

УДК 59.01.85

С.М. Алферов, А.М. Корилов

Моделирование задатчика давления для настройки манометров

Разработано математическое описание процессов, протекающих в задатчике давления (ЗД) автоматизированного стенда для настройки манометров, обоснована линеаризация уравнений, описывающих эти процессы, и получено их решение. На этой основе проведено моделирование ЗД, выполнено также сравнение модельных расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: автоматизация, манометр, автоматизированный стенд, задатчик давления, математическая модель, линеаризация, моделирование.

Манометрические приборы имеют разнообразные сферы применения: промышленность, транспорт, бытовая техника, научные исследования и т.д. Конкуренция производителей в данной области приборостроения высока и заставляет предприятия развиваться в направлении повышения качества выпускаемой продукции, осваивать новые технологии и осуществлять автоматизацию выпуска манометров [1, 2]. В этом направлении проделан большой объем исследований, отраженный частично в цитируемых работах [1–4]. В [1] предложен проект системы автоматизированной настройки манометров с помощью нанесения шкал. В [3] предложены конструкция прибора, позволяющая автоматизировать процесс сборки манометра, способ автоматизированной сборки и расчет регулировочных параметров. В [4] разработан стенд для автоматизированной регулировки узлов манометров с трубкой Бурдона по одному параметру путем измерения характеристик чувствительного элемента и обработки механизма по вычисленному регулировочному параметру (координаты крепежного отверстия к чувствительному элементу). Поиск оригинальных технических решений проблемы автоматизации сборки и настройки манометров продолжается и, в частности, соавтором данной статьи С.М. Алферовым совместно с сотрудниками ОАО «Манотомь» разработан способ индивидуальной градуировки шкал манометров и устройство для его осуществления [2]. В проблеме автоматизации регулировки узлов манометров «узким» местом остается проблема автоматизации процесса управления давлением на стендовых манометрах. Успешное решение обозначенной актуальной задачи возможно с привлечением методов математического моделирования ЗД для настройки манометров. Именно этот путь реализуется в данной статье.

Постановка задачи. Важнейшей компонентой стенда для автоматизированной регулировки узлов манометров с трубкой Бурдона является гидравлическая установка, представленная на рис. 1. На этом рисунке использованы следующие обозначения: ДД – датчик давления (цифровой образцовый манометр); Ст – насосная станция; Вн₁, Вн₂ – вентили; Др – дроссель для настройки входного давления; Кл₁, Кл₂ – электромагнитные клапаны для подъема и сброса давления; УУ – устройство управления. Гидравлическая установка предназначена для плавной подачи и сброса давления на регулируемые манометры. Поясним кратко функциональное назначение основных компонент гидравлической установки с помощью рис. 1. Станция нагнетания давления Ст способна выдавать постоянное давление масла. Через вентиль Вн₁ давление масла подается на дроссель Др, с помощью которого можно настроить необходимое давление на вентиле Вн₂ и входе клапана Кл₁ (если Вн₂ открыт).

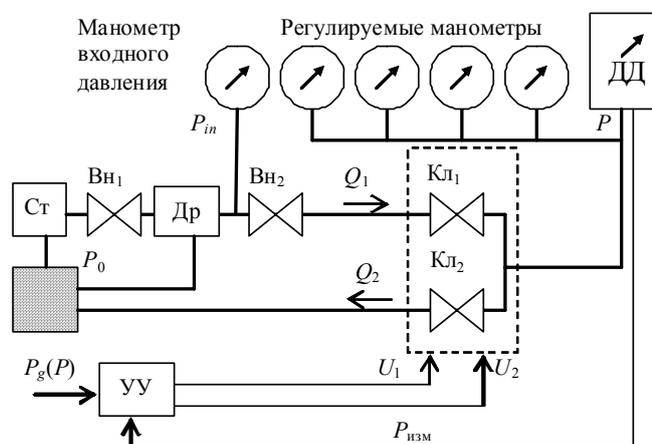


Рис. 1. Схема гидравлической установки

Электромагнитные клапаны $K_{л1}$ и $K_{л2}$ способны плавно менять свою гидравлическую проводимость под действием напряжений U_1 и U_2 , таким образом, регулируются потоки масла Q_1 и Q_2 через клапаны и давление на манометрах P .

Определим суть процессов, протекающих в гидравлической установке с позиции теории управления. Выделим на схеме этой установки объект управления (ОУ). Тогда данная схема может быть представлена в виде рис. 2, на котором в качестве ОУ представлен ЗД (на рис. 1 ему соответствует система клапанов $K_{л1}$ и $K_{л2}$, выделенная пунктиром). Управлению клапанами мешают эффекты «залипания» задвижки клапана, которые, возможно, объясняются силами сухого трения. Для успешного управления давлением требуется построить математическую модель ЗД. Управляемым параметром является давление P . Управляющие параметры: U_1 и U_2 .

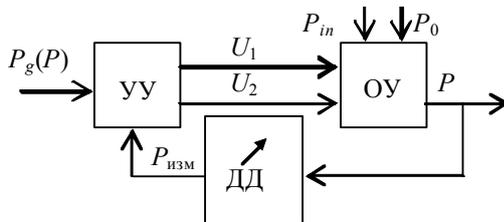


Рис. 2. Структурная схема системы управления:
ОУ – объект управления

Используя уравнения гидродинамики [5], запишем математические модели для компонентов ЗД, т.е. для системы клапанов $K_{л1}$ и $K_{л2}$:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \sqrt{P_{in} - P} \cdot G_1, \\ Q_2 &= \sqrt{P - P_0} \cdot G_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где G_1, G_2 – проводимость соответствующих клапанов.

Зависимость объема воздуха в ресивере от потоков Q_1 и Q_2 находится по следующей формуле:

$$V = V_0 - \int_0^t Q_1 - Q_2 dt. \quad (2)$$

Математическая модель ЗД. Сделаем следующие допущения:

1. Зависимости проводимостей клапанов $K_{л1}$ и $K_{л2}$ от напряжений определяются формулами:

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= K_1 x_1, \\ G_2 &= K_2 x_2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты чувствительности клапанов.

2. Процесс внутри пружины манометра – изотермический.

3. Манометр измеряет относительное давление, т.е. разность между воздействующим давлением и атмосферным (равную примерно 1 кгс/см^2), при воздействии атмосферного давления на манометр его показание равно 0, поэтому удобнее в математической модели использовать давление относительно атмосферного, и, учитывая допущение 2, получаем следующее уравнение зависимости между давлением и объемом газа внутри пружины:

$$V(P+1) = V_0, \quad (4)$$

где V_0 – объем газа при атмосферном давлении.

Из уравнений (1), (3), (4) составим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} V(P+1) &= V_0, \\ V &= V_0 - \int_0^t Q_1 - Q_2 dt, \\ Q_1 &= \sqrt{P_{in} - P} \cdot G_1, \\ Q_2 &= \sqrt{P - P_0} \cdot G_2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Движение задвижки клапана под действием напряжения на катушке описывается следующим уравнением:

$$m \cdot \ddot{x}_h = Fe_h - Fs_h + Ff_h. \quad (6)$$

Здесь m – эффективная масса задвижки; h – номер клапана; x_h, \ddot{x}_h – координата задвижки и её ускорение соответственно для клапана $K_{лh}$; Fe_h – сила магнитного поля катушки, действующая на

задвижку, которая находится по формуле (7); F_{sh} – сила упругости пружины, действующая на задвижку, которая находится по формуле (8), F_{fh} – сила трения, вычисляется по формуле (9) [6]:

$$F_{eh} = \mu \cdot U_h, \tag{7}$$

где μ – коэффициент; U_h – напряжение на катушке;

$$F_{sh} = \eta \cdot x_h, \tag{8}$$

где η – коэффициент упругости пружины;

$$F_{fh} = \begin{cases} 0, & (|\dot{x}_h|=0) \wedge (|F_{eh} - F_{sh} + m\ddot{x}_{h,-1}| \leq F_{\min}), \\ -(F_{eh} - F_{sh}), & (|\dot{x}_h|=0) \wedge (|F_{eh} - F_{sh} + m\ddot{x}_{h,-1}| > F_{\min}), \\ -F_{\min} \cdot \text{sign}(\dot{x}_h), & (|\dot{x}_h| > 0), \end{cases} \tag{9}$$

где \dot{x}_h – скорость движения задвижки, $\ddot{x}_{h,-1}$ – предыстория ускорения, F_{\min} – сила трения покоя.

Линеаризуем систему уравнений (5), искомыми переменными здесь являются Q_1, Q_2, V, P , задаваемые переменные G_1, G_2 . Относительно этих переменных, уравнения 1, 3, 4 в системе уравнений (5) нелинейные, поэтому для численного решения на ЭВМ их необходимо линеаризовать. Перенесем правые части нелинейных уравнений в левую часть, обозначим их соответственно через Φ_1, Φ_3, Φ_4 и в итоге получим следующие уравнения и частные производные для функций Φ_1, Φ_3, Φ_4 :

$$\Phi_1(V, P) = V(P+1) - V_0 = 0; \quad \Phi_3(Q_1, P, G_1) = Q_1 - \sqrt{P_{in} - P} \cdot G_1 = 0; \quad \Phi_4(Q_2, P, G_2) = Q_2 - \sqrt{P - P_0} \cdot G_2 = 0.$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_1}{\partial V} &= P+1; & \frac{\partial \Phi_1}{\partial P} &= V; \\ \frac{\partial \Phi_3}{\partial Q_1} &= 1; & \frac{\partial \Phi_3}{\partial P} &= \frac{G_1}{2\sqrt{P_{in} - P}}; & \frac{\partial \Phi_3}{\partial G_1} &= -\sqrt{P_{in} - P}; \\ \frac{\partial \Phi_4}{\partial Q_2} &= 1; & \frac{\partial \Phi_4}{\partial P} &= \frac{-G_2}{2\sqrt{P - P_0}}; & \frac{\partial \Phi_4}{\partial G_2} &= -\sqrt{P - P_0}. \end{aligned} \tag{10}$$

Так как частные производные $\frac{\partial \Phi_3}{\partial P}$ и $\frac{\partial \Phi_4}{\partial P}$ стремятся к бесконечности при $(P_{in} - P) \rightarrow 0$ и $(P - P_0) \rightarrow 0$, то заменим эти частные производные в окрестности особых точек $P = P_{in}$ и $P = P_0$ на следующие выражения:

$$\frac{\partial \Phi_3}{\partial P} = \frac{G_1}{\sqrt{\varepsilon_P}}, \text{ при } P_{in} - P \leq \varepsilon_P, \quad \frac{\partial \Phi_4}{\partial P} = \frac{-G_2}{\sqrt{\varepsilon_P}}, \text{ при } P - P_0 \leq \varepsilon_P, \tag{11}$$

где ε_P можно принять равным $0,001(P_{in} - P_0)$.

Моделируемый процесс разобьем на временные кванты dt , и представим последовательностью i -х отсчетов $t_i = dt \cdot i$. Предположим, что при достаточно малом значении dt процесс изменения переменных от $(i-1)$ -го отсчета к i -му является линейным.

Используя частные производные, запишем линеаризованные выражения для определения искоемых функций и при этом учтем, что эти функции тождественно равны нулю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Phi_1}{\partial V}(V_i - V_{i-1}) + \frac{\partial \Phi_1}{\partial P}(P_i - P_{i-1}) &= 0, \\ V_i &= V_{i-1} - (Q_{1,i} - Q_{2,i})dt, \\ \frac{\partial \Phi_3}{\partial Q_1}(Q_{1,i} - Q_{1,i-1}) + \frac{\partial \Phi_3}{\partial P}(P_i - P_{i-1}) + \frac{\partial \Phi_3}{\partial G_1}(G_{1,i} - G_{1,i-1}) &= 0, \\ \frac{\partial \Phi_4}{\partial Q_2}(Q_{2,i} - Q_{2,i-1}) + \frac{\partial \Phi_4}{\partial P}(P_i - P_{i-1}) + \frac{\partial \Phi_4}{\partial G_2}(G_{2,i} - G_{2,i-1}) &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Здесь искомые переменные только $Q_{1,i}, Q_{2,i}, V_i, P_i$, оставим их в левой части, остальное перенесем в правую часть и в итоге получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Phi_1}{\partial V} \Big|_{i-1} V_i + \frac{\partial \Phi_1}{\partial P} \Big|_{i-1} P_i &= \frac{\partial \Phi_1}{\partial V} \Big|_{i-1} V_{i-1} + \frac{\partial \Phi_1}{\partial P} \Big|_{i-1} P_{i-1}, \\ V_i + dt \cdot Q_{1,i} - dt \cdot Q_{2,i} &= V_{i-1}, \\ \frac{\partial \Phi_3}{\partial Q_1} \Big|_{i-1} Q_{1,i} + \frac{\partial \Phi_3}{\partial P} \Big|_{i-1} P_i &= \frac{\partial \Phi_3}{\partial Q_1} \Big|_{i-1} Q_{1,i-1} + \frac{\partial \Phi_3}{\partial P} \Big|_{i-1} P_{i-1} - \frac{\partial \Phi_3}{\partial G_1} \Big|_{i-1} (G_{1,i} - G_{1,i-1}), \\ \frac{\partial \Phi_4}{\partial Q_2} \Big|_{i-1} Q_{2,i} + \frac{\partial \Phi_4}{\partial P} \Big|_{i-1} P_i &= \frac{\partial \Phi_4}{\partial Q_2} \Big|_{i-1} Q_{2,i-1} + \frac{\partial \Phi_4}{\partial P} \Big|_{i-1} P_{i-1} - \frac{\partial \Phi_4}{\partial G_2} \Big|_{i-1} (G_{2,i} - G_{2,i-1}). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Уравнение (10) в матричном виде, с учетом (8) и (9), будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{pmatrix} V_{i-1} & (P_{i-1}+1) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & dt & -dt \\ Ap_{3,i-1} & 0 & 1 & 0 \\ Ap_{4,i-1} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_i \\ V_i \\ Q_{1,i} \\ Q_{2,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (2P_{i-1}+1)V_{i-1} \\ V_{i-1} \\ Bp_{3,i-1} \\ Bp_{4,i-1} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$\text{где } Ap_{3,i-1} = \frac{\partial \Phi_3}{\partial P} \Big|_{i-1} = \begin{cases} \frac{G_{1,i}}{2\sqrt{P_{in}-P_{i-1}}}, & P_{in} - P_{i-1} > \varepsilon_p, \\ \frac{G_{1,i}}{\sqrt{\varepsilon_p}}, & P_{in} - P_{i-1} \leq \varepsilon_p; \end{cases} \quad Ap_{4,i-1} = \frac{\partial \Phi_4}{\partial P} \Big|_{i-1} = \begin{cases} \frac{-G_{2,i}}{2\sqrt{P_{i-1}-P_0}}, & P_{i-1} - P_0 > \varepsilon_p, \\ \frac{-G_{2,i}}{\sqrt{\varepsilon_p}}, & P_{i-1} - P_0 \leq \varepsilon_p; \end{cases}$$

$$Bp_{3,i-1} = Q_{1,i-1} + Ap_{3,i-1}P_{i-1} + \sqrt{P_{in}-P_{i-1}}(G_{1,i} - G_{1,i-1}), \quad Bp_{4,i-1} = Q_{2,i-1} + Ap_{4,i-1}P_{i-1} + \sqrt{P_{i-1}-P_0}(G_{2,i} - G_{2,i-1}).$$

Система из уравнений (6) - (9) линейна относительно переменных U , x , \dot{x} , \ddot{x} для каждого случая, указанного в (9), в матричном виде эта система будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{pmatrix} Ax_{h,i-1} & 0 & m \\ 1 & -dt & \frac{dt^2}{2} \\ 0 & 1 & -dt \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_{h,i} \\ \dot{x}_{h,i} \\ \ddot{x}_{h,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu \cdot U_{h,i} + Bx_{h,i-1} \\ x_{h,i-1} \\ \dot{x}_{h,i-1} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$\text{где } Ax_{h,i-1} = \begin{cases} \eta, & |\dot{x}_{h,i-1}| \geq \varepsilon_v, \\ 0, & |\dot{x}_{h,i-1}| < \varepsilon_v; \end{cases}$$

$$Bx_{h,i-1} = \begin{cases} -F_{\min} \operatorname{sign}(\dot{x}_{h,i-1}), & |\dot{x}_{h,i-1}| \geq \varepsilon_v, \\ -F_{\min} \operatorname{sign}(\mu \cdot U_{h,i} - \eta \cdot x_{h,i-1}), & (|\dot{x}_{h,i-1}| < \varepsilon_v) \wedge (|\mu \cdot U_{h,i} - \eta \cdot x_{h,i-1} + m \cdot \ddot{x}_{h,i-1}| \geq F_{\min}), \\ -\mu \cdot U_{h,i}, & (|\dot{x}_{h,i-1}| < \varepsilon_v) \wedge (|\mu \cdot U_{h,i} - \eta \cdot x_{h,i-1} + m \cdot \ddot{x}_{h,i-1}| < F_{\min}). \end{cases}$$

Компоненты начального состояния:

$$U_{1,0} = 0; \quad U_{2,0} = 0; \quad (P_0 \quad V_0 \quad Q_{1,0} \quad Q_{2,0})^T = (P_0 \quad V_0 \quad 0 \quad 0)^T;$$

$$(x_{1,0} \quad \dot{x}_{1,0} \quad \ddot{x}_{1,0})^T = (0 \quad 0 \quad 0)^T; \quad (x_{2,0} \quad \dot{x}_{2,0} \quad \ddot{x}_{2,0})^T = (0 \quad 0 \quad 0)^T.$$

Алгоритм моделирования. Вход: экспериментальные данные t_i – отсчеты времени, $U_{1,i}$ – напряжение на катушке впускного клапана, $U_{2,i}$ – напряжение на катушке выпускного клапана.

Выход: P_i – рассчитанное давление в системе.

1. Цикл по всем отсчетам от $i=1, \dots, n$

1.1. $dt := t_i - t_{i-1}$.

1.2. На основе значений $(x_{1,i-1} \quad \dot{x}_{1,i-1} \quad \ddot{x}_{1,i-1})$ и $U_{1,i}$ решить систему (14) и получить значения $(x_{1,i} \quad \dot{x}_{1,i} \quad \ddot{x}_{1,i})$.

1.3. На основе значений $(x_{2,i-1} \quad \dot{x}_{2,i-1} \quad \ddot{x}_{2,i-1})$ и $U_{2,i}$ решить систему (14) и получить значения $(x_{2,i} \quad \dot{x}_{2,i} \quad \ddot{x}_{2,i})$.

1.4. На основе вычисленных значений $x_{1,i}$ и $x_{2,i}$ по формулам (3) вычислить $G_{1,i}$ и $G_{2,i}$.

1.5. По значениям $(P_{i-1} \quad V_{i-1} \quad Q_{1,i-1} \quad Q_{2,i-1})$ и $G_{1,i}$, $G_{2,i}$ решить систему (13) и получить значения $(P_i \quad V_i \quad Q_{1,i} \quad Q_{2,i})$.

Результаты моделирования. На рис. 3 представлен график зависимости давления от времени. Моделирование и эксперимент проведены при значениях параметров $P_{in} = 30$ кгс/см², $P_0 = 0$ кгс/см² и изменении воздействия напряжений U_1 , U_2 на катушках в соответствии с графиками на рис. 4. При моделировании приняты значения неизвестных параметров: $V_0 = 0,001$ единиц объема, $K_1 = 10^{-4}$ и $K_2 = 10^{-4}$ единиц чувствительности, $m = 0,5$ единиц массы, $\mu = 0,5$ единиц, $\eta = 0,6$ единиц упругости. Нас интересует только величина давления, поэтому размерность неизвестных параметров взята в условных единицах, после параметрической идентификации 3Д эта размерность их единицы измерения не будет играть никакой роли. Расчеты выполнены в системе MathCad [7] по алгоритму, приведенному выше, с использованием функции Isolve для решения систем уравнений (13) и (14).

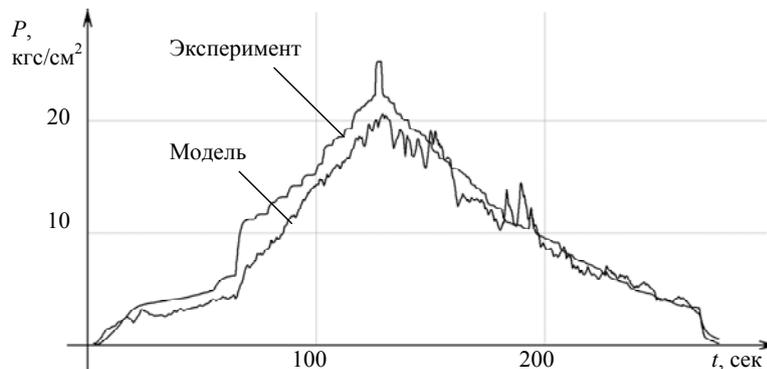


Рис. 3. Зависимость давления от времени

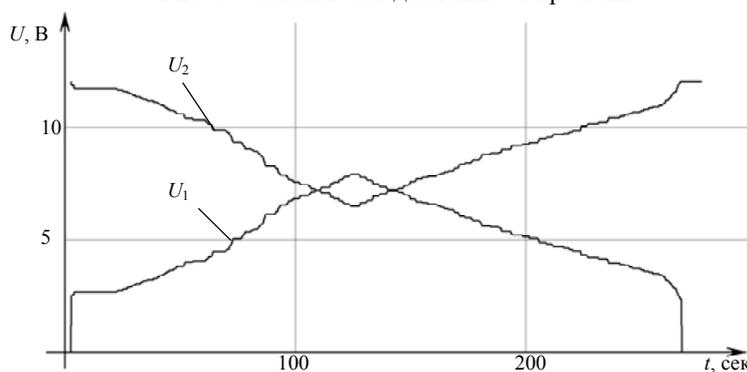


Рис. 4. Изменение напряжения на катушках клапанов 3Д

Сравнительный анализ графиков на рис. 3 позволяет сделать вывод о том, что структура математической модели 3Д в нашем исследовании построена правильно, т.е. нами решена задача структурной идентификации 3Д. Различие результатов эксперимента и моделирования обусловлены допущениями 1–3, сделанными при построении математической модели 3Д, возможным несовпадением значений неизвестных параметров V_0 , K_1 , K_2 , m , μ , η и тем, что в эксперименте на напряжения U_1 и U_2 накладывались колебательные процессы для уменьшения эффекта «залипания» задвижки (т.е. уменьшения воздействия на неё силы трения покоя).

Заключение. Разработанная математическая модель 3Д позволяет адекватно описать процессы, протекающие в 3Д автоматизированного стенда для настройки манометров. В дальнейшем на основе созданной математической модели, планируется решить задачу параметрической идентификации 3Д, т.е. решить задачу определения неизвестных параметров V_0 , K_1 , K_2 , m , μ , η и создать устройство управления для обеспечения равномерного роста давления при настройке манометров.

Литература

1. Лазичев А.А. Система автоматизированной настройки манометров с помощью нанесения шкал / А.А. Лазичев, Ю.А. Самулеева // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 8. – С. 35–38.
2. Пат. 2 428 668 РФ, МПК G01L27/00. Способ индивидуальной градуировки шкал манометров и устройство для его осуществления / А.Ю. Гётц, В.И. Мачкинис, С.М. Везнер и др. (РФ). – № 2009 145 224 / 28; заявл. 07.12.09; опубл. 10.09.10. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers/>, Реестр изобретений; свободный (дата обращения: 25.10.12).

3. Бригадин А.Г. Автоматизация регулировки манометров: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 1998. – 151 с.
 4. Кузнецов А.А. Компьютерный измерительно-технологический комплекс для автоматизированной настройки манометров: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2004. – 149 с.
 5. Гартман Т.Н. Компьютерное моделирование простых гидравлических систем / Т.Н. Гартман, В.Н. Калинин, Л.И. Артемьева. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2002. – 40 с.
 6. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. – М.: Наука, 1973. – 584 с.
 7. Фриск В.В. MathCad. Расчеты и моделирование цепей на ПК. – М.: Солон-Пресс, 2006. – 88 с.
-

Алфёров Сергей Михайлович

Аспирант каф. автоматизированных систем управления ТУСУРа

Тел.: 8-909-538-80-02

Эл. почта: alhoesm@sibmail.com

Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизированных систем управления ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-42-79

Эл. почта: korikov@asu.tusur.ru

Alferov S.M., Korikov A.M.

Simulation of the pressure adjuster for tuning gauges

We developed a mathematical description of processes in an automated booth pressure adjuster for tuning pressure gauge, explained linearized equations describing these processes, and received their solution. On this basis, we simulated a pressure adjuster and compared model calculations with experimental data.

Keywords: automation, pressure gauges, automated stand, pressure vessel, the mathematical model, linearization, modeling.
