

Синергетический синтез нелинейных адаптивных регуляторов для систем пневмоэлектрического привода

Е. Н. Обухова

Донской государственный технический университет
Ростов-нв-Дону, Россия
elena21@spark-mail.ru

А. Н. Попов

Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
anpopov@sfsu.ru

Аннотация. В статье рассмотрено решение задачи синтеза регуляторов для нелинейных систем пневмоэлектрического привода, обеспечивающих гарантированное позиционирование штока пневмоцилиндра в условиях действия внешних кусочно-линейных возмущений. Изложена процедура синергетического синтеза адаптивного регулятора, основанная на методе интегральной адаптации на инвариантных многообразиях синергетической теории управления. Полученные теоретические результаты подтверждаются компьютерным моделированием замкнутых систем.

Ключевые слова: пневмоэлектрический привод, синтез регулятора, возмущение, интегральная адаптация

I. ВВЕДЕНИЕ

С точки зрения рационального использования энергии, применение пневмоприводов является наиболее предпочтительным, по сравнению с другими исполнительными устройствами потребляющими иной вид энергии, за счет работы сжатого воздуха, имеющего низкую себестоимость. Однако, физическое свойство сильной сжимаемости воздуха, усложняет процесс замкнутого управления электропневматической системой.

В настоящее время технологическая актуальность задачи управления электропневматической системой, связана с точным и плавным торможением поршня пневмопривода в заданной координате его траектории в различных режимах работы системы в условиях внешних возмущающих факторов.

В работах авторов МГТУ им. Н.Э. Баумана [1–3] представлены теоретические исследования внешних возмущений, действующих на выходное звено пневмопривода в виде изменения массы нагрузки, приведены неопределенности внутренних параметров, так же представлен цифровой ПИД регулятор для управления следящим пневмоприводом.

В работе [4] описаны синергетические процессы самоорганизации возникающие, в подобной пневмосистеме -гидросистемах, а также выделены проблемы управления нелинейными динамическими системами подобного типа.

Получение адаптивного динамического регулятора на основе принципа косвенной адаптации путем введения обратных связей рассматривается в работах [5–7]; в работах [8, 9] помимо обратных связей введен расширенный наблюдатель возмущений.

Таким образом, разработка и реализация адаптивных алгоритмов управления электропневматической системой, является актуальной задачей, решаемой с использованием методов современной теории автоматического управления.

В данной статье предлагается синтез адаптивных нелинейных синергетических законов управления, в основе которых положен метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов синергетической теории управления, разработанный А.А. Колесниковым. При этом адаптивные свойства системы управления к рассматриваемому внешнему воздействию достигаются за счет применения принципа интегральной адаптации синергетической теории управления [10–14].

II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

На рис. 1 приведена расчетная принципиальная схема электропневматической системы.

В пневмоцилиндре двустороннего действия с двумя полостями, связанными с атмосферой, поршень может свободно перемещаться по всей длине хода в двух направлениях.

Объемы полостей пневмоцилиндра состоят из рабочего объема, который меняется в зависимости от положения поршня и начального, неизменяющегося объема который представляет собой пространство между крышкой и поршнем, находящимся в конце хода и имеющем координату положения l_{0i} .

Суммарное сопротивление пневматической линии пневмопривода определяется коэффициентом ξ_i .

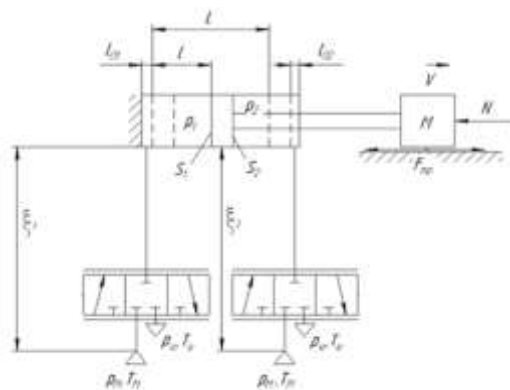


Рис. 1. Расчетная схема электропневматической системы

Кинетическая энергия, сообщенная механическому объекту управления во время разгона, должна быть уменьшена или сведена к нулю прежде, чем поршень достигнет конца хода, иначе это может вызвать повреждение конструкции цилиндра или связанных с ним механизмов.

Эффективно снизить кинетическую энергию в конце хода движения при торможении пневмоцилиндра позволяет ПР, который обеспечивает уменьшение площади сечения отверстия для сброса воздуха в атмосферу. Таким образом, уменьшение площади проходного сечения приводит к созданию воздушной подушки в конце хода, приводящей к увеличению давления воздуха в выхлопной полости и, как следствие, изменению знака ускорения и последующему уменьшению скорости, определяющей фазу торможения поршня, штока и связанными с ним объектами.

Математическая модель электропневматической системы, состоит из уравнения движения механической части устройства, а также из уравнений, характеризующих термодинамические и газодинамические процессы, происходящие в полостях цилиндра [15–17]:

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

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

В модели следующие параметры обозначены как: x_1 – координата перемещения поршня $l(m)$; x_2 – скорость перемещения движущихся масс $V(m/s)$; x_3 – давление в камере наполнения $p_1(Pa)$; x_4 – давление в камере выхлопа $p_2(Pa)$; M – масса подвижной части поршня и штока (0,5 кг); S_1 и S_2 – эффективные площади поршневой

и штоковой полостей пневмоцилиндра ($8 \cdot 10^{-4} m^2$ и $6 \cdot 10^{-4} m^2$); $k_{\text{ВТР}}$ – коэффициент вязкого трения ($100 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}$); T_m – абсолютная температура газа (293 К); k – показатель адиабаты для воздуха (1,4); R – универсальная газовая постоянная ($287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$); l_{01} и l_{02} – начальная и конечная координаты положения поршня (0,002 м); ξ – суммарный коэффициент сопротивления входящих в линию дросселей (30); p_m – уровень давления на входе магистрали ($5 \cdot 10^5 \text{ Па}$); p_a – атмосферное давление (10^5 Па).

Управлениями U_{1f} и U_{2f} являются площади поперечного сечения отверстий первого и второго пневмораспределителей.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ЛИНЕЙНО-НАРАСТАЮЩЕМ ВОЗМУЩЕНИИ

Сформулируем задачу синтеза 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, при этом обеспечивали инвариантность замкнутой системы к действию линейно-нарастающего возмущения.

Линейно-нарастающая, противодействующая движению поршня возмущающая сила возникает в технологических задачах, где пневмопривод воздействует на объект с некоторым, требуемым усилием. К подобным процессам относят гибку, прессование, формование, запрессовку, и т.д. При этом возникающее сопротивление объекта, которое увеличивается пропорционально действующей силе штока, можно математически описать линейно-нарастающей во времени функцией.

Компенсировать внешние воздействия позволяет использование принципа интегральной адаптации синергетической теории управления [11–13], базирующегося на фундаментальных свойствах астатизма подавлять возмущения до полного исчезновения ошибки регулирования. Причем применение принципа интегральной адаптации позволяет подавлять возмущения без их оценки и измерения.

Интегральная адаптация синергетической теории управления предполагает расширение фазового пространства путем введения в систему дифференциальных уравнений электропневматической системы дополнительных интеграторов, которые, по сути, формируют обратные связи системы, за счет которых и достигается результат подавления внешних возмущающих факторов.

Исходя из метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов, расширим фазовое пространство пневматической системы, введя в математическую модель дополнительные уравнения для переменных x_5 и x_6 :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2; \\ \dot{x}_2(t) = a_{21} \cdot x_3 - a_{22} \cdot x_4 - a_{23} \cdot x_2 - a_{24} + x_5; \\ \dot{x}_3(t) = \left[a_{31} \cdot (x_1 + l_{01})^{-1} \cdot U_{1f} \cdot \sqrt{p_M^2 - x_3^2} - \frac{kx_3x_2}{(x_1 + l_{01})} \right]; \\ \dot{x}_4(t) = - \left[a_{41} \cdot (a_{42} - x_1)^{-1} \cdot U_{2f} \cdot \left(\frac{x_4}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{x_4^2 - p_a^2} + \frac{kx_4x_2}{(a_{42} - x_1)} \right]; \\ \dot{x}_5(t) = x_6; \\ \dot{x}_6(t) = \beta(x_1 - x_1^*). \end{cases} \quad (2)$$

На первом этапе синтеза вводятся инвариантные многообразия:

$$\begin{cases} \psi_1 = x_4 - x_3 = 0, \\ \psi_2 = x_3 - \varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

Инвариантное многообразие $\psi_1 = 0$ отражает равновесие давлений в камерах пневмоцилиндра, а $\varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6)$ – некоторая функция перемещения, скорости и переменных x_5 и x_6 .

Для устойчивого асимптотического движения системы из условно допустимой области фазового пространства к пересечению инвариантных многообразий (3) согласно методу аналитического конструирования агрегированных регуляторов ψ_1 и ψ_2 должны удовлетворять следующим функциональным уравнениям:

$$\begin{cases} T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0, \\ T_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $T_1 > 0$ и $T_2 > 0$ – параметры, характеризующие длительность движения системы к инвариантным многообразиям.

При попадании изображающей точки замкнутой системы на пересечение инвариантных многообразий (3) исходная система (2) преобразуется в следующий декомпозированный вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2, \\ \dot{x}_2(t) = (a_{21} - a_{22}) \cdot \varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6) - a_{23} \cdot x_2 - a_{24} + x_5, \\ \dot{x}_5(t) = x_6, \\ \dot{x}_6(t) = \beta(x_1 - x_1^*). \end{cases} \quad (5)$$

На втором этапе синтеза вводится многообразие:

$$\psi_3 = x_2 - k(x_1 - x_1^*) + b_1x_5 + b_2x_6 = 0, \quad (6)$$

где b_1, b_2 и k – параметры синергетического регулятора, отвечающие за устойчивость движения на многообразии $\psi_3 = 0$.

На инвариантном многообразии $\psi_3 = 0$ динамика системы описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = k(x_1 - x_1^*) - b_1x_5 - b_2x_6, \\ \dot{x}_5(t) = x_6, \\ \dot{x}_6(t) = \beta(x_1 - x_1^*). \end{cases} \quad (7)$$

Для получения характеристического полинома линейной системы уравнений (7) найдем определитель ее матрицы состояний:

$$\begin{aligned} A(p) = \det(pE - A) &= \begin{vmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} k & -b_1 & -b_2 \\ 0 & 0 & 1 \\ \beta & 0 & 0 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} (p-k) & b_1 & b_2 \\ 0 & p & -1 \\ -\beta & 0 & p \end{vmatrix} \\ &= p^3 - kp^2 + b_2\beta p + b_1\beta. \end{aligned} \quad (8)$$

Движение изображающей точки системы вдоль заданного многообразия (6) будет асимптотически устойчиво при следующих значениях коэффициентов: $k < 0, b_1, b_2$ и $\beta > 0$ и отрицательных значениях вещественных корней характеристического полинома:

$$\operatorname{Re} p_i < 0, i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Функциональное уравнение, обеспечивающее асимптотическую устойчивость движения к инвариантному многообразию (6):

$$T_3 \dot{\psi}_3(t) + \psi_3 = 0 \quad (10)$$

где постоянная времени $T_3 > 0$.

Совместно решая (6) с (10) с учетом (5), можно найти $\varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6)$:

Закон управления находится из совместного решения (11) и (3) с учетом функциональных уравнений (4) и модели (2):

$$\begin{aligned} U_{1f} &= f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6), \\ U_{2f} &= f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6). \end{aligned} \quad (11)$$

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Результаты моделирования системы с учетом линейно-нарастающего возмущения представлены на рис. 2–6. Значения возмущающего воздействия:

$$a_{m1} = \begin{cases} -0,01t; t = 0, \\ 0,001t; t = 10, \\ -0,005t; t = 20. \end{cases}$$

При моделировании были выбраны следующие значения параметров регулятора: $T_1 = T_2 = 0,1; T_3 = 0,01; k = -1,6; b_1 = 0,05; b_2 = 0,65; \beta = 1$. При таких параметрах корни характеристического полинома (8) имеют значения: $p_1 = -1; p_2 = -0,5; p_3 = -0,25$, что согласно (9) является условием устойчивого асимптотического движения изображающей точки системы к заданной цели управления.

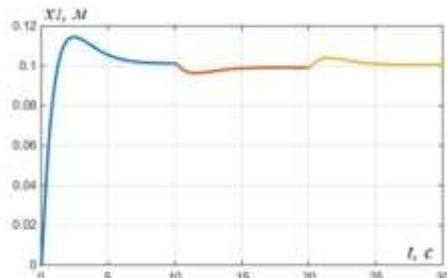


Рис. 2. Переходный процесс перемещения поршня при кусочно-линейном возмущении с интегральной адаптацией

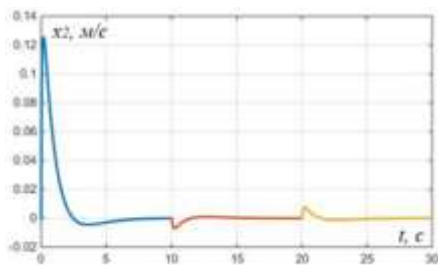


Рис. 3. Переходный процесс скорости поршня при кусочно-линейном возмущении с интегральной адаптацией

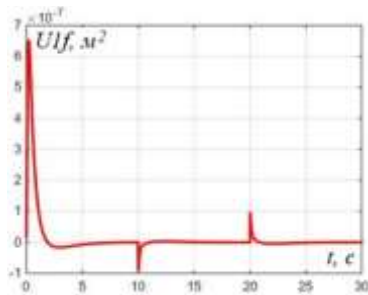


Рис. 4. График переходного процесса площади поперечного сечения ПР1 при кусочно-линейном возмущении с интегральной адаптацией

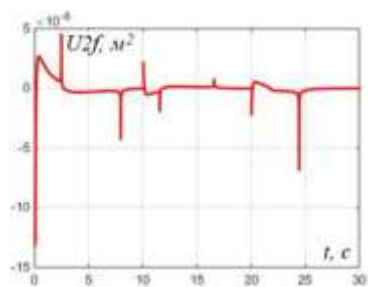


Рис. 5. График переходного процесса площади поперечного сечения ПР2 при кусочно-линейном возмущении с интегральной адаптацией

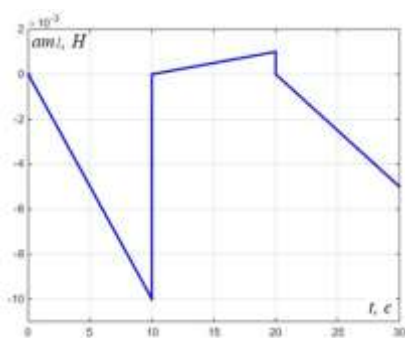


Рис. 6. График функции линейно-нарастающего возмущения

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты компьютерного моделирования подтвердили адаптационные свойства полученных нелинейных синергетических законов управления, к определенному классу возмущений, которые связаны с фундаментальными свойствами астатического управления

совместно с притягивающими свойствами задаваемых инвариантных многообразий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Труханов К.А. Работоспособность пневмо-, гидросистем в условиях непредсказуемых возмущений // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2018. № 12 (261). С. 36-46.
- [2] Ефремова К.Д., Труханов К.А. Синтез следящего пневмо-гидропривода // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 7. С. 75-86.
- [3] Ефремова К.Д., Пильгунов В.Н. К вопросу проектирования следящих пневмоприводов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 3. С. 37-64.
- [4] Попов Д.Н., Сосновский Н.Г., Сиухин М.В. Управление синергетическими процессами для обеспечения асимптотической устойчивости гидросистем // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2017. № 3 (72). С. 37-51.
- [5] Liu G. Adaptive neural network dynamic surface control algorithm for pneumatic servo system / G. Liu, G. Li, Z. Peng, H. Pan // Proceedings of the 11th international conference on modelling, identification and control (ICMIC2019). 2019. P. 821-829. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0474-7_77
- [6] Zuo H. Cross-coupling integral adaptive robust posture control of a pneumatic parallel platform / H. Zuo, G. Tao // Mechanical engineering, control science and information engineering. Journal of central south university. Vol. 23. 2016. P. 2036-2047. <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3260-4>
- [7] Ren H., Fan J. Adaptive backstepping slide mode control of pneumatic position servo system // Chinese journal of mechanical engineering. Vol. 29. 2016. P. 1003-1009. <https://doi.org/10.3901/CJME.2016.0412.050>
- [8] Meng D. Motion synchronization of dual-cylinder pneumatic servo systems with integration of adaptive robust control and cross-coupling approach / D. Meng, G. Tao, A. Li, W. Li // Journal of Zhejiang university SCIENCE C 15. Vol. 15. 2014. P. 651-663. <https://doi.org/10.1631/jzus.C1300360>
- [9] Li A. Nonlinear cascade control of single-rod pneumatic actuator based on an extended disturbance observer / A. Li, D. Meng, B. Lu, Q. Li // Journal of central south university. Vol. 26. 2019. P. 1637-1648. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4118-3>
- [10] Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. / [Колесников А.А. и др.]; под ред. А.А. Колесникова. Изд. 2. М.: Либроком, 2013. 304 с.
- [11] Kuz'menko A. Integral adaptation of high order in problems of synthesis of nonlinear control systems // Informatics and control systems, № 1 (55), 2018, p. 142-153.
- [12] Kuz'menko A. The use of integral adaptation principle to increase the reliability of synchronous generator nonlinear excitation system / A. Kuz'menko, A. Synitsin, Zyiryanova // Proceedings of 6th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT-2014), 2014, p. 415-420.
- [13] Kuz'menko A. Novel robust control of hydrogenerator: The synergetic approach / A. Kuz'menko, A. Kolesnikov, D.Kolesnitchenko // IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(11), pp. 451-456.
- [14] Veselov G.E. Adaptive power saving control for traction asynchronous electrical drive: Synergetic approach / G.E. Veselov, A.N. Popov, I.A. Radionov, A.S. Mushenko // ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference, pp. 1446-1453.
- [15] Попов Д.Н. Механика гидро- и пневмоприводов: Учеб. для вузов. 2-е изд. стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. С. 320.
- [16] Obukhova E., Veselov G. Synergetic synthesis of adaptive control of an electro-pneumatic system // 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, 2020, pp. 13-18.
- [17] Obukhova E. Synergetic method of pneumatic drive control – Conference Paper in AIP Conference Proceedings 2188(1):030004, December 2019.