

# Процедура синергетического синтеза управляющих воздействий пневмораспределителя

Е. Н. Обухова

Донской государственный технический университет  
elena21@spark-mail.ru

**Аннотация.** 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.

**Ключевые слова:** пневмопривод; нелинейная математическая модель; синергетический синтез регулятора; инвариантное многообразие

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка и реализация эффективных алгоритмов управления, является одной из основных задач, решаемой в современной теории автоматического управления. Синтезируемый закон управления должен гарантировать асимптотическую устойчивость системы, при одновременном выполнении оптимизации процессов по определенному заданному критерию.

Несмотря на современное развитие методов теории автоматического управления, нашедших свое применение в различных технических областях и сферах науки, задача синтеза законов управления до сих пор является сложной, неоднозначной и требующей творческого подхода при ее решении.

При этом физическое свойство сжимаемости воздуха и присущая нелинейность математической модели продолжают делать пневматическую систему управления объектом многих как отечественных, так и зарубежных исследований.

Управление пневматической системой с позиции теории автоматического управления можно разделить на определенные группы методов, к которым относятся:

- методы подчиненного управления, основанные на использовании линейных типовых законах управления;

- методы, ориентированные на представлении системы в фазовом пространстве и построении поверхностей переключения;
- интеллектуальные методы построения регуляторов с использованием нечеткой логики и нейронных сетей.

В настоящее время ПИД регуляторы до сих пор находят свое применение в промышленности. Это связано с простым алгоритмом функционирования, широким спектром использования для большинства прикладных задач и экономически низкими затратами на реализацию законов управления.

Однако несмотря на популярность использования и достаточно удовлетворительной работы регуляторов существует ряд проблем, связанных с их применением. К данным проблемам относят сложность настройки дифференциальной составляющей регулятора, увеличение полосы пропускания и вследствие этого появления высокочастотных помех, что сказывается на работе системы и появлению ошибок.

К недостаткам 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.

В научном коллективе под руководством профессора А.А. Колесникова была развита концепция синергической теории [1–3], адаптированная к теории управления нелинейными диссипативными системами. Данная концепция заключалась в том, что необходимо сформировать такой закон управления, который позволял бы перевести изображающую точку системы, в область инвариантного многообразия, являющимся областью притяжения фазовых траекторий системы. Попадая в область притяжения, система непременно сама будет двигаться в точку равновесия, которая является целью управления.

В данной работе рассматривается синтез законов управления с использованием синергетического метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов, который учитывает нелинейную динамику пневмоцилиндра.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

В пневмоцилиндре двустороннего действия с двумя полостями, связанными с атмосферой, поршень может свободно перемещаться по всей длине хода в двух направлениях, не встречая на своем пути особого сопротивления движению. Рассмотрим принцип действия двустороннего пневмоцилиндра, расчетная схема которого изображена на рис. 2.

Давление сжатого воздуха  $p_i$ , попеременно воздействует на штоковую и бесштоковую поверхности поршня площадью  $S_i$  в одной из полостей пневмоцилиндра, объемом  $W_i$ , создавая при этом усилие, которое перемещает поршень на расстояние  $l$ , со скоростью  $V$ . Для этого сжатый воздух под давлением  $p_m$  и температурой  $T_m$  поступает попеременно в полость нагнетания и сливную полость пневмоцилиндра из пневмораспределителя сечением  $f_i$ , позволяя таким образом получить перемещение выходного звена массой  $M$ .

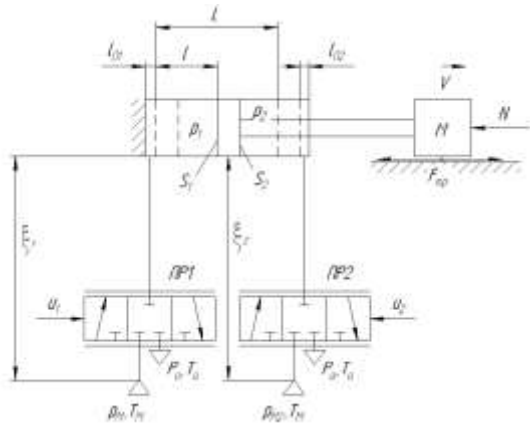


Рис. 1. Расчетная схема пневматической системы

Пневмораспределитель (ПР) с электромагнитным пропорциональным управлением, преобразует входной электрический сигнал – напряжение  $U_i$  на электромагните  $i$ -того ПР в площадь проходного сечения отверстия  $f_i$ :

$$f_i = g \cdot U_i,$$

где  $g$  – коэффициент усиления по напряжению ( $\text{м}^2/\text{В}$ ).

Эффективная площадь отверстия ПР связана с диаметром отверстия следующим выражением:

$$f_i = (\pi \cdot d^2 / 4)$$

Пропорциональное управление эффективной площадью отверстия ПР осуществляется путем изменения входного управляющего сигнала в пределах 0–10 В.

Если сигнал задания меньше 5 В, то распределитель переключается в режим наполнения и в камеру поступает воздух из магистрали, если сигнал больше 5 В, то распределитель соединяется с выхлопным портом. На половине номинального напряжения равного 5 В, золотник занимает среднее положение, в котором все отверстия управления закрыты, при этом воздух не проходит через распределитель.

Математическая модель сложной динамической системы, к которой относится пневмоцилиндр, 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:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= a_{21} \cdot x_3 - a_{22} \cdot x_4 - a_{23} \cdot x_2 - a_{24} - a_N; \\ \dot{x}_3 &= \left[ a_{31} \cdot (x_1 + l_{01})^{-1} \cdot g \cdot U_1 \cdot \sqrt{p_m^2 - x_3^2} \right] - \frac{k x_3 x_2}{(x_1 + l_{01})}; \\ \dot{x}_4 &= - \left[ a_{41} \cdot (a_{42} - x_1)^{-1} \cdot g \cdot U_2 \cdot \left( \frac{x_4}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{x_4^2 - p_a^2} \right] + \frac{k x_4 x_2}{(a_{42} - x_1)}. \end{aligned} \quad (1)$$

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

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;  $\xi$  – 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 напряжения на ПР1 и ПР2, которые находятся в правых частях математической модели.

## III. СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ АКАР

Согласно синергетической теории управления необходимо синтезировать такой вектор управляющих воздействий  $u_1$  и  $u_2$ , который переводил бы изображающую точку системы из начального состояния, находящуюся в области допустимых значений, в требуемое конечное состояние, при условии соблюдения требуемых критериев качества [4–6].

Целью управления является достижение требуемого положения штока пневмоцилиндра, поэтому согласно заданной технологической задачи введем первый инвариант:

$$x_1 = x_1^*,$$

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

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 вида:

$$x_4 = x_3,$$

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:

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

Во второе многообразие (2) 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  $\psi_2 = 0$ . Эта функция  $\varphi_1(x_1, x_2)$ , определяется в ходе процедуры синтеза законов управления.

Согласно методу АКАР, макропеременные  $\psi_1$  и  $\psi_2$  должны удовлетворять решению системы основных функциональных уравнений:

$$\begin{cases} T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0, \\ T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0, \end{cases}\quad (3)$$

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

Совместное решение (1) и (2) с учетом (3) позволяет найти закон управления относительно напряжений на пневмораспределителях:

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

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

$$\text{где: } a_{11} = \frac{K_1 \cdot \sqrt{x_3^2 - P_m^2}}{S_1(x_1 + l_{01})}; a_{12} = \frac{kx_2 x_3}{x_1 + l_{01}}; a_{15} = x_4;$$

$$a_{13} = \frac{K_2 \cdot (x_4 / P_m)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{x_4^2 - P_a^2}}{S_2(L - x_1 + l_{02})}; a_{16} = x_3; a_{14} = \frac{kx_2 x_4}{L - x_1 + l_{02}}.$$

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

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

$$a_{24} = \frac{kx_2 x_3}{x_1 + l_{01}}; a_{25} = x_3;$$

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

#### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С ЗАКОНОМ УПРАВЛЕНИЯ

С целью анализа поведения замкнутой системы, с учетом полученного в аналитической форме закона управления, было проведено компьютерное моделирование системы в среде пакета Maple, с заданными значениями перемещения  $x_1^* = 0,2$  м. и начальными условиями системы:  $x = [0, 0, 200000, 100000]$ .

При моделировании использовались параметры пневмоцилиндра компании Camozzi серии QST2A032A200, имеющего характеристики представленные в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1 ПАРАМЕТРЫ ПНЕВМОСИСТЕМЫ

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$M$	0,5 кг	$k$	1,4
$S_1$	0,008 м <sup>2</sup>	$R$	287 (Дж/(кг · К))
$S_2$	0,006 м <sup>2</sup>	$T_m$	293 К
$k_{втр}$	1000	$P_a$	10 <sup>5</sup> Па
$L$	0,2 м	$P_m$	5 · 10 <sup>5</sup> Па
$l_{01} = l_{02}$	0,002 м	$\xi_1 = \xi_2$	30
$N$	0-20 кг	$g$	1,2 · 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /В

На рис. 1 и 2 представлены график перемещения штока пневмопривода на заданное расстояние, равное 0,2 м и график изменения скорости штока.

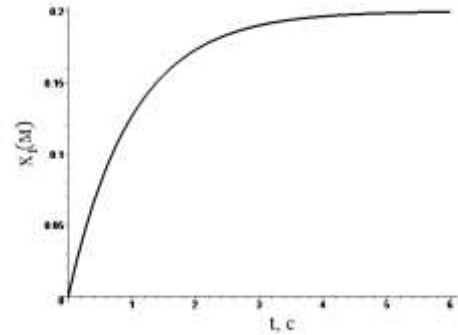


Рис. 2. График перемещения штока пневмопривода

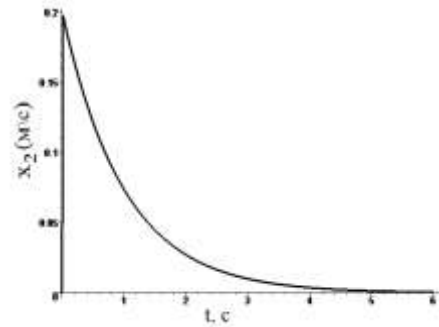


Рис. 3. График изменения скорости штока

На рис. 3 и 4 представлены графики изменения давлений в камере наполнения и выхлопа при различных нагрузочных массах на штоке привода. При отсутствии нагрузки на приводе давления в камерах постепенно уравниваются и приходят к значению атмосферного давления. При увеличении массы нагрузки, соответственно

повышается давление, «удерживающее» нагрузку в заданном положении.

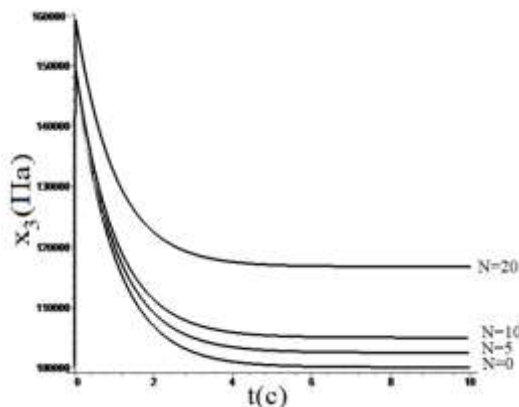


Рис. 4. Графики изменения давления  $x_3$  при различных нагрузках

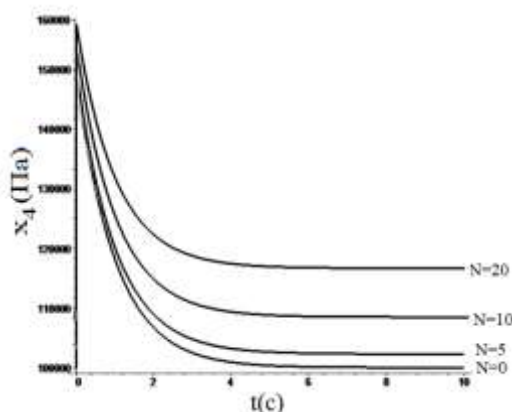


Рис. 5. Графики изменения давления  $x_4$  при различных нагрузках

На рис. 5 и 6 показаны графики изменения управляющих воздействий, которыми являются напряжения на пневмораспределителях ПР1 и ПР2.

ПР1 работает в режиме наполнения камеры, его порт соединен с источником питания. Максимальное значение управляющего сигнала +10 В соответствует полному открытию порта на впуск сжатого воздуха.

ПР2 работает на выхлоп, значение управляющего сигнала равно -10 В соответствует полному открытию порта на выход сжатого воздуха из камеры. Площадь проходного сечения отверстия ПР составляет 0,004м.

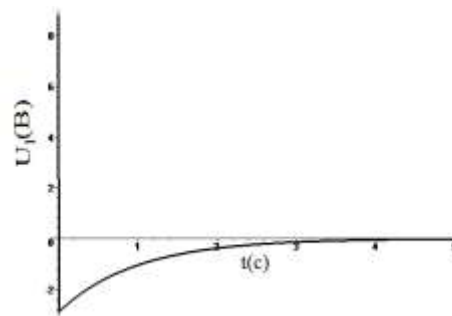


Рис. 6. График напряжения на пневмораспределителе ПР1

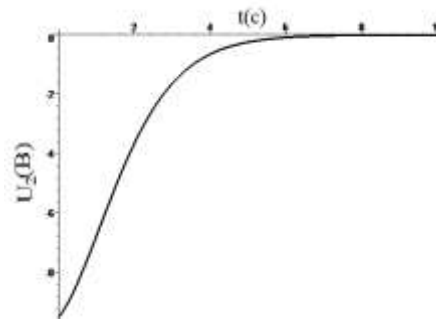


Рис. 7. График напряжения на пневмораспределителе ПР2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития// Известия ТРТУ. 2001. Т. 23. No 5. С. 7-27.
- [2] Веселов Г.Е. Прикладная теория синергетического синтеза иерархических систем управления// Известия ТРТУ. Тематический выпуск. Прикладная синергетика и системный синтез. –2006. –No5. –С. 66–76.
- [3] Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
- [4] Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Мушенко А.С.и др. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. М.: КомКнига, 2006. 304 с.
- [5] A.A. Kolesnikov, "Introduction of synergetic control," Proc. American Control Conference (ACC-2014), Portland, OR, USA, 4-6 June 2014, pp. 3013-3016, doi:10.1109/ACC2014.6859397
- [6] G.E.Veslov, A.N.Popov, I.A.Radionov, A.S.Mushenko, "Adaptive Power Saving Control for Traction Asynchronous Electrical Drive: Synergetic Approach," Proc. IEEE International Energy Conference (EnergyCon 2014), Dubrovnik, Croatia, 13-16 May 2014, pp. 1446-1453, doi:10.1109/ENERGYCON.2014.6850613.