

Бахриева Хуршида Аскарходжаевна

доцент, PhD кафедры «Цифровых технологий»

Alfraganus university, Ташкент, Узбекистон.

Почта: adish_adisha@mail.ru ORCID: - 0000-0003-2709-1232

СИНТЕЗ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Аннотация: В статье предложен метод синтеза нечеткого синергетического регулятора с дискретным временем для неопределенных нелинейных динамических объектов, с изменяющимися во времени параметрами. Синтезированный регулятор учитывает нелинейный характер объекта, позволяет его параметрам адаптироваться к изменениям окружающей среды: Синтез регулятора осуществляется путем гибридного применения методов теории синергетического управления и нечеткой системы и придает системе асимптотическую устойчивость и требуемые динамические свойства системы управления, с возможностью адаптации к изменению параметров объекта. Предложенный метод синергетического управления гарантирует надежность и асимптотическую устойчивость системы управления и позволяет использовать типовые и нетипичные законы управления. Для преодоления трудностей, связанных с неопределенностями функции принадлежности используется сигмоидальная функция, отличающаяся простотой реализации и возможностью дифференцирования входных переменных. Полученный закон управления имеет аналитическую зависимость, что существенно расширяет возможности его реализации на микроконтроллерах. Результаты моделирования на примере показали эффективность предлагаемого метода относительно известных.

Annotatsiya: Maqolada vaqt bo'yicha o'zgaruvchi parametrlarga ega noravshan nochiziqli dinamik ob'ektlar uchun diskret vaqtli noravshan sinergetik rostlagichni sintez qilish usuli taklif etiladi. Sintezlangan rostlagich ob'ektning nochiziqli xususiyatini hisobga oladi, uning parametrlarini atrof-muhitdagi o'zgarishlarga moslashishga imkon beradi: Rostlagich sintezi va tizimning asimptotik turg'unligi va ob'ekt parametrlarining o'zgarishiga moslashish qobiliyatiga ega bo'lgan boshqarish tizimining zarur dinamik xususiyatlarini sinergetik boshqarish nazariyasi va noravshan tizimlar usullarini gibrid qo'llash orqali amalga oshiriladi. Taklif etilgan sinergetik boshqarish usuli boshqarish tizimining ishonchligi va asimptotik turg'unligini kafolatlaydi va standart va nonstandart boshqarish qonunlaridan foydalanishga imkon beradi. Ob'ekt holatlari funksiyasidagi noaniqliklar bilan bog'liq qiyinchiliklarni bartaraf etish uchun Mamdani tipidagi neyron to'r modelidan foydalanish taklif etiladi. Sigmasimon funksiya taaluqlilik funksiyasi sifatida qo'llaniladi, u amalga oshirish qulayligi va kiritilgan o'zgaruvchilarni farqlash qobiliyati bilan tavsiflanadi. Olingan boshqarish qonuni analitik bog'liqlikka ega bo'lib, uni mikrokontrollerda amalga oshirish imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytiradi. Misol yordamida olingan tajriba natijalari tavsiya etilgan usulning ma'lum bo'lganlarga nisbatan samarali ekanligini ko'rsatdi.

Annotation: The paper proposes a method for synthesizing an adaptive fuzzy synergistic controller with discrete time for indefinite nonlinear dynamic objects, with changing parameters in time. The synthesized adaptive controller takes into account the non-linear nature of the object, allows its parameters to adapt to environmental changes: The synthesis of the controller is carried out by the hybrid application of the methods of the theory of synergistic control and fuzzy system and gives the system asymptotic stability and the desired dynamic properties of the control system, with the ability to adapt to changes in the parameters of the object. The proposed method of synergistic control guarantees the reliability and asymptotic stability of the control system and makes it possible to use typical and atypical control laws. To overcome the difficulties associated with the uncertainties of the function of the states of objects, the use of a neural network model of the Mamdani type is proposed. A sigmoidal function is used as the membership function, which is distinguished by the simplicity of implementation and the possibility of differentiating input variables. The resulting control law has an analytical dependence, which significantly increases the possibilities of its implementation on microcontrollers. The simulation results by example showed the effectiveness of the proposed method relative to the known ones

Ключевые слова: Адаптация, дискретность, нелинейность, синергетическое управление, синтез, регулятор, аналитическая зависимость, макропеременные, инвариант, устойчивость, неопределенность, качества управления.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется методам, направленным на улучшение нелинейных систем управления, их устойчивости с учетом нелинейных свойств. Известно, что принцип суперпозиции для таких систем неприменим, а аналитическое решение задачи нелинейных зависимостей аппроксимации не всегда дает точные решения [1]. Теорема Ляпунова, используемая для создания нелинейного закона управления, обеспечит устойчивость нелинейной системы управления (НСУ), но этот метод не позволяет получить аналитическую (зависимость).

Следует отметить такие методы, как нечеткая логика [3], стратегия адаптивного управления, искусственные нейронные сети [5,6], адаптивные переключаемые нестрогие нелинейные системы с обратной связью [7], управление переменной структурой (скользящий режим, синергетическое управление), адаптивное нечеткое управление для стохастических нелинейных систем с неизмеряемыми состояниями [6,7] и многие другие методы нелинейного управления [7, 8]. Преимущество методов управления с нечеткой логикой заключается в том, что параметры системы можно регулировать в режиме онлайн. Для обеспечения большей адаптивности создается комбинация нечеткой логики и других методов управления, таких как синергетический контроль [11,12]. Большое внимание привлек метод адаптивного нелинейного нечеткого управления. Однако большая часть результатов ограничивается непрерывными нелинейными системами [2], которые не могут быть непосредственно использованы для нелинейных систем с дискретным управлением из-за потери некоторых преимуществ непрерывных регуляторов времени. В данной работе предложена новая адаптивная нечеткая синергетическая схема управления неопределенными нелинейными системами с дискретным временем.

Теория синергетического управления позволяет определить нелинейный закон управления - динамический объект, учитывающий нелинейное свойство системы в схеме управления и пригодный для цифровой реализации [9, 10]. С другой стороны, синергетическое управление обеспечивает постоянство частоты переключения, обеспечивающее асимптотическую стабильность работы системы. При решении задачи синтеза теории си-

нергетического управления с учетом показателей качества системы управления (скорости, перерегулирования и статической ошибки) необходимо выбирать макропеременные, обеспечивающие устойчивость системы.

При использовании такого подхода не возникает вибраций, возникающих в процессе управления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пусть динамика нелинейной дискретной системы управления описывается дискретной системой уравнений порядка n и m порядка [7]:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), k),$$

где $x(k)$ - вектор состояния, переменные $u(k)$ - вектор управляющих воздействий, f - нелинейная функция. Требуется синтезировать системы нелинейного управления динамическим объектом, обеспечивающие выполнение устойчивости и качественных показателей системы, таких как сокращение времени перехода и компенсация автоколебаний. При этом важной задачей является выбор структуры и параметров нормативного права. Для решения задачи синтеза синергетического регулятора, т.е. определения его структуры и закона управления, изначально выбираются переменные состояния системы, которые представлены в следующем виде:

$$\psi = \psi(x(k), k),$$

Синтез закона синергетического управления заключается в обеспечении движения рабочей точки (аттрактора) к началу координат, т.е. $\psi = 0$. Сущность синергетического подхода к контролю $T\dot{\psi} + \psi = 0$ заключается в определении необходимости скорости двигателя и траектории сходимости к инвариантному многообразию [4,13]. Дискретный аналог инвариантных многообразий с учетом периода дискретизации T_s .

$$T \left[\frac{\psi(k+1) - \psi(k)}{T_s} \right] + \psi(k) = 0, \quad (1)$$

где T - шаг расчета, выбранный исходя из скорости сходимости к началу координат. Тогда инвариантное многообразие записывается как:

$$T \left(\frac{T}{T_s - T} \right) \cdot \frac{T}{T_s} \cdot \psi(k+1) + \psi(k) = 0, \quad (2)$$

С учетом дискретности сигналов динамика нелинейной системы с дискретным временем представляется в пространстве состояний следующим образом:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_2(k); \\ x_2(k+1) = x_3(k); \\ \vdots \\ x_{n-1}(k+1) = x_n(k); \\ x_n(k+1) = f(x(k)) + u(k) + d(k); \\ y(k) = x_1(k), \end{cases} \quad (3)$$

где $f(x(k))$ - нелинейная функция. $X(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T \in R^n$ вектор измеримых состояний системы, $u(k) \in R^m$ и $y(k) \in R^p$ соответственно вход и выход системы, и $d(k)$ - ограниченные внешние возмущения.

Ошибки управления определяются как:

$$\begin{aligned} e_1(k) &= x_2(k) - y_d(k); \\ &\vdots \\ e_2(k) &= x_2(k) - y_d(k+1); \\ e_n(k) &= x_n(k) - y_d(k+n-1), \end{aligned}$$

где $y_d(k)$ требуемая траектория движения системы. Уравнение ошибки управления подставляется в следующее:

$$e(k+1) = Ae(k) + B[f(x(k)) + u(k) - y_d(k+n) + d(k)], \quad (4)$$

where

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

At the same time, the synergistic controller must provide approximations of the state variables $x_1(k)$ to the desired output signal $y_d(k)$ in the presence of external disturbances $d(k)$ having an indefinite character. Values of control actions $u(k)$ determined in accordance with (2) and (4), should give the control system the desired properties. Then the macro variables of the manifold are represented in the following form:

$$\psi(k) = K_1 e_1(k) + e_2(k) = \sum_{i=1}^{n-1} K_i e_i(k) + e_n(k), \quad (6)$$

$$\psi(k+1) = K_1 e_1(k+1) + e_2(k+1), \quad (7)$$

where K_1 - gear ratio regulator

$$e_1(k+1) = x_1(k+1) - y_d(k+1),$$

$$e_2(k+1) = x_2(k+1) - y_d(k),$$

$$\psi(k+1) = K_1 x_1(k+1) - K_1 y_d(k+1) + x_2(k+1) - y_d(k), \quad (8)$$

$$\psi(k+1) = K_1 x_2(k+1) - K_1 y_d(k+1) + f(x(k)) + u(k) + d(k) - y_d(k), \quad (9)$$

Subsequent (refined) values of the macro variable $\psi(k)$ are defined as follows:

$$\Delta\psi(k+1) = \psi(k+1) - \psi(k) = \sum_{i=1}^{n-1} K_i e_i(k+1) + e_n(k+1) - \sum_{i=1}^{n-1} K_i e_i(k) + e_n(k)$$

$$\Delta\psi(k+1) = \sum_{i=1}^{n-1} K_i e_i(k+1) + x_n(k+1) - y_d(k+n) - \sum_{i=1}^{n-1} K_i e_i(k) + e_n(k)$$

$$\Delta\psi(k+1) = \sum_{i=1}^{n-1} K_i e_i(k+1) + f(x(k)) - y_d(k+n) - \sum_{i=1}^{n-1} K_i e_i(k) + e_n(k)$$

Let

$$\alpha = \frac{T}{T_S} \left(\frac{T}{T_S - T} \right)$$

Combining equations (8) and (2) we get:

$$a \left[K_1 x_2(k) - K_1 y_d(k+1) + f(x(k)) + u(k) + d(k) - y_d(k) \right] + \psi(k) = 0, \quad (10)$$

Taking into account these proposals, a synergistic control law is sought in the following form

$$u(k) = f(x(k)) - K_1 x_2(k) + K_1 y_d(k) + y_d(k) - d(k) - \frac{1}{a} \psi(k) \quad (11)$$

If $f(x(k))$ is known, that one can easily construct the law of synergistic control (11).

If the values of the non-linear function $f(x(k))$ is known, then one can easily construct the law of synergistic control (11).

If no information about $f(x(k))$ is known, then to solve the set tasks and the use of an adaptive synergistic fuzzy controller is proposed.

Since $f(x(k))$ is unknown, therefore, to determine its approximation to $f(x(k))$ we use the Mamdani model [4], represented by the set of rules IF - THEN in the shape of:

$$R^l: \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y \text{ is } G^l$$

где, $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ - векторные входные переменные нечеткой системы, y - система вывода, F и G - нечеткие логические выводы.

Дефазификация $y(x)$ для нечетко-логического вывода определяется по формуле

$$y(x) = \frac{\sum_{j=1}^m y^j \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^j}(x_i) \right)}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^j}(x_i)} \quad (12)$$

где $\mu_{F_i^j}(x_i)$ - функция принадлежности лингвистической переменной x_i и y_j - это точка, в которой функция

принадлежности G^l достигает максимального значения.

Таким образом, новый закон управления получается в виде:

$$u_c(k) = -f(x(k)) - K_1 x_2(k) + K_1 y_d(k) + y_d(k) - d(k) - \frac{1}{a} \psi(k) \quad (13)$$

Полученные результаты

Пусть динамика некоторой нелинейной дискретной системы управления представлена в каноническом виде.

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_2(k), \\ x_2(k+1) = f(x(k)) + (k/T)u(k) + d(k), \\ y(k) = x_1(k), \end{cases}$$

где, K - коэффициент передачи; T - постоянное время;

$f(x(k)) = -[a_1 x_2 + a_2 x_2^3(k)] / T$ - нелинейная зависимость, придающая нелинейные свойства динамике системы;

$y_d(k) = \sin(k\pi/20)$ - Требуемое перемещение системы.

Внешнее возмущение от удара описывается уравнением

$$d(k) = \begin{cases} 0, & \text{if } k \leq 500 \\ 0.1 \tanh(0.5k), & \text{if } k > 500 \end{cases}$$

Функции принадлежности для переменных состояния $x_i, i=1,2$ выбираются следующим образом: $\mu(x_j) = e^{(-0.5(x_j + 6 - 2(j+1))^2)}$, $j=1, \dots, 5$, $\gamma = 10^{-3}$, период выборки $TS = 0.02$ s.

Имитационный эксперимент был проведен с использованием пакета программ MATLAB:

Результаты исследования показали, что синтезированная синергетическая система управления обладает хорошими следящими характеристиками, что предлагаемый адаптивный синергетический нечеткий регулятор $u(k)$ обеспечивает высокую точность управления при наличии различных типов возмущений.

При изменении переменных состояний системы на 10% от относительно необходимого значения система сохраняет устойчивость и обеспечивает нормальное функционирование системы. Таким образом, все сигналы в закрытой системе ограничены, что свидетельствует об эффективности предлагаемой методики - синтеза синергетического закона управления.

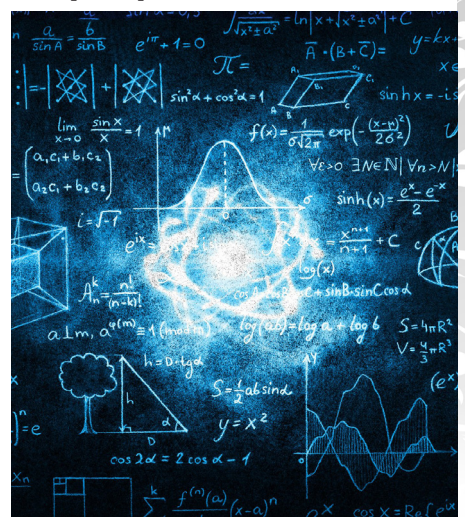
ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе для решения задачи синтеза системы управления нелинейными динамическими объектами предлагается синергетический подход, заключающийся в обеспе-

чении инвариантности траектории и скорости сходимости движения координат системы к многообразиям. Синтезированные управляющие воздействия имеют дискретную форму, что обеспечивает применение синергетического закона управления на микроконтроллерах. Для учета внешних и внутренних возмущений неопределенного характера предложена модель Мамдани. Полученные результаты применимы для одномерных объектов, описываемых нелинейным дифференциальным уравнением низкого порядка, при этом шаг дискретизации управляющих сигналов должен быть известен. В отличие от скользящего режима работы системы управления в предлагаемом подходе вибрации в процессе управления отсутствуют. Дальнейшим развитием предложенного подхода является его применение к многомерным нелинейным динамическим объектам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод синтеза нелинейной динамической системы методом синергетического управления с использованием адаптивного нечеткого регулятора для нелинейных систем с дискретным временем. Синтез адаптивного регулятора, учитывающего нелинейный характер объекта и позволяющего адаптировать его параметры к изменениям окружающей среды, осуществляется путем гибридного применения теории синергетического управления и нечеткой системы. Предложенный метод синергетического управления гарантирует надежность и асимптотическую устойчивость системы управления и отличается простотой реализации закона управления в промышленных контроллерах.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dadras S., Momeni H.R. Control uncertain Genesisio – Tesi chaotic system: Adaptive sliding mode approach // *Chaos, Solitons and Fractals*. – 2009. – Vol. 42. – Pp. 3140 – 3146
2. Fradkov A.L., Evans R.J. Control of chaos: methods and application in engineering // *Ann. Rev. Control*. – 2005. – Vol. 29. – Pp. 33 – 56.
3. Ho N.F., Wong Y.K., Rad A.B. Adaptive fuzzy sliding mode control with chattering elimination for nonlinear SISO systems. *Simulation Modeling Practice and Theory*. Vol. 17, no. 7, 2009. -pp. 1119-1120.
4. Kolesnikov A. A. Synergistic control theory. - M.: Energoatomizdat, 1994.
5. Kolesnikov A.A. Synergistic methods of managing complex systems: the theory of system synthesis. -M.: Com Book, 2006.
6. Khidirova Ch.M. Comparative Analysis of Artificial Neural Network Training Algorithms. International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT 2020). Tashkent, Uzbekistan, 2020. DOI:10.1109/ICISCT50599.2020.9351395.
7. Khidirova Ch.M. Methods and algorithms of determination of complexity of test questions for formation a database system of the adaptive test-control of knowledge. International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT 2017). Tashkent, Uzbekistan, 2017. -P. 2-5. DOI:10.1109/ICISCT.2017.8188572.
8. Kolesnikov A.A., Kolesnikov A.A., Kuzmenko A.A. The ACAR method and the theory of adaptive control in the problems of synthesis of nonlinear control systems // *Mechatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. - 2017. - T.18. - No. 9. (in the press).
9. Marakhimov A.R., Siddiqov I.H., Nasriddinov A., Byun J. -Y. 2015. *Lecture Notes in Electrical Engineering* 330.
10. Nigmatova F.U., Shomansurova M.Sh., Siddikov I.Kh., Musakhonov A.A. 2014. *Automation and Remote Eontrd* 756.
11. Sarbolaev F.N., Islamova F.K., Yakubova N.S., Usmanov K.I. Adaptively Fuzzy Synergistic Control of Multidimensional Nonlinear Dynamic Objects, *Universum: Engineering Sciences*. №3(72), 2020. -24 p.
12. Synergistic methods of managing complex systems: energy systems / Edited by A.A. Kolesnikov. – M.: Editorial URSS, 2005.
13. Young D.S., Won H., Santi E., Monti A. Synergistic control approach for induction motor speed control. 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 2 - 6, 2004, Busan, Korea.
14. Siddikov Isamidin Xakimovich, Bakhrieva Xurshida Askarxodjaevna Designs Neuro-Fuzzy Models in Control Problems of a Steam Heater // *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering* 6(5), 2019.-P. 359-365. (№29; Scopus; IF:0.283).
15. Siddikov Isamidin Xakimovich, Umurzakova Dilnoza Maxamadjonovna and Bakhrieva Hurshida Askarxodjaevna Adaptive system of fuzzy-logical regulation by temperature mode of a drum boiler // *IJUM Engineering Journal*, Vol.21, №1, 2020.-P. 182-192. (№6; Scopus; IF:0.281).
16. Sidikov, Kh. Bakhrieva. Synthesis of the synergetic law of control of nonlinear dynamic objects // *Technical science and innovation Journal*, №1/2023, P.111-121.

