

УДК 59.01.85

С.М. Алфёров, А.М. Кориков

Модели прессового задатчика давления АСУТП регулировки манометров с учетом утечки давления

Разработано математическое описание процессов, протекающих в задатчиках давления (ЗД) на основе пресса с шаговым двигателем для автоматизированного стенда настройки манометров. В модели ЗД учтено явление утечки давления, обоснована адекватность структуры модели и предложен способ параметрической идентификации ЗД.

Ключевые слова: идентификация, манометр, автоматизированный стенд, прессовый задатчик давления, математическая модель, утечка.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-3-90-93

Актуальность исследования

Автоматизация процесса сборки и регулировки манометрических приборов усложняется тем, что данный технологический процесс (ТП) является нестационарным и нелинейным объектом управления (ОУ). Известно, что общей теории управления подобными ОУ не существует, поэтому разрабатываются частные теории управления различными классами объектов, обладающих нестационарностью, типовыми нелинейностями и работающими в обстановке помех и возмущений. ТП сборки и регулировки манометров как объект управления имеет отмеченные выше особенности, поэтому к настоящему времени известны только частные решения проблемы автоматизации данного ТП. Некоторые частные решения этой проблемы представлены в наших работах [1–3].

Важнейшей компонентой автоматизированной системы управления ТП (АСУТП) сборки и регулировки манометров с трубкой Бурдона является задатчик давления (ЗД). В работе [2] представлено математическое описание процессов, протекающих в ЗД клапанного типа АСУТП настройки манометров, обоснована линеаризация уравнений, описывающих эти процессы, и получено их решение. В работе [2] представлено также экспериментальное исследование клапанного ЗД, питаемого аккумуляторной станцией через редукционный клапан (дроссель), и отмечено, что различие результатов эксперимента и моделирования обусловлены допущениями, сделанными при построении математической модели клапанного ЗД, поэтому необходимо создать специальное устройство управления (СУУ) для обеспечения равномерного роста давления при настройке манометров. Очевидно, что введение СУУ в состав АСУТП усложняет её функционирование, поэтому на ОАО «Манотомь» заменили клапанные ЗД на ЗД, использующий пресс с шаговым двигателем. Производственные испытания подтвердили эффективность применения в составе АСУТП прессового ЗД с шаговым двигателем. В процессе этих испытаний установлено, что на эффективность применения данного типа ЗД влияют утечки давления и необходимо исследовать каналы утечки давления и разработать рекомендации по их учету. В этой связи

математическое моделирование процессов, протекающих в ЗД на основе пресса с шаговым двигателем, представляет не только теоретическое, но и практическое значение.

Постановка задач исследования

В процессах сборки и градуировки манометров важнейшей составляющей является процесс управления давлением. Точностные характеристики этого процесса определяют класс точности манометрических приборов. Эксперименты показывают наличие утечки давления на стендах градуировки манометров среднего номинала (от 6 до 60 кгс/см²), что существенно затрудняет заданную точность процесса управления давлением. Для повышения точности и скорости управления давлением необходимо решить следующие задачи:

- Построить математическую модель прессового ЗД с учетом утечки давления.
- Разработать и реализовать алгоритм параметрической идентификации модели.
- Разработать и реализовать алгоритм управления давлением.

Прессовый ЗД как объект идентификации

Упрощенная схема ЗД с возможными утечками представлена на рис. 1.

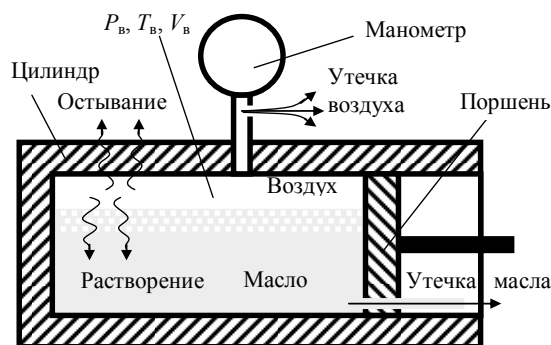


Рис. 1. Упрощенная схема ЗД с утечками

Возможны следующие каналы утечки давления:

1. Утечка воздуха, например в местах соединения манометров и пресса ЗД.
2. Утечка масла, например в месте контакта поршня и поршневой камеры.
3. Остывание воздуха в прессе, находящегося под давлением.

4. Растворение воздуха, находящегося под давлением, в масле пресового ЗД.

Рассмотрим пресовый ЗД с утечками как объект идентификации (ОИ). Для разработки математической модели данного ОИ был проведен эксперимент: поршень прессы был передвинут до состояния, при котором давление достигло примерно 40 кгс/см^2 (2/3 от максимально допустимого на экспериментальном стенде АСУТП), затем поршень был остановлен и проведены измерения давления в зависимости от времени в течение примерно 800 с (точнее, 784 с). В результате эксперимента получен числовой массив из 9625 отсчетов P_i и t_i . График падения давления при неподвижном поршне прессы приведен на рис. 2. На графике за начало отсчета времени t принят момент остановки поршня.

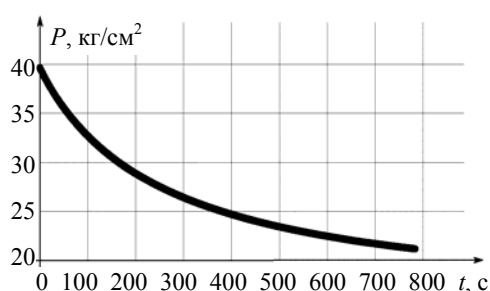


Рис. 2. Зависимость падения давления в ЗД от времени

Данный график и соответствующий ему числовой массив из 9625 отсчетов P_i и t_i с математической точки зрения является временным рядом [4], анализ которого на основе методов теории эксперимента [5] позволит определить причинные механизмы, обуславливающие появление этого ряда. Итак, на основе полученных экспериментальных данных необходимо построить математическую модель пресового ЗД с учетом наблюдаемых утечек.

Исследование пресового ЗД с учетом утечки воздуха

В качестве математической модели ЗД с учетом утечки воздуха используем следующее уравнение:

$$Q_A = k_{LA} \cdot P, \quad (1)$$

где Q_A — поток утечки воздуха; k_{LA} — коэффициент проводимости канала утечки воздуха; P — текущее давление в прессе.

С учетом модели утечки (1), математическая модель прессы будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} (P + P_{\text{atm}}) \cdot V &= (P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0 - \int_0^t Q_A(\tau) d\tau, \\ Q_A &= k_{LA} \cdot P, \\ V &= V_0 - S \cdot x, \\ x &= k \cdot F, \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где V — текущий объем воздуха; P_{atm} — атмосферное давление; P_0 , V_0 — давление и объем перед началом движения поршня прессы; S — площадь поршня; x — текущее положение поршня от начального состояния или расстояние, пройденное поршнем; k — коэффициент зависимости между количеством им-

пульсов управления и расстоянием, пройденным поршнем; F — количество выработанных импульсов управления.

Для определения модели падения давления рассмотрим поведение давления в ЗД после остановки поршня, при этом $x = \text{const}$ и $V = \text{const}$, согласно третьему уравнению из системы уравнений (2). Продифференцировав по времени первое уравнение системы уравнений (2), с учетом условия $V = \text{const}$ получим:

$$\dot{P} \cdot V = -Q_{LA}$$

или с учетом второго уравнения

$$\dot{P} \cdot V = -k_{LA} \cdot P, \quad (3)$$

решение дифференциального уравнения (3) запишем в следующем виде:

$$P = P_{\text{max}} \cdot \exp\left(-\frac{k_{LA}}{V} \cdot t\right), \quad (4)$$

где P_{max} — давление в прессе в начале падения, после остановки поршня ($t = 0$, см. рис. 2). После логарифмирования уравнения (4) получим линейную зависимость $\ln(P)$ от t :

$$\ln(P) = \ln(P_{\text{max}}) + \left(-\frac{k_{LA}}{V} \cdot t\right). \quad (5)$$

На рис. 3 показана зависимость $\ln(P)$ от времени t , здесь P и t взяты из экспериментальных данных P_i и t_i , представленных на рис. 2.

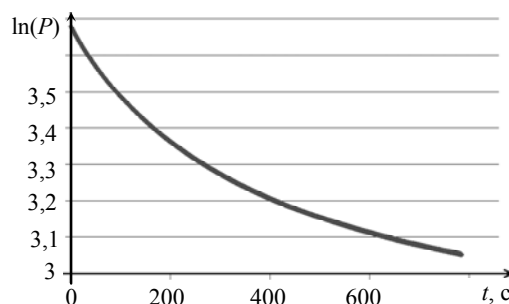


Рис. 3. Проверка структуры модели утечки воздуха

Из графика на рис. 3 видно, что зависимость на этом рисунке не совпадает с линейной зависимостью (5). Коэффициент корреляции R между величинами $\ln(P_i)$ и t_i равен $-0,96239$. При расчете коэффициента корреляции R использовали известные формулы корреляционного анализа [4]. Обозначим для удобства $\ln(P_i)$ через Y_i , а t_i — X_i , тогда R между величинами Y_i и X_i определится по формуле

$$R = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где $\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - M(X))(Y_i - M(Y))$ — ковариация;

$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - M(X))^2}$ — дисперсия;

$M(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ — математическое ожидание.

Если принять предложенную модель утечки воздуха, то можно вычислить интегральный параметр p_I как коэффициент наклона прямой, проведенной через точки $t_i, \ln(P_i)$, с помощью метода наименьших квадратов (МНК):

$$p_I = -\frac{k_{LA}}{V}.$$

Параметр V можно вычислить, подсчитав количество импульсов F и используя уравнения 3 и 4 системы уравнений (2). Вычисление параметров V_0 и k будет рассмотрено далее при выводе формул (13) и (14). Параметр S – площадь поршня известен из проектной документации на ЗД.

Вычисляя интегральный параметр модели p_I из данных $t_i, \ln(P_i)$ с помощью МНК и V с использованием системы уравнений (2) и формул (13) и (14), определим параметр утечки воздуха по формуле:

$$k_{LA} = -p_I \cdot V.$$

Исследование прессового ЗД с учетом утечки масла

В качестве математической модели утечки масла используем следующее уравнение:

$$Q = k_L \cdot P, \quad (6)$$

где Q – поток утечки масла; k_L – коэффициент проводимости канала утечки масла; P – давление в прессе.

С учетом модели (6) математическая модель прессы будет следующей:

$$\left. \begin{aligned} (P + P_{\text{atm}}) \cdot V &= (P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0, \\ Q &= k_L \cdot P, \\ V &= V_0 - S \cdot x + \int_0^t Q(\tau) d\tau, \\ x &= k \cdot F. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Рассмотрим поведение системы по модели (7) после остановки поршня. Из эксперимента нам известно поведение параметра P , поэтому исключим остальные параметры из (7), которые меняются во времени. Для этого сначала исключим Q , подставив второе уравнение в третье, затем исключим V , подставив третье уравнение в первое, получим:

$$\left. \begin{aligned} (P + P_{\text{atm}}) \cdot \left(V_0 - S \cdot x + \int_0^t k_L \cdot P d\tau \right) &= (P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0, \\ x &= k \cdot F. \end{aligned} \right\}$$

Преобразуем первое уравнение полученной системы уравнений:

$$\int_0^t k_L \cdot P d\tau = \frac{(P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0}{(P + P_{\text{atm}})} + S \cdot x - V_0.$$

Так как поршень неподвижен, то $x = \text{const}$, учитывая это, про дифференцируем левую и правую части полученного уравнения по времени t :

$$k_L P = -\frac{(P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0 \cdot \dot{P}}{(P + P_{\text{atm}})^2}$$

или

$$P(P + P_{\text{atm}})^2 = -\frac{(P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0 \cdot \dot{P}}{k_L}.$$

Если давление измеряется в кгс/см², то $P_{\text{atm}} = 1$ кгс/см², тогда:

$$P(P+1)^2 = -\frac{(P_0+1) \cdot V_0 \cdot \dot{P}}{k_L}. \quad (8)$$

Решив уравнение (8), получим:

$$t = -\frac{(P_0+1) \cdot V_0}{k_L} \cdot \left(\ln\left(\frac{P}{P+1}\right) + \frac{1}{P+1} + C \right), \quad (9)$$

где C – постоянный коэффициент, полученный после интегрирования, учитывая, что при $t = 0$ [т.е. после остановки поршня (см. рис. 2)] давление было равно P_{max} , получим:

$$C = -\ln\left(\frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{max}}+1}\right) - \frac{1}{P_{\text{max}}+1}.$$

Введем функцию

$$Y(P) = A \ln(P) + B \ln(P+1) - \frac{C}{P+1}, \quad (10)$$

где $A = 1$ см⁴/кгс², $B = -1$ см⁴/кгс², $C = -1$ см²/кгс. При проверке размерности в формуле (10) следует помнить, что выше в формуле (9) через 1 обозначено $P_{\text{atm}} = 1$ кгс/см².

Из уравнения (9) следует, что между функцией $Y(P)$, введенной соотношением (10), и временем t имеется линейная зависимость, так как параметры C, P_0, V_0 и k_L не меняются в процессе падения давления. По экспериментальным данным P_i можно рассчитать значения функции (10), получив значения $Y_i = Y(P_i)$. Построив график зависимости Y_i от t (рис. 4), можно увидеть зависимость, близкую к линейной, что подтверждает адекватность структуры математической модели утечки масла.

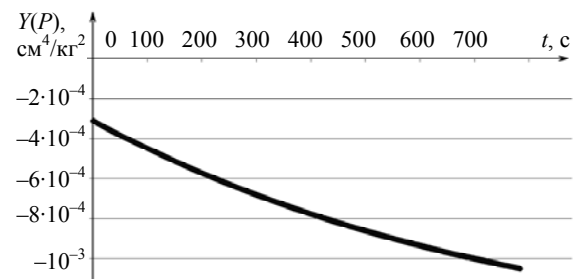


Рис. 4. Проверка структуры модели утечки масла

Коэффициент корреляции R между величинами Y_i и t_i равен $-0,99166$. Расчет коэффициента корреляции R выполнен по известным формулам корреляционного анализа [4].

По данным Y_i и t_i получено значение интегрального параметра уравнений (8) и (9):

$$p_I = \frac{(P_0+1) \cdot V_0}{k_L} = 1058670.$$

Процесс градуировки предполагает следующее: параметр P_0 измеряется перед началом движения поршня, т.е. известен и зависит от номинала. Параметр V_0 может изменяться в зависимости от количества установленных манометрических приборов на стенд АСУТП регулировки манометров и количества воздуха в их пружинах, поэтому его необходимо определять для каждого процесса управления давле-

нием при градуировке. Параметр k_L можно считать неизменным, так как он характеризует задатчик давления.

Параметр V_0 можно оценить в процессе набора давления при съеме характеристики манометра, допустив, что при небольших давлениях утечка незначительна. Для этого необходимо измерить давление в двух состояниях поршня x_0 (перед началом движения поршня) и x_1 . Модель без учета утечек:

$$\left. \begin{aligned} (P + P_{\text{atm}}) \cdot V &= (P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0, \\ V &= V_0 - S \cdot x, \\ x &= k \cdot F. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Начальному положению поршня $x = 0$ соответствует давление P_0 и объем V_0 , положению поршня x_1 соответствует давление P_1 и объем V_1 . Подставив соответствующие значения в систему уравнений (11) получим:

$$\left. \begin{aligned} (P_1 + P_{\text{atm}}) \cdot V_1 &= (P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0, \\ V_1 &= V_0 - S \cdot x_1, \\ x_1 &= k \cdot F_1, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где F_1 – количество импульсов управления, совершенных до достижения давления P_1 . Параметр F_1 подсчитывается программой управления. Напомним также, что параметр S – площадь поршня – известен из проектной документации на ЗД. Из систем уравнений (11) и (12) следует:

$$V_0 = S \cdot k \cdot F \frac{P_1 + P_{\text{atm}}}{P_1 - P_0}, \quad (13)$$

$$k = \frac{V_0 - V_1}{S \cdot F} \quad \text{или} \quad k = \frac{\Delta V_k}{S \cdot F_k}, \quad (14)$$

где ΔV_k – объем камеры пресса; F_k – количество импульсов управления, требующихся для перемещения поршня от начального до конечного положения. Параметр k не меняется и может быть вычислен заранее.

Если параметр V_0 оценить при наборе давления в процессе получения данных P_i и t_i (см. рис. 1), то после вычисления интегрального параметра p_I можно определить коэффициент утечки k_L :

$$k_L = \frac{(P_0 + 1) \cdot V_0}{p_I}.$$

Заключение

Рассмотрены две модели ЗД: с утечкой воздуха и утечкой масла. Предложены способы параметрической идентификации ЗД для каждой модели утечки, при этом предполагается, что при малых давлениях утечка незначительна. Корреляционный анализ [4, 5] предложенных двух моделей ЗД показал, что утечка масла является основной причиной падения давления в ЗД, представленного экспериментальными данными на рис. 2. Наш теоретический

вывод совпадает с экспертным заключением разработчика исследуемого ЗД, суть которого заключается в том, что наибольший вклад в падение давления вносит утечка масла. Определена структура математической модели прессового ЗД с учетом утечки масла и доказана адекватность предложенной модели ЗД. Разработанный и реализованный алгоритм параметрической идентификации модели прессового ЗД с учетом утечки масла является основой для следующего важнейшего этапа исследования: разработки и реализации алгоритма управления давлением, обеспечивающего равномерный рост давления при настройке манометров.

Литература

1. Алфёров С.М. Автоматизация процессов сборки и настройки манометров / С.М. Алфёров, А.М. Кориков // Доклады Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 121–128.
2. Алфёров С.М. Моделирование задатчика давления для настройки манометров / С.М. Алфёров, А.М. Кориков // Доклады Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2012. – № 2(26), ч. 1. – С. 193–198.
3. Алфёров С.М. Автоматизация процесса градуировки шкал манометров / С.М. Алфёров, А.М. Кориков // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 1(7). – С. 82–92.
4. Кендалл М. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
5. Кориков А.М. Эксперимент в научном исследовании // Доклады Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 148–154.

Алфёров Сергей Михайлович

Канд. техн. наук, ассистент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-42-79
Эл. почта: alferov.sm@asu.tusur.ru

Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. АСУ,
профессор Национального исследовательского
Томского политехнического университета
Тел.: +7 (382-2) 41-42-79
Эл. почта: korikov@asu.tusur.ru

Alferov S.M., Korikov A.M.

Model of a press-based pressure controller for settings automated manometers in view of pressure leakage

The paper presents the mathematical models of the processes that take place in pressure controllers based on the press with the stepper motor for automatically adjusting manometers.

Keywords: identification, pressure gauge, automated stand, pressure control, mathematical model, leak.