

УДК 621.757.007.52

В.В. Поливцев, аспирант*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: pvv@tci.com.ua***АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В ТРУБОПРОВОДАХ ГРС НА БАЗЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО КЛАПАНА ДАВЛЕНИЯ**

Рассматриваются вопросы автоматического регулирования природного газа на ГРС с возможностью дистанционного управления. Разработана математическая модель регулирования давления в газовых магистральных с помощью модернизированного регулятора природного газа управляемого от пропорционального клапана давления.

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

Одной из основных задач газораспределительных станций (ГРС) является регулирование (понижение) давления природного газа от уровня давления в подводящей магистрали до требуемого уровня давления газа в магистралях, идущих к потребителю.

Наиболее часто на ГРС Украины встречаются регуляторы давления РД (прямого действия), ВТК, РДУ с рабочим давлением 5,5 МПа и диапазоном регулирования давления 1,6 ... 0,3 МПа [1]. В таких регуляторах используется двухкаскадная схема регулирования, где в качестве первого каскада используется пилот, а второго – регулятор давления, стоящий непосредственно на газовой магистрали. Так, для регуляторов давления РТУК–2 используются пилоты KB2 и KH2, которые в основе своей конструкции используют вялую мембрану и запорный элемент в сочетании с запорным седлом. В пилотной части схемы для входных давлений свыше 2,5 МПа применяют понижающий регулятор или стабилизатор давления. Регулирование давления производится вручную оператором, который выставляет по манометру требуемое давление газа с помощью пилотного регулятора давления. В последующем это давление передается на силовой регулятор давления (второй каскад), стоящий на газовой магистрали, и это же давление устанавливается в магистрали и в последующем поддерживается с помощью газомеханической отрицательной обратной связи. Основной регулятор работает как повторитель давления и в определенных пределах изменения давления на входе поддерживает заданное выходное давление, т.е. работает и как стабилизатор давления. Точность таких регуляторов с ручным управлением на низких давлениях составляет 5%, а на высоких – 10%. Ручное управление давлением технически исключает возможность централизованного управления давлением на ГРС от диспетчера в режиме реального времени. Указанная выше точность регулирования давления, а следовательно, и расхода снижает экономические показатели работы газораспределительной отрасли Украины, а только ручное управление от оператора не соответствует современным требованиям безопасности работы ГРС.

Целью работы является автоматизация процесса регулирования давления газа на магистралях ГРС. Для этого заменяется первый каскад управления с ручным управлением на автоматический пропорциональный клапан давления, выпускаемый серийно, например марки MPPE–3–1/8–10–010–В фирмы «Фесто» Германия, а в качестве локального средства управления используется свободно программируемый контролер. Указанный пропорциональный клапан давления позволяет регулировать давление в диапазоне 0,01...1 МПа, точность регулирования давления – 0,005 МПа, время срабатывания – 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 в штатном режиме.

Целью данной работы является создание математической модели, которая отражает физический процесс регулирования давления природного газа в трубопроводах ГРС и его поддержания в заданных пределах, при изменении давления в подающем газопроводе и изменении расхода потребителями или изменении температуры атмосферного воздуха и природного газа.

На рисунке 1 изображена физическая модель одной из веток газопровода ГРС с модернизированным регулятором давления описанным выше. От первого каскада управления (на рисунке не изображен) в одну из полостей мембранного привода от пропорционального клапана давления подается пневматический (аналоговый по уровню давления) сигнал управления P_y . Уравнение движения центра мембраны, штока и запорного элемента представлено в виде

$$m\ddot{X} = S_y P_{21} + S_c P_1 + cX + F_{II} - S_y P_y - S_1 P_{21}, \quad (1)$$

где m – масса подвижных частей (мембраны, штока и запорного клапана); $\ddot{X}$ – ускорение подвижных частей мембранного привода; S_y – эффективная площадь мембраны; $S_c = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь запорного

клапана; d – диаметр запорного клапана; P_1 – давление природного газа на входе регулятора давления; P_{21} – давление газа в полости мембранного привода; c – жесткость пружины; X – величина перемещения штока мембраны и запорного элемента; F_n – усилие предварительного поджатия пружины; P_y – давление сжатого воздуха (управления) в полости мембранного привода; $S_1 = \frac{\pi(d^2 - d_u^2)}{4}$ – площадь запорной части клапана со стороны штока; d_u – диаметр штока.

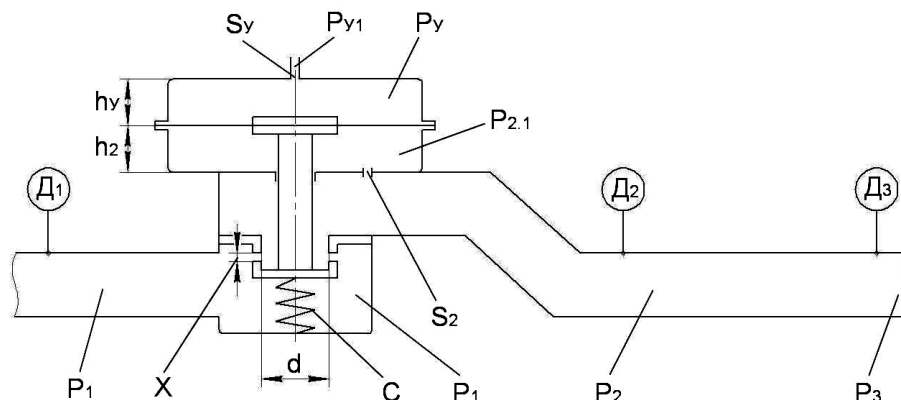


Рисунок 1 – Физическая модель регулятора давления

Эффективная площадь вялой мембраны определяется по формуле Ликтана [2] исходя из следующей зависимости

$$S_y = \frac{\pi D_1^2}{12} \left[1 + \gamma + \gamma^2 - \frac{x(1-\gamma)\sqrt{4+7\gamma+4\gamma^2}}{\sqrt{5(X_{\max}^2 - 5X^2)}} \right]. \quad (2)$$

Максимальный прогиб (ход) вялой мембраны определяется из выражения

$$X_{\max} = \frac{X_0 \sqrt{5(1+\gamma+\gamma^2)} + (1-\gamma)(4+7\gamma+4\gamma^2)}{(1+\gamma+\gamma^2)\sqrt{5}}, \quad (3)$$

где $\gamma = D_1 / D_2$; X_0 – прогиб вялой мембраны без нагрузки; X – текущая координата хода центра мембраны; $S = \frac{\pi D_1^2}{4}$ – начальная площадь плоской мембраны.

С учетом политропного процесса запишем уравнения изменения давления в полостях мембранного привода и одновременную подачу в одну полость давления (управления) сжатого воздуха P_y , а в другую – давление газа P_2 , получаемого на выходе регулятора давления [3]

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

$$\frac{dP_{21}}{dt} = \frac{1}{S(h_2 - X_0) - S_y X} (R_T T_2 G_2 - P_{21} S_y \dot{X}), \quad (5)$$

где P_y – давление сжатого воздуха в полости мембранного привода; P_{21} – давление природного газа в полости мембранного привода; 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_2 – температура воздуха и природного газа подаваемого в полости мембранного привода; G_y, G_2 – массовый расход сжатого воздуха и природного газа поступающего в полости мембранного привода регулятора давления; $\dot{X}$ – скорость перемещения центра мембраны.

Массовый расход воздуха и газа, поступающего в полости мембранного привода, для адиабатического процесса воздуха и для политропического процесса газа зависит от режима истечения докритического или надкритического и определяется по следующим выражениям [4]

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

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

$$G_2 = \mu_2 S_2 P_{21} \sqrt{\frac{2}{R_2 T_2} \frac{n}{n-1} \left(\frac{P_2}{P_{21}} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_2}{P_{21}} \right)^{\frac{n+1}{n}}}, \quad P_2 / P_{21} \geq \beta_k, \quad (8)$$

$$G_2 = \mu_2 S_2 P_{21} \sqrt{\frac{2}{R_2 T_2} \frac{n}{n+1} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n}}}, \quad P_2 / P_{21} \leq \beta_k. \quad (9)$$

Здесь μ_y, μ_2 – коэффициент расхода воздуха и природного газа; S_y, S_2 – площади проходных сечений отверстий, через которые сжатый воздух и природный газ поступают в полости мембранного привода; P_{y1}, P_2 – давление сжатого воздуха и природного газа подводимого в полости мембранного привода; P_y, P_{21} – давление сжатого воздуха и природного газа в полостях мембранного привода; k – показатель адиабаты для воздуха; n – показатель политропического процесса для природного газа.

Величина давления управления P_{y1} подается в полость мембранного привода от пропорционального клапана давления, которая в свою очередь задается контролером. Решая совместно уравнения (1), (4), (5) с учетом выражений (2), (3) и в зависимости от режима течения воздуха и газа, учитываемого выражениями (6) – (9), можно определить динамические характеристики и величину перемещения X запорного элемента мембранного привода газового регулятора давления.

Давление газа P_2 на выходе регулятора давления задается в зависимости от вида газовой магистрали и верхний предел, которого регламентируется нормами газовой отрасли Украины [1]. Нормы 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 по уровню давления газопроводах, может колебаться в пределах от 1 МПа до 2,5 МПа, в зависимости от условий подачи природного газа. Потребление (расход) природного газа потребителями различен и зависит от времени суток и времени года, что приводит к изменению давления P_3 на трубопроводе потребителя. Уровни давления P_1, P_2, P_3 в системе модернизированной ГРС контролируются датчиками давления D_1, D_2, D_3 . Параметр давления P_2 задается и должен, поддерживаться, независимо от изменяющихся давлений P_1 и P_3 . Так как расход через регулятор давления G_p и расход потребителя G_{II} связаны между собой, то можно записать уравнение расхода в виде:

$$G_p = G_{II}. \quad (10)$$

С учетом политропического процесса для природного газа используем выражения Сен-Венана Ванцеля для определения массового расхода газа проходящего через регулятор давления и трубопровод потребителя. Эти формулы расхода учитывают докритический и надкритический режимы истечения природного газа. В этом случае 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 $P_3 / P_2 \geq \beta_{kr}$. С учетом (10) представим равенство указанных выше массовых расходов в виде:

$$\mu_p \pi d X P_1 \sqrt{\frac{2n}{R_T T_1 (n-1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]} = \mu_T \frac{\pi D_T^2}{4} P_2 \sqrt{\frac{2n}{R_T T_2 (n-1)} \left[\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]}, \quad (11)$$

где μ_p, μ_T – коэффициенты расхода природного газа через регулятор давления и трубопровод потребителя; d – диаметр проходного сечения запорной части регулятора давления; X – величина перемещения запорной части и центра мембраны регулятора давления; D_T – диаметр трубопровода потребителя; n – показатель политропного процесса для природного газа; T_1, T_2 – температура природного газа до и после регулятора давления. Критическое значение коэффициента давлений определяется из соотношения [3]

$$\beta_{KP} = \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}}. \quad (12)$$

Преобразуем выражение (11), возведя правую и левую часть уравнения в квадрат и степень n , в результате получим

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\mu_p^2 d^2 X^2 P_1^2 2n}{R_T T_1 (n-1)} \right]^n \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 - \left[\frac{\mu_p^2 d^2 X^2 P_1^2 2n}{R_T T_1 (n-1)} \right]^n \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n+1)} = \\ & = \left[\frac{\mu_T^2 D_T^4 P_2^2 2n}{R_T T_2 (n-1) 16} \right]^n \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^2 - \left[\frac{\mu_T^2 D_T^4 P_2^2 2n}{R_T T_2 (n-1) 16} \right]^n \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{(n+1)}. \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом замены выражений $A = \left[\frac{\mu_p^2 d^2 2n}{R_T (n-1)} \right]^n$, $B = \left[\frac{\mu_T^2 D_T^4 2n}{R_T (n-1) 16} \right]^n$ и подстановки их в уравнении (13)

с последующим преобразованием получим

$$\frac{A^n}{T_1^n} X^{2n} P_1^n P_2^2 P_2^{(n+1)} - \frac{A^n}{T_1^n} X^{2n} \left(\frac{P_1^{2n}}{P_1^{(n+1)}} \right) P_2^{2(n+1)} = \frac{B^n}{T_2^n} P_3^2 P_2^n P_2^{(n+1)} - \frac{B^n}{T_2^n} P_3^{(n+1)} P_2^{2n}. \quad (14)$$

Преобразуем выражение (14) относительно давления P_2 и получим следующее окончательное уравнение:

$$\frac{A^n}{T_1^n} X^{2n} \left(\frac{P_1^{2n}}{P_1^{(n+1)}} \right) P_2^{2(n+1)} + \frac{B^n}{T_2^n} P_3^2 P_2^{(2n+1)} - \frac{A^n}{T_1^n} X^{2n} P_1^n P_2^{(n+3)} - \frac{B^n}{T_2^n} P_3^{(n+1)} P_2^{2n} = 0. \quad (15)$$

Второй вариант: истечение природного газа через регулятор давления надкритическое $P_2 / P_1 \leq \beta_{KP}$; истечение газа через трубопровод потребителя надкритическое $P_3 / P_2 \leq \beta_{KP}$. С учетом (10) представим равенство массовых расходов газа через регулятор давления и трубопровод потребителя в виде:

$$\mu_p \pi d X P_1 \sqrt{\frac{2n}{R_T T_1 (n-1)} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n+1}}} = \mu_T \frac{\pi D_T^2}{4} P_2 \sqrt{\frac{2n}{R_T T_2 (n-1)} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n+1}}}. \quad (16)$$

Правую и левую часть уравнения (16) возводим в квадрат и умножаем на степень n , в результате получаем:

$$\left[\frac{\mu_p^2 d^2 2n}{R_T T_1 (n-1)} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n+1}} X^2 P_1^2 \right]^n = \left[\frac{\mu_T^2 D_T^4 2n}{R_T T_2 (n-1) 16} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n+1}} P_2^2 \right]^n. \quad (17)$$

С учетом замены выражений $A_1 = \left[\frac{\mu_p^2 d^2 2n}{R_T (n-1)} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n+1}} \right]^n$, $B_1 = \left[\frac{\mu_T^2 D_T^4 2n}{R_T (n-1) 16} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n+1}} \right]^n$ и подстановки

их в уравнение (17) с последующим преобразованием получим

$$\frac{A_1^n}{T_1^n} X^{2n} P_1^{2n} = \frac{B_1^n}{T_2^n} P_2^{2n}. \quad (18)$$

Преобразуем уравнение (18) относительно P_2 и окончательно получим выражение для варианта второго истечения газа в виде:

$$\frac{B_1^n}{T_2^n} P_2^{2n} - \frac{A_1^n}{T_1^n} X^{2n} P_1^{2n} = 0. \quad (19)$$

Третий вариант: истечения природного газа через регулятор давления докритическое $P_2 / P_1 \geq \beta_{кр}$; истечение газа через трубопровод потребителя надкритическое $P_3 / P_2 \leq \beta_{кр}$. С учетом (10) представим равенство массовых расходов газа через регулятор давления и трубопровод потребителя, используя для левой части левую часть уравнения (11), а для правой части – правую часть уравнения (16), получаем выражение вида:

$$\mu_p \pi d X P_1 \sqrt{\frac{2n}{R_T T_1 (n-1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]} = \mu_T \frac{\pi D_T^2}{4} P_2 \sqrt{\frac{2n}{R_T T_2 (n-1)} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n+1}}}. \quad (20)$$

С учетом левой части выражения (14) и правой части выражения (18) приведем уравнение (20) к виду:

$$\frac{A^n}{T_1^n} X^{2n} P_1^n P_2^{2n} P_2^{(n+1)} - \frac{A^n}{T_1^n} X^{2n} \left(\frac{P_1^{2n}}{P_1^{(n+1)}} \right) P_2^{2(n+1)} = \frac{B_1^n}{T_2^n} P_2^{2n}. \quad (21)$$

Преобразуем уравнение (18) относительно P_2 и окончательно получим выражение для третьего варианта истечения природного газа в виде:

$$\frac{A^n}{T_1^n} X^{2n} \left(\frac{P_1^{2n}}{P_1^{(n+1)}} \right) P_2^{2(n+1)} - \frac{A^n}{T_1^n} X^{2n} P_1^n P_2^{(n+3)} - \frac{B_1^n}{T_2^n} P_2^{2n} = 0. \quad (22)$$

Четвертый вариант: истечение природного газа через регулятор давления надкритическое $P_2 / P_1 \geq \beta_{кр}$; истечение газа через трубопровод потребителя докритическое $P_3 / P_2 \leq \beta_{кр}$. С учетом (10) представим равенство массовых расходов газа через регулятор давления и трубопровод потребителя, используя для левой части левую часть уравнения (16), а для правой части – правую часть уравнения (11) получаем выражение вида:

$$\mu_p \pi d X P_1 \sqrt{\frac{2n}{R_T T_1 (n-1)} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n+1}}} = \mu_T \frac{\pi D_T^2}{4} P_2 \sqrt{\frac{2n}{R_T T_2 (n-1)} \left[\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]}. \quad (23)$$

С учетом левой части выражения (18) и правой (14) приведем уравнение (20) к виду

$$\frac{A_1^n}{T_1^n} X^{2n} P_1^{2n} = \frac{B^n}{T_2^n} P_3^2 P_2^n P_2^{(n+1)} - \frac{B^n}{T_2^n} P_3^{(n+1)} P_2^{2n} = 0. \quad (24)$$

Преобразуем уравнение (24) относительно P_2 и окончательно получим выражение для четвертого варианта истечения природного газа в виде

$$\frac{B^n}{T_2^n} P_3^2 P_2^{(2n+1)} - \frac{B^n}{T_2^n} P_3^{(n+1)} P_2^{2n} - \frac{A_1^n}{T_1^n} X^{2n} P_1^{2n} P_2^{(n+1)} = 0. \quad (25)$$

Математическая модель, представленная выше, описывает два основных режима регулирования давлением природного газа в трубопроводах на ГРС. Переходный режим работы: понижение уровня давления до заданных пределов. Задается требуемое давление управление P_y , подводящее давление P_1 и другие параметры. Если подставить их значения в уравнение (1), и с учетом выражений (4) – (9), которые описывают переходный процесс изменения давления в полостях мембранного привода. Мембрана и центр мембраны вместе со штоком и запорным элементом начинают перемещаться вдоль оси X . 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 расход газа, поступающего в трубопровод потребителя, а следовательно, и давление P_2 . Как только величина перемещения запорного элемента X достигнет некоторого значения, при котором его ускорение и скорость станут равными нулю ($\ddot{X} = 0, \dot{X} = 0$), мембрана вместе с запорным элементом будут, находится

в состоянии равновесия от сил давления, действующих на них. Давление P_2 достигнет требуемой величины соответствующей заданному давлению управления P_y .

Основной режим работы – поддержание требуемого давления P_2 с требуемой точностью при изменении параметров: подводящего давления P_1 , расхода потребителя, а следовательно, и давления P_3 , и температуры T_1, T_2 , которые фиксируются датчиками давления и температуры. Мембрана и запорный элемент находятся в равновесии от сил давления природного газа и сжатого воздуха, действующих на них. Запорный элемент, открытый на величину X , пропускает через регулятор давления соответствующий расход газа и понижает давление газа в подводящем трубопроводе с величины давления P_1 до величины давления P_2 в трубопроводе после регулятора давления. При изменении параметров P_1, P_3, T_1, T_2 , которые поступают в автоматизированную систему управления (контроллер) в зависимости от режима течения газа через запорный элемент регулятора давления и трубопровод потребителя используются выражения (15), (19), (22), (25). В одно из четырех представленных выше выражений, подставляются текущие значения изменяемых параметров, и вычисляется величина X открытия запорного клапана. Данное значение величины X подставляется в уравнение (1) и находится требуемое значение давления управления P_y .

Предложенная математическая модель отражает основные физические процессы, происходящие при регулировании и поддержании давления с помощью регулятора давления газа на ГРС. На основе предложенной математической модели составляется алгоритм и пишется программа управления давлением на ГРС, которая реализуется программируемым контроллером. При модернизации ГРС, оснащая ее датчиками давления и температуры, пропорциональным клапаном давления и контроллером и при наличии алгоритма и программы управления, позволяет перейти на дистанционный принцип управления несколькими ГРС от диспетчера центрального пункта управления.

Библиографический список

1. Рознюк В.В. Эксплуатация газонефтяного комплекса: справочник / В.В. Рознюк, Л.А. Хачикян, М.А. Гриль. — К.: Росток, 1998. — 431 с.
2. Ибрагимов И.А. Элементы и системы пневмоавтоматики: учеб. пособие для втузов / И.А. Ибрагимов, Н.Г. Фарзана, А.В. Ильясов. — М.: Высш. шк., 1975. — 360 с.
3. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин / Е.В. Герц — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с.
4. Дмитриев В.Н. Основы пневмоавтоматики / В.Н.Дмитриев, В.Г. Градецкий — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.

Поступила в редакцию 21.01.2010 г.