

УДК 621.757.007.52

В.В. Поливцев, аспирант,**Е.А. Шушляпин, профессор, д-р техн. наук***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33 г. Севастополь, Украина. 99053**E-mail: pvv@tci.com.ua***МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА
НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ
С ПОМОЩЬЮ РЕГУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ**

Рассматриваются вопросы автоматического регулирования давления природного газа на газораспределительных станциях (ГРС) с помощью регуляторов давления. Разработана математическая модель регулирования давления в газовых магистралях для двух- и трехкаскадных схем регулирования. Описаны все основные режимы работы регуляторов при понижении давления газа на ГРС.

Ключевые слова: *регулирование, газ, давление, клапан, воздух, трубопровод.*

На большинстве ГРС Украины процесс задания понижающего уровня давления газа в трубопроводах потребителей выполняется вручную оператором по команде диспетчера. Такой уровень управления не соответствует требуемому уровню безопасности и экономическим показателям эксплуатации ГРС[4].

Предлагается следующий подход для автоматизации процесса регулирования давления газа на магистралях ГРС. Для этого каскад управления с ручным управлением дополняется (или полностью заменяется) автоматическим пневматическим пропорциональным клапаном давления, выпускаемым серийно, а в качестве локального средства управления используется промышленный свободно программируемый контролер. Пневматический пропорциональный клапан позволяет регулировать давление в диапазоне от 0,01 до 1 МПа, с точностью регулирования давления 2 %, и временем срабатывания от 120 до 250 мс. Такая частичная модернизация ГРС позволяет значительно сократить затраты и обеспечить работу ГРС в режиме дистанционного управления от диспетчера, а оператор выполняет функции контроля и ручного управления при работе ГРС во внештатном режиме.

Целью данной статьи является представление подхода при автоматизации ГРС для возможности дистанционного управления от оператора процессом понижения давления газа и создание математической модели процесса понижения давления газа при работе регуляторов давления в различных режимах.

В этом случае возможны две схемы регулирования давления газа на ГРС: трехкаскадная и двухкаскадная. Трехкаскадная схема регулирования давления газа показана на рисунке 1. Пропорциональный клапан давления, описанный выше, является первым каскадом регулирования давления газа. На него подается электрический сигнал с напряжением U (от 1 до 10 В), а на его выходе появляется пневматический сигнал управления P_{y1} (от 0,1 до 1,0 МПа), который поступает как сигнал управления на второй каскад (II) пилотного регулятора давления. На выходе второго каскада получаем газовый сигнал управления P_{y2} , который в свою очередь как сигнал управления поступает на третий каскад (III) регулирования давления газа. Последний газовый сигнал управления поступает в полость мембранного привода (P_{y3}) основного газового регулятора давления стоящего на газораспределительной магистрали. На входе третьего каскада давление газа P_1 понижается до давления P_2 на его выходе. Трехкаскадная схема управления применяется, когда требуется обеспечить давление на выходе ГРС в трубопроводе свыше 1,0 МПа (1,2 МПа для промышленных предприятий). В этой схеме промежуточный элемент II является преобразователем пневматического сигнала в газовый с одновременным его усилением.

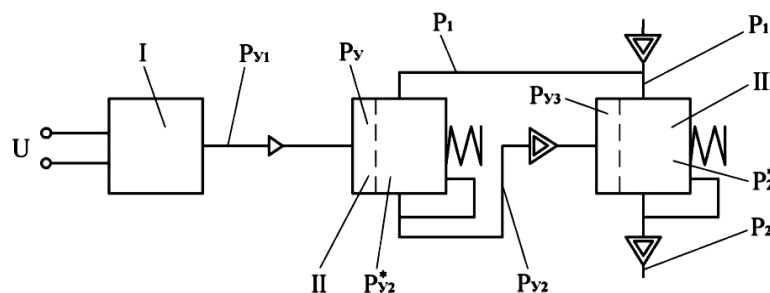


Рисунок 1 – Трехкаскадная схема регулирования газа

Двухкаскадная схема регулирования давления изображена на рисунке 2, где пилотный регулятор с ручным управлением заменяется пропорциональным клапаном давления (первый каскад), на выходе которого, образуется пневматический сигнал управления P_{y1} поступающий в полость мембранного привода регулятора давления, стоящего на газовой магистрали каскада два (II). Данная схема применима, когда на выходе ГРС требуется давление газа 0,3 или 0,6 МПа и в этой схеме промежуточный элемент не требуется.

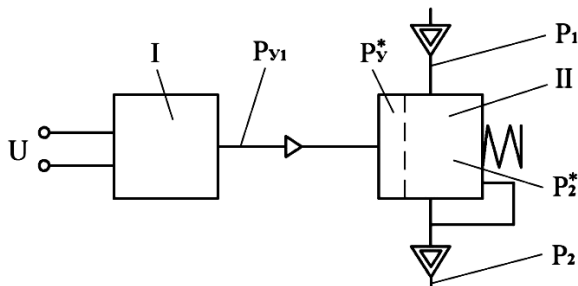


Рисунок 2 – Двухкаскадная схема регулирования газа

На рисунке 3 показана физическая модель одной из веток газопровода ГРС с модернизированным регулятором давления, описанным выше. От первого каскада управления (на рисунке не изображен) пропорционального клапана давления в одну из полостей мембранного привода газового регулятора давления подается пневматический (аналоговый) сигнал управления P_{y1} (двухкаскадная схема регулирования). От первого каскада управления (пропорционального клапана давления) пневматический сигнал управления P_{y1} подается во второй каскад, а от него в одну из полостей мембранного привода (третий каскад) поступает газовый сигнал управления P_{y2} (трехкаскадная схема регулирования).

Рассмотрим физическую модель основного газового регулятора давления, который входит как в двух-, так и в трехкаскадную схемы регулирования. Уравнение движения центра мембраны, штока и запорного элемента для привода регулятора давления газа на основании второго закона Ньютона запишем в виде[1]:

$$m\ddot{X} = S_3 P_2^* + S_c P_1 + cX + F_{II} - S_3 P_{y3} - S_1 P_2^* , \quad (1)$$

$$m\ddot{X} = S_3 P_2^* + S_c P_1 + cX + F_{II} - S_3 P_Y^* - S_1 P_2^* . \quad (2)$$

Здесь m – масса подвижных частей (мембраны, штока и запорного клапана); $\ddot{X}$ – ускорение подвижных частей мембранного привода; S_3 – эффективная площадь мембраны; S_c – площадь запорного клапана, $S_c = \frac{\pi d^2}{4}$; d – диаметр запорного клапана; P_1 – давление природного газа на входе регулятора давления; P_2^* – давление газа в полости мембранного привода; c – жесткость пружины; X – величина перемещения штока мембраны и запорного элемента; F_{II} – усилие предварительного поджатия пружины; P_{y3} , P_Y^* – давление сжатого воздуха (управления) в полости мембранного привода для трех каскадной и двух каскадной схемы управления; S_1 – площадь запорной части клапана со стороны штока, $S_1 = \frac{\pi(d^2 - d_u^2)}{4}$; d_u – диаметр штока. Уравнение (1) представлено для трехкаскадной схемы управления, а уравнение (2) – для двух каскадной.

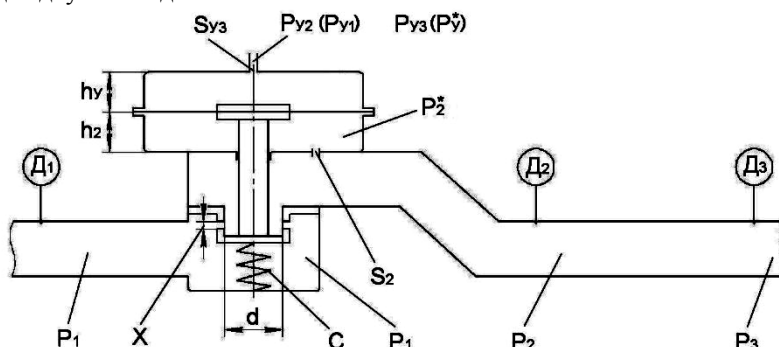


Рисунок 3 – Физическая модель регулятора давления газа

С учетом политропного процесса для газа и адиабатического процесса для сжатого воздуха запишем уравнения изменения давления в полостях мембранного привода как для двух-, так и для трехкаскадной схемы регулирования давления газа, при одновременной подаче по каналам в одну полость давления (управления) сжатого воздуха P_{y1} или P_{y2} — газа, а в другую по каналу давление газа P_2 , получаемого на выходе регулятора давления [1]:

$$\frac{dP_{y3}}{dt} = \frac{1}{Sh_y + S_3 X} (R_T T_{y3} G_{y3} - P_{y3} S_3 \dot{X}), \quad (3)$$

$$\frac{dP_y^*}{dt} = \frac{1}{Sh_y + S_3 X} (R_B T_y G_y - P_y^* S_3 \dot{X}), \quad (4)$$

$$\frac{dP_2^*}{dt} = \frac{1}{S(h_2 - X_0) - S_3 X} (R_T T_2 G_2^* - P_2^* S_3 \dot{X}). \quad (5)$$

Здесь P_2^* — давление природного газа в штоковой полости мембранного привода при двух- и трехкаскадной схеме управления; P_y^* — давление сжатого воздуха в бесштоковой полости мембранного привода с двухкаскадным управлением; P_{y3} — давление сжатого газа в бесштоковой полости мембранного привода с трехкаскадным управлением; h_y, h_2 — глубины полостей мембранного привода регулятора давления; R_B — универсальная газовая постоянная для сжатого воздуха; R_T — универсальная газовая постоянная для природного газа; T_y, T_{y3}, T_2 — температура воздуха и природного газа, подаваемого в полости мембранного привода; G_y, G_{y3}, G_2^* — массовый расход сжатого воздуха и природного газа поступающего в полости мембранного привода регулятора давления при двух- и трехкаскадных схемах регулирования давления газа; $\dot{X}$ — скорость перемещения центра мембраны.

Массовый расход воздуха и газа, поступающего в полости мембранного привода, для адиабатического процесса воздуха и для политропного процесса газа зависит от докритического или надкритического режима истечения и определяется по следующим зависимостям [1]:

$$G_y = \mu_y S_y P_{y1} \sqrt{\frac{2}{R_T T_y} \frac{k}{k-1} \left(\frac{P_y^*}{P_{y1}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_y^*}{P_{y1}} \right)^{\frac{k+1}{k}}}, \quad P_y^* / P_{y1} \geq \beta_k; \quad (6)$$

$$G_y = \mu_y S_y P_{y1} \sqrt{\frac{2}{R_T T_y} \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}, \quad P_y^* / P_{y1} \leq \beta_k; \quad (7)$$

$$G_{y3} = \mu_{y3} S_{y3} P_{y2} \sqrt{\frac{2}{R_B T_{y3}} \frac{n}{n-1} \left(\frac{P_{y3}}{P_{y2}} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_{y3}}{P_{y2}} \right)^{\frac{n+1}{n}}}, \quad P_{y3} / P_{y2} \geq \beta_k; \quad (8)$$

$$G_{y3} = \mu_{y3} S_{y3} P_{y2} \sqrt{\frac{2}{R_B T_{y3}} \frac{n}{n+1} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n-1}}}, \quad P_{y3} / P_{y2} \leq \beta_k; \quad (9)$$

$$G_2^* = \mu_2^* S_2 P_2 \sqrt{\frac{2}{R_T T_2} \frac{n}{n-1} \left(\frac{P_2^*}{P_2} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_2^*}{P_2} \right)^{\frac{n+1}{n}}}, \quad P_2^* / P_2 \geq \beta_k; \quad (10)$$

$$G_2^* = \mu_2^* S_2 P_2 \sqrt{\frac{2}{R_T T_2} \frac{n}{n+1} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n-1}}}, \quad P_2^* / P_2 \leq \beta_k. \quad (11)$$

Здесь μ_y, μ_{y3}, μ_2^* — коэффициент расхода воздуха и природного газа через подводящие сечения; S_y, S_{y3}, S_2 — площади проходных сечений отверстий через которые сжатый воздух и природный газ поступают в полости мембранного привода; P_{y2}, P_{y1} — давления природного газа и сжатого воздуха,

подводимого в полости мембранного привода по каналам; P_2 – давление природного газа, подаваемого в штоковую полость мембранного привода по каналу; k – показатель адиабаты для воздуха, n – показатель политропного процесса для природного газа.

Рассмотрим силовую часть газового регулятора давления представленного (рисунок 3). В полость постоянного объема $V_2 = \text{const}$, через клапанную часть из магистрали поступает природный газ давлением P_1 , температурой T_1 и массовым расходом газа G_1 . Из этого объема газ истекает через отводящий трубопровод с параметрами: давление P_2 , температура T_2 , массовый расход G_2 . Камера регулятора давления V_2 имеет параметры протекающего через нее газа P_2^* , температуры T^* , который не имеет теплообмена через стенки с окружающей средой.

Согласно первому закону термодинамики подведенная к природному газу, находящемуся в камере V_2 теплота, расходуется на изменение его внутренней энергии (и на работу, совершаемую газом, которая в данном случае равна нулю) запишем уравнение вида [2]

$$dQ_1 - dQ_2 = dU_2^* , \quad (12)$$

где dQ_1, dQ_2 – соответственно количества тепловой энергии подводящего в камеру и отводящего из камеры потока газа; dU_2^* – потенциальная энергия природного газа, находящегося в камере объемом V_2 .

Количество тепловой энергии dQ природного газа равно [3]

$$dQ = Idm , \quad (13)$$

где I – теплосодержание (энтальпия) газа; dm – количество или масса газа.

Определим изменение внутренней энергии газа в камере V_2 через его удельную внутреннюю энергию и массу и представим ее в виде

$$dU_2^* = u_2^* dm_2^* + m_2^* du_2^* , \quad (14)$$

где dU_2^* – потенциальная (внутренняя) энергия газа в камере V_2 ; u^* – удельная внутренняя энергия газа; m_2^* – масса газа, находящегося в камере.

Выразим теплосодержание и удельную внутреннюю энергию газа через температуру и теплоемкость при постоянном давлении и постоянном объеме в виде выражений:

$$I = c_p T ; u_2^* = c_v T_2^* . \quad (15)$$

С учетом выражений (13) – (15) при их подстановке в уравнение (12) получим

$$c_p T_1 dm_1 - c_p T_2 dm_2 = c_v T_2^* dm_2^* + c_v m_2^* dT_2^* , \quad (16)$$

где c_p, c_v – удельная теплоемкость газа при его постоянном давлении и при постоянном объеме; T_1, T_2, T_2^* – температура подводящего, отводящего потоков газа и температура газа в камере V_2 ; dm_1, dm_2, dm_2^* – количество газа, соответственно поступающего, истекающего из камеры и находящегося в камере.

Продифференцируем известное уравнение состояния газа $P_2^* V_2 = m_2^* R T_2^*$, и, преобразовав его, получим выражение для природного газа, находящегося в камере постоянного объема V_2 вида

$$T_2^* dm_2^* = \frac{1}{R} (P_2^* dV_2 + V_2 dP_2^*) - m_2^* dT_2^* , \quad (17)$$

где R – универсальная газовая постоянная.

С учетом того, что $V_2 = \text{const}$ и $dV_2 = 0$, преобразуем выражение (17) к виду:

$$T_2^* dm_2^* = \frac{1}{R} V_2 dP_2^* - m_2^* dT_2^* . \quad (18)$$

Подставив (18) в уравнение (16), получим:

$$c_p T_1 dm_1 - c_p T_2 dm_2 = \frac{c_v}{R} V_2 dP_2^* . \quad (19)$$

Представим удельные теплоемкости через известные выражения

$$c_p = c_v + R ; c_p / c_v = n , \quad (20)$$

где n – показатель политропного процесса.

С учетом (20) преобразуем выражение (19) относительно давления в камере и получим уравнение в окончательном виде как

$$dP_2^* = \frac{nR_T}{V_2} (T_1 G_1 - T_2^* G_2), \quad (21)$$

где G_1, G_2 – соответственно массовый расход поступающего через клапан в камеру газа и массовый расход газа, истекающего из камеры через трубопровод. Тогда можно записать, что

$$G_1 = \mu_1 S_1^* P_1 \sqrt{\frac{2}{R_T T_1} \frac{n}{n-1} \left(\frac{P_2^*}{P_1} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_2^*}{P_1} \right)^{\frac{n+1}{n}}}, \quad P_2^* / P_1 \geq \beta_k; \quad (22)$$

$$G_1 = \mu_1 S_1^* P_1 \sqrt{\frac{2}{R_T T_1} \frac{n}{n+1} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n-1}}}, \quad P_2^* / P_1 \leq \beta_k; \quad (23)$$

$$G_2 = \mu_2 S_2 P_2^* \sqrt{\frac{2}{R_T T_2^*} \frac{n}{n-1} \left(\frac{P_2}{P_2^*} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_2}{P_2^*} \right)^{\frac{n+1}{n}}}, \quad P_2 / P_2^* \geq \beta_k; \quad (24)$$

$$G_2 = \mu_2 S_2 P_2^* \sqrt{\frac{2}{R_T T_2^*} \frac{n}{n+1} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n-1}}}, \quad P_2 / P_2^* \leq \beta_k, \quad (25)$$

где μ_1, μ_2 – соответственно коэффициенты расхода газа для запорного клапана регулятора давления и расхода газа через входное сечение газопровода; S_1^* – площадь проходного сечения окна, запорного клапана регулятора давления газа; S_2 – диаметр трубопровода газа, отходящего от регулятора давления. Площадь окна определяется как

$$S_1^* = \pi d X,$$

где d – диаметр запорного клапана; X – величина перемещения штока мембраны и запорного элемента.

Давление газа P_2 на выходе регулятора давления задается в зависимости от вида газовой магистрали и верхнего предела, которые регламентируются нормами газовой отрасли Украины [4]. Наиболее часто применяемые давления после понижения газовым регулятором на выходе ГРС составляют 0,3 МПа и 0,6 МПа. Давление P_1 на входе ГРС, стоящих на средних газопроводах, может быть в пределах от 1 МПа до 2,5 МПа, и зависит от условий подачи природного газа. Потребление (расход) природного газа потребителями различен и зависит от времени суток, времени года, что приводит к изменению давления P_3 на трубопроводе потребителя. Температура природного газа зависит от времени суток и сезона (зима, лето). Параметр давления P_2 задается и должен поддерживаться независимо от изменяющихся давлений P_1 и P_3 .

Рассмотрим задачу стабилизации заданного на выходе регулятора уровня давления газа при изменяющихся давлениях P_1 и P_2 . Принимаем за расход газа через регулятор расход на его выходе G_2 . Так как расход через регулятор давления G_2 и расход потребителя G_{II} связаны между собой, можно представить уравнение расхода газа в виде

$$G_2 = G_{II}. \quad (26)$$

С учетом политропного процесса для природного газа используем выражения Сен-Венана Ванцеля для определения массового расхода газа проходящего через регулятор давления и трубопровод потребителя. Эти выражения для массового расхода учитывают докритический и надкритический режимы истечения природного газа. С учетом выражения (26) возможны четыре варианта истечения природного газа через регулятор давления и трубопровод потребителя.

Первый вариант: истечение природного газа через регулятор давления – докритическое ($P_2 / P_1 \geq \beta_{kr}$); истечение газа через трубопровод потребителя – докритическое ($P_3 / P_2 \geq \beta_{kr}$). Критическое значение коэффициента давлений определяется из соотношения [2]:

$$\beta_{KP} = \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}}.$$

На основании этого получим следующее, преобразованное относительно давления P_2 , уравнение вида [1]

$$\frac{A}{T_1^n} X^{2n} \left(\frac{P_1^{2n}}{P_1^{(n+1)}} \right) P_2^{2(n+1)} + \frac{B}{T_2^n} P_3^2 P_2^{2(n+1)} - \frac{A}{T_1^n} X^{2n} P_1^n P_2^{(n+3)} - \frac{B}{T_2^n} P_3^{(n+1)} P_2^{2n} = 0. \quad (27)$$

$$\text{Здесь } A = \left[\frac{\mu_p^2 d^2 2n}{R_f(n-1)} \right], \quad B = \left[\frac{\mu_T^2 D_T^4 2n}{R_f(n-1)16} \right].$$

Второй вариант: истечение природного газа через регулятор давления – надкритическое ($P_2/P_1 \leq \beta_{кр}$); истечение газа через трубопровод потребителя – надкритическое ($P_3/P_2 \leq \beta_{кр}$). Преобразованное уравнение относительно P_2 для второго варианта истечения газа получим в виде [1]:

$$\frac{B_1^n}{T_2^n} P_2^{2n} - \frac{A_1^n}{T_1^n} X^{2n} P_1^{2n} = 0, \quad (28)$$

$$\text{Здесь } A_1 = \left[\frac{\mu_p^2 d^2 2n}{R_f(n-1)} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n+1}} \right], \quad B_1 = \left[\frac{\mu_T^2 D_T^4 2n}{R_f(n-1)16} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n+1}} \right].$$

Третий вариант: истечение природного газа через регулятор давления – докритическое ($P_2/P_1 \geq \beta_{кр}$); истечение газа через трубопровод потребителя – надкритическое ($P_3/P_2 \leq \beta_{кр}$). Произведем аналогичные преобразования, как и для двух предыдущих вариантов. Приведем уравнение к виду [1]:

$$\frac{A}{T_1^n} X^{2n} \left(\frac{P_1^{2n}}{P_1^{(n+1)}} \right) P_2^{2(n+1)} - \frac{A^n}{T_1^n} X^{2n} P_1^n P_2^{(n+3)} - \frac{B_1^n}{T_2^n} P_2^{2n} = 0. \quad (29)$$

Четвертый вариант: истечение природного газа через регулятор давления – надкритическое ($P_2/P_1 \geq \beta_{кр}$); истечение газа через трубопровод потребителя – докритическое ($P_3/P_2 \leq \beta_{кр}$). Преобразуем уравнение относительно P_2 и получим выражение для четвертого варианта истечения природного газа в виде [1]:

$$\frac{B}{T_2^n} P_3^2 P_2^{2(n+1)} - \frac{B}{T_2^n} P_3^{(n+1)} P_2^{2n} - \frac{A_1^n}{T_1^n} X^{1n} P_1^{2n} P_2^{(n+1)} = 0. \quad (30)$$

Рассмотрим трехкаскадную модель регулирования давления газовой магистрали, которая позволяет выбрать требуемый закон управления для автоматического дистанционного управления от диспетчера. Второй и третий каскады представляют собой регуляторы давления (рисунки 1, 2), а первый — пропорциональный пневматический клапан давления. Первый каскад представляет пневматический регулятор давления с линейной зависимостью между электрическим сигналом управления (по току или напряжению) и давлением сжатого воздуха на его выходе. Математическая модель для первого каскада не рассматривается, а необходимые характеристики, в том числе динамические выбираются из паспортных данных выпускаемых промышленностью пропорциональных клапанов давления. Третий каскад системы регулирования давления газа на ГРС представлен выше и описывается уравнениями (1) – (25).

Конструктивно пилотный регулятор давления газа (второй каскад регулирования, для трехкаскадной схемы) по своей конструкции аналогичен третьему каскаду и представляет собой мембранный привод с запорным элементом, седлом и четырьмя камерами А, В, Е, О (рисунок 4).

Представим уравнение действия сил на мембрану пилотного регулятора [1]

$$m_* \ddot{X}_* = S_3^* P_{Y2} + S^* P_1 + cX^* + F_{II} - S_3^* P_y - S_2^* P_{Y2}, \quad (31)$$

где m_* – масса подвижных частей (штока и запорного клапана); $\ddot{X}_*$ – ускорение подвижных частей мембранного привода; S_3^* – эффективная площадь мембраны; S^* – площадь запорного элемента; P_1 –

давление газа на входе пилотного регулятора и камеры О; P_{Y2} – давление газа на выходе пилотного регулятора и в камерах В, Е; c – жесткость пружины; S_2^* – площадь запорного элемента со стороны штока; X_* – величина перемещения штока мембраны и запорного элемента; F_{II} – усилие предварительного поджатия пружины; P_{Y1} – давление сжатого воздуха (управления), подаваемое в полость А.

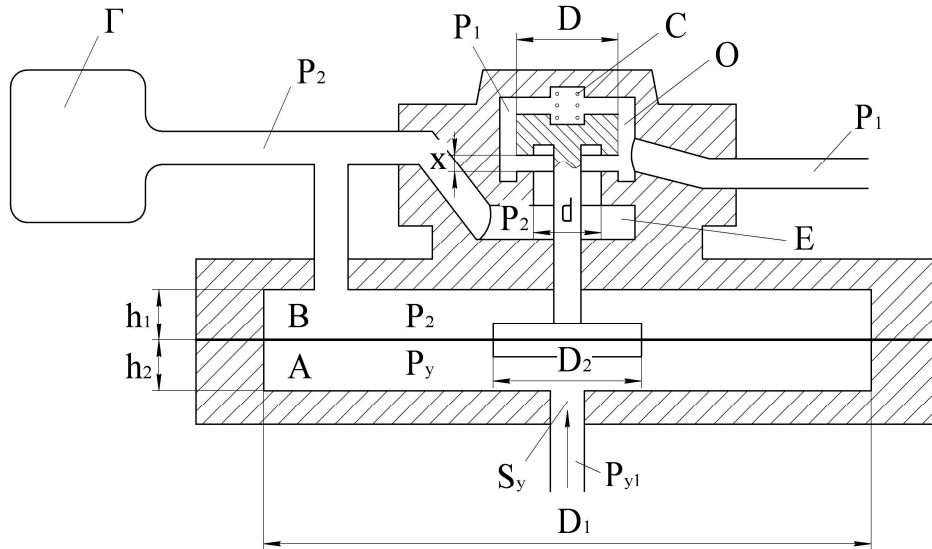


Рисунок 4 – Схема пилотного регулятора давления

Эффективная площадь вялой мембраны определяется по формуле Ликтана аналогично выражениям (1), (2).

Рассмотрим процессы, протекающие в камере А и В. Камера В соединена с камерами Е и Г. Камера Г представляет собой бесштоковую полость мембранного привода регулятора газа третьего каскада (рисунок 3). Изменение массы газа в камере объемом V для адиабатического процесса определяется уравнением

$$M = \frac{P_{Y2}}{RT} V, \quad (32)$$

где $V = V_0 + V_1$, V_0 – постоянный объем полостей и камер $V_0 = V_{01} + V_{02} + V_{03}$, V_1 – объем мембранной полости В. Он включает постоянный объем $(S_M h_1 - S_M x_0)$ и переменный $S_2^* x$, за счет перемещения мембраны (рисунок 4). $V_1 = S_M (h_1 - x_0) - S_2^* x$; x_0 – прогиб вялой мембраны без нагрузки; x – текущая координата хода центра мембраны; S_M – начальная площадь мембраны; h_1 – глубина рабочей камеры.

Продифференцируем по времени уравнение (32) и, преобразовав относительно $\frac{dP_{Y2}}{dt}$, получим

$$\frac{dP_{Y2}}{dt} = \frac{1}{V_0 + S_M (h_1 - x_0) - S_2^* x} (R T_y G_{Y2} - P_{Y2} S_2^* \dot{x}). \quad (33)$$

Здесь $\frac{dP_{Y2}}{dt}$ – изменение давления на выходе регулятора в соответствующих камерах общим объемом V (рисунок 4); R – универсальная газовая постоянная; T – температура газа; $G_{Y2} = \frac{dM}{dt}$ – массовый расход газа, поступающий в объем V ; P_{Y2} – давление на выходе регулятора; $\dot{x}$ – скорость перемещения центра мембраны.

С учетом докритического и надкритического режимов истечения газа через запорную часть регулятора давления можно определить массовый расход газа по следующим зависимостям:

$$G_{Y2} = \mu_{Y2} \pi d_{Y2} x P_{Y2} \sqrt{\frac{2}{R T_{Y2}}} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_{Y2}}{P_1} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_{Y2}}{P_1} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \text{ при } P_{Y2}/P_1 > \beta_{кр}, \quad (34)$$

$$G_{Y2} = \mu_{Y2} \pi d_{Y2} x R_{Y2} \sqrt{\frac{2}{R_T T_{Y2}} \frac{n}{n+1} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n-1}}} \quad \text{при} \quad P_{Y2}/P_1 < \beta_{кр}. \quad (35)$$

Здесь d_{Y2} – диаметр проходного отверстия седла регулятора давления; x – перемещение центра мембраны и запорного элемента регулятора давления; n – показатель политропного процесса для природного газа; T_{Y2} – температура газа, подаваемого после пилотного регулятора давления; $\beta_{кр}$ – критический коэффициент, определяющий докритический и надкритический режимы истечения газа;

$$\beta_{кр} = \left(\frac{P_1}{P_{Y2}} \right)_{кр} = \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}}.$$

Давление P_Y сжатого воздуха, поступающего от пропорционального клапана давления в мембранную полость А, можно определить из выражения

$$\frac{dP_Y}{dt} = \frac{1}{S_M h_2 + S_3 x} (R_B T_{Y1} G_Y - P_Y S_3 \dot{x}), \quad (36)$$

где T_{Y1} – температура сжатого воздуха, подаваемого после пропорционального клапана давления. Расход G_Y в уравнении (36) можно определить из выражений (6), (7).

Математическая модель, представленная выше, позволяет описать переходные и основные режимы, происходящие при двух- и трехкаскадном регулировании давления природного газа в трубопроводах на ГРС.

Первый режим – понижение уровня давления до заданных пределов. Он может задаваться в момент запуска, когда трубопровод, отходящий от ГРС, не находится под давлением и не заполнен газом. Если трубопровод не заполнен, то система регулирования имеет переходные режимы: открытие клапана (перемещения на величину X) до заданной величины и заполнение газом объема трубопровода от ГРС до потребителя (при условии отсутствия расхода газа потребителем). В уравнения (1) или (2), и с учетом выражений (3) – (11) подставляются требуемое давление управления P_{Y1} , подводящее давление

P_1 и другие параметры. Данные уравнения с указанными параметрами описывают переходный процесс изменения давления в полостях мембранного привода. В исходном положении запорный элемент, с помощью пружины и давления газа P_1 закрыт (начальная координата центра мембраны и запорного элемента $X_H = 0$, а давление $P_2 = 0$). Запорный элемент перемещается, при этом увеличивается текущее значение перемещения X , и следовательно, расход газа, поступающего в камеру регулятора расхода. Давление P_2^* определяется из уравнения (21) с учетом выражений (22) – (25). Как только перемещение запорного элемента X достигнет некоторого значения, при котором $\ddot{X} = 0, \dot{X} = 0$, мембрана вместе с запорным элементом будут находиться в состоянии равновесия от сил давления, действующих на них. Давление в камере регулятора P_2^* достигнет требуемой величины, соответствующей заданному давлению управления P_{Y1} . Затем наступает следующий переходный режим – заполнение ветки трубопровода после регулятора давления ГРС. В этом случае используется то же уравнение (21), но к объему рабочей камеры V_2 добавляется объем трубопровода и расход. В этом случае $G_2 = 0$ рассматривается как расход потребителя. Как только давление $P_2^* = P_2 = P_3$, наступает второй основной режим работы регулятора давления газа ГРС.

Второй режим – поддержание требуемого давления P_2 с необходимой точностью при изменении подводящего давления P_1 , расхода потребителя, а следовательно, и давления P_3 , и температуры T_1, T_2 , измеряемых датчиками давления и температуры. Мембрана и запорный элемент находятся в равновесии (не перемежаются) от сил давления природного газа и сжатого воздуха, действующих на них. Запорный элемент открыт на величину X и пропускает через регулятор давления соответствующий расход газа, понижая при этом давление газа в подводящем трубопроводе. При изменении параметров P_1, P_3, T_1, T_2 , поступающих в автоматизированную систему управления (контроллер), в которой в зависимости от режима течения газа через запорный элемент регулятора давления и трубопровод потребителя в программе используется одно из четырех выражений (27), (28), (29) или (30). Из представленных выше выражений вычисляется величина X открытия запорного клапана, которая подставляется в уравнения (1) или (2) и находится требуемое значение давления управления P_Y .

Третий режим, когда в процессе работы регулятора с одним уровнем давления требуется перейти на другой уровень давления на выходе ГРС. В этом режиме происходит тот же переходный процесс, что

и в первом режиме, т.е. перемещения запорного клапана и мембраны регулятора. Используются те же уравнения (1) или (2) с учетом выражений (3) – (11), а также уравнение (21) с учетом выражений (22) – (25), которые в конечном виде определяют давления P_2^* и P_2 . В этом режиме следует учитывать, понижается или повышается давление P_2 по отношению к заданному. Если на выходе регулятора требуется большее давление по сравнению с предыдущим, в этом случае задаются новые значения давлений управления P_y, P_{y1} . Мембрана с запорным элементом перемещается, увеличиваются величина X , расход и давление газа после регулятора. Как только давление на выходе регулятора достигнет требуемого значения, мембрана с запорным элементом будут находиться в состоянии равновесия, поддерживая заданное давление газа. Если на выходе регулятора требуется меньшее давление по сравнению с предыдущим, то задаются новые значения давления управления P_y, P_{y1} , при этом зазор X уменьшается, расход и давление газа после регулятора также уменьшается.

Предложенная математическая модель отражает основные физические процессы, происходящие при двух- и трехкаскадной схемах регулирования и поддержания давления с помощью регуляторов давления газа на ГРС. Представленный подход при автоматизации ГРС Украины позволит получить технические характеристики оборудования для дистанционного управления, аналогичные характеристикам ведущих в газораспределительной отрасли фирм мира с финансовыми затратами в два, три раза меньшими по сравнению со стоимостью оборудования этих фирм.

Перспективой дальнейших исследований является создание алгоритмов управления для поддержания необходимого давления при изменяющихся расходах потребителей и температурных режимах газа.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Поливцев В.В. Автоматическое регулирование давления газа в трубопроводах ГРС на базе пропорционального клапана давления / В.В. Поливцев // Вестник СевНТУ. Сер. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 108. — 196 с.
2. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин / Е.В. Герц. — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с.
3. Федорец В.А. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / В.А. Федорец, М.Н. Педченко, А.Ф. Пичко. — К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. — 375 с.
4. Рознюк В.В. Эксплуатация газонефтяного комплекса. Справочник / В.В. Рознюк, Л.А. Хачикян, М.А. Гриль. — К.: Росток, 1998. — 431 с.

Поступила в редакцию 07.03.2011 г.

Полівцев В.В., Шушляпін Є.А. Модель процесу регулювання тиску природного газу на газорозподільних станціях за допомогою регуляторів тиску

Розглядаються питання автоматичного регулювання тиску природного газу на газорозподільних станціях (ГРС) за допомогою регуляторів тиску. Розроблена математична модель регулювання тиску в газових магістралях для дво- і трикаскадних схем регулювання. Описані всі основні режими роботи зниження тиску газу на ГРС.

Ключові слова: регулювання, газ, тиск, клапан, повітря, трубопровід.

Polivcev V.V., Shushlyapin E.A. Model of the Pressure Regulating Process for Natural Gas at a Distributive Station using Pressure Regulators

Questions of automatic control of natural gas at distributive stations using pressure regulators are considered. A mathematical model of pressure regulation in gas highways for two and three cascades of regulation is developed.

Keywords: regulation, gas, pressure, valve, air, pipeline.