УДК 681.51 DOI: 10.17213/1560-3644-2020-3-27-33

СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ

© 2020 г. *Е.Н. Обухова*

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

SYNERGETIC CONTROL OF ELECTRIC PNEUMATIC CONTROL SYSTEM

E.N. Obukhova

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Обухова Елена Николаевна – ст. преподаватель, кафедра «Автоматизация производственных процессов», Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: elena21@spark-mail.ru

Obukhova Elena N. – Senior Lecturer, Department «Automation of Production Processes», Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia. E-mail: elena21@spark-mail.ru

Поставлена технологическая задача управления положением поршня пневмоцилиндра, которая осуществляется путем синтеза нелинейных синергетических законов управления, основывающихся на методе аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Разработан нелинейный синергетический закон управления противодавлением, который осуществляется путем впуска некоторого количества сжатого воздуха через пневмораспределитель в выхлопную камеру.

Метод управления противодавлением реализуется благодаря согласованному изменению давлений в камерах пневмоцилиндра, это позволяет уменьшить расход поступающего сжатого воздуха в камеру наполнения, за счет чего достигается некоторая энергоэффективность данного метода управления по сравнению, например, с методом дроссельного управления. Достижение поставленных целей управления с помощью полученных в работе нелинейных синергетических законов управления осуществляется путем задания инвариантных многообразий, представляющих собой притягивающие поверхности в фазовом пространстве состояния, к которым устремляются фазовые траектории системы. Проведен сравнительный анализ с наиболее часто используемым в управлении пневмоавтоматикой – методом типовых регуляторов.

Ключевые слова: электропневматическая система; пневмораспределитель; инвариантные многообразия; нелинейный закон управления.

The article poses the technological problem of controlling the position of the piston of a pneumatic cylinder, which is carried out by synthesizing non-linear synergistic control laws based on the method of analytical design of aggregated controllers (AKAR). A nonlinear synergistic law of backpressure control has been developed, which is carried out by the inlet of a certain amount of compressed air through a pneumatic distributor into the exhaust chamber.

The back pressure control method is implemented due to a coordinated change in the pressure in the chambers of the pneumatic cylinder, this allows to reduce the flow of incoming compressed air into the filling chamber, due to which some energy efficiency of this control method is achieved in comparison with, for example, the throttle control method.

The achievement of the set control goals with the help of the nonlinear synergetic control laws obtained in the work is carried out by setting invariant manifolds, which are attractive surfaces in the state phase space to which the phase trajectories of the system rush. A comparative analysis is carried out with the most commonly used control of pneumatic automation - the method of standard regulators.

Keywords: electro-pneumatic system; pneumatic distributor; invariant manifolds; nonlinear control law.

Введение

Технологическая актуальность задачи управления пневматической системой обусловлена сложностью точного и плавного торможения поршня пневмопривода в заданной координате его траектории, поскольку рабочим телом системы является сжатый воздух, обладающий физическим свойством сильной сжимаемости, важную роль играет также существенная нелинейность происходящих в системе термодинамических процессов.

В прошлом веке наиболее используемыми в управлении пневматическими системами были промышленные регуляторы, реализующие типовые линейные законы управления посредством настройки пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора. Линейные законы управления отличались простым алгоритмом функционирования регуляторов, широким спектром их использования для большинства прикладных задач и экономически низкими затратами на реализацию законов управления.

При этом возникали проблемы, связанные со сложностью настройки дифференциальной составляющей регулятора, увеличением полосы пропускания и вследствие этого появлением высокочастотных помех, служивших причиной ошибок в работе системы [1, 2].

В работе [3] достаточно подробно и наглядно проведены исследования синтеза линейных типовых законов регулирования в пневматическом следящем приводе, указаны недостатки разработанного пропорционально-интегрирующего (ПИ) регулятора, которые связаны с появлением перерегулирования и возникновения низкочастотных автоколебаний.

Активное развитие в последние десятилетия микропроцессорной техники привело к усовершенствованию алгоритмов настройки ПИД-регуляторов. На данный момент имеются промышленные регуляторы с автоматической настройкой параметров, использующие адаптивные алгоритмы, нейронные сети, методы нечеткой логики, а также генетические алгоритмы [4].

Появились различные модификации ПИД-регуляторов, например контроллер, осуществляющий задачу следящего управления на основе сетей Петри [5] или регулятор с двумя степенями свободы, обеспечивающий независимость решения двух задач управления [6]. Помимо этого, добавились дополнительные функции контроллера, а именно: функции аварийной сигнализации, контроля разрыва контура регулирования, выхода за границы динамического диапазона [7]. Однако в основном алгоритмы нечеткой логики применяются в системах, которые сложно поддаются формализации и математическому описанию [8].

В данной работе предлагается рассмотреть синтез нелинейных синергетических законов управления положением поршня пневмопривода путем изменения давлений в камерах наполнения и выхлопа. Синтез законов управления осуществляется с помощью метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления [9].

Динамика пневматической системы и математическая модель

На рис. 1 представлен замкнутый контур управления пневматической системой, включающий пневмоцилиндр *4*, электропневматические распределители *3*, программируемый логический контролер *2* и датчик перемещения *1*. Программируемый логический контроллер выдает дискретные команды в виде управляющих напряжений на электропневматические распределители, которые в свою очередь меняют площадь сечения отверстия, управляя при этом входящим и исходящим воздушными потоками.

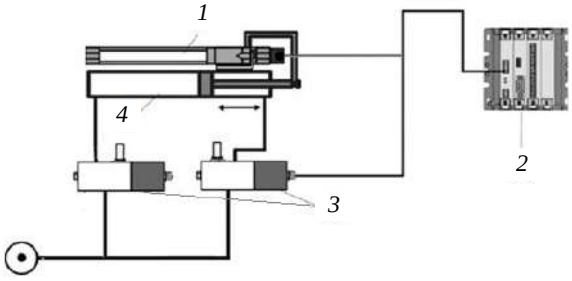

Рис. 1. Замкнутый контур управления пневматической системой / Fig. 1. Closed loop control pneumatic system

Пневмораспределитель (ПР) с электромагнитным пропорциональным управлением преобразует входной электрический сигнал – напряжение U_i на электромагните i-го ПР в площадь проходного сечения отверстия U_f. Таким образом, площади поперечного сечения U_{1f} и U_{2f} ПР связаны с управляющим напряжением следующим соотношением [10]:

$$U_{if} = g \cdot U_i,$$

где g – коэффициент усиления по напряжению, $1{,}2 \cdot 10^{-6}$ м^2/В.

Математическая модель сложной динамической системы, к которой относится электропневматическая система (ЭПС), представляет

взаимосвязи между переменными, 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 [10]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2; \\ \dot{x}_2(t) = a_{21} \cdot x_3 - a_{22} \cdot x_4 - a_{23} \cdot x_2 - a_{24}; \\ \dot{x}_3(t) = \left[a_{31} \cdot (x_1 - l_{01})^{-1} \cdot U_{1f} \cdot \sqrt{p_{\text{м}}^2 - x_3^2} \right] - \dfrac{k x_3 x_2}{(x_1 + l_{01})}; \\ \dot{x}_4(t) = -\left[a_{41} \cdot (a_{42} - x_1)^{-1} \cdot U_{2f} \cdot \left(\dfrac{x_4}{p_{\text{а}}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{x_4^2 - p_{\text{а}}^2} \right] + \dfrac{k x_4 x_2}{(a_{42} - x_1)}. \end{cases} \quad (1)$$

В математическую модель (1) для упрощенного представления и дальнейшего анализа введены следующие коэффициенты:

$$a_{21} = \frac{S_1}{M};\ a_{22} = \frac{S_2}{M};\ a_{23} = \frac{\kappa_{\text{тр}}}{M};\ a_{24} = \frac{P_a (S_1 - S_2)}{M};$$

$$a_{31} = \frac{k \cdot \sqrt{RT_M}}{S_1 \cdot \sqrt{\xi}};\ a_{41} = \frac{k \cdot \sqrt{RT_M}}{S_2 \cdot \sqrt{\xi}};\ a_{42} = (L + l_{02}).$$

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); $\kappa_{\text{тр}}$ – коэффициент вязкого трения (100 Н·с/м); T_M – 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 магистрали ($5 \cdot 10^5$ Па); $p_{\text{а}}$ – атмосферное давление ($1 \cdot 10^5$ Па).

Постановка задачи управления и способы ее реализации

Одним из первоначальных этапов синтеза 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 ЭПС описывается уравнениями динамики движения поршня и уравнениями термодинамического равновесия, то необходимо задать технологические и термодинамические инварианты, которые будут являться конечной целью состояния системы.

Согласно задаче управления, пневмоприводы делятся на позиционные и следящие, таким образом конечной целью управления – технологическими инвариантами могут являться: позиционирование координаты поршня l в заданное положение, а также изменение скорости движения поршня V по заданному временному закону.

Термодинамические инварианты должны отражать «внутреннее» равновесие сил системы, которое будет обеспечивать выполнение конечной – технологической задачи управления. Подобными силами в исследуемой системе являются: давление сжатого воздуха в камере наполнения p_1, которое по сути является «рабочим» давлением, влияющим на перемещение поршня, а также давление в камере выхлопа p_2, изменение которого влияет на торможение поршня, а следовательно, на скорость его движения. Таким образом, прослеживается системная модель управления, в которой равновесие переменных состояния системы будет соответствовать определенным целям управления.

Согласно методу АКАР, количество задаваемых целевых функций должно соответствовать количеству управляющих каналов. Управление в электропневматической системе происходит по двум каналам:

– управление U_{1f} приходящим массовым расходом воздуха, формирующим давление p_1 в камере наполнения, осуществляется путем изменения площади сечения f_1 клапана ПР1;

– управление U_{2f} покидающего камеру выхлопа – массовым расходом воздуха, который физически отражается в виде давления p_2, осуществляется путем изменения площади сечения f_2 клапана ПР2.

В ЭПС создаваемое давление p_1 в камере наполнения отвечает за страгивание и дальнейшее движение поршня, а рост давления p_2 в камере выхлопа осуществляет торможение поршня. В управлении противодавлением торможение поршня происходит с помощью увеличения давления p_2 путем нагнетания воздушного потока в выхлопной камере пневмоцилиндра, которое осуществляется с помощью присоединения пневмораспределителя к источнику с повышенным давлением.

Таким образом, задача управления состоит в том, чтобы синтезировать такие управляющие воздействия U_{1f} и U_{2f}, обеспечивающие определенные соотношения давлений p_1 и p_2, при которых поршень пневмоцилиндра совершает плавную остановку в заданном положении l.

В ходе перемещения штока происходит выравнивание давлений. Можно отразить это выравнивание соответствующим инвариантным многообразием в ходе процедуры синергетического синтеза. Однако при полной остановке привода давление во впускной и выпускной камерах будет незначительно отличаться, так как $S_1 \neq S_2$.

Согласно сформулированной технологической задаче позиционирования штока пневмоцилиндра на требуемом положении, введем первый инвариант, соответствующий цели управления:

$$x_1 = x_1^*, \tag{2}$$

где x_1 – текущее положение штока, а x_1^* – требуемое значение.

Вторым инвариантом системы будем считать условие:

$$x_4 = x_3, \tag{3}$$

при котором давления во впускной и выпускной камерах равны друг другу.

Синтез нелинейных синергетических законов управления противодавлением

На первом этапе синтеза можно учесть инвариант (3) во вводимой совокупности инвариантных многообразий:

$$\psi_1 = x_4 - x_3 = 0,\ \psi_2 = x_3 - \varphi_1(x_1, x_2) = 0. \tag{4}$$

При этом совокупность многообразий (4) должна удовлетворять решению системы функциональных уравнений:

$$\begin{cases} T_1\dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0, \\ T_2\dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0. \end{cases} \tag{5}$$

При попадании изображающей точки системы в окрестность пересечения многообразий (4) в замкнутой системе произойдёт динамическая декомпозиция [10] и поведение системы будет описываться редуцированной системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2; \\ \dot{x}_2(t) = (a_{21} - a_{22}) \cdot \varphi_1(x_1, x_2) - a_{23} \cdot x_2 - a_{24}, \end{cases} \tag{6}$$

где $\varphi_1(x_1, x_2)$ – так называемое внутреннее управление декомпозированной системы.

Для нахождения внутреннего управления φ_1 вводится многообразие, структура которого соответствует инварианту (2):

$$\psi_3 = x_2 - k \cdot (x_1 - x_1^*) = 0. \tag{7}$$

Для асимптотически устойчивого движения системы на аттракторе к цели управления $x_1 = x_1^*$ инвариантное многообразие (7) должно удовлетворять решению функционального уравнения:

$$T_3\dot{\psi}_3(t) + \psi_3 = 0. \tag{8}$$

Решение функционального уравнения (8) с учётом инвариантного многообразия (7) и модели декомпозированной системы (6) определяет структуру внутреннего управления:

$$\varphi_1 = \frac{T_3(a_{23}x_2 + a_{24} + kx_2) - x_2 + k(x_1 - x_1^*)}{T_3(a_{21} - a_{22})}. \tag{9}$$

Выражения управляющих воздействий U_{1f} и U_{2f} определяются из совместного решения (4) и (5) с учётом найденного внутреннего управления (9) и математической модели объекта (1). Таким образом, закон управления площадью проходного сечения клапана на ПР1 и ПР2 имеет вид:

$$\begin{aligned} U_{1f} &= \frac{T_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4) - x_3 + \lambda_5}{T_2\lambda_3}, \\ U_{2f} &= \frac{T_1(\lambda_3 U_1 + \lambda_4 + \lambda_7) - x_4 + x_3}{-T_1\lambda_6}, \end{aligned} \tag{10}$$

где

$$\lambda_1 = -\frac{kx_2}{T_3(a_{22} + a_{21})};$$

$$\lambda_2 = \frac{(T_3k + T_3a_{23} - 1)(a_{21}x_3 - a_{22}x_4 - a_{23}x_2 - a_{24})}{T_3(a_{22} + a_{21})};$$

$$\lambda_3 = \frac{a_{31}\sqrt{p_{\text{м}}^2 - x_3^2}}{x_1 + l_{01}};\quad \lambda_4 = \frac{kx_3x_2}{(x_1 + l_{01})};$$

$$\lambda_5 = \frac{T_3(kx_2 + a_{23}x_2 + a_{24}) + k(x_1 - x_1^*) - x_2}{T_3(a_{21} - a_{22})};$$

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

Моделирование синергетической системы управления

На рис. 2 и 3 представлены результаты моделирования системы с полученными нелинейными законами управления (10). При моделировании были заданы следующие начальные условия системы: $x_1 = 0$ м; $x_2 = 0$ м/с; $x_3 = x_4 = 10^5$ Па и желаемые значения перемещения поршня x_1^*=0,1 м, давления в выхлопной камере $x_4 = x_3 = 10^5$ Па. Значения параметров регулятора: T_1=T_2=T_3=0,001 с, $k = -1$.

Положение штока x_1 достигает желаемого значения перемещения за время, равное 4 с (рис. 2 *а*), что свидетельствует об адекватности синтезированного закона управления, а также его асимптотической устойчивости. График изменения скорости штока x_2 пневмоцилиндра показывает, что скорость, возрастая до максимума в начале движения пневмоцилиндра, уменьшается, принимая нулевое значение при достижении заданного перемещения. Давление в камере наполнения x_3 в конце цикла движения совпадает с давлением в выхлопной камере x_4 (рис. 2 *б*), что и было задано при формировании инварианта (3).

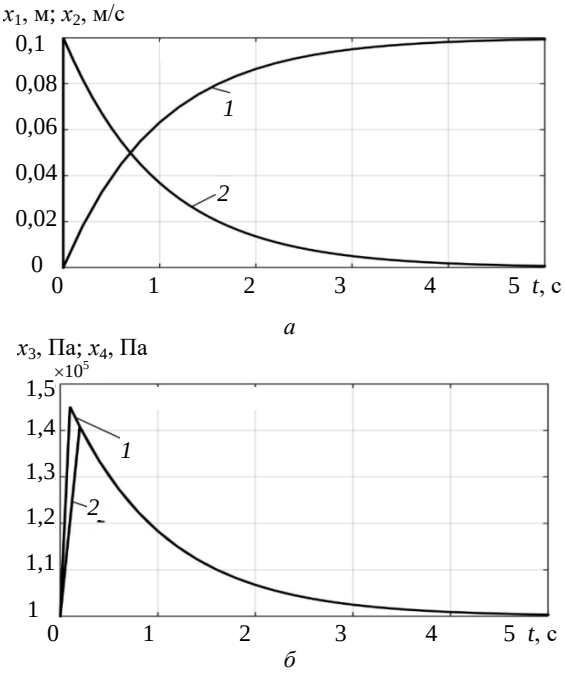

Рис. 2. Графики изменения фазовых переменных при согласованном управлении: *а* – перемещения поршня x_1 (*1*), скорости поршня x_2 (*2*); *б* – изменение давления в камере наполнения x_3 (*1*), изменение давления в выхлопной камере x_4 (*2*) / Fig. 2. Graphs of the change in the phase variables with coordinated control: *a* – piston movement x_1 (*1*), piston speed x_2 (*2*); *б* – pressure change in the intake chamber x_3 (*1*), pressure change in the exhaust chamber x_4 (*2*)

Переходные процессы, представленные на рис. 3, показывают, что при управлении противодавлением площадь открытия клапана, впускающего поток сжатого воздуха U_{1f} (рис. 3 *а*) больше, это приводит к росту рабочего давления x_3 (рис. 2 *б*). При этом, за счет плавного уменьшения площади поперечного сечения выхлопного клапана U_{2f}, куда подается воздух с избыточным давлением, стабилизируются давления в камерах наполнения x_3 и выхлопа x_4 до значения атмосферы.

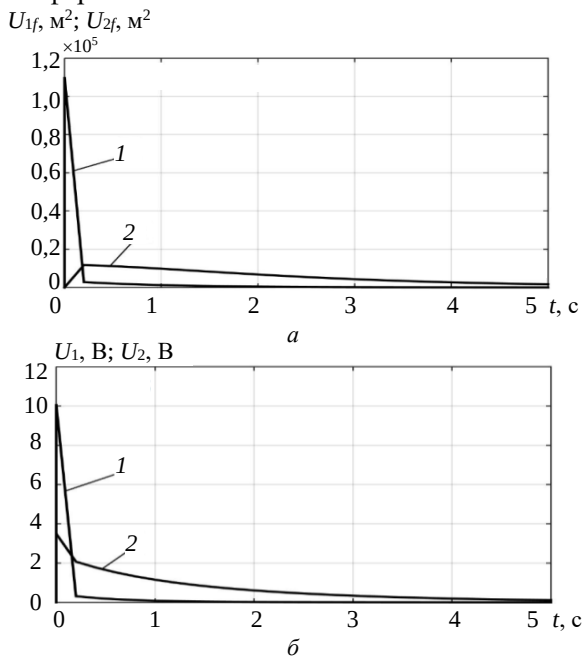

Рис. 3. Графики переходных процессов при согласованном управлении: *а* – площадь сечения клапана на ПР1 U_{1f} (*1*), площадь сечения клапана на ПР2 U_{2f} (*2*); *б* – напряжение на ПР1 U_1 (*1*), напряжение на ПР2 U_2 (*2*) / Fig. 3. Transient schedules with coordinated management: *a* – the cross-sectional area of the valve on PV1 U_{1f} (*1*), the cross-sectional area of the valve on PV1 U_{2f} (*2*); *б* – voltage on PV1 U_1 (*1*), voltage on PV2 U_2 (*2*)

Значение управляющего напряжения U_1, равное 10 В (рис. 3 *б*), соответствует полному открытию порта ПР1 (рис. 3 *а*) и соединению его с магистралью питания сжатым воздухом, происходит это за доли секунды, далее порт полностью закрывается. Положительное значение напряжения U_2 (рис. 3 *а*) соответствует соединению порта ПР2 с источником повышенного давления, которым может выступать как источник питания, так и специальное пневматическое устройство. В этом случае камера выхлопа наполняется сжатым газом до некоторого предела. Данное управление противодавлением часто используется в пневмоавтоматике, это связано с возможностью плавного перемещения штока в реальных экспериментальных условиях.

Сравнительный анализ синергетических законов управления с классическими методами управления на основе типовых регуляторов

Проведем сравнительный анализ полученных (10) нелинейных синергетических законов управления с наиболее широко используемыми в пневмоавтоматике типовыми линейными трехпараметрическими ПИД-регуляторами. Передаточная функция ПИД-регулятора, с учетом реализуемой дифференциальной составляющей, имеет следующий вид:

$$W(p) = k_{\text{р}} + \frac{1}{T_{\text{И}} \cdot p} + \frac{T_{\text{Д}} \cdot p}{T_{\text{Р}} \cdot p + 1},$$

где $k_{\text{р}}$, $T_{\text{И}}$, $T_{\text{Д}}$, $T_{\text{Р}}$ – параметры настойки ПИД регулятора, причем $T_{\text{Р}} \ll T_{\text{И}}$ и $T_{\text{Р}} \ll T_{\text{Д}}$. Коэффициент усиления пропорционального (П) регулятора $k_{\text{р}}$ = 0,00003, а также параметры ПИД-регулятора $k_{\text{р}}$ = 1,5; $T_{\text{И}}$ = 1 с; $T_{\text{Д}}$ = 0,3 с были получены на основе анализа ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой линейной системы.

Переходные процессы перемещения и скорости штока с применением П- и ПИД-регуляторов, а также нелинейного закона управления, полученного методом АКАР, представлены на рис. 4.

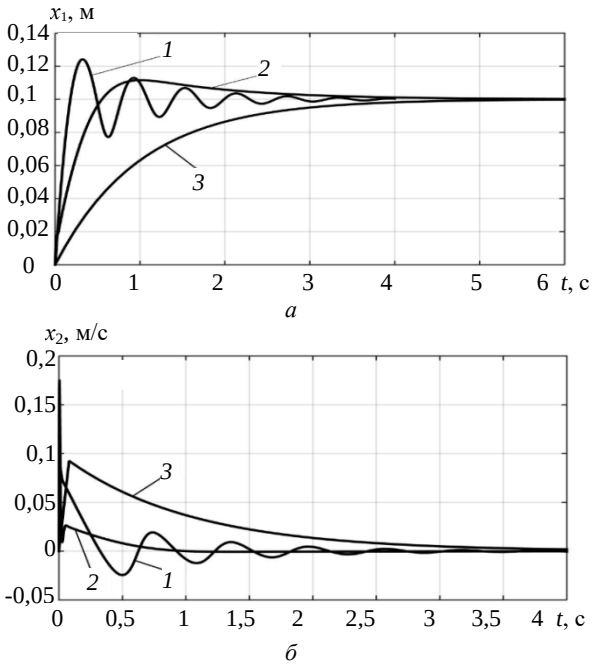

Рис. 4. Графики переходных процессов: *1* – П-регулятора; *2* – ПИД регулятора; *3* – синергетический регулятор: *а* – перемещения штока; *б* – скорости штока
/ Fig. 4. Transient graphs *1* – P regulator; *2* – PID controller; *3* – synergistic regulator: *a* – rod movement; *б* – rod speed

Использование П-регулятора в нелинейной модели дает колебательный затухающий за 2,0 – 2,5 с переходный процесс, при применении ПИД-регулятора процесс имеет перерегулирование, равное 11,5 %, при этом синергетический регулятор позволяет плавно без перерегулирования перемещать шток привода в заданное положение.

Результаты управления с применением линейных типовых законов управления существенно отличаются от результатов синергетического управления методом АКАР, что естественно будет отражаться при реальном внедрении управления в технологический процесс.

Выводы

Достижение поставленных целей управления с помощью полученных в работе нелинейных синергетических законов управления осуществляется за счет задания инвариантных многообразий, представляющих собой притягивающие поверхности в фазовом пространстве состояния, к которым устремляются фазовые траектории системы. При этом устойчивость фазового движения системы к инвариантным многообразиям обеспечивается введением функциональных уравнений. За счет использования естественных притягивающих свойств задаваемых аттракторов достигается робастность управления исследуемой системы, которая выражается в неизменяемости переходных характеристик переменных состояния при небольших отклонениях фазовых траекторий – изменениях параметров системы.

Литература

1. *Пьявченко Т.А.* Регулятор без дифференциальной составляющей для управления сложными промышленными объектами // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2012. № 2 (127). С. 135 – 141.
2. *Востриков А.С.* Проблема синтеза регуляторов для систем автоматики: состояние и перспективы // Автометрия. 2010. Т. 46. № 2. С. 3 – 19.
3. *Харченко А.Н.* Повышение точности и быстродействия промышленных мехатронных электропневматических следящих приводов на основе аппаратной и программной интеграции мехатронных компонентов: дис. … канд. техн. наук. М., 2010.
4. *Tan K.K., Putra A.S.* Drives and control for industrial automation. Part of the advances in industrial control: Servo hydraulic and pneumatic drive. P.: Springer London. 2011. 386 p.
5. *Vázquez C.R., Gómez-Castellanos J.A., Ramírez-Treviño A.* Petri Nets Tracking Control for Electro-pneumatic Systems Automation // Informatics in Control, Automation and Robotics. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Cham 2018. Vol. 613. Pp. 503 – 525.

6. *Jamian S., Salim S.N.S., Junoh S.C.K., Kamarudin M.N., Abdullah L.* Nonlinear Proportional Integral (NPI) Double Hyperbolic Controller for Pneumatic Actuator System // Advances in Electronics Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Singapore. 2020. Vol. 619. Pp. 221 – 229.
7. *Yin Y.* High Speed Pneumatic Theory and Technology. Control System and Energy System. P.: Springer Singapore, 2020. 386 p.
8. *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.
9. *Колесников А.А.* Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. 2-е. изд. М.: Либроком, 2012. 237 с.
10. *Попов Д.Н.* Механика гидро- и пневмоприводов: учебник для вузов. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 320 с.

References

1. Piavchenko T.A. *Regulator without a differential component for managing complex industrial objects* // Izvestiya SFedU. engineering sciences. 2012. No. 2 (127). Pp. 135 – 141.
2. Vostrikov A.S. *The problem of synthesis of controllers for automation systems: state and prospects* // Avtometriya. 2010. Vol. 46. No. 2. Pp. 3 – 19.
3. Kharchenko A.N. *Improving the accuracy and speed of industrial mechatronic electro-pneumatic servo drives on the basis of hardware and software integration of mechatronic components*: diss ... to-that tech. Sciences: 05.02.05 Moscow state. technologist. un-t. Moscow, 2010.
4. Tan K.K., Putra A.S. *Drives and control for industrial automation*. Part of the advances in industrial control: Servo hydraulic and pneumatic drive. P.: Springer London. 2011. 386 p.
5. Vázquez C.R., Gómez-Castellanos J.A., Ramírez-Treviño A. *Petri Nets Tracking Control for Electro-pneumatic Systems Automation* // Informatics in Control, Automation and Robotics. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Cham. 2018. Vol. 613. P. 503 – 525.
6. Jamian S., Salim S.N.S., Junoh S.C.K., Kamarudin M.N., Abdullah L. *Nonlinear Proportional Integral (NPI) Double Hyperbolic Controller for Pneumatic Actuator System* // Advances in Electronics Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Singapore. 2020. Vol. 619. Pp. 221 – 229.
7. Yin Y. *High Speed Pneumatic Theory and Technology*. Control System and Energy System. P.: Springer Singapore. 2020. 386 p.
8. Ren H., Fan J. *Adaptive backstepping slide mode control of pneumatic position servo system* // Chinese journal of mechanical engineering. Vol. 29. 2016. Pp. 1003 – 1009.
9. Kolesnikov A.A. *Synergetic methods for managing complex systems: the theory of system synthesis*. Ed. 2nd. M.: Librokom, 2012. 237 p.
10. Popov D.N. *Mechanics of hydraulic and pneumatic drives*: Textbook. For universities. 2nd ed. stereotype. M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2002. 320 p.

Поступила в редакцию / Received ***11 июля 2020 г. / July 11, 2020***