

## УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

М.О. Шейкин

sheykinmo@mpei.ru

С.Н. Черкасских

cherkasskikhsn@mpei.ru

Д.В. Шилин

shilindv@mpei.ru

В.В. Феденков

fedenkovvv@mpei.ru

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрен электропневматический привод для управления механической системой желоб–шар. Нелинейная математическая модель составлена для объекта регулирования, включающего в себя желоб и свободно перекатывающийся по нему шар, и электропневматического привода с пропорциональным управлением. Для определения исходных дифференциальных уравнений использовано несколько подходов. Полученная модель приведена в MATLAB Simulink в виде функциональных блоков. Синтезирован и описан алгоритм управления системой, на основе которого представлены нечеткие правила, определяющие входы и выходы системы, а также спроектирован регулятор нечеткой логики. Рассмотрены вопросы формирования лингвистических переменных и базы знаний для регулятора нечеткой логики. Приведены графики переходных процессов положений шара и штока пневмоцилиндра, определены показатели качества переходного процесса шара. Отмечено, что при применении нечеткого регулятора управление осуществляется плавно и без перерегулирования. Выявлено, что при создании нечеткого регулятора необходимо учитывать принцип управления системой, на основе которого формируется база знаний

### Ключевые слова

*Пневмопривод, механическая система желоб–шар, математическая модель, пневмораспределитель с пропорциональным управлением, пневмоцилиндр, нечеткая логика*

Поступила 30.01.2023

Принята 14.09.2023

© Автор(ы), 2024

---

**Введение.** Повышение эффективности электропневматического привода во многом связано с увеличением его точности и быстродействия, что возможно обеспечить только при тесной интеграции силовой и управляющей частей. Это позволяет совместить преимущества как пневматики, так и электроники и обеспечить высокие выходные мощности и требуемые

силовые характеристики при сохранении высоких динамических качеств привода.

Однако часто достижение необходимого качества управления затруднено вследствие отсутствия полной, детальной и достоверной информации как об объекте управления, так и о характеристиках самого пневмопривода. Это приводит к трудностям при формировании адекватных моделей системы и синтезе систем управления. Кроме того, рабочие процессы в пневмоприводе характеризуются существенными нелинейностями, что приводит к невозможности обеспечения оптимальной работы традиционных регуляторов во всех режимах работы. В результате необходимое качество управления не всегда достижимо [1].

В этих условиях перспективным оказывается использование регуляторов, построенных на принципах нечеткой логики. Регуляторы позволяют обеспечить управление сложными системами в условиях отсутствия их точного описания за счет экспертного формирования набора правил управления. Оценка входных и выходных переменных осуществляется по менее строгим критериям, по сравнению с традиционными системами управления.

Данный подход может быть эффективно применен для управления системой желоб–шар, приведенной на рис. 1. Цель управления в системе — обеспечить заданное положение шара путем изменения наклона желоба с помощью приводного устройства, в данном случае пневмоцилиндра. Изменение угла наклона желоба на угол  $\theta(t)$  вызывает качение без проскальзывания шара по желобу под действием силы тяжести (рис. 2). Такая система является нелинейной, имеет две степени свободы и часто используется для отработки различных алгоритмов управления [2–5].

**Математическая модель системы.** Математическая модель включает в себя уравнения движения частей механической системы желоб–шар, поршня пневмоцилиндра, уравнения заполнения нагнетательной и опорожнения выхлопной полостей пневмоцилиндра и уравнение пневмораспределителя. Полученную систему уравнений необходимо дополнить описанием управляющей части.

Для описания движения частей системы желоб–шар может быть использован подход Лагранжа. Выберем в качестве обобщенных координат положение шара  $x$  в желобе относительно оси его вращения и угол  $\theta$  наклона желоба. Уравнения Лагранжа 2-го рода запишутся в виде

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_{x,\theta}} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial q_{x,\theta}} \right) = Q_{x,\theta}, \quad (1)$$

где  $L$  — лагранжиан, равный разности кинетической и потенциальной энергий системы;  $q_{x,\theta}(t)$  — обобщенные координаты;  $Q_{x,\theta}$  — обобщенные внешние силы.

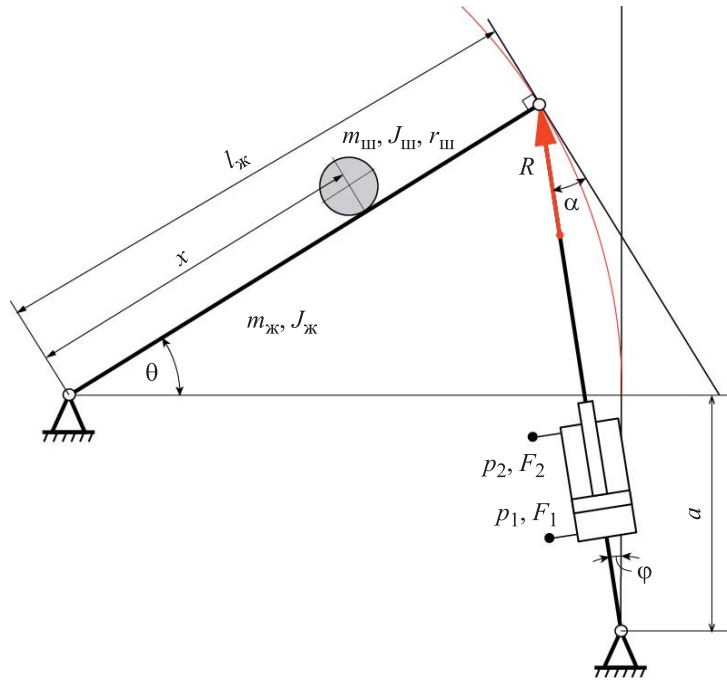


Рис. 1. Расчетная схема системы желоб-шар

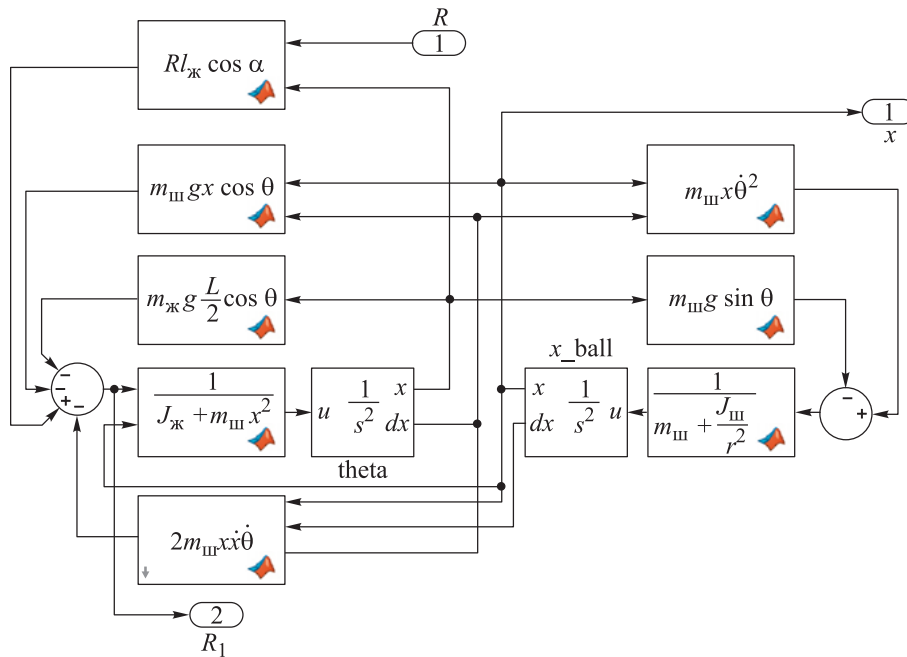


Рис. 2. Модель механической системы желоб-шар в MATLAB Simulink

Для рассматриваемой системы лагранжиан запишем в виде

$$L = \frac{\left(m_{\text{ш}} + \frac{J_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}}^2}\right) \dot{x}^2 + (m_{\text{ш}} x^2 + J_{\text{ж}}) \dot{\theta}^2}{2} - m_{\text{ш}} g x \sin \theta - \frac{1}{2} m_{\text{ж}} g l_{\text{ж}} \sin \theta, \quad (2)$$

где  $m_{\text{ш}}$ ,  $r_{\text{ш}}$  — масса и радиус шара;  $m_{\text{ж}}$ ,  $l_{\text{ж}}$  — масса и длина желоба;  $J_{\text{ж}}$  — момент инерции желоба;

$$J_{\text{ш}} = \frac{2m_{\text{ш}}r^2}{5} \quad (3)$$

— момент инерции шара.

Обобщенные силы:

$$Q_x = 0 \quad \text{и} \quad Q_{\theta} = R l_{\text{ж}} \cos \alpha, \quad (4)$$

где  $R$  — сила, развиваемая пневмоприводом;  $\alpha$  — угол между направлением действия силы  $R$  и нормалью к желобу.

Согласно (1) получаем два дифференциальных уравнения, описывающих движения шара и желоба:

$$\begin{aligned} \left(m_{\text{ш}} + \frac{J_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}}^2}\right) \ddot{x} - m_{\text{ш}} x \dot{\theta}^2 + m_{\text{ш}} g \sin \theta &= 0; \\ (m_{\text{ш}} x^2 + J_{\text{ж}}) \ddot{\theta} + 2m_{\text{ш}} x \dot{x} \dot{\theta} + m_{\text{ш}} g x \cos \theta + \frac{1}{2} m_{\text{ж}} g l_{\text{ж}} \cos \theta &= R l_{\text{ж}} \cos \alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

Для рассматриваемой схемы справедливо  $\alpha = \theta - \varphi$ , поэтому

$$\cos \alpha = \cos (\theta - \varphi) = \cos \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi. \quad (6)$$

Согласно рис. 1:

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{r_{\text{ш}}(1 - \cos \theta)}{\sqrt{r_{\text{ш}}^2(1 - \cos \theta)^2 + (a + r_{\text{ш}} \sin \theta)^2}}; \\ \cos \varphi &= \frac{a + r_{\text{ш}} \sin \theta}{\sqrt{r_{\text{ш}}^2(1 - \cos \theta)^2 + (a + r_{\text{ш}} \sin \theta)^2}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $a$  — расстояние по вертикали от оси поворота желоба до оси поворота гидроцилиндра.

Учитывая (7), выражение (6) запишется в виде

$$\cos \alpha = \frac{a \cos \theta + r_{\text{ш}} \sin \theta}{\sqrt{2r_{\text{ш}}^2(1 - \cos \theta) + a^2 + 2 a r \sin \theta}}. \quad (8)$$

Поворот желоба обеспечивается перемещением  $y$  поршня пневмоцилиндра. Приняв, что начало координат соответствует горизонтальному положению желоба и среднему положению поршня, получаем следующую геометрическую связь между  $y$  и  $\theta$ :

$$y = \sqrt{2r_{\text{ш}}^2 (1 - \cos \theta) + a^2} + 2ar \sin \theta - a. \quad (9)$$

Реализация модели механической системы желоб–шар в MATLAB Simulink приведена на рис. 2.

Уравнение движения поршня пневмоцилиндра имеет вид [6, 7]:

$$p_1 F_1 - p_2 F_2 = m_{\text{п}} \ddot{y} + R + R_{\text{тр}} \text{sign } \dot{y} + R_{\text{уп}}, \quad (10)$$

где  $p_1, p_2$  — давление в поршневой и штоковой полостях пневмоцилиндра;  $F_1, F_2$  — поршневая и штоковая площади поршня;  $m_{\text{п}}$  — масса поршня;  $R_{\text{тр}}$  — сила кулонового трения;  $R_{\text{уп}}$  — сила реакции упоров в пневмоцилиндре.

Реакцию упоров, ограничивающих перемещение поршня, можно считать как

$$R_{\text{уп}} = \begin{cases} C_{\text{уп}}(y + 0,5H) + \beta_{\text{уп}} \dot{y} & \text{при } y < -0,5H; \\ 0 & \text{при } -0,5H < y < 0,5H; \\ C_{\text{уп}}(y - 0,5H) + \beta_{\text{уп}} \dot{y} & \text{при } y > 0,5H, \end{cases} \quad (11)$$

где  $C_{\text{уп}}, \beta_{\text{уп}}$  — коэффициенты жесткости и диссипации контактного взаимодействия поршня пневмоцилиндра с упором;  $H$  — ход пневмоцилиндра.

Уравнение динамики заполнения нагнетательной полости пневмоцилиндра можно получить из первого начала термодинамики, уравнений Менделеева — Клапейрона и Сен-Венана — Ванцеля. При рассмотрении процессов, происходящих в полостях пневмоцилиндра, термодинамические процессы заполнения принимаем адиабатическими [8].

Согласно первому началу термодинамики, имеем

$$dQ_1 = dU_1 + dL_1. \quad (12)$$

Здесь

$$dQ_1 = c_p T_M dm_M \quad (13)$$

— количество тепловой энергии, подведенной к газу [9] ( $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $T_M$  — температура газа в магистрали;  $dm_M$  — масса газа, поступившая в нагнетательную полость из ма-

гистралами);  $dU_1$  — изменение внутренней энергии газа;  $dL_1$  — полная внешняя работа газа.

Внутренняя энергия идеального газа зависит только от его температуры [9]:

$$U_1 = c_v m_1 T_1, \quad (14)$$

где  $c_v$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме;  $T_1$  — температура газа в полости нагнетания;  $m_1$  — масса газа в полости нагнетания.

Запишем уравнение Менделеева — Клапейрона для нагнетательной полости [9]:

$$p_1 V_1 = m_1 R T_1, \quad (15)$$

где  $V_1$  — объем газа в нагнетательной полости и подводящей линии;  $R = c_p - c_v$  — газовая постоянная, отнесенная к единице массы вещества,

$$R = \frac{R_y}{\mu_{\text{км}}}. \quad (16)$$

Здесь  $R_y = 8314$  Дж/(кмоль · К) — универсальная газовая постоянная;  $\mu_{\text{км}}$  — масса одного киломоля вещества; для воздуха  $R = 287$  Дж/(кг · К).

Из (15) и (16) следует

$$U_1 = \frac{c_v}{R} p_1 V_1 \quad (17)$$

или в приращениях

$$dU_1 = \frac{c_v}{R} (p_1 dV_1 + V_1 dp_1). \quad (18)$$

Работа газа определяется по формуле

$$dL_1 = p_1 dV_1. \quad (19)$$

Первое начало термодинамики с учетом (12), (17) и (18) запишем в виде

$$c_p T_m dm_m = \frac{c_v}{R} (p_1 dV_1 + V_1 dp_1) + p_1 dV_1 \quad (20)$$

или

$$k R T_m G_1 = k p_1 \dot{V}_1 + V_1 \dot{p}_1, \quad (21)$$

где  $k = c_p / c_v$ ;  $G_1 = \dot{m}_m$  — массовый расход газа.

Согласно уравнению Сен-Венана — Ванцеля, для адиабатического процесса массовый расход

$$G_1 = \mu f p_M \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_M}} \varphi(p_M, p_1), \quad (22)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода;  $f = bx_3$  — площадь проходного сечения окна пневмораспределителя, определяемая шириной дроссельной щели  $b$  и смещением золотника  $x_3$ . Расходная функция имеет вид

$$\varphi(p_a, p_b) = \begin{cases} 0,259 & \text{при } \frac{p_b}{p_a} \leq 0,528; \\ \sqrt{\left(\frac{p_b}{p_a}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_b}{p_a}\right)^{\frac{k+1}{k}}} & \text{при } \frac{p_b}{p_a} > 0,528. \end{cases} \quad (23)$$

Объем  $V_1$  с учетом мертвого объема пневмоцилиндра и объема  $V_{10}$  подводящей линии представим так:

$$V_1 = V_{10} + F_1(0,5H + y), \quad (24)$$

обозначим

$$y_{10} = \frac{V_{10}}{F_1} + 0,5H. \quad (25)$$

С учетом этого из (21)–(24) следует

$$\dot{p}_1 = \frac{k\mu bx_3 p_M \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_M}}{F_1(y_{10} + y)} \varphi(p_M, p_1) - \frac{kp_1}{y_{10} + y} \dot{y}. \quad (26)$$

В выхлопной полости происходит истечение воздуха в атмосферу. Для этого случая первое начало термодинамики описывается уравнением

$$-dQ_2 = dU_2 + dL_2, \quad (27)$$

где  $dQ_2$  — количество тепловой энергии, уносимой газом при соединении с атмосферой;  $dU_2$  — изменение внутренней энергии газа;  $dL_2$  — полная внешняя работа газа. Количество тепловой энергии  $dQ_2$  определяется как

$$dQ_2 = c_p T_2 dm_a, \quad (28)$$

где  $T_2$  — температура в выхлопной полости;  $dm_a$  — масса газа, уносимого в атмосферу.

Внутренняя энергия  $U_2$  рассчитывается аналогично (17):

$$U_2 = \frac{c_v}{R} p_2 V_2. \quad (29)$$

Здесь

$$V_2 = V_{20} + F_2(0,5H - y) = F_2(y_{20} - y) \quad (30)$$

— объем газа в выхлопной полости пневмоцилиндра, включая мертвый объем пневмоцилиндра и объем  $V_{20}$  отводящей линии,

$$y_{20} = \frac{V_{20}}{F_2} + 0,5H. \quad (31)$$

Полная внешняя работа газа определяется в соответствии с выражением

$$dL_2 = p_2 dV_2. \quad (32)$$

Первое начало термодинамики для выхлопной полости с учетом (28), (29) и (32) запишем в виде

$$-c_p T_2 dm_a = \frac{c_v}{R} (p_2 dV_2 + V_2 dp_2) + p_2 dV_2 \quad (33)$$

или

$$-kRT_2 G_2 = kp_2 \dot{V}_2 + V_2 \dot{p}_2. \quad (34)$$

Расход газа в выхлопной полости определяется уравнением Сен-Венана — Ванцеля как

$$G_2 = \mu f_2 p_2 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_2}} \varphi(p_2, p_a). \quad (35)$$

Здесь  $G_2$  — массовый расход в выходной пневмолинии;  $f_2$  — площадь проходного сечения выхлопного окна пневмораспределителя;  $p_a$  — атмосферное давление. Для адиабатического процесса температура

$$T_2 = T_a \left( \frac{p_2}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (36)$$

где  $T_a$  — атмосферная температура, обычно равная  $T_m$ .

С учетом (34)–(36) выражение, описывающее опорожнение выхлопной полости, имеет вид

$$\dot{p}_2 = - \frac{k\mu b x_3 p_2^{\frac{3k-1}{2k}} p_a^{\frac{1-k}{2k}} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} RT_a}{F_2(y_{20} - y)} \varphi(p_2, p_a) + \frac{kp_2}{y_{20} - y} \dot{y}. \quad (37)$$



Уравнение баланса сил на золотнике пневмораспределителя запишем так:

$$k_{RI}I - k_{Rx}x_3 = m_3\ddot{x}_3 + D_3\dot{x}_3 + C_3x_3, \quad (38)$$

где  $k_{RI}$  — коэффициент усиления по току;  $k_{Rx}$  — коэффициент жесткости электромагнита;  $I$  — ток в обмотках электромагнита;  $m_3$  — масса золотника;  $D_3$  — коэффициент вязкого трения пневмораспределителя;  $C_3$  — коэффициент позиционной составляющей нагрузки.

Уравнение управляющей обмотки электромагнита [10] имеет вид

$$U = R_{эм}I + L_{эм}\dot{I} + k_u\dot{x}_3, \quad (39)$$

где  $U$  — входное напряжение управляющего сигнала;  $R_{эм}$  — активное сопротивление обмотки электромагнита;  $L_{эм}$  — индуктивность обмотки электромагнита;  $k_u$  — коэффициент противоЭДС.

Реализация модели силовой части пневмопривода в MATLAB Simulink в соответствии с уравнениями (11), (25), (35)–(37) приведена на рис. 3.

#### Основные значения параметров модели, использованные для расчета

Радиус шара $r_{ш}$ , мм .....	29
Масса шара $m_{ш}$ , кг .....	0,683
Плечо $a$ , м .....	0,150
Момент инерции, кг · м <sup>2</sup> :	
шара $J_{ш}$ .....	0,029
желоба $J_{ж}$ .....	0,480
Масса поршня пневмоцилиндра $m_{п}$ , кг .....	0,400
Диаметр, мм:	
поршня $d_{п}$ .....	25
штока $d_{шт}$ .....	8
Давление, бар:	
питания магистрали $p_{м}$ .....	6
выхлопа $p_{а}$ .....	1,0132
Начальная температура в магистрали $T_{м}$ , К .....	300
Мертвый объем пневмоцилиндра, м <sup>3</sup> :	
поршневой полости $V_{01}$ .....	10 <sup>-6</sup>
штоковой полости $V_{02}$ .....	10 <sup>-6</sup>

**Управляющая часть системы.** В процессе работы рассматривалось использование регулятора на основе нечеткой логики. Нечеткое управление выбрано исходя из существенной нелинейности системы.

При разработке нечеткого логического контроллера использован алгоритм Мамдани [11–15], в соответствии с которым формируются логические правила, определяющие принципы регулирования. Для формирования базы правил на рис. 4 изображена поясняющая схема.

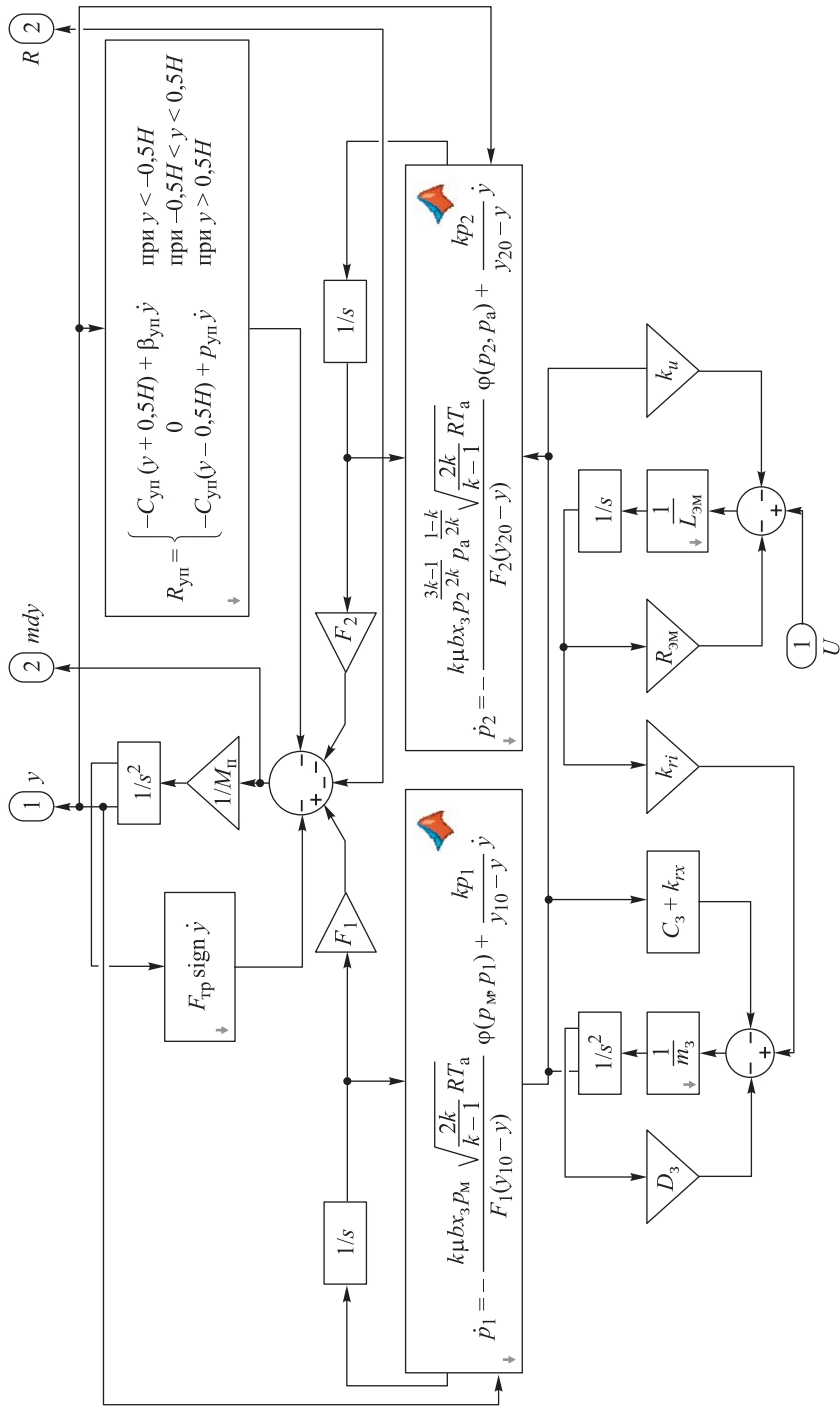


Рис. 3. Модель силовой части пневмопривода в MATLAB Simulink

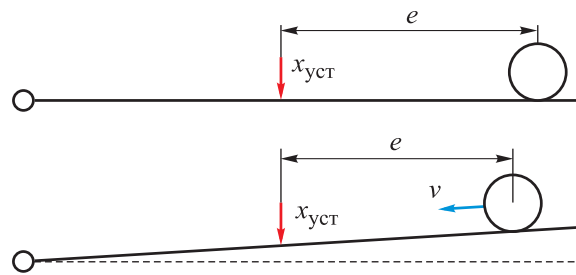


Рис. 4. Схема к составлению базы правил

При начальном положении шар (объект регулирования) находится на расстоянии ошибки регулирования  $e$  от необходимой позиции и имеет скорость, равную нулю. Поскольку шар находится с правой стороны от точки позиционирования, чтобы привести его в движение в требуемую сторону, необходимо наклонить желоб, выдвинув шток пневмоцилиндра, подав напряжение на распределитель. Для быстрогодействия необходимо придать шару максимальное ускорение, т. е. наклонить желоб на максимальный угол, что соответствует максимальному выдвиганию штока пневмоцилиндра. Максимальный угол сохраняется постоянным до некоторой точки торможения, в которой скорость шара максимально допустимая. В точке торможения угол наклона желоба необходимо изменить на отрицательный, чтобы придать шару ускорение с обратным знаком, и сохранять до тех пор, пока скорость не станет приемлемой для уменьшения модуля угла наклона желоба. В процессе торможения шара желоб возвращается в нейтральное положение до тех пор, пока ошибка регулирования не станет находиться в допустимых пределах и скорость не станет равной нулю, что прекращает процесс регулирования.

Исходя из рассмотренной логики, в качестве входных лингвистических переменных выбраны ошибка регулирования и скорость шара, а в качестве выходной — напряжение на распределителе. Входные и выходные лингвистические переменные принимают значения только из заранее определенного множества и могут быть описаны фразами из естественного или искусственного языков. Связь между числовыми и лингвистическими переменными устанавливается с помощью функций принадлежности термножеств, функции которых имеют треугольный и трапециевидный вид. Для ошибки и ее скорости приняты следующие возможные значения лингвистических переменных: отрицательное (О), малое отрицательное (МО), среднее (С), положительное (П) и малое положительное (МП). Для напряжения — сильно малое (СМ), малое (М), среднее (С), большое (Б) и сильно большое (СБ).

После определения лингвистических переменных необходимо составить базу знаний. База знаний состоит из правил вида «если..., то...» [15–17] и формируется экспертным путем. Ниже приведены примеры правил, сформированные для рассматриваемой системы:

- если ошибка регулирования отрицательная (О) и скорость шара отрицательная (О), то напряжение на распределителе среднее (С);
- если ошибка регулирования положительная (П) и скорость шара положительная (П), то напряжение на распределителе среднее (С).

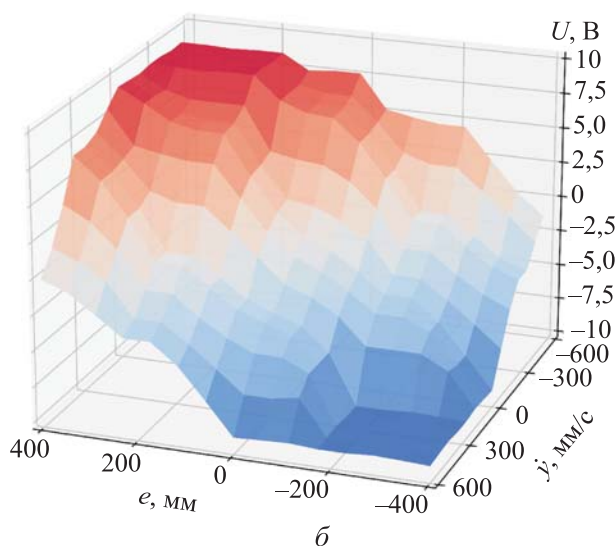
Поскольку в каждой лингвистической переменной пять термов, база знаний состоит из 25 правил. Базу знаний проще всего представить в виде таблицы (рис. 5, а).

Проходя через все этапы нечеткого вывода, можно получить поверхность отклика, связывающую между собой все физические переменные [18, 19]. Поверхность отклика для базы знаний приведена на рис. 5, б.

**База знаний**

Ошибка	Скорость				
	О	МО	С	МП	М
О	С	М	СМ	СМ	СМ
МО	Б	С	М	СМ	СМ
С	СБ	Б	С	О	СМ
МЦ	СБ	СБ	Б	С	М
П	СБ	СБ	СБ	Б	С

а



б

**Рис. 5.** База знаний (а) и поверхность отклика (б), связывающая выходную и входную переменные нечеткого регулятора

Итоговая реализация модели механической системы желоб–шар, управляемой пневмоприводом с нечетким регулятором, в MATLAB Simulink приведена на рис. 6.

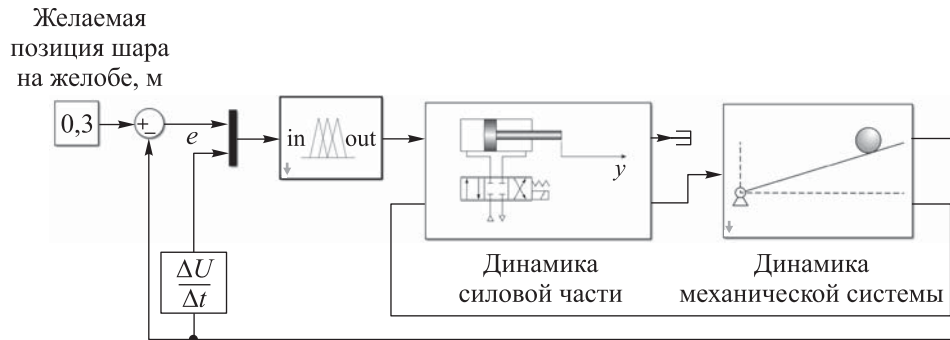


Рис. 6. Реализация механической системы желоб–шар, управляемой пневмоприводом с ПИД-регулятором, в MATLAB Simulink

**Переходные процессы при моделировании.** Полученная математическая модель рассчитана в пакете прикладных программ имитационного моделирования динамических систем MATLAB Simulink. Заданным значением позиционирования было выбрано  $x = 300$  мм. Полученные переходные логические процессы при нечетком управлении приведены на рис. 7. Синтезированный нечеткий регулятор позволил получить устойчивый переходной процесс без перерегулирования.

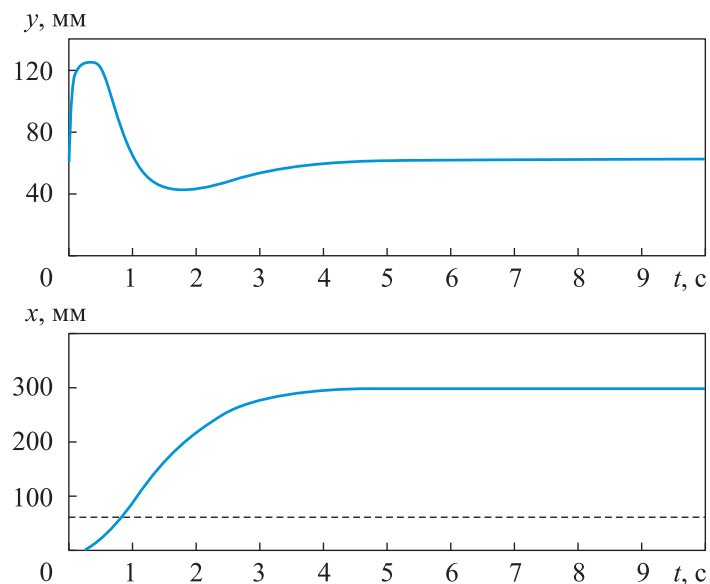


Рис. 7. Переходные логические процессы при нечетком управлении

Для оценки качества переходного процесса выбраны следующие показатели:

– время переходного процесса  $t_{п}$ , оцениваемое по расположению переходной характеристики в 1%-ной зоне относительно установившегося значения;

– квадратичная интегральная оценка качества переходного процесса, определяемая в соответствии со следующим выражением:

$$IQ = \int_0^{\infty} (x_{уст} - x(t))^2 dt. \quad (40)$$

Численные значения показателей качества переходного процесса следующие:  $t_{п} = 4,52$  с;  $IQ = 175,08$  с.

**Заключение.** Разработана математическая модель пневмопривода, включающая в себя описание движения объекта регулирования, полученное на основе уравнений Лагранжа 2-го рода, и приведено описание самого пневмопривода. На основе разработанной модели синтезирован регулятор нечеткой логики. Описан принцип управления механической системой для выбора лингвистических переменных и составлена база правил. Полученные переходные процессы оценены по двум показателям: качество — время переходного процесса и квадратичная интегральная оценка.

Полученные характеристики показали, что при использовании нечеткого регулятора управление получается достаточно мягким, без переуправления. Отмечено, что для синтеза нечеткого регулятора необходимо только понимание принципа управления системой, на основании чего и формируется база знаний, при этом зачастую даже не требуется детальная математическая модель.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Saravanakumar D., Mohan B., Muthuramalingam T. A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems. *Precis. Eng.*, 2017, vol. 49, pp. 481–492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.014>
- [2] Ding M., Liu B., Lichao W. Position control for ball and beam system based on active disturbance rejection control. *Syst. Sc. Control Eng.*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 97–108. DOI: <https://doi.org/10.1080/21642583.2019.1575297>
- [3] Amiruddin B.P., Kadir R.E. Ball and beam control using adaptive PID based on Q-learning. *EECSI*, 2020, pp. 203–208. DOI: <https://doi.org/10.23919/EECSI50503.2020.9251898>

- [4] Keshmiri M., Jahromi A.F., Mohebbi A., et al. Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches. *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 14–35. DOI: <https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-468>
- [5] Amjad M., Kashif M.I., Abdullah S.S., et al. Fuzzy logic control of ball and beam system. *Int. Conf. on Education Technology & Computer*, 2010, vol. 3, pp. 489–493. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETC.2010.5529494>
- [6] Valdiero A.C., Ritter C.S., Rios C.F., et al. Nonlinear mathematical modeling in pneumatic servo position applications. *Math. Probl. Eng.*, 2011, vol. 2011, art. 472903. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/472903>
- [7] Герц Е.В., Крейнин Г.В. Расчет пневмоприводов. М., Машиностроение, 1975.
- [8] Faudzi A.A.M., Osman K., Rahmat M.F., et al. Nonlinear mathematical model of an intelligent pneumatic actuator (IPA) systems: position and force controls. *IEEE/ASME Int. Conf. “Advanced Intelligent Mechatronics”*, 2012, pp. 1105–1110. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIM.2012.6266014>
- [9] Цирельман Н.М. Техническая термодинамика. СПб., Лань, 2018.
- [10] Казмиренко В.Ф. Электрогидравлические мехатронные модули движения. М., Радио и связь, 2001.
- [11] Lee L., Chiang H., Li I. Development and control of a pneumatic-actuator 3-DOF translational parallel manipulator with robot vision. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 6, art. 1459. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19061459>
- [12] Nguyen A., Taniguchi T., Eciolaza L., et al. Fuzzy control systems: past, present and future. *IEEE Comput. Intell. Mag.*, 2019, vol. 14, no. 1, pp. 56–68. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCI.2018.2881644>
- [13] Lee C.C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part I. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, 1990, vol. 20, no. 2, pp. 404–418. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.52551>
- [14] Novakovic B.M. Adaptive fuzzy logic control synthesis without a fuzzy rule base. In: *Fuzzy theory systems*. New York, Academic Press, 1999, pp. 781–808.
- [15] Takosoglu J., Dindorf R., Wos P. Design rules for fuzzy logic controllers for pneumatic systems. In: *Advances in hydraulic and pneumatic drives and control*. Cham, Springer Nature, 2021, pp. 192–204. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8_17)
- [16] Schulte H., Hahn H. Fuzzy state feedback gain scheduling control of servo-pneumatic actuators. *Control Eng. Pract.*, 2004, vol. 12, no. 5, pp. 639–650. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(03\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(03)00148-5)
- [17] Zhang D., Zhou Z., Jia X. Networked fuzzy output feedback control for discrete-time Takagi — Sugeno fuzzy systems with sensor saturation and measurement noise. *Inf. Sc.*, 2018, vol. 457–458, pp. 182–194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.02.026>
- [18] Rohillaa P.K., Kumar V., Al-Hakkak F. Fuzzy gain scheduling of PID controller for stiction compensation in pneumatic control valve. *JCARME*, 2019, vol. 8, no. 2, pp. 165–174. DOI: <https://doi.org/10.22061/jcarme.2018.2689.1270>

[19] Echalih S., Abouloifa A., Lachkar I., et al. Hybrid automaton-fuzzy control of single phase dual buck half bridge shunt active power filter for shoot through elimination and power quality improvement. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2021, vol. 131, art. 106986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106986>

**Шейкин Максим Олегович** — младший научный сотрудник кафедры гидромеханики и гидравлических машин ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 17).

**Черкасских Сергей Николаевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры гидромеханики и гидравлических машин ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 17).

**Шилин Денис Викторович** — канд. техн. наук, доцент кафедры гидромеханики и гидравлических машин ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 17).

**Феденков Владимир Васильевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры гидромеханики и гидравлических машин ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 17).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Шейкин М.О., Черкасских С.Н., Шилин Д.В. и др. Управление электропневматическим приводом на основе нечеткой логики. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 1 (148), с. 110–127. EDN: GSCWVO

**ELECTRO-PNEUMATIC DRIVE CONTROL BASED  
ON THE FUZZY LOGIC**

**M.O. Sheykin**

**S.N. Cherkasskikh**

**D.V. Shilin**

**V.V. Fedenkov**

sheykinmo@mpei.ru

cherkasskikhsn@mpei.ru

shilindv@mpei.ru

fedenkovvv@mpei.ru

**MPEI, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The paper considers an electro-pneumatic drive to control the gutter-ball mechanical system. A nonlinear mathematical model was compiled for both the control object including a gutter and a ball freely rolling along it, and the pneumatic drive with the proportional control. Several approaches were used to determine the initial differential equations. The resulting model was presented in the MATLAB Simulink in the function blocks form. The system control algorithm was synthesized and described forming the basis to present the fuzzy

**Keywords**

*Pneumatic drive, gutter-ball mechanical system, mathematical model, pneumatic distributor with proportional control, pneumatic cylinder, fuzzy logic*



rules that determined the system inputs and outputs. Besides, a fuzzy logic controller was designed. Issues of forming linguistic variables and the knowledge base for the fuzzy logic controller were considered. Graphs of the transient processes in both the ball and the pneumatic cylinder rod positions were presented, and quality indicators of the ball transient process were determined. It was noted that when using a fuzzy controller, the control was smooth and without overshoot. To create a fuzzy controller, it becomes also necessary to understand the system control principle forming the knowledge base

Received 30.01.2023

Accepted 14.09.2023

© Author(s), 2024

## REFERENCES

- [1] Saravanakumar D., Mohan B., Muthuramalingam T. A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems. *Precis. Eng.*, 2017, vol. 49, pp. 481–492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.014>
- [2] Ding M., Liu B., Lichao W. Position control for ball and beam system based on active disturbance rejection control. *Syst. Sc. Control Eng.*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 97–108. DOI: <https://doi.org/10.1080/21642583.2019.1575297>
- [3] Amiruddin B.P., Kadir R.E. Ball and beam control using adaptive PID based on Q-learning. *EECSI*, 2020, pp. 203–208. DOI: <https://doi.org/10.23919/EECSI50503.2020.9251898>
- [4] Keshmiri M., Jahromi A.F., Mohebbi A., et al. Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches. *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 14–35. DOI: <https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-468>
- [5] Amjad M., Kashif M.I., Abdullah S.S., et al. Fuzzy logic control of ball and beam system. *Int. Conf. on Education Technology & Computer*, 2010, vol. 3, pp. 489–493. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETC.2010.5529494>
- [6] Valdiero A.C., Ritter C.S., Rios C.F., et al. Nonlinear mathematical modeling in pneumatic servo position applications. *Math. Probl. Eng.*, 2011, vol. 2011, art. 472903. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/472903>
- [7] Gerts E.V., Kreyenin G.V. Raschet pnevmoprivodov [Calculation of pneumatic drives]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975.
- [8] Faudzi A.A.M., Osman K., Rahmat M.F., et al. Nonlinear mathematical model of an intelligent pneumatic actuator (IPA) systems: position and force controls. *IEEE/ASME Int. Conf. "Advanced Intelligent Mechatronics"*, 2012, pp. 1105–1110. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIM.2012.6266014>
- [9] Tsirelman N.M. Tekhnicheskaya termodinamika [Technical thermodynamics]. St. Petersburg, Lan Publ., 2018.
- [10] Kazmirenko V.F. Elektrogidravlicheskie mekhatronnye moduli dvizheniya [Electrohydraulic mechatronic motion modules]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 2001.

- [11] Lee L., Chiang H., Li I. Development and control of a pneumatic-actuator 3-DOF translational parallel manipulator with robot vision. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 6, art. 1459. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19061459>
- [12] Nguyen A., Taniguchi T., Eciolaza L., et al. Fuzzy control systems: past, present and future. *IEEE Comput. Intell. Mag.*, 2019, vol. 14, no. 1, pp. 56–68. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCI.2018.2881644>
- [13] Lee C.C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part I. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, 1990, vol. 20, no. 2, pp. 404–418. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.52551>
- [14] Novakovic B.M. Adaptive fuzzy logic control synthesis without a fuzzy rule base. In: *Fuzzy theory systems*. New York, Academic Press, 1999, pp. 781–808.
- [15] Takosoglu J., Dindorf R., Wos P. Design rules for fuzzy logic controllers for pneumatic systems. In: *Advances in hydraulic and pneumatic drives and control*. Cham, Springer Nature, 2021, pp. 192–204. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8_17)
- [16] Schulte H., Hahn H. Fuzzy state feedback gain scheduling control of servo-pneumatic actuators. *Control Eng. Pract.*, 2004, vol. 12, no. 5, pp. 639–650. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(03\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(03)00148-5)
- [17] Zhang D., Zhou Z., Jia X. Networked fuzzy output feedback control for discrete-time Takagi — Sugeno fuzzy systems with sensor saturation and measurement noise. *Inf. Sc.*, 2018, vol. 457–458, pp. 182–194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.02.026>
- [18] Rohillaa P.K., Kumar V., Al-Hakkak F. Fuzzy gain scheduling of PID controller for stiction compensation in pneumatic control valve. *JCARME*, 2019, vol. 8, no. 2, pp. 165–174. DOI: <https://doi.org/10.22061/jcarme.2018.2689.1270>
- [19] Echalih S., Abouloifa A., Lachkar I., et al. Hybrid automaton-fuzzy control of single phase dual buck half bridge shunt active power filter for shoot through elimination and power quality improvement. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2021, vol. 131, art. 106986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106986>

**Sheykin M.O.** — Research Assistant, Department of Hydromechanics and Hydraulic Machines, MPEI (Krasnokazarmennaya 17, Moscow, 111250 Russian Federation).

**Cherkasskikh S.N.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Hydromechanics and Hydraulic Machines, MPEI (Krasnokazarmennaya 17, Moscow, 111250 Russian Federation).

**Shilin D.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Hydromechanics and Hydraulic Machines, MPEI (Krasnokazarmennaya 17, Moscow, 111250 Russian Federation).

**Fedenkov V.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Hydromechanics and Hydraulic Machines, MPEI (Krasnokazarmennaya 17, Moscow, 111250 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Sheykin M.O., Cherkasskikh S.N., Shilin D.V., et al. Electro-pneumatic drive control based on the fuzzy logic. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 1 (148), pp. 110–127 (in Russ.). EDN: GSCWVO