14. *Gupta V., Rincon-Mora G., and Raha P*. Analysis and design of monolithic, high PSR, linear regulators for SoC applications, *in Proc. IEEE Int. Syst. Chip Conf. , Santa Clara, CA, Sep. 2004,* pp. 311-315.
15. *Rincon-Mora G.A. and Allen P.E.* A low-voltage, low quiescent current, low drop-out regulator, *IEEE J. Solid-State Circuits,* Jan. 1998, Vol. 33, No. 1, pp. 36-44.
16. *Man T.Y., Leung K.N., Leung C.Y., Mok P.K.T., and Chan M.* Development of single-transistor-control LDO based on flipped voltage follower for SoC, *IEEE Tran. Circuits and Systems I, Reg. Papers,* Jun. 2008, Vol. 55, pp. 1392-1401.
17. *Lau S-K., Mok P.K.T. and Leung K.N.* A low-dropout regulator for SoC with Q-reduction, *IEEE J. Solid-State Circuits,* Mar. 2007, Vol. 42, No. 3, pp. 658-664.
18. *Leung W.Y., Man T.Y., Chan W.T., and Chan M.* A high precision, output-capacitor-free low-dropout regulator for system-on-chip design, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems,* May 2008, pp. 2242-2245.
19. *Hoon S.K., Chen S., Maloberti F., Chen J., and Aravind B*. A Low Noise, High Power Supply Rejection Low Dropout Regulator for Wireless System-on-Chip Applications, *in Proc.IEEE Custom Integr.Circuits Conf*., Sept. 2005, pp. 759-762.
20. *Peter Hazucha, Tanay Karnik, Bradley A. Bloechel, Colleen Parsons, David Finan, and Shekhar Borkar.* Area-Efficient Linear Regulator With Ultra-Fast Load Regulation, *IEEE J. Solid-State Circuits,* April 2005, Vol. 40, pp. 933-940.
21. *Leung K.N. and Mok P.K.T.* Analysis of multistage amplifier–Frequency compensation, *IEEE Trans on Circuits Syst. I,* Sept. 2001, Vol. 48, pp. 1041-1056.
22. *Leung K.N. and Mok P.K.T.* A capacitor-free CMOS low-dropout regulator with damping-factor-control frequency compensation, *IEEE Journal of Solid-State Circuits,* 2003, No. 38 (10), pp. 1691-1702.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Самойлов Леонтий Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: lksamoilov@sfe u.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел./факс: 88634371638; кафедра информационных измерительных технологий и систем; д.т.н.; профессор.

Жук Алексей Андреевич – Донской государственный технический университет; e-mail: alexey.zhuk96@mail.ru; 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147; тел. 89185880301; кафедра информационных систем и радиотехники; аспирант.

Samoilov Leontii Konstantionovich – South Federal University; e-mail: lksamoilov@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371638; tpy department of information measuring technologies and systems; dr, of eng. sc.; professor.

Zhuk Alexey Andreevich – Don State Technical University; e-mail: alexey.zhuk96@mail.ru; 346500, Shakhty, 147, Shevchenko street; phone: +79185880301; the department of information systems and radio engineering; postgraduate student.

УДК 681.51 DOI 10.23683/2311-3103-2019-5-203-213

Е.Н. Обухова

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АСТАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Существенное расширение функциональных возможностей пневматического привода, обеспечивающего работу различного технологического оборудования, достигается за счет введения в пневматическую систему точной организации управления ее элементами. Однако, несмотря на современное развитие методов теории автоматического управления, нашедших свое применение в различных технических областях и сферах науки, задача син-

теза законов управления до сих пор является сложной, неоднозначной и требующей творческого подхода при ее решении. В настоящее время в этом направлении проводятся исследования как российскими так и зарубежными учеными с использованием классических линейных законов управления, методологии оптимального управления, а так же современного аппарата нечеткой логики и нейронных сетей. Целью данной работы является разработка астатического нелинейного синергетического регулятора для подавления возмущающих воздействий возникающих в электропневматических системах. Синтез управляющих воздействий проводился посредством метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов, входящего в концепцию синергетической теории управления. Исходным материалом для исследования является математическая модель и параметры пневмоцилиндра компании Camozzi серии QCT2A032A200. Синтез синергетических законов управления основан на методе аналитического конструирования агрегированных регуляторов и представлении поведения системы в фазовом пространстве. Суть метода сводится к выбору областей притяжения - инвариантных многообразий системы, попадая на которых система неизбежно будет двигаться к заданной цели управления. Полученные аналитическим путем законы управления, посредством совместного решения введенных макропеременных и функциональных уравнений, гарантируют асимптотическую устойчивость замкнутой системы, а так же достижения желаемых целей управления – инвариантов при одновременном подавлении возмущающих воздействий. Управляющие воздействия, были смоделированы в пакете Maple. Полученные графики изменения фазовых переменных свидетельствуют об адекватности синтезированного астатического закона управления и о его подавляющих возмущения свойстве. Результаты могут быть использованы в процессе настройки программируемых логических контроллеров для высокоточного энергосберегающего управления пневмоприводами, и дальнейшего экспериментального исследования.

Электропневматическая система; инвариантные многообразия; фазовые переменные; регулятор; возмущение; цель управления.

E. N. Obukhova

SYNERGETIC SYNTHESIS OF ASTATIC CONTROL OF AN ELECTRO-PNEUMATIC SYSTEM TO COMPENSATE FOR EXTERNAL DISTURBANCES

A significant expansion of the functional capabilities of the pneumatic drive, ensuring the operation of various technological equipment, is achieved by introducing the precise organization of control of its elements into the pneumatic system. However, despite the modern development of methods of the theory of automatic control, which have found application in various technical fields and fields of science, the task of synthesizing the laws of control is still a complex, ambiguous and requiring creative approach to its solution. Currently, research is being conducted in this direction by both Russian and foreign scientists using the classical linear laws of control, the optimal control methodology, as well as the modern apparatus of fuzzy logic and neural networks. The aim of this work is to develop an astatic nonlinear synergistic controller to suppress disturbing effects arising in electro-pneumatic systems. The synthesis of control actions was carried out using the method of analytical design of aggregated controllers, which is part of the concept of synergetic control theory. The starting material for the study is the mathematical model and parameters of the Camozzi pneumatic cylinder of the QCT2A032A200 series. The synthesis of synergistic control laws is based on the method of analytical design of aggregated controllers and the representation of the behavior of the system in phase space. The essence of the method is to choose the regions of attraction - invariant manifolds of the system, falling on which the system will inevitably move towards a given control goal. The control laws obtained by an analytic method, by jointly solving the introduced macro-variable and functional equations, guarantee the asymptotic stability of the closed system, as well as the achievement of the desired control goals - invariants while suppressing disturbing influences. The resulting control actions were simulated in the Maple. The obtained graphs of changes in phase variables indicate the adequacy of the synthesized astatic control law and its suppressive perturbation property. The results can be used in the process of setting up programmable logic controllers for high-precision energy-saving control of pneumatic drives, and further experimental research.

Electro-pneumatic system; invariant manifolds; phase variables; controller; disturbance; control goal.

Введение. Эффективное управление таким сложным, с точки зрения математического описания объектом, как электропневматическая система является в настоящее время весьма актуальной задачей. Это подтверждается многочисленными работами как российских так и зарубежных авторов, исследования которых направлены на получение оптимальных, точных законов управления с использованием современных направлений теории автоматического управления, к которым относятся методы нечёткой логики и нейронных сетей [1–8].

В нечеткой логике, в отличии от других методов теории управления, где рассматривается математическая модель в виде дифференциальных уравнений, используются эмпирические данные об объекте для формирования законов управления в виде определенных правил. Нечеткий регулятор использует экспертную информацию для оценки ошибки регулирования и скорости ее изменения.

Реализация ПИД–регулятора на базе нечеткой логики, а так же настройка его параметров представленная в работе [9], показала, что позиционирование штока пневмопривода становится более точным, при расширении множества значений переменных, отвечающих за ошибку регулирования. Однако увеличение таблицы баз знаний приводит к колебательному характеру переходного процесса.

В работе [10] отражено совместное применение нечеткого управления в сочетании с нейронной сетью для управления позиционированием пневматической следящей системой. Была проведена группа экспериментов подтверждающая эффективность результатов обучения и дальнейшего использования нечеткого управления. В работе [11] предложен нейросетевой подход для аппроксимации сложных нелинейных функций, присутствующих в модели пневматической системы.

Однако, в данных работах, к сложностям реализации нейросетевого подхода, как и в случае управления на основе нечеткой логики, относят необходимость к доступу большого количества данных для обучения, а так же сложность математического анализа выбранной структуры регулятора. Отметим, также, что в основном алгоритмы нечеткой логики применяются в системах, которые сложно поддаются формализации и математическому описанию, в то время как математическая модель электропневматической системы имеет достаточно точное описание, не смотря на нелинейность некоторых параметров.

В данной работе рассматривается возможность применения методов синергетической теории управления для реализации астатического нелинейного регулятора с целью подавления возмущающих факторов. Методологическая база синергетической теории управления была разработана профессором А.А. Колесниковым и адаптирована к теории управления нелинейными диссипативными системами [12–14].

Математическая модель. Математическая модель электропневматической системы, представляет взаимосвязи между переменными состояния, которые характеризуют поведение системы, исходя из уравнения движения механической части устройства, а так же из уравнений, характеризующих термодинамические и газодинамические процессы, происходящие в полостях цилиндра [15, 16]:

$$\begin{aligned}
\dot{x_1} &= x_2;\\
\dot{x_2} &= a_{21}\cdot x_3 - a_{22}\cdot x_4 - a_{23}\cdot x_2 - a_{24} - a_N;\\
\dot{x_3} &= \left[a_{31}\cdot (x_1 + l_{01})^{-1}\cdot U_{1f}\cdot\sqrt{p_{\text{м}}^2 - x_3^2}\right] - \frac{k x_3 x_2}{(x_1 + l_{01})};\\
\dot{x_4} &= -\left[a_{41}\cdot (a_{42} - x_1)^{-1}\cdot U_{2f}\cdot\left(\frac{x_4}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{2k}}\cdot\sqrt{x_4^2 - p_{\text{А}}^2}\right] + \frac{k x_4 x_2}{(a_{42} - x_1)}.
\end{aligned} \tag{1}$$

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; x_2 – скорость перемещения движущихся масс V; x_3 – давление в камере наполнения p_1; x_4 – давление в камере слива p_2; M – масса подвижной части поршня и штока, включая массу объекта управления, который механически связан со штоком; S_1 и S_2 – эффективные площади поршневой и штоковой полостей пневмоцилиндра соответственно; $k_{\text{Втр}}$ – коэффициент вязкого трения; N – статическая нагрузка; $T_{\text{м}}$ – абсолютная температура газа; k – показатель адиабаты для воздуха; R – универсальная газовая постоянная; l_{01} – начальная координата положения поршня; l_{02} – конечная координата положения поршня; ξ – суммарный коэффициент сопротивления входящих в линию дросселей, $p_{\text{м}}$ – уровень давления на входе магистрали; $p_{\text{а}}$ – атмосферное давление. Управлениями U_{1f} и U_{2f} являются площади поперечного сечения отверстий первого и второго пневмораспределителей которые находятся в правых частях математической модели.

Синтез нелинейного астатического регулятора. На изменения фазовых переменных в пространстве состояния системы, а так же на точность ее управления естественным образом влияют возмущения, возникающие в процессе реальной эксплуатации электропневматической системы. К подобным возмущающим воздействиям можно отнести периодическое изменение массы нагрузки на определенном временном интервале, а так же влияние силы трения, потери сжатого воздуха в распределительных устройствах, возможные люфты в различных механических соединениях пневматической линии и т.д.

Компенсировать возмущения позволяет использование астатического принципа управления, основным свойством которого является астатизм, действие которого направленно на отработку ступенчатого возмущающего воздействия [17, 18]. При этом астатический закон управления подавляет возмущение до полного исчезновения ошибки регулирования.

Синтез астатического регулятора предполагает расширение фазового пространства путем введения в систему дифференциальных уравнений электропневматической системы оценки возмущающего воздействия. Предположим, что внешнее возмущение имеет характеристику кусочно-постоянной во времени функции: $x_5 = const$. Тогда следуя концепции синергетической теории управления [12–14] введем аддитивно функцию возмущения x_5 во второе уравнение (1) и расширим систему добавлением оценки возмущения:

$$\begin{aligned}
&\frac{dx_1}{dt} = x_2;\\
&\frac{dx_2}{dt} = a_{21}\cdot x_3 - a_{22}\cdot x_4 - a_{23}\cdot x_2 - a_{24} - a_N + x_5;\\
&\frac{dx_3}{dt} = \left[a_{31}\cdot (x_1 + l_{01})^{-1}\cdot U_{1f}\cdot\sqrt{p_{\text{м}}^2 - x_3^2}\right] - \frac{kx_3x_2}{(x_1 + l_{01})};\\
&\frac{dx_4}{dt} = -\left[a_{41}\cdot (a_{42} - x_1)^{-1}\cdot U_{2f}\cdot\left(\frac{x_4}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{2k}}\cdot\sqrt{x_4^2 - p_{\text{А}}^2}\right] + \frac{kx_4x_2}{(a_{42} - x_1)};\\
&\frac{dx_5}{dt} = \beta(x_1 - x_1^*),
\end{aligned} \tag{2}$$

где $\dot{x}_5 = \beta(x_1 - x_1^*)$ – оценка возмущающего воздействия, причем очевидно, что при $x_1 = x_1^*$ $\dot{x}_5 = 0$, что означает подавление возмущения.

Сформулируем закон управления следующим образом: необходимо синтезировать такие управляющие воздействия U_{1f} и U_{2f} , которые позволяли бы достижения точки позиционирования штока x_1 при условии равновесия давлений в камерах наполнения и выхлопа $x_3 = x_4$, при этом обеспечивали независимость результатов оценки от введенного кусочно-постоянного возмущения x_5.

Исходя из этого введем в исследуемую систему следующие инвариантные многообразия, отражающие заданные цели управления с учетом возмущающего фактора:

$$\begin{cases} \psi_1 = x_4 - x_3 = 0 \\ \psi_2 = x_3 - \varphi_1(x_1, x_2) + b_1 x_5 = 0, \end{cases} \tag{3}$$

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

Согласно методу аналитического конструирования агрегированных регуляторов, для асимптотической устойчивости синтезируемого закона управления, введенные инвариантные многообразия должны удовлетворять следующим функциональным уравнениям [13,14]:

$$\begin{cases} \mathrm{T}_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0, \\ \mathrm{T}_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0, \end{cases} \tag{4}$$

где $\mathrm{T}_1 > 0$ и $\mathrm{T}_2 > 0$ постоянные времени, характеризующие динамические свойства исследуемой системы.

Введем инвариантные многообразия (3) в систему дифференциальных уравнений (2), в результате получим декомпозированную систему следующего вида:

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \dfrac{dx_2}{dt} = (a_{21} - a_{22}) \cdot (\varphi_1 - b_1 x_5) - a_{23} \cdot x_2 - a_{24} - a_N - x_5, \\ \dfrac{dx_5}{dt} = \beta(x_1 - x_1^*). \end{cases} \tag{5}$$

Для нахождения внутреннего управления φ_1 введем инвариантное многообразие, отражающее зависимость скорости от желаемого перемещения с учетом возмущения:

$$\psi_3 = x_2 - k(x_1 - x_1^*) + b_2 x_5 = 0, \tag{6}$$

где b_2 и k – параметры синергетического регулятора.

Уравнение (6) удовлетворяет решению функционального уравнения:

$$\mathrm{T}_3 \dot{\psi}_3 + \psi_3 = 0. \tag{7}$$

Подставим (6) в (7) для определения внутреннего управления φ_1:

$$T_3\big((a_{21} - a_{22}) \cdot (\varphi_1 - b_1 x_5) - a_{23} \cdot x_2 - a_{24} - a_N - x_5 - k x_2 + b_2 \beta(x_1 - x_1^*)\big) + \\ + x_2 - k(x_1 - x_1^*) + b_2 x_5 = 0. \tag{8}$$

Таким образом внутренние управление представляет собой следующую зависимость:

$$\varphi_1 = \frac{T_3 \begin{pmatrix} k x_2 + a_{23} x_2 - a_{24} - a_N - x_5 + \\ + b_2 \beta(x_1 - x_1^*) - x_2 + k(x_1 - x_1^*) - b_2 x_5 \end{pmatrix} + b_2 x_5}{T_3(a_{21} - a_{22})}. \tag{9}$$

Значение внешних управляющих воздействий, в виде площадей проходных сечений первого и второго пневмораспределителей выводятся из совместного решения уравнений (9), (3), с учетом функциональных уравнений (4) и математической модели ЭПС (2):

$$U_{1f} = \frac{T_2\left(\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_4 \cdot \beta(x_1 - x_1^*)\right) - x_3 + \lambda_5}{T_2\lambda_3};$$

$$U_{2f} = \frac{T_1\left(U_{1f}\lambda_3 + \lambda_7\right) + x_4 - x_3}{T_1\lambda_6}, \qquad (10)$$

где $x_5 = \beta\int(x_1 - x_1^*)dt$;

$$\lambda_1 = \frac{(-T_3b_2\beta + k)x_2}{T_3(a_{21} - a_{22})};\ \lambda_2 = \frac{(a_{21}x_3 - a_{22}x_4 - a_{23}x_2 - a_{24} - a_N - x_5)}{T_3(a_{21} - a_{22})};$$

$$\lambda_3 = \frac{(a_{31} \cdot \left(\sqrt{p_{\text{м}}^2 - x_3^2}\right) - kx_3x_2}{x_1 + l_{01}};\lambda_4 = -\frac{T_3(a_{21}b_1 - a_{22}b_1 - 1) - b_2}{T_3(a_{21} - a_{22})} + b_1;$$

$$\lambda_5 = \frac{T_3(kx_2 + a_{21}b_1x_5 + a_{24} - a_{22}b_1x_5 - x_5 + a_{23}x_2 + a_N - b_2\beta(x_1 - x_1^*))}{T_3(a_{21} - a_{22}) + b_1x_5};$$

$$\lambda_6 = \frac{a_{41} \cdot \left(\frac{x_4}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{x_4^2 - p_{\text{А}}^2}}{a_{42} - x_1};\ \lambda_7 = \frac{kx_4x_2}{a_{42} - x_1}.$$

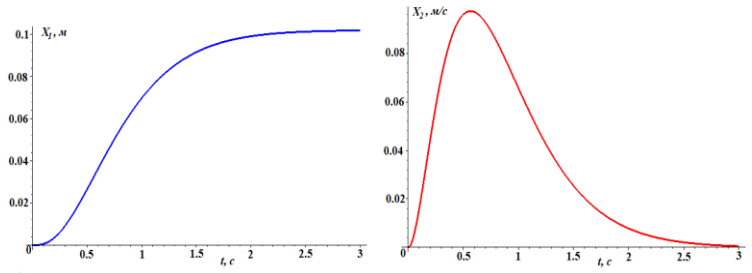
В виду большой размерности электропневматической системы не представляется возможным построить фазовый портрет системы, однако с позиции представления поведения системы в фазовом пространстве можно сделать следующее заключение: время движения, за которое изображающая точка системы попадет в окрестность пересечения инвариантных многообразий ψ_1 и ψ_2 определяется постоянными времени T_1 и T_2. После попадания в окрестность многообразий декомпозированная система неизбежно асимптотически будет смещаться в точку, соответствующую цели управления: $x_1 = x_1^*$, $x_3 = x_4$, за время, значение которого характеризует постоянная времени T_3.

Важно отметить, что достоинством синтезированных нелинейных законов управления является возможность их получения аналитическим путем, с помощью совместного решения введенных макропеременных и функциональных уравнений, гарантирующих их устойчивость. При этом управляющие воздействия обеспечивают асимптотическую устойчивость замкнутой системы при выполнении желаемых целей управления.

Результаты компьютерного моделирования. Полученные аналитическим путем законы астатического управления были смоделированы с использованием пакета Maple методом численного решения дифференциальных уравнений Рунге–Кутта. Начальные условия, а так же параметры электропневматической системы имеют следующие значения: масса поршня M = 0.5 кг; S_1=0.0008 м^2 – площадь бесштоковой поверхности, определяется по диаметру цилиндра d=0,032 м; S_2=0.0006 м^2 – площадь штоковой поверхности; коэффициент вязкого трения $k_{\text{Втр}}$=100; площади проходных сечений пневмораспределителя f_1= f_2 = $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ м^2; начальная и конечная координаты расположения поршня $l_{01} = l_{02} = 0.002$ м; длина хода поршня $L = 0.2$ м; коэффициенты сопротивлений дросселя в полости цилиндра ξ_1=ξ_2=30; значение давления в линии $P_{\text{м}} = 5 \cdot 10^5$ Па; внешнее атмосферное давление; $P_{\text{а}} = 1 \cdot 10^5$ Па.

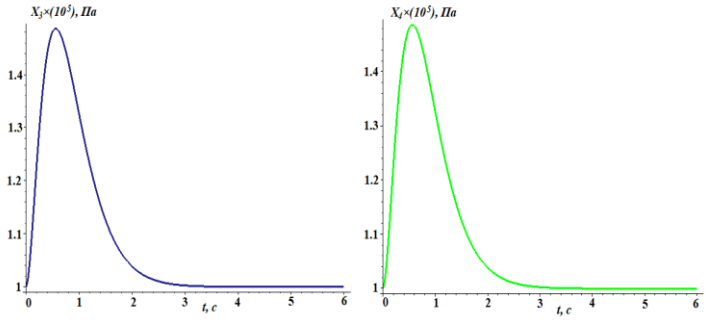
Возмущение в математическую модель вводилось как кусочно-постоянная функция: $x_5 = -1$. Значения инвариантов: $x_1^* = 0{,}1$м; $x_3 = x_4 = 10^5$Па. Параметры регулятора - постоянные времени: $T_1 = T_2 = T_3 = 0{,}3$ с.; коэффициенты: $k = -4$; $\beta = 0{,}1$; $b_1 = 0{,}1$; $b_2 = 1$.

На рис. 1–4 представлены изменения фазовых переменных и управляющих воздействий при применении астатического регулятора.



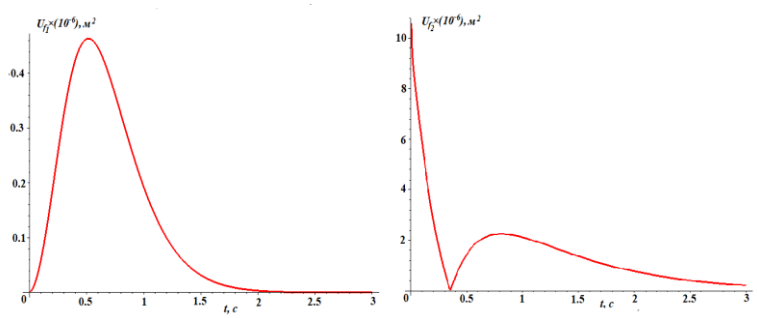
а б

Рис. 1. Графики изменения фазовых переменных электропневматической системы при астатическом управлении: а – перемещения поршня; б – скорости поршня



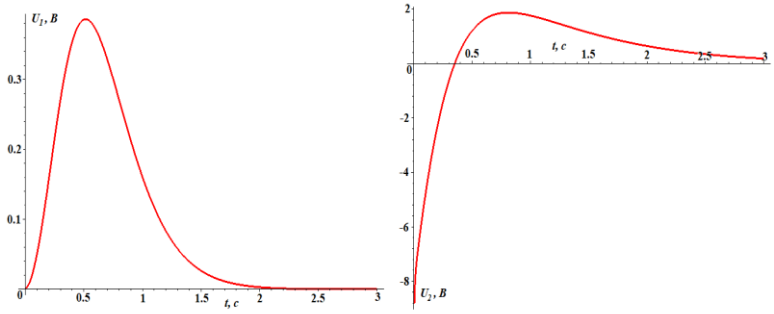
а б

Рис. 2. Графики изменения фазовых переменных электропневматической системы при астатическом управлении: а – давления во впускной камере; б – давления в выхлопной камере



а б

Рис. 3. Графики переходных процессов при астатическом управлении: а – площади поперечного сечения первого пневмораспределителя; б – площади поперечного сечения второго пневмораспределителя



а б

Рис. 4. Графики управляющих воздействий при астатическом управлении: а – по напряжению первого пневмораспределителя; б – по напряжению второго пневмораспределителя

Анализируя математическую модель электропневматической системы (2) и полученные временные характеристики ее фазовых координат, представленных на рис. 1–2, можно сделать вывод, что исследуемая динамическая система является непрерывной автономной диссипативной системой, с сосредоточенными параметрами [19, 20].

Заключение. Представленные графики изменения положения и скорости штока показывают, что электропневматическая система с синтезированным нелинейным астатическим регулятором подавляет введенное кусочно-постоянное возмущение, ошибка регулирования отсутствует. При этом, отметим, что присутствующая в модели естественная пропорциональная зависимость перемещения от интеграла скорости штока позволяет отрабатывать ступенчатые воздействия без ошибок. Следовательно, синтезированная система управления с нелинейным астатическим регулятором будет так же инварианта к линейно-нарастающим возмущающим воздействиям, обеспечивая при этом асимптотическую устойчивость всех фазовых переменных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Meng D., Tao G., Zhu X.* Integrated direct/indirect adaptive robust motion trajectory tracking control of pneumatic cylinders // International Journal of Control. – 2013. –Vol. 86. – P. 1620-1633.
2. *Zhu X., Cao J., Tao G., Yao B.* Synchronization strategy research of pneumatic servo system based on separate control of meter-in and meter-out // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. – 2009. – P. 24-29.
3. *Nazari V., Surgenor B.* Improved position tracking performance of a pneumatic actuator using a fuzzy logic controller with velocity, system lag and friction compensation // International Journal of Control, Automation and Systems. –2016. – Vol. 14, Issue 5. – P. 1376-1388.
4. *Lu C-H., Hwang Y-R.* A model reference robust multiple-surfaces design for tracking control of radial pneumatic motion systems // Nonlinear Dynamics. – 2012. – Vol. 67, Issue 4. – P. 2585-2597.
5. *Falcão Carneiro J., Gomes de Almeida F.* Accurate motion control of a servopneumatic system using integral sliding mode control // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 77, Issue 9–12. – P. 1533-1548.
6. *Хазиев Э.Л., Хазиев М.Л.* Нечеткое управление пневмоприводом подачи фрезерно-расточного станка с применением спецификации xml // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 9-1. – С. 84-88.

7. *Грибков А.М., Шилин Д.В.* Разработка алгоритма управления трехкоординатным пневматическим манипулятором на базе нечеткой логики // Вестник Уфимского гос. авиационного тех. ун-та. – 2012. – Т. 16, № 6 (51). – С. 127-135.
8. *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.
9. *Cai S., Wu S., and Bao G.* Cylinder position servo control based on fuzzy PID // Journal of Applied Mathematics. – 2013. – P. 1-10.
10. *Mu S., Shibata S., Yamamoto T., Goto S., Nakashima S., Tanaka K.* Experimental study on learning of neural network using particle swarm optimization in predictive fuzzy for pneumatic servo system // International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics ISAIR 2018: Cognitive Internet of Things: Frameworks, Tools and Applications. – P. 323-332.
11. *Дьяченко П.А.* Быстродействующая нейросетевая система релейного управления позиционно-следящим пневмоприводом в условиях его существенной неопределенности: дисс.. к-та техн. наук: 05.13.06. – Владивосток: Дальневосточный гос. тех. ун-т, 2010. – 155 с.
12. *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.
13. *Колесников А.А.* Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – 2-е изд.. – М.: Либроком, 2012. – 237 с.
14. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – Ч. II. – 400 с.
15. *Донской А.С.* Математическое моделирование процессов в пневматических приводах: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 122 с.
16. *Попов Д.Н.* Механика гидро- и пневмоприводов: учеб. для вузов. – 2-е изд. стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 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 // III Всероссийская научная конференция "Системный синтез и прикладная синергетика": Сб. научных трудов. Южный федеральный университет, 2017. – С. 50-60.
19. *Веселов Г.Е.* Прикладная теория синергетического синтеза иерархических систем управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 5 (60). – С. 66-76.
20. *Веселов Г.Е.* Теория иерархического управления сложными системами: синергетический подход // III Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика». Южный федеральный университет, 2017. – С. 23-43.

REFERENSES

1. *Meng D., Tao G., Zhu X.* Integrated direct/indirect adaptive robust motion trajectory tracking control of pneumatic cylinders, *International Journal of Control,* 2013, Vol. 86, pp. 1620-1633.
2. *Zhu X., Cao J., Tao G., Yao B.* Synchronization strategy research of pneumatic servo system based on separate control of meter-in and meter-out, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics,* 2009, *pp.* 24-29.
3. *Nazari V., Surgenor B.* Improved position tracking performance of a pneumatic actuator using a fuzzy logic controller with velocity, system lag and friction compensation, *International Journal of Control, Automation and Systems,* 2016, Vol. 14, Issue 5, pp. 1376-1388.
4. *Lu C-H., Hwang Y-R.* A model reference robust multiple-surfaces design for tracking control of radial pneumatic motion systems, *Nonlinear Dynamics,* 2012, Vol. 67, Issue 4, pp. 2585-2597.
5. *Falcão Carneiro J., Gomes de Almeida F.* Accurate motion control of a servopneumatic system using integral sliding mode control, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 2015, Vol. 77, Issue 9–12, pp. 1533-1548.

6. *Khaziev E.L., Khaziev M.L.* Nechetkoe upravlenie pnevmoprivodom podachi frezerno-rastochnogo stanka s primeneniem spetsifikatsii xml [Fuzzy control of the pneumatic feed of a milling and boring machine using the xml specification], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies], 2016, No. 9-1, pp. 84-88.
7. *Gribkov A.M., Shilin D.V.* Razrabotka algoritma upravleniya trekhkoordinatnym pnevmaticheskim manipulyatorom na baze nechetkoy logiki [Development of an algorithm for controlling a three-coordinate pneumatic manipulator based on fuzzy logic], *Vestnik Ufimskogo gos. aviatsionnogo tekh. un-ta* [Bulletin of the Ufa state aviation technical University], 2012, Vol. 16, No. 6 (51), pp. 127-135.
8. *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.
9. *Cai S., Wu S., and Bao G.* Cylinder position servo control based on fuzzy PID, *Journal of Applied Mathematics,* 2013, pp. 1-10.
10. *Mu S., Shibata S., Yamamoto T., Goto S., Nakashima S., Tanaka K.* Experimental study on learning of neural network using particle swarm optimization in predictive fuzzy for pneumatic servo system, *International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics ISAIR 2018: Cognitive Internet of Things: Frameworks, Tools and Applications,* pp. 323-332.
11. *D'yachenko P.A.* Bystrodeystvuyushchaya neyrosetevaya sistema releynogo upravleniya pozitsionno-sledyashchim pnevmoprivodom v usloviyakh ego sushchestvennoy neopredelennosti: diss.. k-ta tekhn. nauk: 05.13.06 [High-speed neural network system for relay control of a position-tracking pneumatic actuator under conditions of significant uncertainty: cand. of eng. sc. diss. 05.13.06]. Vladivostok: Dal'nevostochnyy gos. tekh. un-t, 2010, 155 p.
12. *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.
13. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza [Synergetic methods for managing complex systems: the theory of system synthesis]. 2nd ed. Moscow: Librokom, 2012. – 237 s.
14. Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: Sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya [Modern applied management theory: a Synergetic approach in management theory], ed. by A.A. Kolesnikova. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, Part II, 400 p.
15. *Donskoy A.S.* Matematicheskoe modelirovanie protsessov v pnevmaticheskikh privodakh: ucheb. posobie [Mathematical modeling of the processes in pneumatic actuators: a training manual]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2009, 122 p.
16. *Popov D.N.* Mekhanika gidro- i pnevmoprivodov: ucheb. dlya vuzov [Mechanics of hydraulic and pneumatic drives: textbook for universities]. 2nd ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2002, 320 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* [Computer science and management 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 integrated adaptation], *VIII Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya "Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika": Sb. nauchnykh trudov* [VIII all-Russian scientific conference "System synthesis and applied synergetics": Collection of scientific papers]. Yuzhnyy federal'nyy universitet, 2017, pp. 50-60.
19. *Veselov G.E.* Prikladnaya teoriya sinergeticheskogo sinteza ierarkhicheskikh sistem upravleniya [Applied theory of synergetic synthesis of hierarchical control systems], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 5 (60), pp. 66-76.

20. *Veselov G.E.* Teoriya ierarkhicheskogo upravleniya slozhnymi sistemami: sinergeticheskiy podkhod [Theory of hierarchical management of complex systems: a synergetic approach], *VIII Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya «Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika»* [VIII all-Russian scientific conference "System synthesis and applied synergetics"]. Yuzhnyy federal'nyy universitet, 2017, pp. 23-43.

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, ул. Таганрогская 112в, кв. 106; тел.: 89064146401.

Obukhova Elena Nikolayevna – Don State Technical University; e-mail: elena21@spark-mail.ru; e-mail: elena21@spark-mail.ru; 112v, Taganrogskaya street, Rostov-on-Don. 344016. Russia; phone: +79064146401.