

Синергетический синтез нелинейных регуляторов для задачи позиционирования пневмопривода

Е.Н. Обухова¹, А.Н. Попов²

¹Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

²Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: Сложность организации управления пневмоприводом вносит нелинейный математический аппарат, учитывающий термодинамические процессы при наполнении и сливе рабочих полостей пневмоцилиндра. Обзор существующих подходов и методов управления пневматическими системами позволяет сделать выводы о линеаризации нелинейных зависимостей, снижение порядка системы уравнений и таким образом значительном упрощении математической модели исследуемой системы, что приводит к несоответствию математической модели ее техническому оригиналу и ограниченном применении разработанных законов управления.

Целью данной работы является синтез законов управления положением поршня пневмоцилиндра с использованием синергетического метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), который учитывает нелинейную динамику рассматриваемой системы.

Процедура синтеза синергетического управления основывается на введении последовательности инвариантных многообразий, исходя из технологической задачи позиционирования штока пневмоцилиндра на требуемом положении, и последующей поэтапной динамической декомпозиции исходной динамической системы. В результате синтезированный нелинейный двухканальный регулятор осуществляет перемещение штока пневмопривода на заданное положение при одновременной стабилизации давления в камере слива. Моделирование системы с регулятором в среде MatLab показало, что полученный в аналитической форме закон управления осуществляет перемещение штока пневмопривода на заданное положение при одновременной стабилизации давления в камере слива.

Ключевые слова: пневмопривод, нелинейная математическая модель, синергетический синтез регулятора, инвариантное многообразие.

Введение

Пневмоэлектрические системы являются важными функциональными элементами большого числа технологических процессов различных отраслей современного производства и широко используются в пищевой, упаковочной отраслях, в станкостроении, робототехнике, металлургии и тяжелой индустрии.

Сравнительный анализ эффективности внедрения в производство пневматического привода с другими типами приводов позволяет выделить ряд преимуществ, благодаря которым пневматика так широко

распространена - это простота конструкции и технического обслуживания; нечувствительность к перегрузкам; доступность воздуха, используемого в качестве рабочего тела; экологическая чистота; высокая скорость перемещения.

Современные тенденции развития технологических систем, связанные с ростом их производительности и качества выпускаемых изделий, требуют от исполнительных электропневматических приводов всё более высокого быстродействия без перерегулирования и точности движений при безударном торможении в конце рабочего хода и без потерь сжатого воздуха в неподвижном состоянии.

Электропневматические системы, по способу математического описания являются нелинейными, из-за влияния сжимаемости воздуха, что вызывает колебательные процессы и значительно затрудняет управление ими.

Эффективное выполнение пневмосистемой ее технологической задачи требует синтеза соответствующего управления. На данный момент известны исследования многих ученых, проводимые в русле совершенствования законов управления пневмоприводом.

Использование классических законов управления, основанных на применении типовых регуляторов позволяют контролировать перерегулирование, колебание, время переходного процесса, а также установившиеся ошибки [1-5].

В работе [6] предложен адаптивный квазиоптимальный закон управления, улучшающий точность позиционирования и быстродействие пневмопривода.

В работах [7] пневмопривод рассматривается как адаптивная система с переменной структурой, в которой реализуется скользящий режим перехода от движения, соответствующего одной линейной структуре, к движению, соответствующему другой линейной структуре.

Помимо этого, были разработаны методы управления скоростью пневмопривода с использованием аппарата нечеткой логики [8,9].

Таким образом, исследования в области регулирования пневмосистем являются на данный момент весьма актуальными, при этом используются методы и подходы как классической теории управления, так и аппарата современной теории управления нелинейными системами [10].

В большинстве приведенных работ, вводят допущения, облегчающие моделирование, либо пренебрегают учетом нелинейных свойств системы, что обусловлено сложностью формализации термодинамических процессов, связанных со значительной сжимаемостью воздуха и нелинейной динамикой пневмосистемы, модель которой с трудом поддается линейной аппроксимации. Однако применение линейных законов управления не дают достаточно эффективного и точного управления пневмоприводом.

В данной работе рассматривается синтез законов управления с использованием синергетического метода АКАР, который учитывает нелинейную динамику пневмоцилиндра.

Математическая модель

В основе синергетического управления сложными системами лежит переход от непрогнозируемого поведения системы к целенаправленному движению изображающих точек системы в желаемое состояние, соответствующее целям управления. Эти цели управления в синергетической теории управления принято называть инвариантами системы [11].

Метод, позволяющий синтезировать систему управления путем перевода изображающей точки системы в область инвариантных многообразий, а затем и на желаемый аттрактор, называется методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [10-12].

Математическая модель пневмосистемы представляет собой следующую систему дифференциальных уравнений [4-7]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{M} \cdot (S_1(x_3 - P_a) - S_2(x_4 - P_a) - k_{\text{втр}} \cdot x_2 - N); \\ \frac{dx_3}{dt} = K_1^* \cdot \frac{u_1}{S_1(x_1 + l_{01})} \cdot \sqrt{(p_M^2 - x_3^2)} - \frac{k \cdot x_3}{(x_1 + l_{01})} \cdot x_2; \\ \frac{dx_4}{dt} = -K_2^* \cdot \frac{u_2}{S_2(L - x_1 + l_{02})} \cdot \left(\frac{x_4}{p_M}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{(x_4^2 - p_A^2)} + \frac{kx_4}{(L - x_1 + l_{02})} \cdot x_2. \end{cases} \quad (1)$$

где 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_M – 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_M – уровень давления на входе магистрали; p_a – атмосферное давление.

Управлениями u_1 и u_2 являются площади проходных сечений пневмораспределителя f_1 и f_2 в первой и второй камере пневмоцилиндра, которые находятся в правых частях математической модели (1).

Для более компактной записи системы уравнений введены следующие коэффициенты обозначения термодинамических констант: $K_1^* = (k\sqrt{RT_m})/\sqrt{\xi_1}$;
 $K_2^* = (k\sqrt{RT_m})/\sqrt{\xi_2}$.

Поскольку все переменные состояния объекта, такие как перемещение и скорость штока, давления в камерах наполнения и слива изменяются при подаче входных воздействий и доступны измерению с помощью соответствующих датчиков, то можно судить о полной управляемости и наблюдаемости объекта.

1. Процедура синергетического синтеза с отдельным управлением давлением в камерах наполнения

Рассмотрим случай двухканального управления положением поршня пневмопривода x_1 , путем изменения давления в полостях x_3 и x_4 .

С позиции синергетической теории управления это означает, что необходимо синтезировать такой вектор управляющих воздействий $u_1(x_1, x_2, x_3, x_4)$, и $u_2(x_1, x_2, x_3, x_4)$ – представляющий собой функцию фазовых координат, который переводил бы изображающую точку системы из начального состояния, находящуюся в области допустимых значений, в требуемое конечное состояние, при условии соблюдения требуемых критериев качества.

Исходя из технологической задачи 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:

$$x_4 = x_4^*, \quad (3)$$

соответствующее задаче стабилизации давления в камере слива.

Исходя из того, что управляющее воздействие $u_1(x_n)$, влияет на динамику изменения давления x_3 , а управляющее воздействие $u_2(x_n)$ – на динамику изменения давления x_4 , то целесообразно ввести следующую совокупность инвариантных многообразий:

$$\begin{cases} \psi_1 = x_4 - x_4^* = 0 \\ \psi_2 = x_3 - \varphi_1(x_1, x_2) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Во второе многообразие входит некоторая функция $\varphi_1(x_1, x_2)$, которая определяет желаемый характер изменения давления x_3 на пересечении инвариантных многообразий $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$. Функция $\varphi_1(x_1, x_2)$, определяется в ходе процедуры синтеза законов управления, исходя из условий выполнения инварианта (2).

Согласно методу АКАР, макропеременные ψ_1 и ψ_2 должны удовлетворять решению системы основных функциональных уравнений:

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

где $T_1 > 0$ и $T_2 > 0$ обеспечивают условия асимптотической устойчивости движения системы.

При попадании изображающей точки системы на пересечение многообразий $\psi_1 = \psi_2 = 0$ происходит точная динамическая декомпозиция системы (1) и динамика замкнутой системы описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2^* \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{M} \cdot (S_1(\varphi_1(x_1, x_2)) - P_a) - S_2(x_2^* - P_a) - k_{втр} \cdot x_2 - N. \end{cases} \quad (6)$$

Функцию $\varphi_1(x_1, x_2)$, в декомпозированной системе (6) можно рассматривать как «внутреннее» управление.

На втором этапе синтеза для поиска этого управления и, следовательно, определения функции $\varphi_1(x_1, x_2)$, вводится дополнительное инвариантное многообразие, которое должно обеспечить устойчивость замкнутой системы и выполнение технологического инварианта (2).

Введем многообразие:

$$\psi_3 = x_2 - k(x_1 - x_1^*) = 0. \quad (7)$$

Динамика системы на этом многообразии описывается следующим уравнением:

$$\frac{dx_1}{dt} = k(x_1 - x_1^*), \quad (8)$$

условием устойчивости, которого относительно $x_1 = x_1^*$, является неравенство $k < 0$.

Для того, чтобы выполнялось условие $\psi_3 = 0$ макропеременная ψ_3 должна удовлетворять решению функционального уравнения:

$$T_3 \dot{\psi}_3 + \psi_3 = 0, \quad (9)$$

где $T_3 > 0$ условие асимптотической устойчивости движения изображающей точки системы к инвариантному многообразию.

Подставим (7) в (9) для определения внутреннего управления φ_1 :

$$T_3(\dot{x}_2 - k\dot{x}_1) + x_2 - k(x_1 - x_1^*) = 0. \quad (10)$$

Далее в уравнение (10) подставляются уравнения декомпозированной системы (6) в результате чего получается выражение:

$$T_3 \left(\frac{1}{M} \cdot (S_1(\varphi_1 - P_a) - S_2(x_4^* - P_a) - k_{втр} \cdot x_2 - N) - kx_2 \right) + x_2 - k(x_1 - x_1^*) = 0. \quad (11)$$

Выразим внутреннее управление φ_1 из выражения (11):

$$\varphi_1 = \frac{1}{S_1} \left[S_2(x_4^* - P_a) + N + \left(\frac{kM - M}{T_3} + k_{втр} \right) \cdot x_2 + \frac{kM}{T_3} (x_1 - x_1^*) \right] + P_a. \quad (12)$$

Искомый закон управления находится как решение системы уравнений (5) и имеет следующий вид:

$$u_1 = \left\{ - \left[x_3 - \frac{1}{S_1} [S_2(x_4^* - P_a) - N + \left(\frac{kM}{T_3} - \frac{M}{T_3} + k_{втр} \right) \cdot x_2 + \frac{1}{S_1} \frac{kM}{T_3} (x_1 - x_1^*)] + P_a \right] + \frac{T_2 \cdot k \cdot x_3 x_2}{(x_1 + l_{01})} + \frac{T_2}{S_1} \left(\frac{kM - M}{T_3} + k_{втр} \right) \cdot \frac{1}{M} (S_1(x_3 - P_a) - S_2(x_4 - P_a) - k_{втр} \cdot x_2 - N) - \frac{T_2 \cdot k \cdot M \cdot x_2}{S_1 T_3} \right\} \cdot \frac{S_1(x_1 + l_{01})}{T_2 \cdot K_1^* \cdot \sqrt{(p_m^2 - x_3^2)}}. \quad (13)$$

$$u_2 = - \frac{S_2(x_4(x_1 - L - l_{02} - T_1 k x_2) + x_4^*(L - x_1 + l_{02}))}{T_1 K_2^* (x_4 / P_m)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{(x_4^2 - p_A^2)}}$$

Для анализа поведения замкнутой системы, с учетом полученного в аналитической форме закона управления, было проведено компьютерное моделирование системы. При моделировании использовались параметры пневмоцилиндра компании Samozzi серии QCT2A032A200, имеющего характеристики представленные в таблице 1.

Таблица №1.

Параметры моделируемой пневмосистемы

Параметр	Значение	Параметр	Значение
----------	----------	----------	----------

M	0,5 кг	k	1,4
S_1	0,008 м ²	R	287 (Дж/(кг · К))
S_2	0,006 м ²	T_m	293 К
$k_{втр}$	1000	P_a	100000 Па
L	0,2 м	P_m	500000 Па
$l_{01} = l_{02}$	0,002 м	$\xi_1 = \xi_2$	30

На рис. 1-3 представлены результаты моделирования системы с законами управления (13) в среде пакета Maple, с начальными условиями системы: $x = [0, 0, 100000, 100000]$ и заданными значениями перемещения $x_1^* = 0,1$ м и давления в выпускной камере $x_4^* = 120$ кПа.

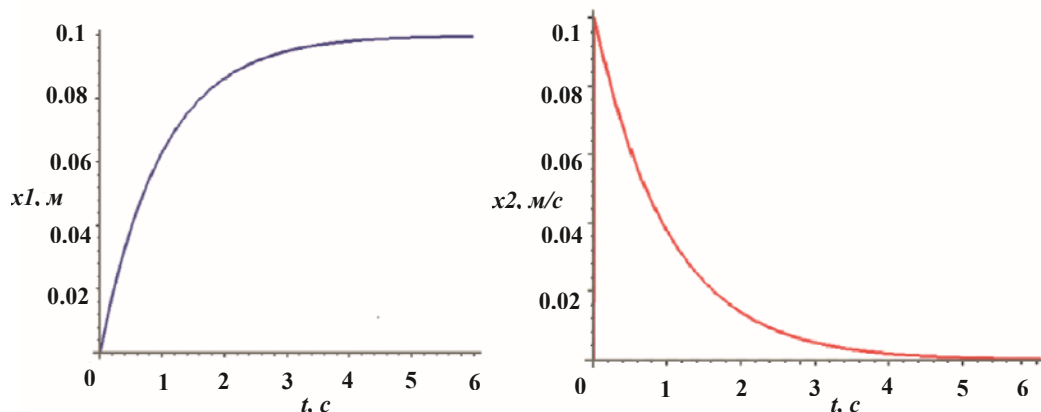
а)

б)

Рис. 1. – Переходные процессы:

а) по перемещению штока в $x_1^* = 0,1$ м; б) по скорости x_2 .

По графикам переходных процессов, представленным на рис. 1, видно,



что положение штока достигает заданного значения инварианты (2) за время равное 6 секунд (рис. 1а), что свидетельствует от адекватности синтезированного закона управления.

График изменения скорости штока пневмоцилиндра (рис. 1б) показывает, что скорость, возрастая до максимума в начале движения цилиндра, уменьшается, принимая нулевого значения при достижении заданного перемещения.

Графики изменения давлений во впускной и выпускной камерах показаны на рис. 2. Из них видно, давление x_3 в конце цикла движения несколько меньше x_4 , что объясняется меньшим объемом впускной камеры из-за наличия в ней штока.

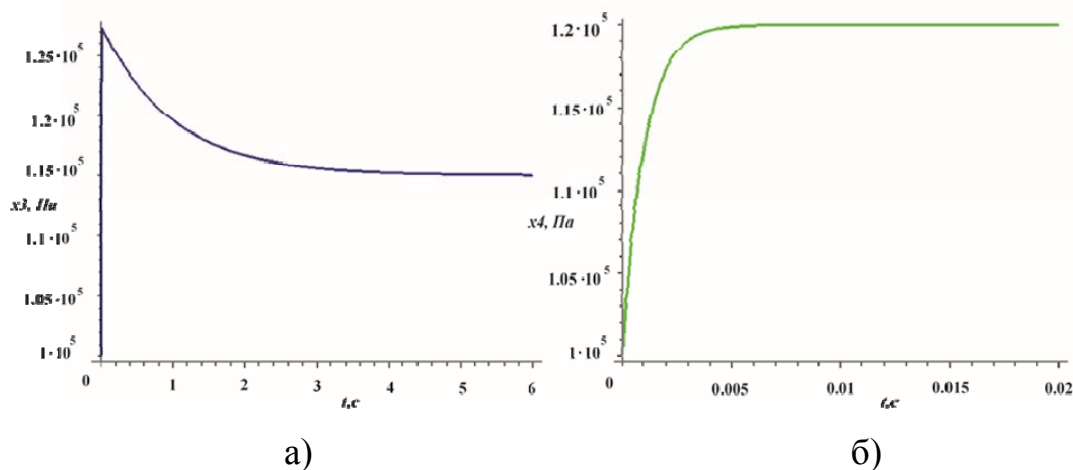


Рис. 2. – Переходные процессы:

а) по переменной x_3 ; б) по переменной x_4 .

Синтезированные методом АКАР изменения управляющих воздействий во времени (13), представляющие собой площади поперечного сечения клапанов пневмораспределителя, представлены на рис. 3.

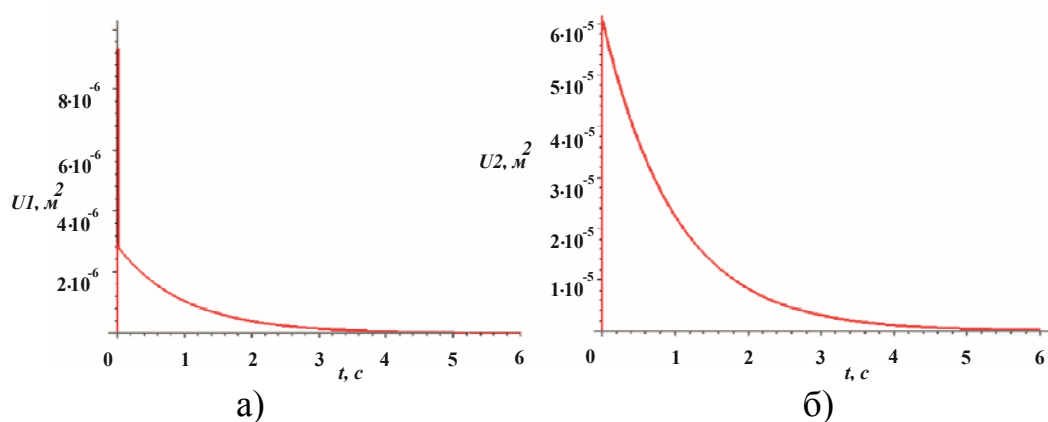


Рис. 3. – Переходные процессы:

а) по управлению u_1 ; б) по управлению u_2 .

2. Процедура синергетического синтеза с согласованным управлением давлением в камерах наполнения

В приведенном выше варианте синтеза обеспечивается раздельное управление давлениями в камерах наполнения: одно из них непосредственно отвечает за позиционирование штока второе – стабилизируется в некотором заданном значении. Таким образом, один из каналов управления остается «пассивным» в решении технологической задачи. К тому же, стабилизируемое давление в камере может быть избыточным или недостаточным, что приводит к дополнительным затратам на его поддержание. В этой связи, целесообразно синтезировать векторный регулятор, обеспечивающий согласованное изменение давлений при позиционировании штока.

При полной остановке привода давления во впускной и выпускной камерах соответственно равны друг другу. Таким образом в ходе перемещения штока происходит выравнивание давлений. Можно отразить это выравнивание в соответствующем инвариантном многообразии в ходе

процедуры синергетического синтеза. Для обеспечения этого условия необходимо ввести инвариант (3) вида:

$$x_4 = x_3, \quad (14)$$

Тогда совокупность вводимых инвариантных многообразий имеет вид:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= x_4 - x_3 = 0, \\ \psi_2 &= x_3 - \varphi_1(x_1, x_2) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Повторяя процедуру синтеза для многообразий вида (15), получим закон управления:

$$u_1 = \frac{T_2(-a_{21} - a_{22} - a_{24}) + a_{25} + a_{26}}{-T_2 \cdot a_{23}}, \quad (16)$$

$$u_2 = \frac{T_1 T_2 a_{11}(a_{21} + a_{22} + a_{24}) + a_{25} + a_{26} + T_2 a_{23}(T_1(a_{12} + a_{14}) + a_{15} + a_{16})}{-T_1 T_2 a_{13} a_{23}},$$

где:

$$a_{11} = \frac{K_1 \cdot \sqrt{x_3^2 - P_m^2}}{S_1(x_1 + l_{01})}; \quad a_{12} = \frac{kx_2 x_3}{x_1 + l_{01}}; \quad a_{13} = \frac{K_2 \cdot (x_4/P_m)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{x_4^2 - P_a^2}}{S_2(L - x_1 + l_{02})}$$

$$a_{14} = \frac{kx_2 x_4}{L - x_1 + l_{02}}; \quad a_{15} = x_4; \quad a_{16} = x_3.$$

$$a_{22} = \frac{(T_3 kM + T_3 k_{TP} - M)(S_1(x_3 - P_a) - S_2(x_4 - P_a) - k_{TP}x_2 - N)}{T_3 M(S_1 - S_2)}$$

$$a_{21} = \frac{kMx_2}{T_3(S_1 - S_2)}; \quad a_{23} = a_{11} = \frac{K_1 \cdot \sqrt{x_3^2 - P_m^2}}{S_1(x_1 + l_{01})}; \quad a_{24} = \frac{kx_2 x_3}{x_1 + l_{01}}; \quad a_{25} = x_3;$$

$$a_{26} = \frac{T_3(kx_2 M + S_1 P_a + N - S_2 P_a + k_{TP} x_2) - M(x_2 - kx_1 - kx_1^2)}{T_3(S_1 - S_2)}.$$

На рис. 4-6 представлены результаты моделирования системы с законами управления (16) в среде пакета Maple, с начальными условиями системы аналогичным первому случаю, но с другим заданным значением **давления в выпускной камере $x_1^* = x_3$ при $x_1^* = 0,1$ м.**

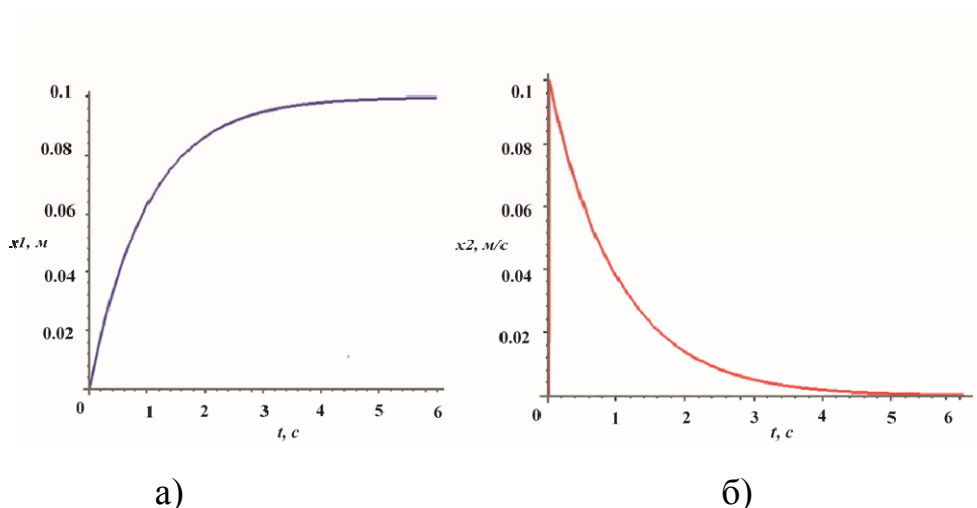


Рис. 4. – Переходные процессы:

а) по перемещению штока в $x_1^* = 0,1$ м; б) по скорости x_2 .

Сравнительный анализ графиков переходных процессов, представленных на рис. 1 и 4 показывает, что процессы по перемещению и скорости в обоих случаях совпадают. Это значит, что динамика системы сохраняется не зависимо от изменения задачи управления.

Графики изменения давлений во впускной и выпускной камерах для второго случая показаны на рис. 5. Из них видно, давление x_3 в конце цикла совпадает с давлением x_4 , что и было задано при формировании инварианта.

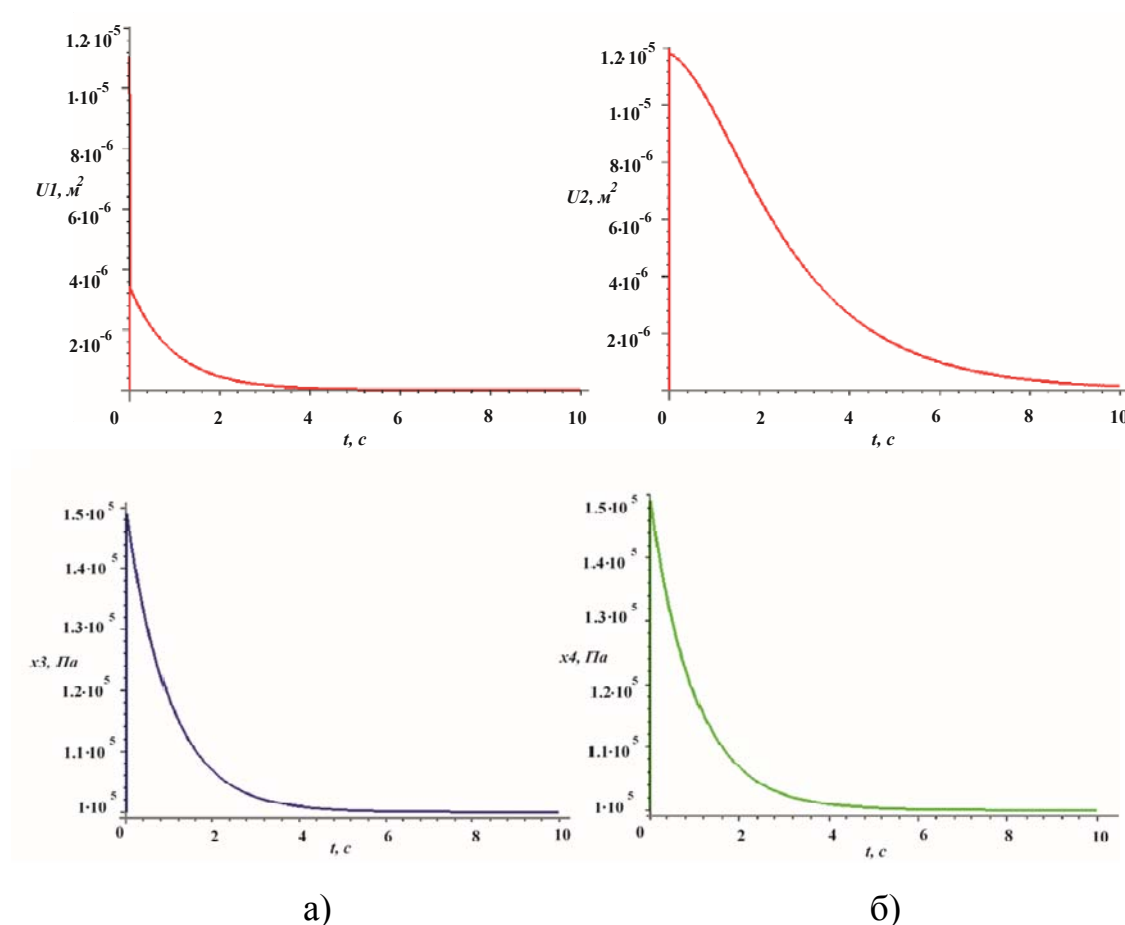


Рис. 5. – Переходные процессы:

а) по переменной x_3 ; б) по переменной x_4 .

Синтезированные методом АКАР изменения управляющих воздействий во времени (16), представлены на рис. 6.

а) б)

Рис. 6. – Переходные процессы:

а) по управлению u_1 ; б) по управлению u_2 .

Анализ графиков переходных процессов, представленных на рис. 3 и 6 показывает, что во втором случае площадь открытия клапана, впускающего поток сжатого воздуха, больше, это приводит к росту рабочего давления (рис. 5а). При этом, за счет плавного уменьшения площади поперечного сечения

выхлопного клапана (рис.6б), стабилизируются давления X_3 и X_4 до значения атмосферы (рис. 5).

Заключение

На основе нелинейной модели пневмосистемы, с использованием синергетического метода АКАР, синтезированы законы управления, обеспечивающие перемещение штока пневмоцилиндра в заданное значение.

Важным 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 обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы при выполнении желаемых целей управления, что доказывают приведенные на рисунках 1-6 графики переходных процессов.

Литература

1. Tang J., Walker G. Variable structure control of a pneumatic actuator // ASME Dynamic Syst., Measure, Contr.- 1995.- vol. 117, pp. 88–92.
2. Fok S. C., Ong E. K. Position control and repeatability of a pneumatic rodless cylinder system for continuous positioning // Robotics and Computer Integrated Manufacturing. - 1999. - vol. 15, pp 365-371.
3. Bobrow J. E., Jabbari F. Adaptive pneumatic force actuation and position control // ASME J. Dynamic Syst., Measur., Contr.- 1991.- vol. 113, pp. 267–272.
4. Грешняков П.И. Совершенствование пневматической системы управления платформы Стюарта // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. - 2016. -т. 15. № 1, с. 151-162.
5. Глебов Н.А., Аль Гбури Висам Е.А.Л. Адаптивный электропневматический модуль систем управления технологическим оборудованием и роботами с пневмоприводом // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки.- 2016.- № 2 (190).- С. 15-20.

6. Дяченко П.А. Быстродействующая нейросетевая система релейного управления позиционно-следящим пневмоприводом в условиях его существенной неопределенности дис. ... канд. техн. наук. - Владивосток, 2010. С 155.

7. Дыда А.А., Маркин В.Е. Адаптивное управление с переменной структурой с парными и нелинейными деформируемыми поверхностями переключения // Информатика и системы управления. - 2003.- № 1 (5).- С. 100-105.

8. Грибков А.М., Шилин Д.В. Разработка алгоритма управления трехкоординатным пневматическим манипулятором на базе нечеткой логики // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - 2012.- Т. 16. № 6 (51).- С. 127-135.

9. 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.

10. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. и др. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем / Под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, Ч.III. 2000. – 640 с.

11. 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. – Изд. 2. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013 – 304 с.

12. Bezuglov A., Kolesnikov A., Kondratiev I., Vargas J. Synergetic Control Theory Approach for Solving Systems of Nonlinear Equations // Proc. of the 9th World Multi - Conference on Systemic, Cybernetics and Informatics, 2005. pp. 121-126.

References

1. Tang J., Walker G. Variable structure control of a pneumatic actuator ASME Dynamic Syst., Measure, Contr.1995. vol. 117, pp. 88–92.

2. Fok S. C., Ong E. K. Position control and repeatability of a pneumatic rodless cylinder system for continuous positioning. Robotics and Computer Integrated Manufacturing. 1999. vol. 15, pp. 365-371.

3. Bobrow J. E., Jabbari F. Adaptive pneumatic force actuation and position control. ASME J. Dynamic Syst., Measur., Contr. 1991. vol. 113, pp. 267–272.

4. Greshnjakov P.I. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroljova. 2016. № 1, pp. 151-162.



5. Glebov N.A., Al' Gburi Visam E.A.L. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Serija: Tehnicheskie nauki. 2016. № 2 (190). pp. 15-20.
6. Djachenko P.A. Bystrodejstvujushhaja nejrosetevaja sistema relejnogo upravlenija pozicionno-sledjashhim pnevmoprivodom v uslovijah ego sushhestvennoj neopredelennosti [High-speed neural network system of relay control of position-tracking pneumatic actuator under conditions of its substantial uncertainty] dis. kand. tehn. nauk. Vladivostok, 2010. P. 155.
7. Dyda A.A., Markin V.E. Informatika i sistemy upravlenija. 2003. № 1. pp. 100-105.
8. Gribkov A.M., Shilin D.V. Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehničeskogo universiteta. 2012. № 6. pp. 127-135.
9. Haziev Je.L., Haziev M.L. Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2016. № 9. pp. 84-88.
10. Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N. i dr. Sovremennaja prikladnaja teorija upravlenija: Novye klassy reguljatorov tehničeskikh system [Modern applied control theory: new classes of technical system regulators] Taganrog. TRTU, Ch.III. 2000. P.640.
11. Kolesnikov A.A., Veselov G.Ye., Popov A.N., Kolesnikov Al.A., Topchijev B.V., Mushenko A.S., Kobzev V.A. Sinergeticheskiye metody upravleniya slozhnymi sistemami: mekhanicheskiye i elektromekhanicheskiye sistemy [Synergistic methods for managing complex systems: mechanical and electromechanical systems]. Librokom, 2013. P.304.
12. Bezuglov A., Kolesnikov A., Kondratiev I., Vargas J. Synergetic Control Theory Approach for Solving Systems of Nonlinear Equations. 2005. pp. 121-126.