

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования
неразрушающего контроля

Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 681.515

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-54-62>

EDN SHAEZM



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ и синтез интеллектуальных систем автоматического управления с нечетким регулятором I рода

Ю.А. Быковцев[@],
В.М. Лохин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: bykovcev@mirea.ru

• Поступила: 20.11.2024 • Доработана: 13.02.2025 • Принята к опубликованию: 21.03.2025

Резюме

Цели. Активное развитие интеллектуальных систем автоматического управления, связанное с повышением требований к качеству и точности систем управления современных технических систем, требует разработки новых подходов к их анализу и синтезу. Одним из перспективных классов интеллектуальных управляющих устройств выступают регуляторы, построенные на базе технологии нечеткого логического вывода. Целью настоящей работы является разработка методики комплексного синтеза параметров нечеткого регулятора I рода на основе кругового критерия Якубовича.

Методы. В основу предлагаемой методики положено рассмотрение нечеткого регулятора с позиции соответствующего нелинейного преобразования, что позволяет использовать методы теории нелинейных систем автоматического управления. В качестве показателей качества в работе используются аналоги понятий «степень устойчивости» и «степень колебательности». Синтез параметров нелинейного преобразования сводится к определению достаточных областей абсолютной устойчивости системы со смещенной и расширенной амплитудно-фазовыми частотными характеристиками, полученных с помощью кругового критерия устойчивости Якубовича.

Результаты. В соответствии с теорией нечетких множеств и алгоритмом нечеткого логического вывода Такаги – Сугено показана возможность взаимно-однозначного соответствия нелинейного преобразования и параметров базы знаний нечеткого регулятора при соответствующей организации последней. В работе предложена процедура синтеза параметров нечеткого регулятора I рода, нацеленная на обеспечение комплексных требований к качеству системы управления по «степени устойчивости», «степени колебательности» и точности в установившемся режиме. Предложенная методика также гарантирует абсолютную устойчивость не только положения равновесия, но и процессов, а ее эффективность подтверждена результатами модельных экспериментов.

Выводы. В работе предложена удобная инженерная методика настройки параметров интеллектуального регулятора, построенная по технологии нечеткого логического вывода на основе методов теории автоматического управления. Показано удобство применения таких косвенных показателей качества, как «степень устойчивости», «степень колебательности» и точность в установившемся режиме.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, нечеткий логический вывод, нечеткий регулятор, модель Такаги – Сугено, абсолютная устойчивость процессов

Для цитирования: Быковцев Ю.А., Лохин В.М. Анализ и синтез интеллектуальных систем автоматического управления с нечетким регулятором I рода. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):54–62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-54-62>, <https://www.elibrary.ru/SHAEZM>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Analysis and synthesis of intelligent automatic control systems with type-1 fuzzy regulator

Yuri A. Bykovtsev[@],
Valery M. Lokhin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: bykovtsev@mirea.ru

• Submitted: 20.11.2024 • Revised: 13.02.2025 • Accepted: 21.03.2025

Abstract

Objectives. The active development of intelligent automatic control systems, which is associated with increasing requirements to the quality and accuracy of control systems of modern technical systems, requires the development of new approaches to their analysis and synthesis. A promising class of intelligent control devices is based on regulators that use fuzzy-logic inference technology. The purpose of this work is to develop a method for the complex synthesis of type-1 fuzzy regulator parameters on the basis of the Yakubovich circle criterion.

Methods. The proposed methodology is based on a consideration of fuzzy regulators in terms of the corresponding nonlinear transformation that support the use of methods derived from the theory of nonlinear automatic control systems. Analogs of the degrees of stability and oscillation are used as quality indicators. The synthesis of the parameters of the nonlinear transformation can be reduced to determining sufficient regions of absolute stability of the system with the shifted and extended Nyquist plot obtained using the Yakubovich circle stability criterion.

Results. In accordance with the theory of fuzzy sets and algorithms of fuzzy logical inference described by Takagi–Sugeno, the possibility of one-to-one correspondence of the nonlinear transformation and the parameters of an appropriately arranged knowledge base of the fuzzy controller is shown. A procedure proposed for synthesizing the parameters of the type-1 fuzzy regulator is aimed at ensuring complex requirements for the quality of the control system according to the degree of stability, the degree of oscillation, and steady-state mode accuracy. The effectiveness of the proposed technique, which guarantees the absolute stability not only of the equilibrium position but also of the processes, is confirmed by the results of model experiments.

Conclusions. The paper proposes a convenient engineering technique for determining the parameters of an intelligent controller constructed using fuzzy logic inference technology based on methods informed by automatic control theory. The convenience of using such indirect quality indicators as the degree of stability, the degree of oscillation, and accuracy in steady-state mode, is demonstrated. These indicators are explicable for developers of applied control systems.

Keywords: intelligent control system, fuzzy logic inference, fuzzy controller, Takagi–Sugeno model, absolute stability of processes

For citation: Bykovtsev Y.A., Lokhin V.M. Analysis and synthesis of intelligent automatic control systems with type-1 fuzzy regulator. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):54–62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-54-62>, <https://www.elibrary.ru/SHAEZM>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В последние два–три десятилетия интеллектуальные технологии находят все более широкое применение в различных сферах деятельности. Одной из таких сфер являются системы автоматического управления (САУ) [1], для которых на базе интеллектуальных технологий (экспертных систем, нейроподобных сетей, ассоциативной памяти или нечеткой логики) создается новое поколение регуляторов – интеллектуальных регуляторов, обеспечивающих не только высокие качественные показатели САУ, но и требуемый уровень адаптации к различным факторам неопределенности, воздействующим на систему.

Среди отмеченных интеллектуальных технологий наибольшее распространение (в силу объективных и субъективных причин [2–4]) получила технология нечеткого логического вывода (НЛВ) или нечеткая логика. Она получила достаточно широкое распространение в робототехнике на всех уровнях иерархии интеллектуального управления (стратегического, тактического и исполнительного) автономными и полуавтоматическими роботами различного типа базирования, в системах управления сложным технологическим оборудованием и т.д. В значительной степени это связано с тем, что аппарат НЛВ позволяет строить модели управления даже для сложных объектов на уровне логико-лингвистических рассуждений.

Вместе с тем этот новый и оригинальный формализм не соответствует существующей теории автоматического управления (ТАУ). Возникла серьезная проблема, связанная с созданием новых подходов к решению задач оценки устойчивости и качества нового класса САУ, которая достаточно активно решается в последние два десятилетия. Серьезное обобщение работ проведено в монографии Пегата [5]. Весьма перспективной оказалась концепция, предложенная в начале XXI века в РТУ МИРЭА И.М. Макаровым с соавторами [1]. Обобщая многолетний опыт исследований в области нечетких САУ и, в частности, результаты исследований, приведенных в работах [1–6], можно констатировать следующее:

1. НЛВ позволяет синтезировать логико-лингвистические модели управления для сложных объектов.

2. Несмотря на кажущуюся сложность формализма НЛВ установлено и обосновано, что регуляторы, построенные по данной технологии – нечеткие регуляторы (НР) – являются по существу нелинейными, т.е. реализуют нелинейное преобразование, параметры которого могут незначительно меняться при изменении технологии НЛВ (Мамдани, Сугено и др.).
3. Характер нелинейного преобразования в НР однозначно определяет параметры входных логико-лингвистических переменных.

Представление НР как нелинейного элемента САУ открывает широкую перспективу для привлечения к исследованию интеллектуальных САУ традиционных методов исследования нелинейных систем, принятых в ТАУ и модифицированных с учетом специфики и характера нелинейных преобразований.

ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА САУ С НР

Рассмотрим нечеткую логическую систему с одной входной (E) и одной выходной (U) лингвистическими переменными с областями рассуждения на $X_E \subseteq \mathbb{R}$ и $Y_U \subseteq \mathbb{R}$, для которых заданы соответствующие терм-множества T_E и T_U , причем каждое значение лингвистической переменной из базового терм-множества задается нормальным нечетким множеством $A_i^E = \{(\mu_A(e), e) | e \in X_E\}$ и $A_i^U = \{(\mu_A(u), u) | u \in X_U\}$. В настоящее время среди моделей НЛВ активно применяются модели Мамдани, Ларсена, Такаги – Сугено и Цукамото, имеющие свои достоинства и недостатки [7], а нечеткое преобразование в результате (независимо от типа этих моделей) может быть представлено как определенное нелинейное отображение $f: X_E \rightarrow Y_U$.

Несмотря на это, большинство разработчиков нечетких систем управления к настоящему времени сформулировали некоторые общие принципы построения НР, а именно:

1. Количество нечетких множеств в базовых терм-множествах: 5–7.
2. Терм-множество должно содержать, по крайней мере, по одному нечеткому множеству, задаваемому функциями принадлежности (ФП) классов L и γ для ограничения величины управления, что связано с физическими особенностями САУ.

3. Симметричность расположения ФП относительно центральной ФП для обеспечения симметричности процесса регулирования при отклонениях состояния системы от положения равновесия.

В зависимости от способа обработки входных переменных в работе [1] предложено разделение НР на I и II роды. В данной статье рассматриваются САУ с наиболее популярными НР I рода с моделью НЛВ по Такаги – Сугено как наиболее перспективной.

Во-первых, это связано с облегченной процедурой дефазификации, представляющей собой расчет средневзвешенного значения, что требует существенно меньше аппаратных ресурсов и процессорного времени управляющего контроллера, чем другие методы. Во-вторых, при соответствующей организации базы знаний реализуемое нечеткой моделью отображение будет являться кусочно-линейной функцией, что существенно упрощает как анализ, так и синтез нечетких САУ. Рассмотрим последнее обстоятельство подробнее.

На рис. 1 представлен фрагмент нечеткой системы, у которой на некотором интервале рассуждения определены два нечетких множества A_{i-1}^E и A_i^E , задаваемые ФП класса t тройками $\{a_{i-1}, b_{i-1}, c_{i-1}\}$ и $\{a_i, b_i, c_i\}$, соответственно.

Получим выражение для отображения f в диапазоне входных воздействий $[b_{i-1}, b_i]$. Пусть база правил содержит два продукционных правила, вида:

1. Если E есть A_{i-1}^E , то $U = u_{i-1}^*$,
2. Если E есть A_i^E , то $U = u_i^*$,

где $u_{i-1}^* \equiv \text{const}$, $u_i^* \equiv \text{const}$.

В этом случае на этапе фаззификации значения степени принадлежности лингвистической переменной E нечетким множествам A_{i-1}^E и A_i^E определяется как:

$$\mu_{i-1}(e) = \frac{c_{i-1} - e}{c_{i-1} - b_{i-1}}, \quad \mu_i(e) = \frac{e - a_i}{b_i - a_i}. \quad (1)$$

В соответствии с процедурой НЛВ Такаги – Сугено и принятыми ограничениями на значения параметров ФП выходная переменная определяется как:

$$\begin{aligned} u_i(e) &= \frac{\mu_{i-1} u_{i-1}^* + \mu_i u_i^*}{\mu_{i-1} + \mu_i} = \\ &= \left(\frac{b_i - e}{b_i - b_{i-1}} u_{i-1}^* + \frac{e - b_{i-1}}{b_i - b_{i-1}} u_i^* \right) \div \left(\frac{b_i - e}{b_i - b_{i-1}} + \frac{e - b_{i-1}}{b_i - b_{i-1}} \right) = \\ &= \frac{u_i^* - u_{i-1}^*}{b_i - b_{i-1}} e + \frac{b_i u_{i-1}^* - b_{i-1} u_i^*}{b_i - b_{i-1}}. \end{aligned} \quad (2)$$

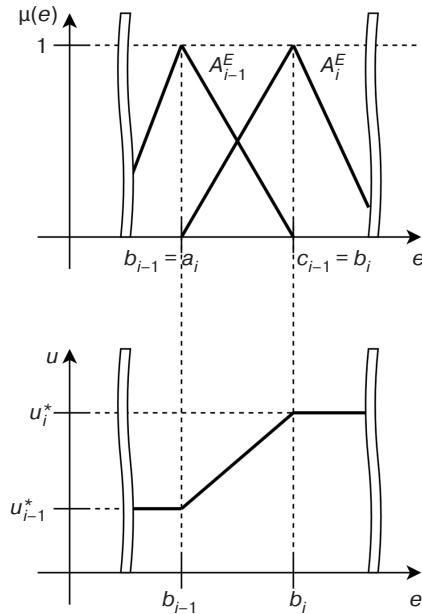


Рис. 1. Связь параметров ФП с видом нелинейного отображения

Таким образом, на интервале $[b_{i-1}, b_i]$ отображение f представляет собой линейную функцию, причем ее область определения задается расположением вершин соседних ФП, а область значения – величиной заключений базы правил.

Пользуясь результатами приведенного анализа, нечеткую САУ, построенную в соответствии с изложенными выше принципами, можно представить как нелинейную систему, у которой статическая характеристика НР имеет кусочно-линейную характеристику (рис. 2). Таким образом, создана возможность всестороннего анализа динамики нечеткой САУ с позиции теории нелинейных систем с учетом особенности нелинейного преобразования.

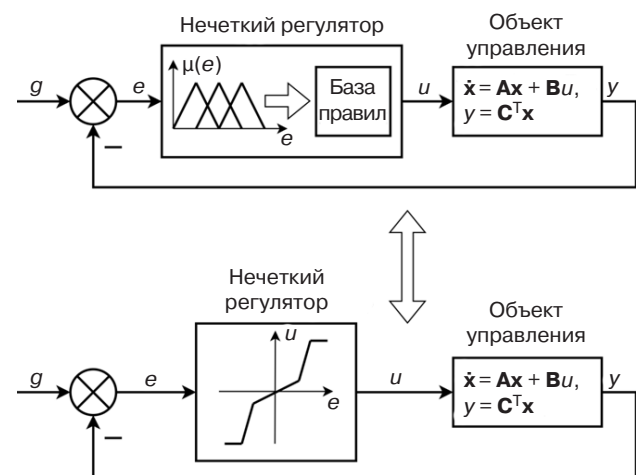


Рис. 2. Преобразование интеллектуальной САУ с НР к нелинейной САУ. g – задающее воздействие, u – управляющее воздействие, y – выход объекта управления, $\mathbf{x}$ – вектор состояния, $\mathbf{A}$ – матрица системы, $\mathbf{B}$ – матрица управления, $\mathbf{C}$ – матрица выхода

К настоящему времени развиваются различные подходы к анализу устойчивости систем с НР. Как отмечается в [5], несмотря на активное появление новых методов, наибольшую популярность приобрели второй метод Ляпунова [8, 9] и критерий абсолютной устойчивости [10, 11]. Для систем с одной входной и одной выходной величиной (Single Input Single Output, SISO) рекомендуется использовать критерий Попова и круговой критерий, в то время как для систем с множеством входов и выходов (Multiple Input Multiple Output, MIMO) наиболее подходящими являются методы, основанные на критерии гиперустойчивости, поскольку эти подходы обеспечивают строгую математическую базу для оценки устойчивости.

На фоне достаточно большого количества работ по устойчивости нечетких систем явно ощущается отсутствие удобных инженерных методик оценки качественных показателей таких систем, как быстродействие и перерегулирование. Такой подход к задаче более конструктивен, поскольку при достижении необходимого уровня качества САУ автоматически решается и вопрос устойчивости. Тем не менее, анализ существующих исследований показывает, что данная проблема недостаточно изучена и проработана.

Помимо аналитических методов исследования нечетких САУ, на данный момент широкую популярность получили подходы, основанные на численных оптимизационных алгоритмах, включая генетические алгоритмы [12, 13], методы, связанные с поведением роя частиц [13, 14], градиентный спуск [15, 16] и прочие. Хотя эти методы отличаются высокой производительностью и способны в автоматическом режиме определять параметры НР, их применение в практических инженерных целях осложняется рядом факторов. Прежде всего, для эффективного использования этих методик необходимо точно определить функцию качества, что представляет собой сложную задачу. Кроме того, алгоритмы не предоставляют инструкции по дополнительной настройке параметров НР после их вычисления, исходя из заданных критериев качества.

Приведенный анализ показывает, что с учетом очевидной перспективы нечетких систем и актуальности внедрения НР в широкий спектр систем управления промышленного и специального назначения, назрела необходимость создания новых подходов к исследованию динамики таких систем, основанных на традиционных методах, принятых в ТАУ. Удобная платформа для этого создается на основе предложенной концепции, при которой нечеткая САУ может рассматриваться как нелинейная.

В качестве исходных показателей качества удобно взять аналоги известных показателей качества линейных САУ – «степени устойчивости» как показателя скорости затухания переходного процесса и «степени

колебательности» как показателя затухания колебаний. За счет рассмотрения НР с позиции ее статической характеристики удастся адаптировать известные методы анализа и синтеза нелинейных САУ и, в частности, круговой критерий устойчивости Якубовича. Как показано в работе [17], за счет применения данного критерия к «смещенной» амплитудно-фазовой частотной характеристике (АФЧХ) линейной части удастся определить секторные ограничения на нелинейное преобразование, обеспечивающие заданную «степень устойчивости» нечеткой САУ, а также гарантирующие абсолютную устойчивость положения равновесия и процессов. С учетом этого, крайне перспективным представляется расширение данного метода с целью учета требований по «степени колебательности» и точности нечеткой САУ.

АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ НР I РОДА НА ОСНОВЕ КОСВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Модель нечеткой системы по аналогии с описанием нелинейных систем, принятым в ТАУ, можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \\ u &= f(y), \\ y &= \mathbf{C}^T \mathbf{x},\end{aligned}\tag{3}$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^1$, $f(y)$ – скалярная функция, являющаяся статической характеристикой «вход-выход» НР и принадлежащая классу $(K_1; K_2)$, т.е. удовлетворяющая неравенству [2]:

$$K_1 \leq \frac{df(y)}{dy} \leq K_2.\tag{4}$$

Ставится задача синтеза соответствующей базы знаний НР, обеспечивающего абсолютную устойчивость процессов в нечеткой САУ и качественные показатели переходного процесса – «степень устойчивости», «степень колебательности» и точность.

Для дальнейшего исследования удобно воспользоваться «смещенной» $\bar{W}(j\omega - \eta)$ и «расширенной» $\hat{W}(j\omega - m\omega)$ АФЧХ линейной части, где $W(j\omega) = \mathbf{C}^T(j\omega\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$, η – аналог «степени устойчивости», m – аналог «степени колебательности». На рис. 3а и 3б представлено семейство «смещенных» ($\eta_1 > \eta_0 > 0$) и «расширенных» ($m_1 > m_0 > 0$) АФЧХ линейной части 3-го порядка, соответственно. Следует обратить внимание на характерное изменение «смещенной» АФЧХ линейной части при $\eta = \eta_0$ вследствие перехода одного из полюсов $W(s)$ в правую комплексную полуплоскость.

Пусть перед нечеткой системой управления стоит требование обеспечить быстродействие не более, чем

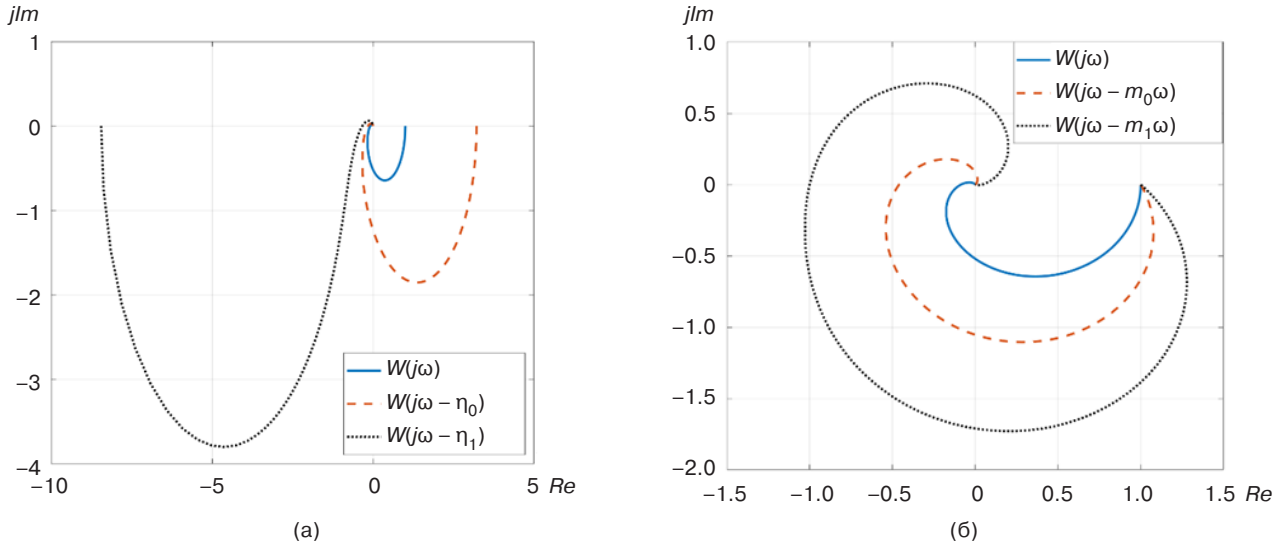


Рис. 3. Семейство «смещенных» (а) и «расширенных» (б) АФЧХ линейной части

время затухания экспоненты $e^{-n_0 t}$, причем n_0 выбрано таким, что степень неустойчивости (r) «смещенной» линейной части $\bar{W}(j\omega - \eta)$ равна единице.

Используя модификацию кругового критерия, предложенную в [17], можно сформулировать следующее достаточное условие: нечеткая система абсолютно устойчива в классе $(K_1^S; K_2^S)$ и имеет степень устойчивости не менее η , если «смещенная» АФЧХ линейной части $\bar{W}(j\omega - \eta)$ охватывает окружность с центром на вещественной оси в точке $-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{K_1^S} + \frac{1}{K_2^S}\right)$, проходящей через точки $-\frac{1}{K_1^S}$ и $-\frac{1}{K_2^S}$, также принадлежащие действительной оси, r раз.

Для обеспечения заданной степени колебательности m достаточно, чтобы «расширенная» АФЧХ располагалась вне вышеобозначенной окружности. Причем, если требуемая «степень колебательности» обеспечивается в секторе $(K_1^O; K_2^O)$, то, учитывая результаты, полученные исходя из заданной «степени устойчивости», в секторе $\{\max(K_1^O; K_1^S); \min(K_2^O; K_2^S)\}$ будут обеспечиваться оба требования по качеству. Таким образом, рассматривая нечеткую САУ как нелинейную и применяя круговой критерий Якубовича, удастся определить параметры K_1 и K_2 нелинейного преобразования и соответствующие параметры настройки НР.

Наконец, остановимся на вопросе обеспечения требуемой точности нечеткой САУ. Поскольку ошибка регулирования системы в установившемся режиме определяется участком статической характеристики вблизи положения равновесия, то выбор коэффициента усиления K_1^a определяется из требования желаемой точности (ассигасу) во всем диапазоне возмущающих воздействий f . В работе [18]

показано, что для статических линейных частей ошибка в установившемся режиме в диапазоне возмущающих воздействий $f \leq \frac{b_1(1 + K_1^a K_{лч})}{K_{лч}}$ определяется как:

$$e_{уст} = \frac{f K_{лч}}{1 + K_{лч} K_1^a}, \quad (6)$$

где b_1 – правая граница участка статической характеристики с коэффициентом усиления K_1^a , $K_{лч} = \lim_{\omega \rightarrow 0} W(j\omega)$.

Из (6) нетрудно видеть, что, если известна максимальная величина возмущающего воздействия $f_M = \sup(f)$ и задано допустимое значение ошибки регулирования e_d , то требуемое значение коэффициента усиления K_1^a и граница участка b_1 определяются как:

$$K_1^a = \frac{f_M K_{лч} - e_d}{K_{лч} e_d}, \quad (7)$$

$$b_1 \geq \frac{f_M K_{лч}}{1 + K_{лч} K_1^a}. \quad (8)$$

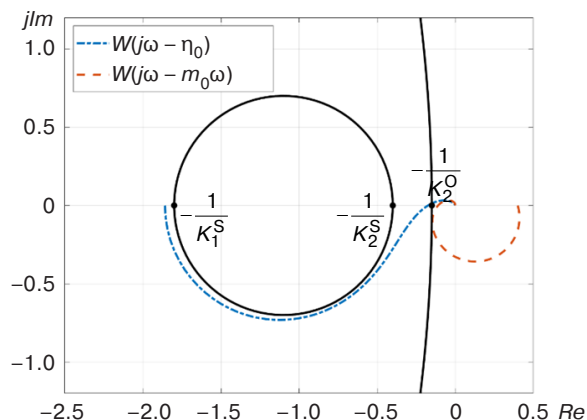
Таким образом, в секторе $(\max\{\max\{K_1^O, K_1^S\}, K_1^a\}; \min\{K_2^O, K_2^S\})$, гарантирующем абсолютную устойчивость нечеткой САУ, выполняется условие обеспечения требуемых показателей качества переходных процессов и ошибки в установившемся режиме.

Рассмотрим пример синтеза параметров НР I рода для задачи стабилизации положения равновесия нечеткой САУ с линейной частью 3-го порядка с частотной характеристикой $W(j\omega)$. В соответствии с методикой, изложенной выше, на рис. 4 приведены необходимые построения. Из них следует, что:

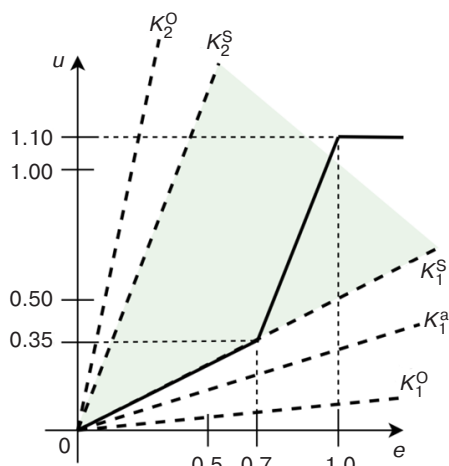
- требуемое значение η_0 обеспечивается, если характеристика НР располагается в секторе (0.6; 2.5);

- требуемое значение m_0 обеспечивается в секторе $(0.05; 6.1)$.

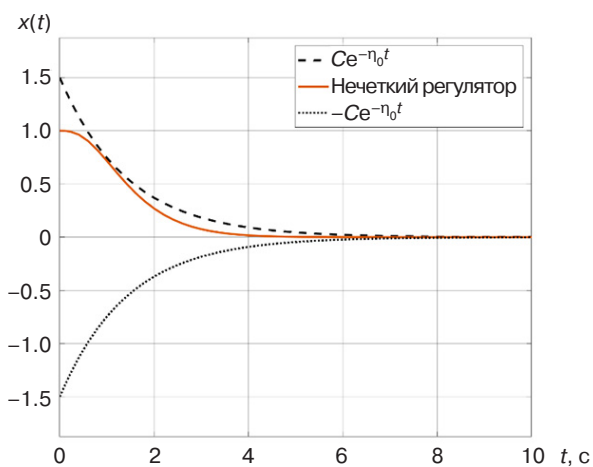
Если дополнительно учесть требование по ошибке в установившемся режиме и (7), то окончательно искомый сектор будет соответствовать рис. 4б. На рис. 4в представлен переходной процесс $x(t)$ в нечеткой САУ, где НР I рода имеет синтезированную нелинейную характеристику.



(а)



(б)



(в)

Рис. 4. Круговой критерий Якубовича (а), секторы абсолютной устойчивости с нелинейной характеристикой (б) и переходной процесс в САУ (в)

На основе полученного нелинейного преобразования НР и исходя из приведенных выше рекомендаций по организации структуры базы знаний, нетрудно построить соответствующее ее наполнение:

- поскольку синтезированное нелинейное преобразование имеет 4 точки изменения коэффициента усиления, терм-множество T_E для лингвистической переменной ошибки E будет содержать 5 нечетких множеств $T_E = \{A_0, A_1, A_2, A_3, A_4\}$;
- ФП, задающие нечеткие множества A_0 и A_4 , принадлежат классам L и γ , соответственно (в силу ограничения выходного сигнала);
- остальные ФП принадлежат классу t .

Как было показано ранее, область определения i -го кусочно-линейного участка статической характеристики регулятора зависит от взаимного расположения соседних ФП, а область значений – от величин заключений соответствующих правил из базы правил. Пробегая по всей области определения нелинейной характеристики (рис. 4б) и учитывая ее симметричность относительно начала координат, нетрудно определить параметры ФП (рис. 5) входной переменной, а также значения ФП выходной переменной, заложенные в базу правил:

- ЕСЛИ E есть A_0 , ТО $u = 1.1$;
- ЕСЛИ E есть A_1 , ТО $u = 0.35$;
- ЕСЛИ E есть A_2 , ТО $u = 0$;
- ЕСЛИ E есть A_3 , ТО $u = -0.35$;
- ЕСЛИ E есть A_4 , ТО $u = -1.1$.

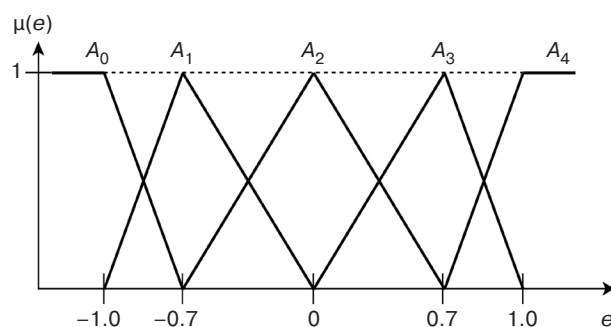


Рис. 5. Расположение функций ФП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе развивается концепция, предложенная Макаровым с соавторами, по которой нечеткое преобразование по Заде, реализуемое в контуре САУ НР I рода, есть, по существу, нелинейное преобразование. В случае использования модели Сугено оно является кусочно-линейным. Для такой нечеткой системы с привлечением методов теории нелинейных САУ решена задача исследования динамики в удобной для инженера-разработчика форме и предложена методика, которая обеспечивает определение не только гарантированной области устойчивости,

но и требуемые показатели качества процесса управления.

Очевидно, что полученные результаты справедливы и при использовании в системах управления моделей НЛВ Мамдани, Ларсена и Цукамото. Действительно, поскольку нелинейные преобразования, соответствующие этим моделям, имеют гладкий характер, то они могут быть аппроксимированы кусочно-линейными участками и, таким образом, решение задачи сводится к предложенной выше методике. При этом линейный участок аппроксимации

в начале координат (с малым наклоном) выбирается исходя из требуемой ошибки в установившемся режиме, а наклон крутого участка – исходя из требований по качеству в соответствии с критерием Якубовича. Такой подход позволяет решать задачи как анализа, так и синтеза нечетких САУ с регулятором I рода.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров И.М., Лохин В.М. *Интеллектуальные системы автоматического управления*. М.: Физматлит; 2001. 576 с. ISBN 978-5-9221-0162-2
2. Поспелов Д.А. (ред.). *Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта*. М.: Наука; 1986. 312 с.
3. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. *Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления*. М.: Наука; 2006. 333 с.
4. Makarov I.M., Lokhin V.M. *Artificial Intelligence and Complex Objects Control*. Lewiston: Edwin Mellen Press; 2000. 404 p.
5. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. Berlin: Physica Heidelberg; 2001. 728 p.
6. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Ситников М.С. Устойчивость интеллектуальных систем автоматического управления. *Информационные технологии*. 2013;2:1–32.
7. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы*: пер. с пол. М.: Горячая линия–Телеком; 2006. 452 с.
8. Hashemi S.M., Botez R. Lyapunov-based Robust Adaptive Configuration of the UAS-S4 Flight Dynamics Fuzzy Controller. *The Aeronautical Journal*. 2022;126(1301):1187–1209. <https://doi.org/10.1017/aer.2022.2>
9. Gandhi R., Adhyaru D. Takagi-Sugeno fuzzy regulator design for nonlinear and unstable systems using negative absolute eigenvalue approach. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2020;7(2):482–493. <https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911444>
10. Lan L., Tiem N., Co Nhu V. Absolute Stability for a Class of Takagi-Sugeno Fuzzy Control Systems. In: *3rd International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE)*. 2020. P. 47–51. <https://doi.org/10.1109/RCAE51546.2020.9294352>
11. Sakly A., Zahra B., Benrejeb M. Stability Study of Mamdani's Fuzzy Controllers Applied to Linear Plants. *Studies in Informatics and Control*. 2008;17(4):441–452.
12. Siddikov I., Porubay O., Rakhimov T. Synthesis of the neuro-fuzzy regulator with genetic algorithm. *Int. J. Electric. Comput. Eng. (IJECE)*. 2024;14(1):184–191. <http://doi.org/10.11591/ijece.v14i1.pp184-191>
13. Hamza M., Yap I., Choudhury I. Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization Based Cascade Interval Type 2 Fuzzy PD Controller for Rotary Inverted Pendulum System. *Math. Probl. Eng.* 2015;2015(6). <https://doi.org/10.1155/2015/695965>
14. Mahmoodabadi M., Babak N. Robust fuzzy linear quadratic regulator control optimized by multi-objective high exploration particle swarm optimization for a 4 degree-of-freedom quadrotor. *Aerosp. Sci. Technol.* 2019;97:105598. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105598>
15. Sakalli A., Beke A., Kumbasar T. Gradient Descent and Extended Kalman Filter based self-tuning Interval Type-2 Fuzzy PID controllers. In: *2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. 2016. P. 1592–1598. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737880>
16. Islam S.U., Zeb K., Kim S. Design of Robust Fuzzy Logic Controller Based on Gradient Descent Algorithm with Parallel-Resonance Type Fault Current Limiter for Grid-Tied PV System. *Sustainability*. 2022;14(19):12251. <https://doi.org/10.3390/su141912251>
17. Быковцев Ю.А. Синтез нечеткого регулятора на основе оценки степени устойчивости системы управления. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2022;23(6):295–301. <https://doi.org/10.17587/mau.23.295-301>
18. Bykovtsev Y.A., Lokhin V.M. Estimation of the accuracy of a control system with a fuzzy PID controller based on the approximation of the static characteristic of the controller. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021;22(12):619–624. <https://doi.org/10.17587/mau.22.619-624>

REFERENCES

1. Makarov I.M., Lokhin V.M. *Intellektual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya (Intelligent Automatic Control Systems)*. Moscow: Fizmatlit; 2001. 576 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-0162-2
2. Pospelov D.A. (Ed.). *Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta (Fuzzy Sets in Control Models and Artificial Intelligence)*. Moscow: Nauka; 1986. 312 p. (in Russ.).

3. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P. *Iskusstvennyi intellekt i intellektual'nye sistemy upravleniya (Artificial Intelligence and Intelligent Control Systems)*. Moscow: Nauka; 2006. 333 p. (in Russ.).
4. Makarov I.M., Lokhin V.M. *Artificial Intelligence and Complex Objects Control*. Lewiston: Edwin Mellen Press; 2000. 404 p.
5. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. Berlin: Physica Heidelberg; 2001. 728 p.
6. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., Sitnikov M.S. Stability of intellectual automatic control systems. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2013;2:1–32 (in Russ.).
7. Rutkowska D., Pilinski M., Rutkowski L. *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy (Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems)*: transl. from Pol. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom; 2006. 452 p. (in Russ.). [Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L. *Sieci Neuronowe, Algorytmy Genetyczne i Systemy Rozmyte*. Warszawa; Łódź: Wydawnictwo Naukowe PWN. 2004.]
8. Hashemi S.M., Botez R. Lyapunov-based Robust Adaptive Configuration of the UAS-S4 Flight Dynamics Fuzzy Controller. *The Aeronautical Journal*. 2022;126(1301):1187–1209. <https://doi.org/10.1017/aer.2022.2>
9. Gandhi R., Adhyaru D. Takagi-Sugeno fuzzy regulator design for nonlinear and unstable systems using negative absolute eigenvalue approach. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2020;7(2):482–493. <https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911444>
10. Lan L., Tiem N., Co Nhu V. Absolute Stability for a Class of Takagi-Sugeno Fuzzy Control Systems. In: *3rd International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE)*. 2020. P. 47–51. <https://doi.org/10.1109/RCAE51546.2020.9294352>
11. Sakly A., Zahra B., Benrejeb M. Stability Study of Mamdani's Fuzzy Controllers Applied to Linear Plants. *Studies in Informatics and Control*. 2008;17(4):441–452.
12. Siddikov I., Porubay O., Rakhimov T. Synthesis of the neuro-fuzzy regulator with genetic algorithm. *Int. J. Electric. Comput. Eng. (IJECE)*. 2024;14(1):184–191. <http://doi.org/10.11591/ijece.v14i1.pp184-191>
13. Hamza M., Yap I., Choudhury I. Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization Based Cascade Interval Type 2 Fuzzy PD Controller for Rotary Inverted Pendulum System. *Math. Probl. Eng.* 2015;2015(6). <https://doi.org/10.1155/2015/695965>
14. Mahmoodabadi M., Babak N. Robust fuzzy linear quadratic regulator control optimized by multi-objective high exploration particle swarm optimization for a 4 degree-of-freedom quadrotor. *Aerosp. Sci. Technol.* 2019;97:105598. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105598>
15. Sakalli A., Beke A., Kumbasar T. Gradient Descent and Extended Kalman Filter based self-tuning Interval Type-2 Fuzzy PID controllers. In: *2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. 2016. P. 1592–1598. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737880>
16. Islam S.U., Zeb K., Kim S. Design of Robust Fuzzy Logic Controller Based on Gradient Descent Algorithm with Parallel-Resonance Type Fault Current Limiter for Grid-Tied PV System. *Sustainability*. 2022;14(19):12251. <https://doi.org/10.3390/su141912251>
17. Bykovtsev Y.A. Synthesis of a Fuzzy Controller According to the Degree of Stability of the Control System. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2022;23(6):295–301 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.23.295-301>
18. Bykovtsev Y.A., Lokhin V.M. Estimation of the accuracy of a control system with a fuzzy PID controller based on the approximation of the static characteristic of the controller. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021;22(12):619–624. <https://doi.org/10.17587/mau.22.619-624>

Об авторах

Быковцев Юрий Алексеевич, к.т.н., доцент, кафедра проблем управления, Институт искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д 78). E-mail: bykovtsev@mirea.ru. Scopus Author ID 57302607300, ResearcherID KRQ-5339-2024, SPIN-код РИНЦ 9961-4437, <https://orcid.org/0009-0003-6671-5674>

Лохин Валерий Михайлович, д.т.н., профессор, кафедра проблем управления, Институт искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Лауреат государственной премии РФ в области науки и техники. Лауреат премии Правительства РФ в области образования. Член научного Совета РАН по робототехнике и мехатронике. Заслуженный деятель науки РФ. E-mail: kpu-mirea@yandex.ru. Scopus Author ID 6602931640, <https://orcid.org/0000-0001-6708-9124>

About the Authors

Yuri A. Bykovtsev, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bykovtsev@mirea.ru. Scopus Author ID 57302607300, ResearcherID KRQ-5339-2024, RSCI SPIN-code 9961-4437, <https://orcid.org/0009-0003-6671-5674>

Valery M. Lokhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Laureate of the State Prize of the Russian Federation in Science and Technology. Laureate of the State Prize of the Russian Federation in Education. Member of the Scientific Council on Robotics and Mechatronics of the Russian Academy of Sciences. Honored Worker of Science of the Russian Federation. E-mail: kpu-mirea@yandex.ru. Scopus Author ID 6602931640, <https://orcid.org/0000-0001-6708-9124>