



НЕЧЕТКОЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Сидиков Исомиддин Хакимович - доктор технических наук, профессор Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, **Усманов Комил Исроилович** - старший преподаватель Ташкентского химико-технологического института, **Якубова Ноилахон Собиржонова** – докторант Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, **Казахбаев Сапарбай Атабаевич** – преподаватель Каракалпакского университета имени Бердаха.

Аннотация. В данной статье разработан нечеткий синергетический регулятор для класса неопределенных нелинейных динамических систем с дискретным временем. Предложена синергетическая схема управления для решения задачи управления нелинейными системами. Нелинейные системы с конфигурациями и параметрами, которые меняются со временем, требуют полностью нелинейной модели и схемы адаптивного управления с дискретным временем для практической операционной среды. Синтез законов управления выполнен методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Системы нечеткой логики используются для оценки неизвестного нелинейного поведения системы, а новый адаптивный нечеткий контроллер разработан на основе синергетической теории управления.

Ключевые слова: нечеткий синергетический регулятор, система нечеткой логики, нелинейный объект с дискретным временем, теория синергетического управления, метод АКАР.

Аннотация: Бу мақолада ноаниқ синфли дискрет вақтли ночизикли динамик тизимлар учун ноқатъий синергетик ростлагич ишлаб чиқилган. Ночизикли тизимларни бошқариш масалаларини ечиш учун синергетик бошқариш схемаси таклиф этилган. Вақт бўйича ўзгаришчи, конфигурация ва параметрли ночизикли тизимлар, амалий иш муҳити учун, тўлиқ ночизикли модел ва дискрет вақтли адаптив бошқариш схемасини талаб этади. Бошқариш қонунлари аналитик конструкцияли агрегирланган ростлагичлар (АКАР) усулидан фойдаланиб синтез қилинди. Ноқатъий мантқиқ тизими тизимнинг ноаниқ ночизикли ҳолатини баҳолаш учун ишлатилади, янги адаптив ноқатъий контроллер эса синергетик бошқариш назарияси асосида ишлаб чиқилган.

Калим сизлар: ноқатъий синергетик ростлагич, ноқатъий мантқиқ тизими, дискрет вақтли ночизикли объект, синергетик бошқариш назарияси, АКАР усули.

Abstract: In this article, the fuzzy synergistic controller is developed for a class of indefinite nonlinear dynamic systems a discrete-time. Synergetic control scheme is proposed to deal with the problem of controlling non-linear systems. Non-linear systems with configurations and parameters that change over time require a fully non-linear model and discrete-time adaptive control scheme for a practical operating environment. Control laws were designed by the method of analytical design of aggregated regulators (ADAR). Fuzzy logic systems are used to estimate the unknown nonlinear behaviours of the system, and a novel adaptive fuzzy controller is designed via synergetic control theory.

Keywords: fuzzy synergetic controller, fuzzy logic system, discrete-time nonlinear object, synergetic control theory, ADAR method.

Современные сложные системы разнообразной природы надставляют собой комплекс различных подсистем, выполняющих определенные технологические функции и связанных между собой процессами интенсивного динамического взаимодействия и обмена энергией веществом и информацией. Указанные суперсистемы являются нелинейными, многомерными и многосвязными, в которых протекают сложные переходные процессы и возникают критические и хаотические режимы. Проблемы управления такого рода динамическими системами являются весьма актуальными, трудными и практически недоступными для существующей теории управления [1].

В последние десятилетия значительные усилия были направлены на совершенствование нелинейных систем, их устойчивости и нелинейных явлений. Хотя стабильность этих систем можно улучшить с помощью анализа Ляпунова [2].

Большинство систем нелинейны с характеристиками, которые меняются со временем, поскольку в динамическом режиме работы мы не можем гарантировать высокую производительность контроллеров нелинейных систем на основе линеаризованных моделей. Следовательно, нелинейности нелинейных систем необходимы для интеллектуального контроллера [3]. Чтобы улучшить поведение нелинейных контроллеров, было предложено много методов для их разработки, таких как нечеткая логика, стратегия адаптивного управления антиповоротом для крановых систем, искусственные нейронные сети, адаптивные переключаемые нестрогие нелинейные системы с обратной связью, метаэвристические алгоритмы, нелинейные конструкции с использованием управления переменной структурой (скользящий режим, синергетическое управление), разработка адаптивного нечеткого управления для стохастического нелинейные системы с неизмеренными состояниями, управляющие неразработанными системами, стабилизирующая стратегия управления для неразряженных судовых крановых систем и многие другие нелинейные методы управления [4].

Синергетическое управление - это новая нелинейная техника управления, которая учитывает нелинейности системы в конструкции управления [5] Предлагается систематическая процедура



проектирования, которая дает законы управления, подходящие для цифровой реализации. Кроме того, синергетическое управление не только обеспечивает постоянную частоту переключения, но также обеспечивает асимптотическую устойчивость относительно требуемой условия эксплуатации и надежность в параметрах работа системы [6].

Рассмотрим динамические нелинейные системы n -го порядка, описываемые как:

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

где $x(k)$ представляет системный вектор, $u(k)$ управляющий входной вектор и f является нелинейной функцией. Синтез синергетического контроллера начинается с выбора функции системных переменных состояния, которая называется макропеременной и зависит от переменных состояния [7].

$$\psi = \psi(x(k), k), \quad (2)$$

Временной синергетический подход, для процедуры теории управления (SACT) $T\psi' + \psi = 0$ [8] определяет скорость и траекторию сходимости к инвариантному многообразию. Учитывая период выборки T_s , дискретный аналог получается следующим образом:

$$T \left[\frac{\psi(k+1) - \psi(k)}{T_s} \right] + \psi(k) = 0 \quad (3)$$

где T - расчетный парамет, который задает скорость сходимости к коллектору. Уравнение (3) можно переписать как:

$$T \left(\frac{T}{T_s - T} \right) \cdot \frac{T}{T_s} \cdot \psi(k+1) + \psi(k) = 0 \quad (4)$$

Рассмотрим нелинейные системы с дискретным временем, которые имеют представление в пространстве состояний:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_2(k), \\ x_2(k+1) = x_3(k), \\ \vdots \\ x_{n-1}(k+1) = x_n(k), \\ x_n(k+1) = f(x(k)) + u(k) + d(k), \\ y(k) = x_1(k) \end{cases} \quad (5)$$

где $f(x(k))$ - нелинейная функция, $x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T \in R^n$ вектор состояния систем, который предполагается, что они доступны для измерения, $u(k) \in R^n$ и $y(k) \in R^n$ соответственно вход и выход системы, и $d(k)$ - внешнее возмущение, которое предполагается ограниченным.

Определите ошибки отслеживания как:

$$\begin{aligned} e_1(k) &= x_1(k) - y_d(k), \\ &\vdots \\ e_2(k) &= x_2(k) - y_d(k+1), \\ e_n(k) &= x_n(k) - y_d(k+n-1), \end{aligned}$$

где $y_d(k)$ обозначает опорную траекторию. Определим макропеременную как:

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

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

где K_1 - параметр контроллера и

$$e_1(k+1) = x_1(k+1) - y_d(k+1) \quad (8)$$

$$e_2(k+1) = x_2(k+1) - y_d(k) \quad (9)$$

Если $f(x(k))$ известно, мы можем легко построить закон синергетического управления. Однако этот контроллер содержит ограничение: знание $f(x(k))$ которое не всегда возможно, что делает реализацию невозможной [9].

Поскольку $f(x(k))$ неизвестно, мы не можем реализовать идеальный контроллер, мы предполагаем, что нечеткая система может приближаться к $f(x(k))$. Нечеткая система - это набор правил IF-THEN в форме:

$$R^{(l)}: IF x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y \text{ is } G^l \quad (10)$$

где $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ - вход нечетких систем, а y - его выход, F и G - нечеткие множества, для $l = 1, \dots, m$.

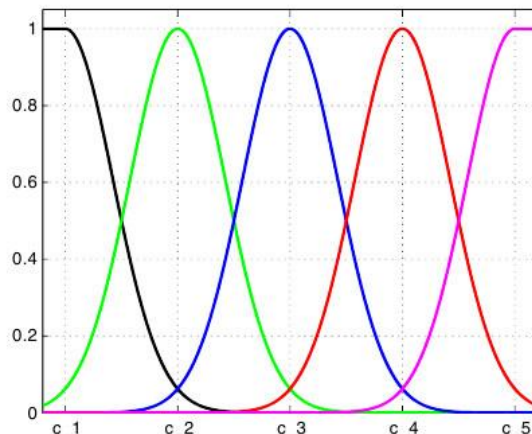


Рис 1. Функции принадлежности для f и u .

$$y(x) = \frac{\sum_{j=1}^m y^j (\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^j}(x_i))}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^j}(x_i)} \quad (11)$$

где $\mu_{F_i^j}(x_i)$ - функция принадлежности лингвистической переменной x_i а y^j - точка, в которой функция принадлежности G^l достигает своего максимального значения.

Вводя понятие вектора нечеткой базисной функции $\xi(x)$, $\vec{y}(x)$ задается (11) и может быть переписано как:

$$y(x) = \theta^T \xi(x) = \xi(x)^T \theta \quad (12)$$

где $\theta = [y^1, \dots, y^m]^T$, $\xi(x) = [\xi^1(x), \dots, \xi^m(x)]^T$ нечеткие базисные функции, определяемые как:



$$\xi^j(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^j}(x_i)}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^j}(x_i)} \quad (13)$$

Используя теорему об универсальном приближении, мы можем использовать $\hat{f}(x(k))\theta_f = \theta_f^T \zeta_f(x(k))$ в виде (12) для аппроксимации функции $f(x(k))$.

Таким образом, новый закон управления получается:

$$u_c(k) = -\hat{f}(x(k)) - K_1 x_2(k) + K y_d(k) + y_d(k) - d(k) - \frac{1}{\alpha} \psi(k) \quad (14)$$

Принимая во внимание проблему управления нелинейной системой (5), при использовании надежного адаптивного нечеткого синергетического регулятора [10], заданного формулой (14), используется \hat{f} , а вектор параметров $\theta_f(k)$ можно настраивать с помощью адаптивного закона, заданного в (15), сигналы в замкнутом контуре в конечном итоге ограничены и ошибка отслеживания сходится к окрестности происхождения.

$$\Delta \theta_f(k) = \gamma \xi(k) \psi(k) \quad (15)$$

где γ - действительная постоянная, определяющая скорость адаптации. Определим оптимальный вектор параметров:

$$\theta_f^* = \arg \min_{\theta_f \in \Omega_{\theta_f}} \left\{ \sup_{x \in \Omega_x} |f(x(k)) - f(x(k))\theta_f| \right\} \quad (16)$$

где Ω_{θ_f} и Ω_x - наборы ограничений для θ_f и x соответственно.

Минимальная ошибка аппроксимации следующая:

$$\varepsilon(k) = f(x(k)) - f(x(k))\theta_f^* + d(k) \quad (17)$$

Нечеткое управление выбирается в замкнутой системе как:

$$u(k) = u_c(k) + u_r(k) + u_\psi(k) = u_c(k) + u_r(k) - \tau \psi(k) \quad (18)$$

где термин $u_r(k)$ - это надежный контроллер, который используется для ослабления внешних помех.

$$u_r(k) = -\frac{1}{2} \cdot [-\beta(k) + (\beta(k)^2 - 4A_0(k))^{1/2}] \cdot \psi(k)$$

с $A_0(k)$ и $\beta(k)$, которые будут определены позже. Затем, подставив (14) - (17) в (9), после простых манипуляций получим:

$$\Delta \psi(k+1) = u_\psi(k) + u_r(k) + \tilde{\theta}_f^T(k) \xi(k) + \varepsilon(k) \quad (19)$$

$$\tilde{\theta}_f(k) = \theta_f^* - \theta_f(k)$$

$$V(k) = \frac{1}{2} (\psi^2(k) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}_f^T(k-1) \tilde{\theta}_f(k-1)) \quad (20)$$

$\Delta V(k+1)$ можно рассчитать как:

$$\Delta V(k+1) = V(k+1) - V(k) = \frac{1}{2} \psi^2(k+1) - \frac{1}{2} \psi^2(k) + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}_f^T(k) \cdot \tilde{\theta}_f(k) - \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}_f^T(k-1) \cdot \tilde{\theta}_f(k-1)$$

Таким образом, новый закон управления получается:

$$u_c(k) = -\hat{f}(x(k)) - K_1 x_2(k) + K y_d(k) + y_d(k) - d(k) - \frac{1}{\alpha} \psi(k) \quad (21)$$

Нечеткое управление $u(k)$ выбирается в замкнутой системе как:

$$u(k) = u_c(k) + u_r(k) + u_\psi(k) = u_c(k) + u_r(k) - \tau \psi(k) \quad (22)$$

где термин $u_r(k)$ - это надежный контроллер, который используется для ослабления внешних помех.

Моделирование выполняется для реальной нелинейной модели системы с дискретным временем, представленной в канонической форме (5).

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

(23) где $f(x(k)) = -[a_1 x_2 + a_2 x_2^3(k)]/T$ представляет динамику системы. $y_d(k) = \sin(k\pi/20)$ - траектория отсчета.

представляет собой внешнее возмущение, начальные условия выбираются как:

$$d(k) = \begin{cases} 0, & \text{if } k \leq 500 \\ 0.1 \tan^{-1}(0.5k), & \text{if } k > 500 \end{cases}$$

Функции принадлежности для состояний системы $x_i, i = 1, 2$ выбираются следующим образом: $\mu(x_i) = e^{(-0.5(x_i + 6 - 2(j+1)))^2}, j = 1, \dots, 5, \gamma = 10^{-3}$, период выборки составляет $T_s = 0,02$ с.

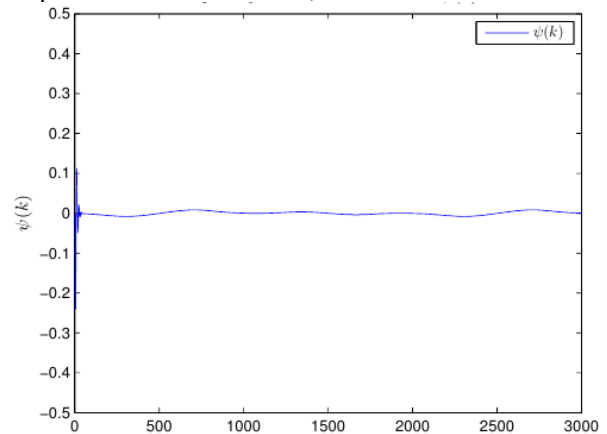


Рис. 2. Траектория макропеременной $\psi(k)$

Траектория макропеременной $\psi(k)$ показана на рис.2, которая сходится к нулю при увеличении k На рис.3 показаны временные эволюции динамики $f(k)$

и ее оценка $\tilde{f}(k)$, показано, что $\tilde{\theta}_f^T \xi_f(x(k))$ приближается к $f(k)$, по мере увеличения, и ошибка оценки сходится к соседнему ноль. На рис.4 показана норма вектора адаптивного параметра $f(k)$ который ограничен.

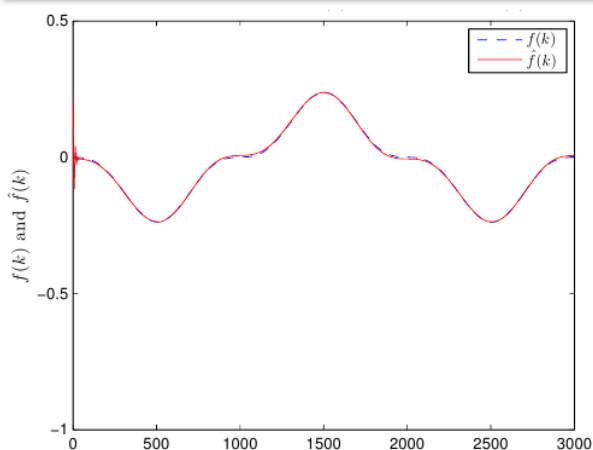


Рис 3. Нелинейная функция $f(k)$, и ее оценка $\tilde{f}(k)$

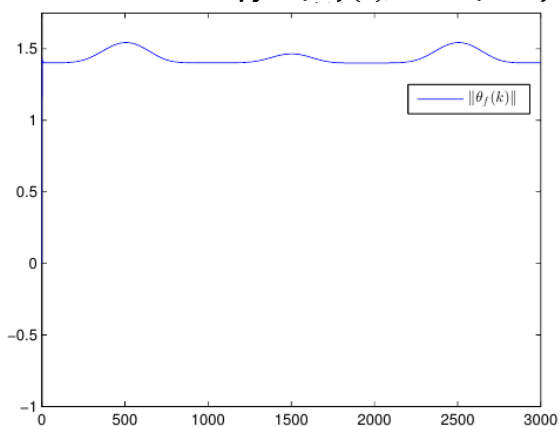


Рис 4. Норма $\theta_f(k)$

Таким образом, в заключение, все сигналы в замкнутой системе ограничены, что свидетельствует об эффективности предлагаемой методики.

Заключение

Работа состоит в исследовании надежного синергетического адаптивного нечеткого контроллера, разработанного для класса нелинейных систем с дискретным временем.

Анализ устойчивости основан на теории Ляпунова. Показано, что все сигналы в замкнутой системе ограничены и ошибка отслеживания очень мала. Необходимо будет использовать тот же алгоритм для хаотических нелинейных систем, таких как система хаосов Хенона.

Список литературы:

- [1] Колесников А.А., "Синергетическая теория управления". М.: КомКнига, 2006.
- [2] Усманов, К.И., Сарболаев, Ф.Н., Исломова, Ф.К., Якубова Н.С., "Адаптивно нечеткое синергетическое управление многомерных нелинейных динамических объектов.," *Universum: технические науки : электрон. научн. журн.*, vol. 3, no. 72, 2020,
- [3] Колесников А.А., *Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза*. 2005.
- [4] Z. Jiang, "Design of a nonlinear power system stabilizer using synergetic control theory," vol. 79, pp.

855–862, 2009, doi: 10.1016/j.epsr.2008.11.006.

[5] I.H.Sidikov, K.I.Usmanov, N.S. Yakubova. "SYNERGETIC CONTROL OF NONLINEAR DYNAMIC OBJECTS," *CHEMICAL Technol. Control Manag.*, vol. 2, no. 92, pp. 49–55, 2020.

[6] Колесников А.А., "МЕТОД СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ САМООРГАНИЗУЮЩИМИСЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ," *Известия ЮФУ. Технические науки*, vol. 5, no. 5, pp. 231–242, 2013.

[7] S. Djenoune and M. Bettayeb, "Automatica Optimal synergetic control for fractional-order systems," *Automatica*, vol. 49, no. 7, pp. 2243–2249, 2013, doi: 10.1016/j.automatica.2013.04.007.

[8] Сидиков И.Х., Усманов К.И., Якубова Н.С. "Ночизикли динамик объектларни синергетик бошқариш усулидан фойдаланиб синтезлаш," *МУҲАММАД АЛ-ХОРАЗМИЙ АВЛОДЛАРИ. Илмий-амалий ва ахборот-таҳлилий журнал*, vol.1, no.11, pp. 1–5, 2020.

[9] А.А.Кузьменко, "Управление объектами энергосистем: синергетический подход," *Труды X Международной конференции «Идентификация системы задачи управления» SICPRO'15, Москва.*, pp. 271–301, 2015.

[10] Усманов, К.И., Бабаяров, Р.А., Авезов, Т.А., Жабборов А.О., "Нечеткое управление нелинейных динамических объектов в интеллектуальных системах," *Universum: технические науки : электрон. научн. журн.*, vol. 4, no. 73, 2020.