7. *Cherepantsev A.S.* Vydelenie proektsii dinamicheskoy sistemy po dannym nablyudeniy polya deformatsiy [Determination of the Phase Projection of a Dynamic System from Strain Field Observations], *Fizika Zemli* [Phisica Zemli], 2008, No. 2, pp. 39-58.
8. *Cherepantsev A.S.* Vydelenie dinamicheskoy sostavlyayushchey v variatsiyakh geofizicheskikh poley na osnove skhodimosti vyborochnogo srednego [Extraction of a dynamic component from variations in geophysical fields using the convergence of a sample average], *Fizika Zemli* [Phisica Zemli], 2008a, No. 11, pp. 31-46.
9. *Takens F.* Detecting strange attractors in turbulence, *Lect. Notes in Math*., 1981, pp. 898.
10. *Li Q., Nyland E.,* Is the Dynamics of the Lithosphere Chaotic?, *Nonlinear Dynamics and Predictability of Geophysical Phenomena,* 1994. Geophysical Monograph 83, IUUG Vol. 18, pp. 37-41.
11. *Gibson J.F., Farmer J.D., Casdagli M., Eubank S.* An analytic approach to practical state space reconstruction, *Physica D,* 1992, Vol. 57, pp. 1-30.
12. *Parker T., Chua L.* Practical numerical algorithms for chaotic systems. New York: Springer-Verlag, 1989, 348 p.
13. *Grassberger P., Procaccia I.,* On the Characterization of Strange Attractors, *Phys.Rev. Lett*., 1983, Vol. 50, pp. 346-349.
14. *Tabor M.* Khaos i integriruemost' v nelineynoy dinamike [Chaos and integrability in nonlinear dynamics]. Moscow: Editorial URSS, 2001, 320 p.
15. *Shuster G.* Determinirovannyy khaos [Deterministic Chaos]. Moscow: Mir, 1988, 240 p.
16. *Malinetskiy G.G., Potapov A.B.* Sovremennye problemy nelineynoy dinamiki [Modern problems of nonlinear dynamics]. Moscow: Editorial URSS, 2002, 360 p.
17. *Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Qian Jiadong, Cherepantsev A.S.* Ritmy i determinirovannyy khaos v geofizicheskikh vremennykh ryadakh [Rhythms and Determined Chaos in Geophysical Time Series], *Fizika Zemli* [Phisica Zemli], 2005, No. 6, pp. 6-28.
18. *Brillindzher D.* Vremennye ryady. Obrabotka dannykh i teoriya [Time series: data analysis and theory]. Moscow: Mir, 1980, 536 p.
19. *Kendall M., Styuart A.* T. 2. Statisticheskie vyvody i svyazi [Vol. 2. Statistical conclusions and links]. Moscow: Nauka, 1973, 899 p.
20. *Levin B.R.* Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki [Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering]. Moscow: Radio i svyaz', 1989, 656 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

Черепанцев Александр Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: acherepantsev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер.Некрасовский, 44; тел.: 88634371663; к.ф.-м.н.; доцент.

Cherepantsev Alexandr Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: acherepantsev@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371663; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

УДК 681.51 DOI 10.18522/2311-3103-2020-4-200-211

Е.Н. Обухова

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИНТЕГРАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ ДЛЯ СИНТЕЗА АДАПТИВНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМОПРИВОДОМ В УСЛОВИЯХ ГАРМОНИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Активное использование электропневматических систем в различных сферах промышленной автоматизации обусловлено такими достаточно высокими эксплуатационными показателями пневмопривода как надежность, быстродействие, низкая стоимость, доступность использования в условиях высокой влажности, а так же во взрыво- и пожароопасных средах. В статье приведен краткий анализ отечественных и зарубежных научных работ, посвященных разработке различных методов управления пневматической сис-

темой, в которых ставится задача синтеза эффективных законов управления обладающих адаптационными свойствами к внешним возмущениям. Целью данной работы является разработка адаптивного нелинейного синергетического закона управления для подавления возмущающего воздействия, которое было задано и аддитивно введено в математическую модель в виде гармонической функции. Синтез адаптивного закона управления проводился посредством метода интегральной адаптации, входящего в концепцию синергетической теории управления. Полученные результаты компьютерного моделирования подтверждают адаптационные свойства полученных нелинейных синергетических законов управления и достижения поставленной технологической цели управления – перемещение штока в заданное положение в условиях гармонического возмущения. Одним из важных этапов анализа представленных в данной работе результатов является проведение экспериментальных исследований, которые позволяют проверить работоспособность полученных аналитическим путем синтезированных нелинейных синергетических законов управления на учебно-экспериментальном стенде пневматических приводов вертикального и горизонтального перемещения компании Camozzi. Для практической реализации полученных синергетических законов управления было произведено программирование контроллера в инструментальной среде разработки программ для промышленной автоматизации CoDeSys на графическом языке функциональных блоковых диаграмм FBD (Function Block Diagram) МЭК 61131-3 программирования.

Электропневматическая система; инвариантные многообразия; фазовые переменные; гармоническое возмущение; интегральная адаптация.

E.N. Obukhova

APPLICATION OF THE METHOD OF INTEGRAL ADAPTATION FOR SYNTHESIS OF ADAPTIVE LAWS OF CONTROL IN A PNEUMATIC DRIVE UNDER HARMONIC DISTURBANCES

The active use of electro-pneumatic systems in various areas of industrial automation is due to such rather high performance indicators of the pneumatic drive as reliability, speed, low cost, availability of use in high humidity conditions, as well as in explosive and fire hazardous environments. The article provides a brief analysis of domestic and foreign scientific works devoted to the development of various methods of pneumatic system control, in which the problem of synthesis of effective control laws with adaptive properties to external disturbances is posed. The aim of this work is to develop an adaptive nonlinear synergetic control law to suppress the disturbing effect, which was specified and additively introduced into the mathematical model in the form of a harmonic function. The synthesis of the adaptive control law was carried out using the method of integral adaptation, which is part of the concept of synergetic control theory. The obtained results of computer modeling confirm the adaptive properties of the obtained nonlinear synergistic control laws and the achievement of the set technological control goal - moving the rod to a given position under conditions of harmonic disturbance. One of the important stages in the analysis of the results presented in this work is the conduct of experimental studies that make it possible to test the performance of synthesized nonlinear synergetic control laws obtained by analytical means on the educational and experimental stand of pneumatic drives of vertical and horizontal displacement of the Camozzi Company. For the practical implementation of the obtained synergetic control laws, the controller was programmed in the CoDeSys programming environment for industrial automation in the graphical language of functional block diagrams FBD (Function Block Diagram) IEC 61131-3 programming.

Electro-pneumatic system; invariant manifolds; phase variables; harmonic disturbance; integral adaptation.

Ведение. Сложная специфика математического описания существенно нелинейных термодинамических процессов, связанных со свойством высокой сжимаемости воздуха, приводит к тому, что в математической модели пневматической системы принимаются допущения о неизменяемости некоторых параметрических характеристик в процессе работы системы.

Совершенно очевидно, что в реальных условиях эксплуатации на систему управления также будут воздействовать некоторые внешние возмущающие факторы, действие которых может значительно отклонить желаемое изменение управляемой величины. При этом, принятые при формировании модели допущения могут привести к значительному расхождению результатов математического моделирования синтезированных законов управления со значениями изменения регулируемого параметра при реальном функционировании замкнутой системы управления.

Как известно, методы классического управления на основе линейных типовых регуляторов применительно к параметрически неопределенным моделям показывают не удовлетворительные результаты. Поэтому для исследования моделей с неопределенными параметрами в условиях внешних возмущений применяют специальные методы робастного и адаптивного управления.

В работе [1] робастные свойства пневматической системы обеспечиваются введением динамической обратной связи по положению штока привода, так же предлагается использование адаптивного нейросетевого динамического контроллера для оценки внешних возмущений. В работах [2, 3] представлен адаптивный робастный регулятор, основанный, на введении обратной связи, которая повышает способность отслеживания траектории выходного звена. Была доказана устойчивость разработанного адаптивного регулятора по методу функции Ляпунова.

В работах [4, 5] рассматривается построение регулятора на основе косвенного адаптивного робастного управления содержащего расширенный наблюдатель возмущений. При этом адаптивный закон управления позволяет оценить не только влияния возмущений, но и неопределенности параметров.

В работе [6] была разработана гибридная нечеткая адаптивная схема управления пневмоприводом с эталонной моделью. Управление основано на мультипликативной адаптации сигнала с линейным регулятором в прямом направлении и нечетким регулятором в адаптивном контуре обратной связи. Подобный принцип управления относится к методу прямой адаптации с эталонной моделью, который объединяет регулятор и алгоритм его адаптации одной целью – уменьшению сигнала ошибки по положению эталонной модели пневмопривода. Принцип прямой адаптации так же применялся для дискретной модели управления пневматической системой в работе [7], а так же в работе [8] для онлайн-оценки параметров эталонной модели пневмопривода.

В работах [9–11] в качестве неопределенного параметра рассматривается сила трения, как изменяющаяся во времени функция. Отдельно стоит выделить работы [12–15] в которых адаптивное управление строится на основе метода управления скользящим режимом. Это так же позволяет ослабить влияние ошибок оценки параметров, и внешних возмущений.

В основе рассмотренных выше работ лежит либо принцип косвенной адаптации либо принцип адаптации на основе эталонной модели или управления скользящим режимом. Принцип косвенной адаптации имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что цель работы синтезируемого адаптивного регулятора расходится с целью построенного наблюдателя, вследствие чего управление по выходной координате оказывается разомкнутым, что естественным образом влияет на ошибку управления.

В адаптивном управлении на основе построения эталонной модели описанный выше недостаток устраняется. Это осуществляется за счет построения блока эталонной модели, вырабатывающей желаемое значение регулируемого параметра управления. Однако в данном принципе управления построение эталонной модели основывается на линейной модели исследуемой системы, что, на наш взгляд, является существенным недостатком. При этом введение в систему блока эталонной

модели усложняет процесс управления, возникают не контролируемые ошибки. Заметим, что в адаптивном управлении скользящим режимом также рассматриваются линейные модели, представленные в матрично-векторной форме.

В данной статье предлагается синтез адаптивных нелинейных синергетических законов управления, в основе которых положен метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов синергетической теории управления (СТУ) [16], разработанный А.А. Колесниковым. При этом адаптивные свойства системы управления к рассматриваемому внешнему гармоническому воздействию достигаются за счет введения принципа интегральной адаптации СТУ [17–19].

Постановка задачи управления. Возмущения колебательного характера являются достаточно распространенными силами, которые могут возникать при различных режимах работы пневматической системы. Подобные возмущения, происходят под влиянием некоторых внешних переменных сил, действие которых не зависит от естественного движения системы в фазовом пространстве.

В качестве одного из примеров возникновения подобных возмущений в пневматической системе можно привести тренажер кабины карьерного экскаватора. При этом внешние возмущающие колебания могут иметь произвольный вид и для их точного функционального описания необходимо либо иметь доступ к экспериментальным данным о характере действующих возмущений [20], либо использовать функцию, которая наиболее полно описывает различные вариации колебаний. В качестве такой функции рассмотрим гармоническое воздействие: $z_f = A \cdot \sin(\omega t)$.

Компенсировать внешние воздействия позволяет использование принципа интегральной адаптации СТУ, базирующегося на фундаментальных свойствах астатизма подавлять возмущения до полного исчезновения ошибки регулирования. Причем применение принципа интегральной адаптации СТУ позволяет подавлять возмущения без их оценки и измерения.

Синтез законов управления с использованием принципа интегральной адаптации СТУ. Интегральная адаптация предполагает расширение фазового пространства путем введения в систему ДУ ЭПС дополнительных интеграторов, которые по сути формируют обратные связи системы, за счет которых и достигается результат подавления внешних возмущающих факторов.

Исходя из метода АКАР расширим фазовое пространство пневматической системы введя в математическую модель интегральные соотношения переменных x_5 и x_6, обеспечивающие подавление функции возмущения z_f:

$$\begin{cases} \dot{x_1}(t) = x_2; \\ \dot{x_2}(t) = a_{21} \cdot x_3 - a_{22} \cdot x_4 - a_{23} \cdot x_2 - a_{24} + x_5 + z_f; \\ \dot{x_3}(t) = \left[a_{31} \cdot (x_1 + l_{01})^{-1} \cdot U_{1f} \cdot \sqrt{p_{\text{м}}^2 - x_3^2}\right] - \dfrac{k x_3 x_2}{(x_1 + l_{01})}; \\ \dot{x_4}(t) = -\left[a_{41} \cdot (a_{42} - x_1)^{-1} \cdot U_{2f} \cdot \left(\dfrac{x_4}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{x_4^2 - p_{\text{А}}^2}\right] + \dfrac{k x_4 x_2}{(a_{42} - x_1)}; \\ \dot{x_5}(t) = x_6; \\ \dot{x_6}(t) = \beta(x_1 - x_1^*). \end{cases} \quad (1)$$

В математическую модель для упрощенного представления и дальнейшего анализа введены следующие коэффициенты: $a_{21} = \frac{S_1}{M}$; $a_{22} = \frac{S_2}{M}$; $a_{23} = \frac{k_{\text{Втр}}}{M}$; $a_{24} = \frac{P_a(S_1 - S_2)}{M}$; $a_N = \frac{N}{M}$; : $a_{31} = \frac{k\sqrt{RT_{\text{м}}}}{S_1\sqrt{\xi}}$; $a_{41} = \frac{k\sqrt{RT_{\text{м}}}}{S_2\sqrt{\xi}}$; $a_{42} = (L + l_{02})$.

В модели следующие параметры обозначены как: x_1 – координата перемещения поршня l (м); x_2 – скорость перемещения движущихся масс V(м/с); x_3 – давление в камере наполнения p_1 (Па); x_4 – давление в камере выхлопа p_2 (Па); M – масса подвижной части поршня и штока (0,5 кг); S_1 и S_2 – эффективные площади поршневой и штоковой полостей пневмоцилиндра ($8 \cdot 10^{-4}$ м^2 и $6 \cdot 10^{-4}$ м^2); $k_{\text{Втр}}$ – коэффициент вязкого трения (100 Н · с/м); $T_{\text{м}}$ – абсолютная температура газа (293 К); k – показатель адиабаты для воздуха (1,4); R – универсальная газовая постоянная (287 Дж/(кг · К)); l_{01} и l_{02} –начальная и конечная координаты положения поршня (0,002 м); ξ – суммарный коэффициент сопротивления входящих в линию дросселей (30); $p_{\text{м}}$ – уровень давления на входе ли ($5 \cdot 10^5$Па); $p_{\text{а}}$ – атмосферное давление (10^5Па).

Управлениями U_{1f} и U_{2f} являются площади поперечного сечения отверстий первого и второго пневмораспределителей которые находятся в правых частях математической модели.

Сформулируем задачу управления следующим образом: необходимо синтезировать управляющие воздействия U_{1f} и U_{2f} на ПР1 и ПР2 таким образом, чтобы положение штока пневмопривода x_1 достигало заданного значения с учетом равновесия давлений $x_3 = x_4$ камерах пневмоцилиндра, при условии воздействия внешних возмущений в виде гармонической функции времени.

Одним из первоначальных этапов синтеза синергетических законов управления по методу АКАР является выделение целей управления – инвариантов, которые задаются исходя из технологической задачи, с учетом физической сущности динамики процессов происходящих в исследуемой системе. Поскольку рассматриваемая пневматическая система описывается уравнениями динамики движения поршня и уравнениями термодинамического равновесия (1), то необходимо задать технологические и термодинамические инварианты которые будут являться конечной целью состояния системы.

Введем термодинамическое инвариантное многообразие ψ_1, отражающее равновесие давлений в камерах пневмоцилиндра в конце хода поршня и технологическое инвариантное многообразие ψ_2 являющееся функцией равновесия давления в камере наполнения, порождающего движение поршня и внутреннего управления, как сложной функции скорости, перемещения и действия возмущающего фактора:

$$\begin{cases} \psi_1 = x_4 - x_3 = 0 \\ \psi_2 = x_3 - \varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $\varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6)$ – внутреннее управление, которым является желаемое изменение давления в камере наполнения x_3 и непосредственно влияющее на скорость штока и его перемещение, с учетом возмущения.

Для устойчивого асимптотического движения системы из условно допустимой области фазового пространства к пересечению инвариантных мноообразий (2) согласно методу АКАР ψ_1 и ψ_2 должны удовлетворять следующим функциональным уравнениям:

$$\begin{cases} \mathrm{T}_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0, \\ \mathrm{T}_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $\mathrm{T}_1 > 0$ и $\mathrm{T}_2 > 0$ постоянные времени, характеризующие длительность движения системы к инвариантным многообразиям.

При попадании системы на пересечение инвариантных многообразий (2) исходная система (1) преобразуется в следующий декомпозированный вид:

$$\begin{cases} \dot{x_1}(t) = x_2, \\ \dot{x_2}(t) = (a_{21} - a_{22}) \cdot \varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6) - a_{23} \cdot x_2 - a_{24} + x_5, \\ \dot{x_5}(t) = x_6, \\ \dot{x_6}(t) = \beta(x_1 - x_1^*). \end{cases} \quad (4)$$

Внутреннее управление φ_1 является сложной функцией, отражающей зависимость скорости от желаемого перемещения с учетом возмущения, поэтому введем следующее многообразие:

$$\psi_3 = x_2 - k(x_1 - x_1^*) + b_1 x_5 + b_2 x_6 = 0, \quad (5)$$

где b_1, b_2 и k – параметры синергетического регулятора, отвечающие за устойчивость движения на многообразии ψ_3 к цели управления. Очевидно, что устойчивость заданного инвариантного многообразия (5), отражающего траекторию движения исследуемой системы в фазовом пространстве ее состояния к конечной цели управления $x_1 = x_1^*$, будет при следующих значениях коэффициентов: $k < 0, b_1, b_2$ и $\beta > 0$. Данные условия устойчивости будут учтены при моделировании системы.

Функциональное уравнение обеспечивающее асимптотическую устойчивость движения к инвариантному многообразию (5):

$$\mathrm{T}_3 \dot{\psi}_3(t) + \psi_3 = 0, \quad (6)$$

где постоянная времени $\mathrm{T}_1 > 0$.

Совместно решая (5) с (6) с учетом (4) выразим $\varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6)$:

$$\varphi_1 = \frac{\mathrm{T}_3(x_5 - kx_2 + b_1 x_6 - a_{23} x_2 - a_{24}) + b_2 x_6 + x_2 - k(x_1 - x_1^*) + b_1 x_5}{\mathrm{T}_3(a_{21} - a_{22})}. \quad (7)$$

Закон управления выраженный относительно площади поперечного сечения ПР1 и ПР2 находится из совместного решения (7) и (2) с учетом функциональных уравнений (3) и модели (1):

$$U_{1f} = \frac{T_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 - \lambda_5) - x_3 - \lambda_6}{T_2 \lambda_3}; \; U_{2f} = \frac{T_1(\lambda_3 U_1 + \lambda_4 + \lambda_8) - x_4 + x_3}{-T_1 \lambda_7}, \quad (8)$$

где

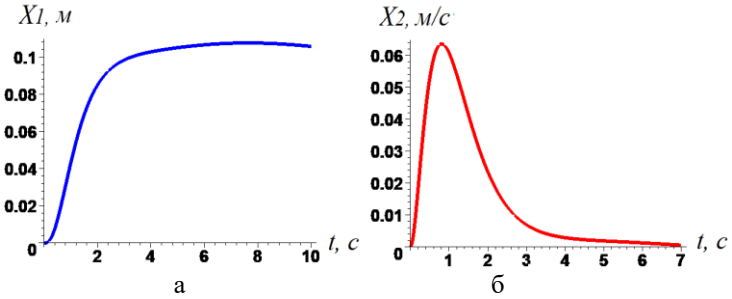
$$\lambda_1 = \frac{kx_2}{T_3(a_{21} - a_{22})}; \; \lambda_2 = \frac{(T_3 k + T_3 a_{23} - 1)\left(a_{21} x_3 - a_{22} x_4 - a_{23} x_2 - a_{24} - z_f\right)}{T_3(a_{21} - a_{22})};$$

$$\lambda_3 = \frac{a_{31}\sqrt{p_{\text{м}}^2 - x_3^2}}{x_1 + l_{01}}; \lambda_4 = \frac{k x_3 x_2}{(x_1 + l_{01})}; \; \lambda_5 = \frac{b_2 x_6}{T_3(a_{21} - a_{22})};$$

$$\lambda_6 = \frac{T_3\left(kx_2 + a_{23} x_2 + a_{24} + z_f + b_1 x_6\right) + x_2 - k(x_1 - x_1^*) + b_1 x_5 + b_2 x_6}{T_3(a_{21} - a_{22})};$$

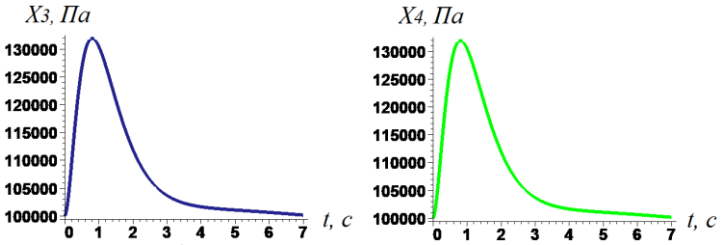
$$\lambda_7 = \frac{a_{41}(x_4/P_m)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{(x_4^2 - p_{\text{A}}^2)}}{a_{42} - x_1}; \; \lambda_8 = \frac{k x_4 x_2}{a_{42} - x_1}.$$

Моделирование. Результаты моделирования системы с учетом гармонического возмущения представлены на рис. 1–3. При моделировании были заданы следующие начальные условия системы: $x_1 = 0$ м; $x_2 = 0$ м/с; $x_3 = 10^5$ Па; $x_4 = 10^5$ Па; желаемые значения перемещения поршня $x_1^* = 0{,}1$м и давления в выхлопной камере $x_4 = x_3 = 10^5$Па; значения возмущающего воздействия: $A = 0{,}1; \omega = 0{,}5$. Значения параметров регулятора: $T_1 = T_2 = T_3 = 0{,}5$ с, $k = -4$; $b_1 = 0{,}01$; $b_2 = 0{,}1$; $\beta = 1$.



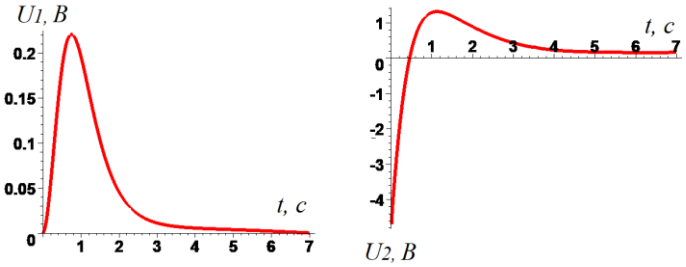
а б

Рис. 1. Переходные процессы ЭПС при синусоидальном возмущении: а – перемещения поршня; б – скорости поршня



а б

Рис. 2. Переходные процессы ЭПС при синусоидальном возмущении: а – давления во впускной камере; б – давления в выхлопной камере



а б

Рис. 3. Графики управляющих воздействий при синусоидальном возмущении: а – по напряжению ПР1; б – по напряжению ПР2

Экспериментальное исследование полученных законов управления на стенде пневматических приводов компании Camozzi. Полученные законы управления были опытным путем апробированы на учебно-экспериментальном стенде ЭПС, фото которого приведено на рис. 4. Ниже представлены основные функциональные элементы стенда ЭПС: пневматические приводы горизонтального и вертикального перемещений Camozzi серии QCT2A032A200 (1); пропорциональные пневматические распределители входящих и исходящих потоков сжатого воздуха Camozzi серии LRWA2-36-2A00 (2); программируемый логический контроллер ПЛК Овен 150; магнитный датчик положения поршня цилиндра серии MPS-128TSTP0.

Данный стенд ЭПС используется в учебных целях для исследования горизонтального и вертикального позиционирования пневматических приводов, с пропорциональными распределителями потоков сжатого воздуха, обеспечивающих торможение и остановку привода в заданной координате.

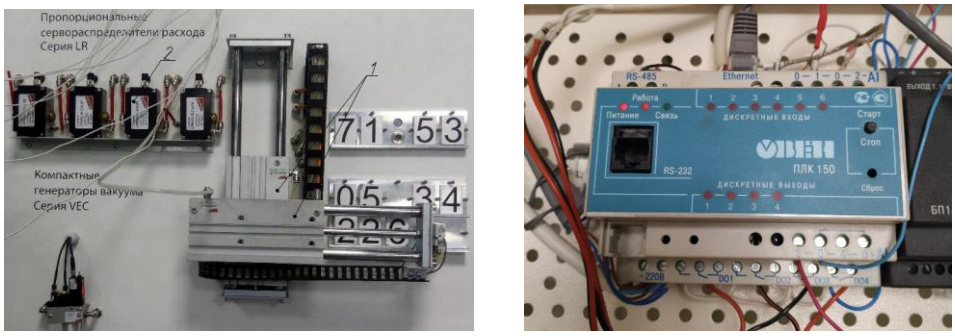


Рис. 4. Учебно-экспериментальный стенд горизонтального и вертикального позиционирования пневмоприводов и ПЛК Овен 150

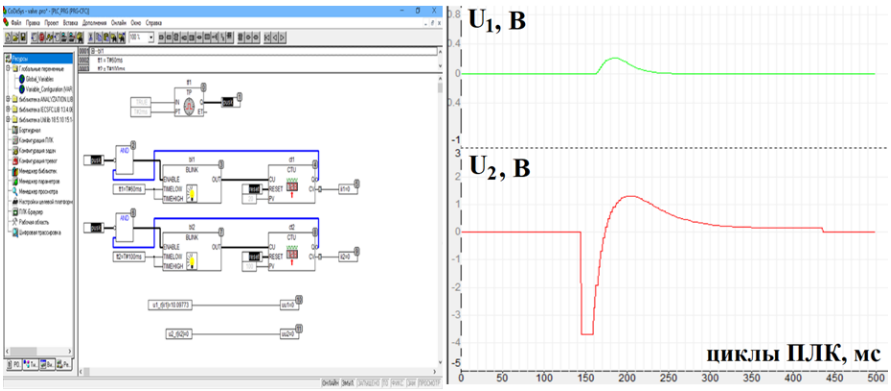
Сбор и обработку информации о положении штока привода обеспечивает аналоговый магнитный датчик, который крепится на корпус пневмоцилиндра. Кабель датчика положения подключается к ПЛК Овен 150, который представлен на рис. 4. При этом, сигнал, который магнитный датчик положения получает при перемещении пневмопривода, передаётся в центральный процессорный модуль ПЛК, который в свою очередь связан с компьютером, через кабель Ethernet. Пропорциональные распределители в системе управления выполняют функцию точного распределения потоков сжатого воздуха, обеспечивая при этом нужную скорость и точность остановки штока привода в заданной точке позиционирования. Входы пропорциональных распределителей подключаются к ПЛК, которые в зависимости от значения управляющего сигнала, осуществляют открытие или закрытие проходных клапанов. Таким образом, в замкнутой системе ПЛК осуществляет организацию управления положением штока привода, изменения заданной координаты положения, а так же принятия, обработки и выдачи сигнала при помощи задаваемого программой алгоритма управления.

Проектирование, отладка и загрузка программы в ПЛК осуществляется в инструментальной среде разработки программ для промышленной автоматизации CoDeSys на одном из пяти языков МЭК 61131-3 программирования. В данном случае, в качестве языка программирования был выбран графический язык функциональных блоковых диаграмм FBD (Function Block Diagram), который позволяет доступно и наглядно представить обработку и передачу управляющего сигнала от ПЛК к ПР, в виде цепей из определенных элементов-программных компонентов (POU).

На рис. 5,а представлен интерфейс среды CoDeSys и реализованная графическая программа для ПЛК на языке FBD. При разработке алгоритма программы использовались базовые функциональные блоки, имеющиеся в библиотеки программы CoDeSys, при этом связи между блоками отражают обмен данных в виде некоторых программно заданных переменных.

На рис. 5,б представлена одновременная цифровая трассировка двух управляющих сигналов – напряжение U1 на ПР1 (зеленый график) и напряжение U2 на ПР2 (красный график). По осям абсцисс представлены циклы работы контроллера, при этом в режиме эмуляции в среде программной отладки CoDeSys 1 цикл ПЛК составляет 55 миллисекунд. Таким образом 500 циклов ПЛК в переводе на время работы контроллера составляет 27,5 секунд. По осям ординат представлены значе-

ния выходных напряжений – единица измерения Вольт. Как видно из рисунка 5б контроллер начинает вырабатывать управляющий сигнал напряжения U_1 примерно на 150 цикле, в то время как сигнал напряжения U_2 примерно на 170 цикле, который соответствует времени равной 8,25 секунды. Эта естественная временная задержка на миллисекунды обусловлена тем, что вначале срабатывает ПР1 на впуск сжатого воздуха в камеру наполнения, а затем открывается клапан на ПР2.



а б

Рис. 5. Интерфейс среды CoDeSys: а – реализованная графическая программа для ПЛК на языке FBD; б – график управляющих напряжений U1 на ПР1 и U2 на ПР2

При этом наличие начальных циклов контроллера при которых отсутствуют значения управляющих сигналов обусловлены временем задержки, в которую входят: задержка операционной системы при подключении среды программирования к контроллеру, физические задержки распространения сигналов на входы ПЛК, а так же задержка на воспроизводство цифровой трассировки в режиме эмуляции контроллера.

Судя по графику напряжения U_2, (рис. 5,б), время за которое клапан ПР2 полностью закроется составляет 11 секунд, при этом, по графику, полученному в ходе математического моделирования в пакете Maple, время полного закрытия ПР2 составляет 6-7 секунд (рис. 3б). Это связано с математической идеализацией получения аналитических данных, а так же отсутствие учета, при моделировании процессов, времени на поступление, обработку и выдачи управляющего сигнала контроллером.

Выводы. В целом, сравнивая графики управляющих воздействий – напряжений U_1 и U_2 (рис. 3), полученные с применением синергетического метода АКАР и графики сигналов дискретных выходов контроллера на рис5б, которые являются управляющими воздействиями на клапаны ПР1 и ПР2, можно совершенно определенно констатировать тождественность данных графиков, что свидетельствует о высокой точности аналитически синтезированных нелинейных синергетических законов управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Liu G., Li G., Z. Peng, Pan H.* Adaptive Neural Network Dynamic Surface Control Algorithm for Pneumatic Servo System // Proceedings of the 11th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC2019). – P. 821-829.
2. *Zuo H., Tao G.* Cross-coupling integral adaptive robust posture control of a pneumatic parallel platform // Mechanical Engineering, Control Science and Information Engineering, Journal of Central South University. – 2016. – Vol. 23. – P. 2036-2047.

3. *Ren H., Fan J.* Adaptive backstepping slide mode control of pneumatic position servo system // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 29. – P. 1003-1009.
4. *Meng D., Tao G., Li A., Li W.* Motion synchronization of dual-cylinder pneumatic servo systems with integration of adaptive robust control and cross-coupling approach // Journal of Zhejiang University SCIENCE C. – 2014. – Vol. 15. – P. 651-663.
5. *Li A., Meng D., Lu B., Li Q.* Nonlinear cascade control of single-rod pneumatic actuator based on an extended disturbance observer // Journal of Central South University. – 2019. – Vol. 26. – P. 1637-1648.
6. *Tóthová M., Pitel J., Hošovský A.* Simulation of Hybrid Fuzzy Adaptive Control of Pneumatic Muscle Actuator // Proceedings of the 4th Computer Science On-line Conference (CSOC2015), Intelligent Systems in Cybernetics and Automation Theory. – 2015. – Vol. 2. – P. 239-246.
7. *Qian P., Tao G., Meng D., Liu H.* A modified direct adaptive robust motion trajectory tracking controller of a pneumatic system // Journal of Zhejiang University SCIENCE C. – 2014. – Vol. 15. – P. 878-891.
8. *Tao G., Shang C., Meng D., Zhou C.* Posture control of a 3-RPS pneumatic parallel platform with parameter initialization and an adaptive robust method // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. – 2017. – Vol. 18. – P. 303-316.
9. *Meng D., Tao G., Zhu X.* Adaptive robust motion trajectory tracking control of pneumatic cylinders // Journal of Central South University. – 2013. – Vol. 20. – P. 3445-3460.
10. *Meng D., Tao G., Liu H., Zhu X.* Adaptive robust motion trajectory tracking control of pneumatic cylinders with LuGre model-based friction compensation // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 27. – P. 802-815.
11. *Tran X., Nguyen V., Nguyen N.C., Pham D.T., Pha V.L.* Sliding mode control for a pneumatic servo system with friction compensation // International Conference on Engineering Research and Applications (ICERA 2019): Advances in Engineering Research and Application. – P. 648-656.
12. *Kien C.V., Anh H.P.H.* Enhanced adaptive fuzzy sliding mode control for nonlinear uncertain serial pneumatic artificial muscle robot system // International Conference on Advances in Computational Mechanics ACOME 2017: Proceedings of the International Conference on Advances in Computational Mechanics. – 2017. – P. 1033-1050.
13. *Chen, H.-Y., Liang J.-W.* Adaptive wavelet neural network controller for active suppression control of a diaphragm-type pneumatic vibration isolator // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2017. – Vol. 15. – P. 1456-1465.
14. *Meng D., Tao G., Ban W., Qian P.* Adaptive robust output force tracking control of pneumatic cylinder while maximizing/minimizing its stiffness // Journal of Central South University. – 2013. – Vol. 20. – P. 1510-1518.
15. *Lee L., Li I.* Design and implementation of a robust FNN-based adaptive sliding-mode controller for pneumatic actuator systems // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2016. – Vol. 30. – P. 381-396.
16. *Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников Ал.А., Топчиев Б.В., Мушенко А.С., Кобзев В.А.* Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – 2-е изд.. – М.: Либроком, 2013. –304 с.
17. *Кузьменко А.А.* Интегральная адаптация высокого порядка в задачах синтеза нелинейных систем управления // Информатика и системы управления. – 2018. – № 1 (55). – С. 142-153.
18. *Кузьменко А.А.* Синергетическое управление нелинейными техническими системами: интегральная адаптация высокого порядка // VIII Всероссийская научная конференция "Системный синтез и прикладная синергетика": Сб. научных трудов. Южный федеральный университет. – 2017. – С. 50-60.
19. *Колесников А.А., Колесников Ал.А., Кузьменко А.А.* Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 9. – С. 579-589.
20. *Веселов Г.Е., Синицын А.С.* Синтез системы управления адаптивной подвеской с учётом физических ограничений амортизатора // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 170-184.

REFERENCES

1. *Liu G., Li G., Z. Peng, Pan H.* Adaptive Neural Network Dynamic Surface Control Algorithm for Pneumatic Servo System, *Proceedings of the 11th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC2019)*, pp. 821-829.
2. *Zuo H., Tao G.* Cross-coupling integral adaptive robust posture control of a pneumatic parallel platform, *Mechanical Engineering, Control Science and Information Engineering, Journal of Central South University*, 2016, Vol. 23, pp. 2036-2047.
3. *Ren H., Fan J.* Adaptive backstepping slide mode control of pneumatic position servo system, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, Vol. 29, pp. 1003-1009.
4. *Meng D., Tao G., Li A., Li W.* Motion synchronization of dual-cylinder pneumatic servo systems with integration of adaptive robust control and cross-coupling approach, *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, 2014, Vol. 15, pp. 651-663.
5. *Li A., Meng D., Lu B., Li Q.* Nonlinear cascade control of single-rod pneumatic actuator based on an extended disturbance observer, *Journal of Central South University*, 2019, Vol. 26, pp. 1637-1648.
6. *Tóthová M., Pitel J., Hošovský A.* Simulation of Hybrid Fuzzy Adaptive Control of Pneumatic Muscle Actuator, *Proceedings of the 4th Computer Science On-line Conference (CSOC2015), Intelligent Systems in Cybernetics and Automation Theory*, 2015, Vol. 2, pp. 239-246.
7. *Qian P., Tao G., Meng D., Liu H.* A modified direct adaptive robust motion trajectory tracking controller of a pneumatic system, *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, 2014, Vol. 15, pp. 878-891.
8. *Tao G., Shang C., Meng D., Zhou C.* Posture control of a 3-RPS pneumatic parallel platform with parameter initialization and an adaptive robust method, *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, Vol. 18, pp. 303-316.
9. *Meng D., Tao G., Zhu X.* Adaptive robust motion trajectory tracking control of pneumatic cylinders, *Journal of Central South University*, 2013, Vol. 20, pp. 3445-3460.
10. *Meng D., Tao G., Liu H., Zhu X.* Adaptive robust motion trajectory tracking control of pneumatic cylinders with LuGre model-based friction compensation, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, Vol. 27, pp. 802-815.
11. *Tran X., Nguyen V., Nguyen N.C., Pham D.T., Pha V.L.* Sliding mode control for a pneumatic servo system with friction compensation, *International Conference on Engineering Research and Applications (ICERA 2019): Advances in Engineering Research and Application*, pp. 648-656.
12. *Kien C.V., Anh H.P.H.* Enhanced adaptive fuzzy sliding mode control for nonlinear uncertain serial pneumatic artificial muscle robot system, *International Conference on Advances in Computational Mechanics ACOME 2017: Proceedings of the International Conference on Advances in Computational Mechanics*, 2017, pp. 1033-1050.
13. *Chen, H.-Y., Liang J.-W.* Adaptive wavelet neural network controller for active suppression control of a diaphragm-type pneumatic vibration isolator, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2017, Vol. 15, pp. 1456-1465.
14. *Meng D., Tao G., Ban W., Qian P.* Adaptive robust output force tracking control of pneumatic cylinder while maximizing/minimizing its stiffness, *Journal of Central South University*, 2013,Vol. 20, pp. 1510-1518.
15. *Lee L., Li I.* Design and implementation of a robust FNN-based adaptive sliding-mode controller for pneumatic actuator systems, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, Vol. 30, pp. 381-396.
16. *Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N., Kolesnikov Al.A., Topchiev B.V., Mushenko A.S., Kobzev V.A.* Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: mekhanicheskie i elektromekhanicheskie sistemy [Synergetic methods for managing complex systems: mechanical and Electromechanical systems]. 2nd ed. Moscow: Librokom, 2013, 304 p.
17. *Kuz'menko A.A.* Integral'naya adaptatsiya vysokogo poryadka v zadachakh sinteza nelineynykh sistem upravleniya [High-order integral adaptation in problems of synthesis of nonlinear control systems], *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and control systems], 2018, No. 1 (55), pp. 142-153.
18. *Kuz'menko A.A.* Sinergeticheskoe upravlenie nelineynymi tekhnicheskimi sistemami: integral'naya adaptatsiya vysokogo poryadka [Synergetic control of nonlinear technical systems: high-order integral adaptation], *VIII Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya "Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika": Sb. nauchnykh trudov. Yuzhnyy federal'nyy universitet* [VIII all-Russian scientific conference "System synthesis and applied synergetics": Collection of scientific papers. Southern Federal University, 2017], 2017, pp. 50-60.

19. *Kolesnikov A.A., Kolesnikov Al.A., Kuz'menko A.A.* Metod AKAR i teoriya adaptivnogo upravleniya v zadachakh sinteza nelineynykh sistem upravleniya [AKAR method and adaptive control theory in problems of synthesis of nonlinear control systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2017, Vol. 18, No. 9, pp. 579-589.
20. *Veselov G.E., Sinitsyn A.S.* Sintez sistemy upravleniya adaptivnoy podveskoy s uchetom fizicheskikh ogranicheniy amortizatora [Synthesis of adaptive suspension control system taking into account the physical limitations of the shock absorber], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 170-184.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Б. Чернышев.

Обухова Елена Николаевна – Донской государственный технический университет; e-mail: elena21@spark-mail.ru; 344016, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; тел.: 89064146401; старший преподаватель.

Obukhova Elena Nikolayevna – Don State Technical University; e-mail: elena21@spark-mail.ru; 1, Gagarin square, Rostov-on-Don, 344016, Russia; phone: +79064146401; senior lecturer.