ex}^+ и $p_{вых}^+$;

- полости измерителя перепада давления Π_1 и Π_2 с мембраной M между ними, находящиеся между сечениями с давлениями $p_{вых}^+$ и $p_{вых}^-$;

- импульсная трубка T_2 с камерой углового отбора K_2 , находящиеся между сечениями с давлениями p_{ex}^- и $p_{вых}^-$.

Каждую из этих частей представим в виде одного четырехполосника, матрицу

коэффициентов которого получим путем перемножения матриц коэффициентов четырехполосников соответствующей части. Матрицы будут иметь вид:

$$|A^{+(i)}| = \begin{pmatrix} A_{11}^{+(i)} & A_{12}^{+(i)} \\ A_{21}^{+(i)} & A_{22}^{+(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{K1.11}^{(i)} & A_{K1.12}^{(i)} \\ A_{K1.21}^{(i)} & A_{K1.22}^{(i)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{T1.11}^{(i)} & A_{T1.12}^{(i)} \\ A_{T1.21}^{(i)} & A_{T1.22}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

для импульсной трубки T_1 и камеры углового отбора K_1 ,

$$|A_{cp}^{(i)}| = \begin{pmatrix} A_{cp.11}^{(i)} & A_{cp.12}^{(i)} \\ A_{cp.21}^{(i)} & A_{cp.22}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{\Pi.11}^{(i)} & A_{\Pi.12}^{(i)} \\ A_{\Pi.21}^{(i)} & A_{\Pi.22}^{(i)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{M.11}^{(i)} & A_{M.12}^{(i)} \\ A_{M.21}^{(i)} & A_{M.22}^{(i)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{\Pi.2.11}^{(i)} & A_{\Pi.2.12}^{(i)} \\ A_{\Pi.2.21}^{(i)} & A_{\Pi.2.22}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (6)$$

для полостей Π_1 , Π_2 и мембраны M измерителя перепада давления,

$$|A^{(i)}| = \begin{pmatrix} A_{11}^{-(i)} & A_{12}^{-(i)} \\ A_{21}^{-(i)} & A_{22}^{-(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{T2.11}^{(i)} & A_{T2.12}^{(i)} \\ A_{T2.21}^{(i)} & A_{T2.22}^{(i)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{K2.11}^{(i)} & A_{K2.12}^{(i)} \\ A_{K2.21}^{(i)} & A_{K2.22}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (7)$$

для импульсной трубки T_2 и камеры углового отбора K_2 . После перемножения матриц электродинамический аналог газовой цепи расходомера можно рассматривать в виде трех четырехполосников с матрицами коэффициентов $A^{+(i)}$, $A_{cp}^{(i)}$, $A^{-(i)}$.

2. Найдём значения входного импеданса четырехполосников во всех местах измерительной газовой цепи расходомера – значение входного импеданса будем обозначать индексом, соответствующим индексу давления, или расхода в данном месте, справа над буквой обозначения импеданса в зависимости от того, в направлении к какому источнику давления осуществляется расчет: если к p_{ex}^+ , то “+”, если в противоположном направлении, то “-”. Находим импедансы:

От выхода мерной диафрагмы к ее входу, то есть к p_{ex}^+ :

$$Z_{8,i}^+ = 0; \quad Z_{6,i}^+ = \frac{A_{11}^{-(i)} \cdot Z_{8,i}^+ + A_{12}^{-(i)}}{A_{21}^{-(i)} \cdot Z_{8,i}^+ + A_{22}^{-(i)}};$$

$$Z_{3,i}^+ = \frac{A_{cp.11}^{(i)} \cdot Z_{6,i}^+ + A_{cp.12}^{(i)}}{A_{cp.21}^{(i)} \cdot Z_{6,i}^+ + A_{cp.22}^{(i)}}; \quad Z_1^+ = \frac{A_{11}^{+(i)} \cdot Z_{3,i}^+ + A_{12}^{+(i)}}{A_{21}^{+(i)} \cdot Z_{3,i}^+ + A_{22}^{+(i)}}; \quad (8)$$

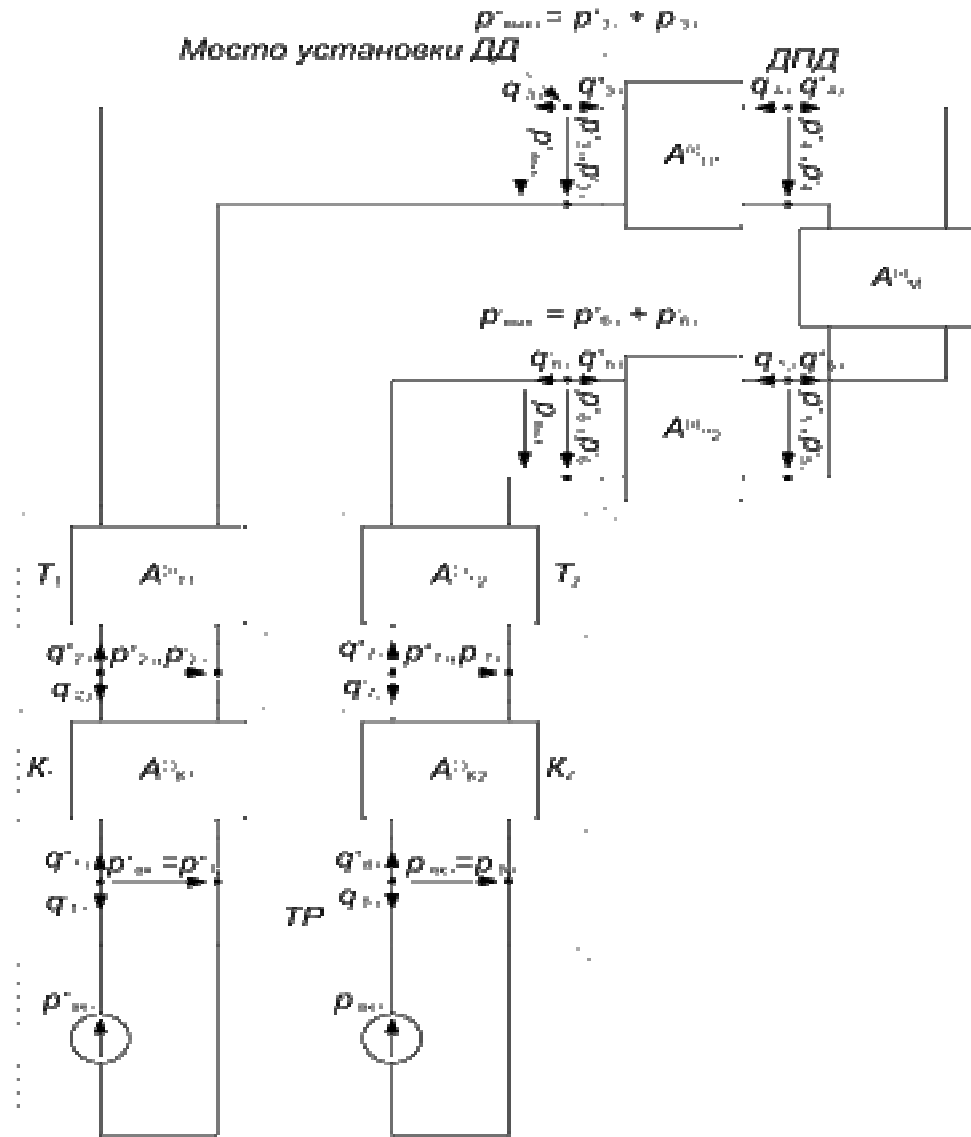


Рис. 2. Электродинамический аналог газовой измерительной цепи. ГП – газопровод, ДПД – датчик перепада давления, K_1, K_2 – кольцевые полости угловых отборов, Π_1, Π_2 – полости измерителя перепада давления, T_1, T_2 – импульсные трубки, M – мембрана измерителя перепада давления.

От входа диафрагмы к ее выходу, относительно p_{ax}^- :

$$Z_{1,i}^- = 0; \quad Z_{3,i}^- = \frac{A_{11}^{(i)} \cdot Z_{1,i}^- + A_{12}^{(i)}}{A_{21}^{(i)} \cdot Z_{1,i}^- + A_{22}^{(i)}}; \quad (9)$$

$$Z_{6,i}^- = \frac{A_{cp.11}^{(i)} \cdot Z_{3i}^- + A_{cp.12}^{(i)}}{A_{cp.21}^{(i)} \cdot Z_{3i}^- + A_{cp.22}^{(i)}}; \quad Z_{8j}^- = \frac{A_{11}^{(i)} \cdot Z_{6j}^- + A_{12}^{(i)}}{A_{21}^{(i)} \cdot Z_{6j}^- + A_{22}^{(i)}};$$

3. Запишем систему линейных уравнений, описывающих взаимосвязь давлений и расходов относительно всех источников на входе и выходе среднего четырехполосника в упрощенной цепи:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_3 = p_3^+ + p_3^- \\ p_6 = p_6^+ + p_6^- \\ p_3^+ = A_{cp.11} p_6^+ + A_{cp.12} q_6^+ \\ q_3^+ = A_{cp.21} p_6^+ + A_{cp.22} q_6^+ \\ p_6^- = A_{cp.11} p_3^- + A_{cp.12} q_3^- \\ q_6^- = A_{cp.21} p_3^- + A_{cp.22} q_3^- \\ p_3 = q_3^+ Z_3^+ + q_3^- Z_3^- \\ p_6 = q_6^+ Z_6^+ + q_6^- Z_6^- \end{array} \right., \quad (10)$$

Решим ее относительно переменных $p_3^+, p_3^-, p_6^+, p_6^-, q_3^+, q_3^-, q_6^+$ и q_6^- :

$$p_3^+ = \frac{p_6 - p_3 \frac{A_{cp22}Z_3^+ - A_{cp12}}{Z_3^+ (A_{cp11}A_{cp22} - A_{cp12}A_{cp21})}}{A_{cp11} + \frac{A_{cp12}}{Z_3^-} - \frac{A_{cp22} \cdot Z_3^+ - A_{cp12}}{Z_3^- \cdot (A_{cp11}A_{cp22} - A_{cp12}A_{cp21})}};$$

$$p_6^- = \frac{p_3 - p_6 \frac{A_{cp22}Z_6^- - A_{cp12}}{Z_6^- (A_{cp11}A_{cp22} - A_{cp12}A_{cp21})}}{A_{cp11} + \frac{A_{cp12}}{Z_6^+} - \frac{A_{cp22} \cdot Z_6^- - A_{cp12}}{Z_6^+ \cdot (A_{cp11}A_{cp22} - A_{cp12}A_{cp21})}}. \quad (11)$$

$$p_3^- = p_{вых}^+ - p_3^+; \quad p_6^+ = p_{вых}^- - p_6^-;$$

$$q_3^+ = \frac{p_3^+}{Z_3^+}; \quad q_3^- = \frac{p_3^-}{Z_3^-}; \quad q_6^+ = \frac{p_6^+}{Z_6^+}; \quad q_6^- = \frac{p_6^-}{Z_6^-}.$$

Таким образом, найдены составляющие давлений $p_{вых}^+$ и $p_{вых}^-$ относительно обоих источников сигнала.

Далее, по найденным значениям комплексных амплитуд составляющих давления газа относительно источников давления, можно восстановить значения давлений на источниках давления газа. Для вычисления значения входного давления четырехполюсника по значению выходного давления требуется решить систему линейных уравнений с матрицей коэффициентов четырехполюсника типа B . Получим матрицы коэффициентов типа B из матриц типа A , записанных в выражениях (5) и (7) – это матрицы коэффициентов четырехполюсников упрощенного представления газовой измерительной цепи диафрагменного расходомера расположены между сечениями с давлениями p_{ex}^+ , $p_{вых}^+$ и

p_{ex}^- , $p_{вых}^-$ соответственно:

$$\left| B^{+(i)} \right| = \begin{pmatrix} B_{11}^{+(i)} & B_{12}^{+(i)} \\ B_{21}^{+(i)} & B_{22}^{+(i)} \end{pmatrix};$$

$$B_{11}^{+(i)} = \frac{A_{22}^{+(i)}}{A_{11}^{+(i)}A_{22}^{+(i)} - A_{12}^{+(i)}A_{21}^{+(i)}};$$

$$B_{21}^{+(i)} = \frac{-A_{21}^{+(i)}}{A_{11}^{+(i)}A_{22}^{+(i)} - A_{12}^{+(i)}A_{21}^{+(i)}}; \quad (12)$$

$$B_{12}^{+(i)} = \frac{-A_{12}^{+(i)}}{A_{11}^{+(i)}A_{22}^{+(i)} - A_{12}^{+(i)}A_{21}^{+(i)}};$$

$$B_{22}^{+(i)} = \frac{A_{11}^{+(i)}}{A_{11}^{+(i)}A_{22}^{+(i)} - A_{12}^{+(i)}A_{21}^{+(i)}}.$$

$$\left| B^{-(i)} \right| = \begin{pmatrix} B_{11}^{-(i)} & B_{12}^{-(i)} \\ B_{21}^{-(i)} & B_{22}^{-(i)} \end{pmatrix};$$

$$B_{11}^{-(i)} = \frac{A_{22}^{-(i)}}{A_{11}^{-(i)}A_{22}^{-(i)} - A_{12}^{-(i)}A_{21}^{-(i)}};$$

$$B_{21}^{-(i)} = \frac{-A_{21}^{-(i)}}{A_{11}^{-(i)}A_{22}^{-(i)} - A_{12}^{-(i)}A_{21}^{-(i)}}; \quad (13)$$

$$B_{12}^{-(i)} = \frac{A_{12}^{-(i)}}{A_{11}^{-(i)}A_{22}^{-(i)} - A_{12}^{-(i)}A_{21}^{-(i)}};$$

$$B_{22}^{-(i)} = \frac{A_{11}^{-(i)}}{A_{11}^{-(i)}A_{22}^{-(i)} - A_{12}^{-(i)}A_{21}^{-(i)}}.$$

Теперь рассчитаем давления на источниках давления.

$$\begin{pmatrix} B_{11}^{+(i)} & B_{12}^{+(i)} \\ B_{21}^{+(i)} & B_{22}^{+(i)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_{1,i}^+ \\ q_{1,i}^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{3,i}^+ \\ q_{3,i}^+ \end{pmatrix}; \quad (14)$$

$$p_{1,i}^+ = \frac{B_{22}^{+(i)}p_{3,i}^+ - B_{12}^{+(i)}q_{3,i}^+}{B_{11}^{+(i)}B_{22}^{+(i)} - B_{12}^{+(i)}B_{21}^{+(i)}};$$

$$\begin{pmatrix} B_{11}^{-(i)} & B_{12}^{-(i)} \\ B_{21}^{-(i)} & B_{22}^{-(i)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_{8,i}^- \\ q_{8,i}^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{6,i}^- \\ q_{6,i}^- \end{pmatrix}; \quad (15)$$

$$p_{8,i}^- = \frac{B_{22}^{-(i)}p_{6,i}^- - B_{12}^{-(i)}q_{6,i}^-}{B_{11}^{-(i)}B_{22}^{-(i)} - B_{12}^{-(i)}B_{21}^{-(i)}};$$

Значения импедансов, эквивалентных источникам давления p_{ex}^+ и p_{ex}^- , согласно допущению, приняты равными нулю, следовательно, на входе диафрагмы составляющая давления относительно источника давления на выходе диафрагмы будет равна нулю, также и на выходе диафрагмы относительно входа диафрагмы:

$$p_{ex,i}^+ = p_{1,i}^+; \quad p_{ex,i}^- = p_{8,i}^-. \quad (16)$$

Таким образом, рассчитаны комплексные амплитуды давлений непосредственно на входе и выходе мерной диафрагмы. Чтобы получить восстановленные временные зависимости, требуется сделать аналогичный расчет для давлений газа по его постоянной составляющей (в этом случае вместо комплексных чисел будут использоваться действительные), рассчитать все значимые гармонические составляющие пульсаций давления и сложить полученные значения

амплитуд по формуле (3) для $i=1...N$. От полученных давлений на входе и выходе мерной диафрагмы перейти к значению давления и перепада давления можно так:

$$p_{изм}(t) = p_{ex}^+(t);$$
$$\Delta p_{изм} = P_{ex}^+(t) - p_{ex}^-(t). \quad (17)$$

Предложенная методика расчета пульсаций давления и расхода газа в измерительной цепи диафрагменного расходомера предназначена для вычисления гармонических составляющих давления газа непосредственно на входе и выходе мерной диафрагмы и может быть использована в алгоритмах коррекции дополнительной пульсационной погрешности измерения расхода газа.

Список литературы

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. - Л.: Машиностроение, 1989.- 701 с.
2. Слива Е.С. Коррекция характеристик информационных газовых цепей для повышения точности систем измерения параметров двигателей и энергетических установок. Дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2000. – 193 с.
3. Шорин В.П., Гимадиев А.Г., Быстров Н.Д. Гидравлические цепи передачи информации. - М.: Машиностроение, 1999. - 331 с.
4. Кашапов И.Д. Разработка методов и средств экспериментального исследования влияния пульсаций давления на погрешность газовых расходомеров. Дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – Самара, 2001. – 190 с.
5. Кабза З., Посполита Я. Оценка диапазона изменения коэффициента расхода диафрагмы при пульсирующем течении // Совершенств. средств измерения расхода жидкости, газа, пара.: Матер. научн.-техн. конф. / Ленингр. дом научн.-техн. проп. - СПб., 1992. - С. 6-12.
6. ISO/NC 3313: 1992(E) Measurement of pulsating fluid flow in a pipe by means of orifice plates, nozzles or Venturi tubes.
7. Атабеков А.Н. Теория электрических цепей. М.: Радио и связь, 1988.- 433 с.

DETERMINATION OF THE GAS FLOW AND PRESSURE PULSATIONS ON THE INPUT OF ORIFICE PLATE FLOWMETER'S MEASURING GAS CIRCUIT

© 2006 A.G. Gimadiyev, A.A. Igonin, V.N. Ilyukhin

Samara State Aerospace University

The method of calculation of flow and pressure pulsations on the orifice plate flowmeter's input is presented. As an input data, pressure signals at the two points within flowmeter's gas circuit are used. Obtained expressions are recommended for use in the digital correction of complementary error because of gas pressure pulsations.