

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.09

УДК 681.51:681

В.С. НикулинПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**МОДИФИКАЦИЯ СЕТИ ANFIS**

Развитие авиационной промышленности и летательных аппаратов напрямую зависит реализации систем автоматического управления (САУ) газотурбинных двигателей (ГТД). Создание распределенной САУ авиадвигателя является сложной задачей, требующей широкого комплекса исследовательских и проектных работ, так как ГТД является нелинейным объектом с неопределенным математическим описанием (недетерминированный объект). Цифровое управление ГТД не исключает проблем, связанных с неопределенностью управления параметрами объекта при обычной работе и при наличии помех. Необходимо брать во внимание инерционные свойства двигателя, встроенных эталонных моделей, а также обеспечивать требуемый запас устойчивости.

Цель исследования: синтез нового алгоритма построения адаптивного нечеткого регулятора с применением нейронечеткой технологии. **Методы:** предлагается новый подход построения адаптивных нейронечетких регуляторов для управления недетерминированными объектами в системе MISO. Рассмотрена модификация адаптивных нейронечетких регуляторов на базе Anfis-сети, где применен адаптивный фаззификатор с треугольными функциями принадлежности, вершины которых перемещаются согласно среднеарифметическому значению «пройденного» пути, а основания соответствуют нормированному интервалу 0–1. Нечеткая композиция выполнена с помощью полиномов Сугено с настройкой по методу наименьших квадратов и дефаззификация по методу средневзвешенного значения. **Результаты:** разработанная модификация построения адаптивного нейронечеткого регулятора на базе Anfis-сети, сети с сохранением адаптации к внешним возмущениям в системе MISO обеспечивает сокращение времени переходного процесса более 9,5 % по сравнению с Anfis-сетью до модификации, а также уменьшение перерегулирования для отдельных контуров в ходе эксперимента с системой автоматического управления авиационного газотурбинного двигателя. **Практическая значимость:** результаты выполненных исследований могут быть использованы для построения адаптивных нейронечетких регуляторов с целью управления нестационарными объектами и объектами с неполным (недостаточным) математическим описанием, в том числе в управлении камерой сгорания ГТД. Это позволяет существенно снизить неопределенность в работе камеры сгорания, обеспечив минимум выделения вредных веществ и гарантированную тягу летательного аппарата.

Ключевые слова: нейронечеткое управление, Anfis-сеть, метод наименьших квадратов, полиномы Сугено, метод средневзвешенного значения, фаззификатор, дефаззификатор.

V.S. Nikulin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MODIFICATION OF THE ANFIS NETWORK

The development of the aviation industry and aircraft directly depends on the implementation of automatic control systems (ACS) of gas turbine engines (GTE). The creation of a distributed ACS for an aircraft engine is a complex task that requires a wide range of research and design work, since the gas turbine engine is a non-linear object with an indefinite mathematical description (non-deterministic object). The digital control of the gas turbine engine does not exclude the problems associated with the uncertainty of controlling the parameters of the object during normal operation and in the presence of interference. It is necessary to take into account the inertial properties of the engine, built-in reference models, and also provide the required stability margin. **Research goal:** Synthesis of a new algorithm for constructing an adaptive fuzzy controller using neuro-fuzzy technology. **Methods:** A new approach is proposed for constructing adaptive neuro-fuzzy controllers to control non-deterministic objects in the MISO system. A modification of adaptive neuro-fuzzy controllers based on the Anfis-network is considered, where an adaptive fuzzifier with triangular membership functions is used, the vertices of which move according to the arithmetic mean of the "passed" path, and the bases correspond to the normalized interval 0–1. The fuzzy composition was performed using Sugeno polynomials with least squares tuning and defuzzification using the weighted average method. **Results:** The developed modification of the construction of an adaptive neuro-fuzzy controller based on the Anfis-network, a network with preservation of adaptation to external disturbances in the MISO system, provides a reduction in the transition process time by more than 9.5% compared to the Anfis-network before modification, as well as a decrease in overshoot for individual circuits during the experiment with the automatic control system of an aircraft gas turbine engine. **Practical significance:** the results of the performed research can be used to build adaptive neuro-fuzzy controllers to control non-stationary objects and objects with an incomplete (insufficient) mathematical description, including in the control of the combustion chamber. This can significantly reduce the uncertainty in the operation of the combustion chamber, ensuring a minimum release of harmful substances and guaranteed thrust of the aircraft.

Keywords: Neuro-fuzzy control, Anfis network and its applications, least squares method, Sugeno polynomials, weighted average method, fuzzifier, defuzzifier.

Введение

В сложных системах автоматического регулирования (САУ), где отсутствует точное математическое описание регулируемого объекта и процесса в целом при наличии неопределенностей, широко применяется нечеткое, нейронечеткое, нейронное управления. Каждое из них имеет свои достоинства и недостатки [1].

Нечеткие регуляторы не требуют обучения и, как следствие, обучающих выборок, являются прозрачными в настройке. Однако есть трудности с априорным (неполным) определением правил базы знаний и построения функции принадлежности для каждого значения лингвистических переменных. При этом параметры функций принадлежности выбираются субъективно, они могут быть не вполне адекватны реальной действительности [2, 3].

Исследованиям нейронечеткого подхода с алгоритмами адаптации посвящены работы Ю.Н. Хижнякова (нейронечеткий регулятор), Е.А. Муравьевой (модельно-предикатное управление), В.И. Васильева (адаптивное управление) и др.

Основным преимуществом нейросетевого подхода на базе персептрона – возможность выявления закономерностей в данных, их обобщение. Недостатком является невозможность непосредственно (в явном виде, а не в виде вектора весовых коэффициентов межнейронных связей) представить функциональную зависимость между входом и выходом исследуемого объекта [3]. Среди других недостатков – требование для персептрона большого числа репрезентативных выборок и циклов обучения (на порядок больше числа синапсов искусственной нейронной сети (ИНС), забывание «старых» примеров, определение размеров и структуры сети [3–5].

Рассматриваемые подходы на основе нейронной сети и нечеткой логики взаимно дополняют друг друга и лежат в основе принципа «мягких» вычислений [6]. Они сводятся к следующему: терпимость к нечеткости и частичной истинности использования данных для достижения интегрируемости, гибкости и низкой стоимости решений.

Нечетко-нейронное (гибридное) управление реализуется нечетко-нейронными регуляторами (ННР) разных вариантов реализации. В основе ННР лежит жесткая архитектура, включающая блок фаззификации, базу знаний, блок нечеткого вывода и блок дефаззификации. Рассмотрим достоинства и недостатки вариантов реализации ННР.

1. Адаптивный ННР, содержащий адаптивный фаззификатор на базе сигмоидных функций принадлежности с применением метода последовательного обучения [7], базу знаний, нечеткую импликацию на базе нечетких нейронов типа «И» (без активационных функций), нечеткую композицию для формирования результирующей функции принадлежности по Мамдани, либо Ларсену, и дефаззификатор с применением метода центраида. Обучение ННР отсутствует. Возможно применение в системе MISO (много входов – один выход). Недостатком является большой объем вычислительных операций для определения центра тяжести фигуры в блоке дефаззификации, что снижает быстродействие работы регулятора [8].

2. Адаптивный ННР, содержащий адаптивный фаззификатор на базе сигмоидных функций принадлежности с применением метода последовательного обучения [8], базу знаний, нечеткую импликацию на

базе нечетких нейронов типа «И» (без активационных функций) с последующей нормализацией, нечеткую композицию с применением уравнений Сугено и дефаззификатор с применением метода средневзвешенного значения.

Обучение в ННР отсутствует. Недостатком является применение подхода только в системе SISO (один вход – один выход) [9].

3. Адаптивный ННР, имеющий n -входных векторов, проекции которых заданы терм-множеством обобщенных «колокообразных» функций принадлежности (ФП), которые размещены на нормированном интервале $-1 - +1$, содержащий базу знаний, нечеткую импликацию на базе нечетких нейронов типа «И» (без активационных функций с последующей нормализацией, нечеткую композицию с применением полиномов Сугено и дефаззификатор с применением метода средневзвешенного значения [10].

Обучение в ННР выполнено с учителем, где в каждой эпохе параметры «колокообразных» ФП и полиномов Сугено настраиваются по методу наименьших квадратов (МНК) [10]. Применим в системе MISO. Недостаток – требует большого числа выборок для настройки параметров с дальнейшим запоминанием.

4. Адаптивный ННР (Anfis-сеть – Adaptive Network based Fuzzy Inference System), имеющий n -входных векторов, проекции которых заданы терм-множеством обобщенных «колокообразных» ФП, которые размещены на нормированном интервале $-1 - +1$, содержащий базу знаний, нечеткую импликацию на базе нечетких нейронов типа «И» (без активационных функций) с последующей нормализацией, нечеткую композицию с применением полиномов первого порядка Сугено и дефаззификатор с применением метода средневзвешенного значения [11].

Обучение в ННР гибридное и выполнено с учителем, где в каждой эпохе параметры «колокообразных» ФП и полиномов Сугено настраиваются в два этапа. На первом этапе настраиваются коэффициенты полиномов первого порядка Сугено по методу наименьших квадратов (МНК). На втором этапе остаточная невязка передается с выхода сети на входы и методом обратного распространения ошибки (ОРО) при неизменных настройках коэффициентов полиномов Сугено, настраиваются параметры «колокообразных» ФП. Применим в системе MISO. Недостаток – требует большого числа выборок для настройки параметров с дальнейшим запоминанием [12].

5. Представителем нейронечеткого управления является Anfis-сеть с ее модификациями: TSK и Ванга–Менделя. Anfis-сеть представляет адаптивную систему нейронечеткого вывода (для MISO) и реализует нечеткую систему Такаги–Сугено.

При некоторых допущениях можно представить нечеткое управление в форме многослойной (пятислойную) сети с прямым распространением сигналов, что допускает ее обучением алгоритмом ОРО [13]. Процесс вычислений выполняется параллельно и одновременно.

1. Постановка задачи

В работе предлагается новый алгоритм адаптивного ННР с применением нейронечеткой технологии.

Новым в алгоритме является применение метода адаптации. Для каждого входа в блоке фаззификации используется одна треугольная функция принадлежности (терма), основания которой соответствуют нормированному интервалу 0–1 [13, 14]. Вершины терм располагаются согласно среднеарифметическим значениям «пройденного» пути входными переменными [13]. Значение степеней принадлежности (выходы блока фаззификации) определяется сигналами с выхода пропорций (1) [13, 14]. Нечеткая композиция выполнена с применением полиномов Сугено, а дефаззификация – с применением метода средневзвешенного значения [14]. Обучение ННР выполнено с учителем. Преимуществом алгоритма является предварительная настройка вершин терм фаззификатора с последующей настройкой коэффициентов полиномов Сугено [15] методом МНК и дальнейшим их запоминанием. Применим в системе MISO [17].

2. Основная часть

Рассмотрим предлагаемый алгоритм построения адаптивного ННР на примере трех входных векторов x_1, x_2, x_3 .

На рис. 1 показана структурная схема адаптивного ННР.

Структурная схема (см. рис. 1) содержит фаззификатор с тремя треугольными термами (по числу входов), нечеткую импликацию на базе трех нечетких нейронов [14–16], блок нечеткой композиции с применением полиномов Сугено, дефаззификатор, преобразующий нечеткую информацию в четкую, по формуле средневзвешенных значений (см. рис. 3).

Диапазоны изменения входов ННР заданы соответственно:

x_1 – изменения в диапазоне ($x_{1\min} - x_{1\max}$); x_2 – изменения в диапазоне ($x_{2\min} - x_{2\max}$); x_3 – изменения в диапазоне ($x_{3\min} - x_{3\max}$).

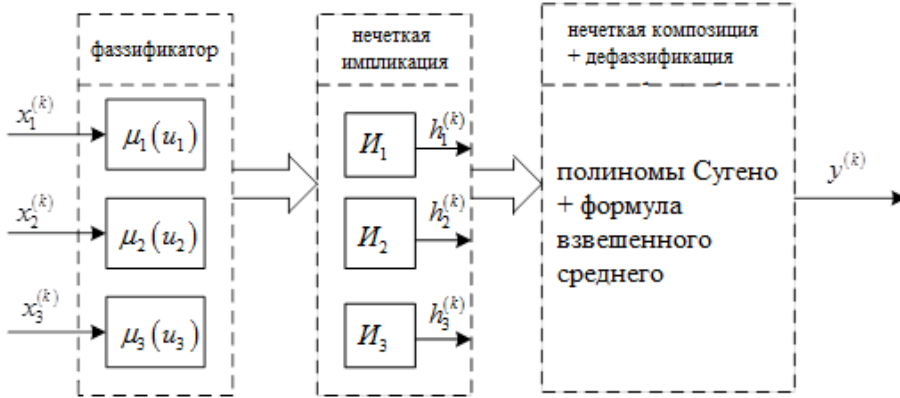


Рис. 1. Структурная схема адаптивного ННР, где $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}$ – входные векторы (k – итерация); $\mu_i(u_i)$ – степени принадлежности нечеткого множества; $h_i^{(k)}$ – выходы нечеткой импликации; $y^{(k)}$ – текущее выходное значение ННР

Вычисления степеней принадлежности по каждой входной переменной фаззификатора выполним с помощью пропорций вида [16, 17]:

$$u_{1i} = \frac{(x_{1i} - x_{1\min})}{(x_{1\max} - x_{1\min})}; \quad u_{2i} = \frac{(x_{2i} - x_{2\min})}{(x_{2\max} - x_{2\min})}; \quad u_{3i} = \frac{(x_{3i} - x_{3\min})}{(x_{3\max} - x_{3\min})}. \quad (1)$$

Математическое описание треугольных терм фаззификатора, основания которых равны интервалу 0–1, выполнено согласно выражениям [16, 17]:

$$\mu_{1i}(u) = \begin{cases} 0, & u \leq 0; \\ \frac{u}{u_1 + 1}, & 0 < u \leq u_1; \\ \frac{1-u}{1-u_1}, & u_1 < u < 1; \\ 0, & u \geq 1; \end{cases} \quad \mu_{2i}(u) = \begin{cases} 0, & u \leq 0; \\ \frac{u}{u_2 + 1}, & 0 < u \leq u_2; \\ \frac{1-u}{1-u_2}, & u_2 < u < 1; \\ 0, & u \geq 1; \end{cases}$$

$$\mu_{3i}(u) = \begin{cases} 0, & u \leq 0; \\ \frac{u}{u_3 + 1}, & 0 < u \leq u_3; \\ \frac{1-u}{1-u_3}, & u_3 < u < 1; \\ 0, & u \geq 1; \end{cases}$$

Расположение вершин треугольных терм вычисляется как среднеарифметическое значение [17]. В качестве примера показано изменение i -входной переменной как «пройденный» путь ранее за пять интервалов времени (параметр настройки).

Ниже приведены формулы расчета среднеарифметического значения вершины термы для x_i – входной переменной [18, 19].

$$b = \begin{cases} \frac{x_{\text{тек}} + x_1^*}{2}, & \text{при } \eta = 2, \\ \frac{x_{\text{тек}} + x_1^* + x_2^*}{3}, & \text{при } \eta = 3, \\ \dots \\ \frac{\sum_{i=0}^{\eta-1} x_i}{\eta}, \end{cases}$$

где η – настройка регулятора; x_0 – текущее значение входного параметра; x_1^* – значение входного параметра с задержкой на 1 такт; x_2^* – значение входного параметра с задержкой на 2 такта; x_i^* – значение входного параметра с задержкой на i тактов;

На рис. 2 представлено расположение функций принадлежности в текущий момент времени фаззификатора ННР [19], где u_i – нормализованные входные величины; x_{ji} – синглтоны (текущие значения входных величин); $\mu_i(u_i)$ – степени принадлежности нечеткого множества;

На рис. 2 показаны степени принадлежности термы $\mu_1(u)$: $\mu(c_{1T})$, $\mu(c_{1лвд})$, $\mu(c_{1нв})$; термы $\mu_2(u)$: $\mu(c_{2T})$, $\mu(c_{2лвд})$, $\mu(c_{2нв})$; и термы $\mu_3(u)$ соответственно: $\mu(c_{3T})$, $\mu(c_{3лвд})$, $\mu(c_{3нв})$.

Далее с помощью нечетких нейронов I_1 , I_2 , I_3 нечеткой импликации вычисляем их выходы (см. рис. 2) [21, 22]:

$$\begin{aligned} I_1: \quad h_1 &= \min [\mu_1(c_{1нв}), \mu_1(c_{1лвд}), \mu_1(c_{1T})]; \\ I_2: \quad h_2 &= \min [\mu_2(c_{2нв}), \mu_2(c_{2лвд}), \mu_2(c_{2T})]; \\ I_3: \quad h_3 &= \min [\mu_3(c_{3нв}), \mu_3(c_{3лвд}), \mu_3(c_{3T})]. \end{aligned}$$

Применение трех нечетких нейронов (без активационных функций) вместо трех нечетких элементов И (T -норма) связано с тем, что необходимо выполнить операции пересечения трех входных переменных, число которых больше двух [22, 23].

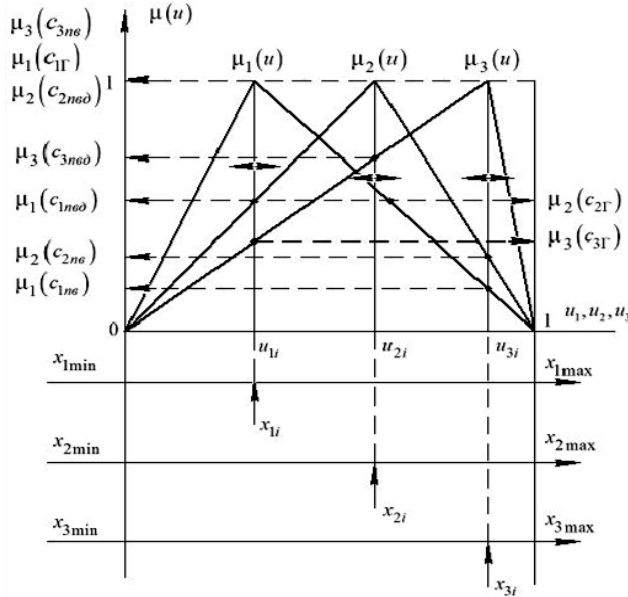


Рис. 2. Текущий момент расположения функций принадлежности терм фаззификатора

На рис. 3 показана расчетная схема формулы средневзвешенного значения для дефаззификации.

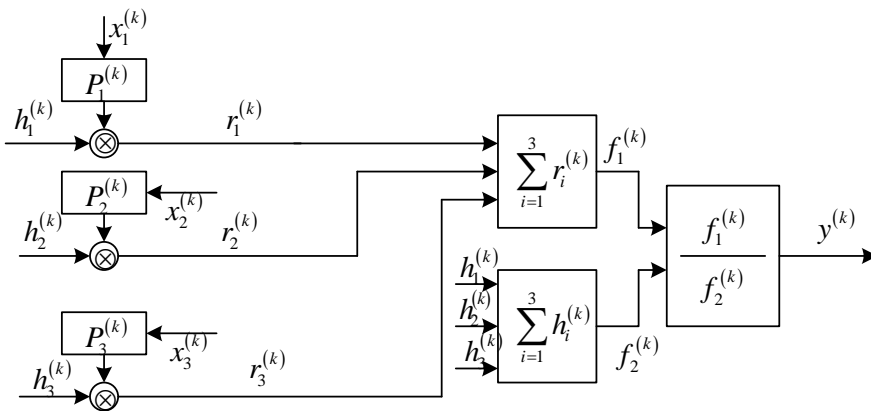


Рис. 3. Расчетная схема формулы средневзвешенного значения для дефаззификации, где $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}$ – входные векторы (k – итерация); $P_i^{(k)}$ – полиномы Сугено; $\mu_i(u_i)$ – степени принадлежности нечеткого множества; $h_i^{(k)}$ – выходы нечеткой импликации; $y^{(k)}$ – текущее выходное значение ННР

Нечеткая композиция выполнена на полиномах Сугено. Ниже дается математический вывод итерационной процедуры настройки коэффициентов полиномов Сугено для k -выборки n входов ННР.

Для полиномов Сугено получим:

$$P_1^{(k)} = c_{10} + \sum_{i=1}^n c_i^{(k)} \cdot x_i^{(k)};$$

$$P_2^{(k)} = c_{20} + \sum_{i=1}^n c_i^{(k)} \cdot x_i^{(k)};$$

...

$$P_n^{(k)} = c_{n0} + \sum_{i=1}^n c_i^{(k)} \cdot x_i^{(k)}.$$

Далее считаем произведение полиномов Сугено на выходы блока нечеткой импликации:

$$r_1^{(k)} = h_1^{(k)} \cdot P_1^{(k)};$$

$$r_2^{(k)} = h_2^{(k)} \cdot P_2^{(k)};$$

...

$$r_n^{(k)} = h_n^{(k)} \cdot P_n^{(k)}.$$

где $h_1^{(k)}, h_2^{(k)}, \dots, h_n^{(k)}$ – выходы блока нечеткой импликации;
 $r_1^{(k)}, r_2^{(k)}, \dots, r_n^{(k)}$ – выходы блока нечеткой композиции.

Рассчитаем выход ННР на k -выборке:

$$y_i^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i^{(k)}}{\sum_{i=1}^n h_i^{(k)}}. \quad (2)$$

Определяем ошибку (невязку) (3):

$$E_i^{(k)} = y_i^{(k)} - y^{(k)}, \quad (3)$$

где $y^{(k)}$ – выход k -выборки.

На основании вышеперечисленного получим рекуррентную формулу итераций:

$$c_i^{(k)}(t+1) = c_i^{(k)}(t) + C \frac{dE_i^{(k)}(t)}{dc_i^{(k)}}, \quad (4)$$

где k – номер текущей выборки (эпохи).

При достижении ошибки (3) меньше 1 % процесс итерации текущей эпохи завершается, а настройки полиномов Сугено запоминаются.

Для исследования предложенного метода построения адаптивного нейронечеткого регулятора на базе Anfis-сети построена модель в среде разработки MatLab/Simulink [24, 26]. Далее приведены исследования, проведенные на модели.

На рис. 4 представлена осциллограмма переходных процессов газотурбинного двигателя (ГТД) (недетерминированного объекта) для Anfis-сети до модификации и с применением предлагаемого адаптивного ННР, где $n_{вд}$ – частота вращения ротора высокого давления, $n_{в}$ – частота вращения ротора вентилятора и T_k – температура за камерой сгорания.

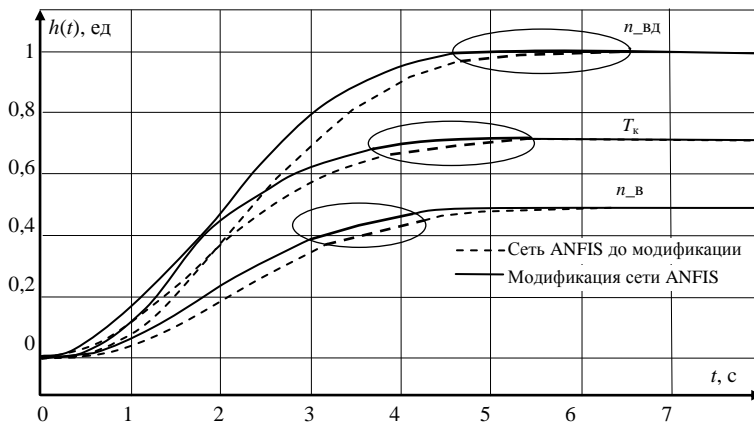


Рис.4. Осциллограмма переходных процессов для нормированных параметров контуров: $n_{вд}$, $n_{в}$ и T_k в процессе работы ГТД

Анализ результатов моделирования показал, что происходит уменьшение времени переходного процесса для параметра $n_{вд}$ с 4,4 с. (Anfis-сеть без модификации) до 4 с., $n_{в}$ с 4,2 с. до 3,5 с., T_k с 4,5 с. до 4,05 с. (в оригинальном регуляторе). Также наблюдается изменение перерегулирования системы для параметра $n_{вд}$ с 1,10 до 1,20 %, а для $n_{в}$ уменьшение – с 0,85 до 0,83 %, и рост перерегулирования для T_k с 0,80 до 0,85 %.

Данные показатели свидетельствуют о том, что предлагаемый оригинальный регулятор обеспечивает сокращение времени переходного процесса более 9,5 % (является достоинством для выбранной САУ, по экспертной оценке). В случае с контурами « $n_{вд}$ » и « T_k » выявлен недостаток в виде роста перерегулирования на 9 %.

Таким образом, результаты выполненных исследований могут быть использованы для построения адаптивных нейронечетких регуляторов с целью управления нестационарными объектами и объектами с неполным (недостаточным) математическим описанием.

Заключение

В работе рассмотрены варианты построения адаптивного нейронечеткого регулятора для управления недетерминированным объектом в системе MISO, определены достоинства и недостатки.

Предложена модификация построения адаптивного нейронечеткого регулятора на базе Anfis-сети, где применен адаптивный фазификатор с треугольными функциями принадлежности, вершины которых перемещаются согласно среднеарифметическому значению «пройденного» пути (исключается субъективность), а основания соответствуют нормированному интервалу 0–1.

Разработанная оригинальная модификация Anfis-сети с сохранением адаптации к внешним возмущениям в системе MISO обеспечивает сокращение времени переходного процесса более 9,5 % по сравнению с Anfis-сетью до модификации, а также уменьшение перерегулирования для отдельных контуров.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы для построения адаптивных нейронечетких регуляторов с целью управления нестационарными объектами и объектами с неполным (недостаточным) математическим описанием, в том числе в управлении камерой сгорания ГТД. Это позволяет существенно снизить неопределенность в работе камеры сгорания, обеспечив минимум выделения вредных веществ и гарантированную тягу летательного аппарата.

Библиографический список

1. Леготкина Т.С., Хижняков Ю.Н. Модификация метода активной адаптации объектов // Нейрокомпьютеры, разработка, применение. – М., 2017. – № 6. – С. 39–44.

2. Леготкина Т.С., Хижняков, Ю.Н. Модификация метода центра триады // Вестник Ижев. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 122–125.

3. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия–Телеком, 2006. – 452 с.

4. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 303 с.
5. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and applications to modeling and control // IEEE Trans. On SMC. – 1985. – 15.– P. 116–132. (Industrial application of fuzzy logic control).
6. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. – СПб: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.
7. Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами: справочник. – Киев: Тэхника, 1990. – 280 с.
8. Пегат А. Нечёткое моделирование и управление: пер. с англ. – М.: Бином, 2009. – 798 с.
9. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
10. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MatLab и FuzzyTech. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – С. 736.
11. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
12. Адаптивный виртуальный измеритель вредных веществ в камере сгорания ГТД с применением нечеткой логики / В.С. Никулин [и др.] // Труды МАИ: электрон. журнал. – 2020. – № 116. – URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=48577>
13. Девятков В.В. Системы искусственного интеллекта: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 352 с. (Сер. Информатика в техническом университете).
14. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем: учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
15. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Нейронечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя // Приборы. – 2010. – № 5. – С. 17–21.
16. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Дефаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2015. – № 9. – С. 32–41.
17. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах: учеб. пособие. – СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. – 244 с.
18. Лихтарников Л.М., Сукачева Т.Г. Математическая логика: курс лекций. Задачник-практикум. – СПб.: Лань, 1999. – 288 с.

19. Синяков А.Н., Шаймарданов Ф.А. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.

20. Zadeh L.A. Outline of a New Approach to Analysis of Complex Systems and Decision Processes // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. SMC-1. – 1973. – P. 28–44.

21. Применение нечеткой логики для создания имитационной модели управляющих действий летчика / Д.В. Верещиков, В.А. Волошин, С.С. Ивашков, Д.В. Васильев // Труды МАИ. – 2018. – № 99. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91926>

22. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления. – М.: Высшая школа, 2002. – 183 с.

23. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. – М.: Горячая линия–Телеком, 2004. – 143 с.

24. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant // Proc. IEEE. – 1974. – P. 121–159.

25. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – May/June 1993. – 23(3). – P. 665–685.

26. Васильев В.И., Идрисов И.И., Макаров А.С. Вопросы синтеза и технической реализации нейросетевых алгоритмов управления газотурбинным двигателем // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2010. – № 5. – С. 44–52.

References

1. Legotkina T.S., Khizhniakov Iu.N. Modifikatsiia metoda aktivnoi adaptatsii ob"ektov [Modifications of the method the active adaptation of objects]. *Neirokomp'utery, razrabotka, primeneniye* Moscow, 2017, no. 6, pp. 39-44.

2. Legotkina T.S., Khizhniakov, Iu.N. Modifikatsiia metoda tsentroida [A modified centroid method]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 1, pp. 122-125.

3. Rutkovskaia D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow: Moscow: Goriachaia liniia-Telekom, 2006, 452 p.

4. Khizhniakov Iu.N. Nechetkoe, neironnoe i gibridnoe upravlenie [Fuzzy, neural and hybrid control]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, 303 p.

5. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and applications to modeling and control. *IEEE Trans. On SMC*, 1985, 15, pp. 116-132. (Industrial application of fuzzy logic control).

6. Gostev V.I. Proektirovanie nechetkikh regulatorov dlia sistem avtomaticheskogo upravleniia [Design of fuzzy controllers for automatic control systems]. Saint Peterburg: BKhV-Peterburg, 2011, 416 p.

7. Gostev V.I. Sistemy upravleniia s tsifrovymi regulatorami [Control systems with digital regulators]. Kiev: Tekhnika, 1990, 280 p.

8. Pegat A. Nechetkoe modelirovanie i upravlenie [Fuzzy modeling and control]. Moscow: Binom, 2009, 798 p.

9. Osovskii S. Neironnye seti dlia obrabotki informatsii [Neural networks for information processing]. Moscow: Finansy i statistika, 2004, 344 p.

10. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MatLab i FuzzyTech [Fuzzy modeling in the MatLab and FuzzyTech]. Saint Peterburg: BKhV-Peterburg, 2005, 736 p.

11. Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MatLab [Designing fuzzy systems using MatLab]. Moscow: Goriachaia liniia-Telekom, 2007, 288 p.

12. Nikulin V.S. et al. Adaptivnyi virtual'nyi izmeritel' vrednykh veshchestv v kamere sgoraniia GTD s primeneniem nechetkoi logiki [Adaptive virtual meter of harmful substances in the combustion chamber of a gas turbine engine using fuzzy technology]. *Trudy Moskovskogo aviatsionnogo instituta: elektronnyi zhurnal*, 2020, no. 116, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=48577>

13. Deviatkov V.V. Sistemy iskusstvennogo intellekta [Artificial intelligence systems]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2001, 352 p. (Informatika v tekhnicheskome universitete).

14. Iarushkina N.G. Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh sistem [Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems]. Moscow: Finansy i statistika, 2004, 320 p.

15. Khizhniakov Iu.N., Iuzhakov A.A. Neironechetkii regulator chastoty gazoturbinnogo dvigatel'ia [Neuro-Fuzzy Frequency Controller of a Gas Turbine Engine]. *Pribory*, 2010, no. 5, pp. 17-21.

16. Bobyr' M.V., Kulabukhov S.A. Defazzifikatsiia vyvoda iz bazy nechetkikh pravil na osnove metoda raznosti ploschadei [Defuzzification of inference from a fuzzy rule base based on the area difference method]. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2015, no. 9, pp. 32-41.

17. Antonov V.N., Terekhov V.A., Tiukin I.Iu. Adaptivnoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh [Adaptive control in technical systems]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet, 2001, 244 p.

18. Likhtarnikov L.M., Sukacheva T.G. Matematicheskaiia logika. Zadachnik-praktikum [Mathematical logic. Task book-workshop]. Saint Petersburg: Lan', 1999, 288 p.

19. Siniakov A.N., Shaimardanov F.A. Sistemy avtomaticheskogo upravleniia LA i ikh silovymi ustanovkami [Automatic control systems for aircraft and their power plants]. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 320 p.

20. Zadeh L.A. Outline of a New Approach to Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* SMC-1, 1973, pp. 28-44.

21. Vereshchikov D.V., Voloshin V.A., Ivashkov S.S., Vasil'ev D.V. Primenenie nechetkoi logiki dlia sozdaniia imitatsionnoi modeli upravliaiushchikh deistvii letchika [Application of fuzzy logic to create a simulation model of the pilot's control actions]. *Trudy Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2018, no. 99, available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91926>

22. Terekhov V.A. Neurosetevye sistemy upravleniia [Neural network control systems]. Moscow: Vysshaia shkola, 2002, 183 p.

23. Uskov A.A., Kuz'min A.V. Intellektual'nye tekhnologii upravleniia. Iskusstvennye neironnye seti i nechetkaia logika [Intelligent control technologies. Artificial neural networks and fuzzy logic]. Moscow: Goriachaia liniia-Telekom, 2004, 143 p.

24. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant. *Proc. IEEE*, 1974, pp. 121-159.

25. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. May/June 1993, 23(3), pp. 665-685.

26. Vasil'ev V.I., Idrisov I.I., Makarov A.S. Voprosy sinteza i tekhnicheskoi realizatsii neurosetevykh algoritmov upravleniia gazoturbinnym dvigatelem [Issues of synthesis and technical implementation of neural network algorithms for controlling a gas turbine engine]. *Neirokomp'iutery: razrabotka, primenenie*, 2010, no. 5, pp. 44-52.

Сведения об авторе

Никулин Вячеслав Сергеевич – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kalif23@yandex.ru)

About the author

Vyacheslav S. Nikulin (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Automation and telemechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kalif23@yandex.ru).

Поступила: 18.02.2022 Одобрена: 20.05.2022 Принята к публикации: 12.09.2022

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Работа была выполнена в индивидуальном авторстве.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Никулин, В.С. Модификация сети Anfis / В.С. Никулин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 42. – С. 178–193. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.09

Please cite this article in English as:

Nikulin V.S. Modification of the Anfis network. *Perm national research polytechnic university bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 42, pp. 178-193. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.09