

Научная статья
УДК 681.5.01
DOI: [10.34759/trd-2022-124-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-21)

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЕМ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМЕ MISO

Сергей Александрович Сторожев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
ПНИПУ, Пермь, Россия
sepra5@mail.ru

Аннотация. Рассматривается новый подход к проектированию на базе нейро-нечеткой технологии адаптивного регулятора состояний с применением треугольных терм, основания которых равны интервалу $0...1$, а вершины – смещаются в интервале $0...1$ согласно среднеарифметическому значению «пройденного» пути. Число терм равно числу входных переменных. Преобразование информации выполняется нечеткими нейронами. Выход регулятора состояний рассчитывается методом разности площадей с последующим воздействием на выносные направляющие аппараты.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель, камера сгорания, электронный регулятор двигателя, нейро-нечеткий регулятор состояний, метод

разности площадей, метод взвешенного среднего, фаззификатор, дефаззификатор, выносной направляющий аппарат.

Для цитирования: Сторожев С.А. Мультиагентное управление окислителем камеры сгорания с применением нейро-нечеткой технологии в системе MISO // Труды МАИ. 2022. № 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-21)

MULTI-AGENT CONTROL OF THE COMBUSTION CHAMBER OXIDIZER USING NEURO-FUZZY TECHNOLOGY IN THE MISO SYSTEM

Sergei A Storozhev

Perm National Research Polytechnic University, PNRPU,

Perm, Russia

cepra5@mail.ru

Abstract. The an aircraft gas turbine engine (GTE) of aircraft from the point of view of control theory is a complex nonlinear object, the frame mathematical description of which is known a priori, has one input and several outputs. When operating a gas turbine engine, continuous monitoring of parameters is required (gas temperature behind the combustion chamber, rotor speed of the low-pressure compressor (free turbine), rotor speed of the high-pressure turbocharger (gas generator). The selective controller controls these parameters, realizing control in different modes of operation of the gas turbine engine. Further The development of GTE control can be associated with the use of neuro-fuzzy

control of the oxidizer flow into the GTE combustion chamber. Purpose: improving the control of the combustion process in the combustion chamber of the gas turbine engine. Methods: a new approach to designing an adaptive state controller based on neuro-fuzzy technology using triangular terms with equal bases equal to the interval 0–1, whose vertices are shifted according to the arithmetic mean of the path traveled by the input variables, is proposed. Determination of the degree of membership is performed by singletons, synchronously shifting depending on the change in input parameters using proportions. On the basis of the proposed approach to designing an adaptive state controller with an oxidizer flow, the relationship between the input parameters of the combustion chamber and the development of the control control with maximum speed is estimated using the area ratio method or the weighted average method. The idea of the experiment, using the designed state controller, is to estimate the temperature change behind the combustion chamber, which should not leave the specified zone. Results: the developed adaptive state controller is characterized by the best values of the probability of non-failure operation during the experiment. Practical relevance: the research results can be used 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: aircraft gas turbine engine, combustion chamber, electronic engine controller, neuro-fuzzy state controller, area difference method, weighted average method, fuzzifier, defuzzifier, external guide vanes

For citation: Storozhev S.A. Multi-agent control of the combustion chamber oxidizer using neuro-fuzzy technology in the MISO system. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-21)

Введение

Газотурбинные двигатели (ГТД) современных маневренных летательных аппаратов являются сложными многорежимными нестационарными нелинейными объектами управления. Отличительной особенностью перспективных ГТД является рост числа регулируемых параметров, расширение диапазона условий и эксплуатационных режимов параметров и регулирующих воздействий. Это приводит к необходимости повышения значений параметров рабочего процесса, увеличения точности их поддержания, ужесточения требований к системам автоматического управления, реализуемого электронным регулятором двигателя (РЭД). ГТД летательных аппаратов с точки зрения теории управления, есть сложный нелинейный объект, фреймовое математическое описание которого известно априори, имеет один вход и несколько выходов [1–3]. Эксплуатация ГТД требует непрерывный контроль большой группы параметров (температура газа за камерой сгорания, частота вращения ротора компрессора низкого давления (свободная турбина), частоты вращения ротора турбокомпрессора высокого давления (газогенератор) и т.д. Контроль этих параметров регламентируется работой селективного регулятора. Алгебраический селективный регулятор, логически непрерывно, анализирует отклонения параметров и управляет подачей топлива (газ)

через дозирующее устройство в ГТД [4]. Программный селективный регулятор участвует в разных режимах работы ГТД и не является адаптивным [5, 6]. Селекторы вводятся в САУ для устранения зоны совместно работы каналов управления и обеспечивают во всех условиях работы управляющего воздействие только одного из них, включаемых в работу в зависимости от режима работы, где подача окислителя в камеру сгорания задается в зависимости от величины расхода топлива. Однако статические характеристики ГТД в процессе эксплуатации изменяются из-за старения элементов дозатора, переменного качества топлива, изменения параметров окружающей среды и т.д. Дальнейшее развитие управления ГТД можно связать с применением нечеткого, нейро-нечеткого и нейронного управлений [7 – 10].

Постановка задачи

В статье предлагается новый подход к проектированию адаптивного регулятора состояний подачи окислителя с применением нейро-нечеткой технологии.

Новым в концепции проектирования адаптивного нейро-нечеткого регулятора является то, что если входов регулятора состояний несколько, то для каждого входа используются одна треугольная функция принадлежности (терма), основания которых соответствуют нормированному интервалу $0...1$, а вершины термы располагаются согласно среднеарифметическим значениям «пройденного» пути входными переменными. Значение степеней принадлежности определяется с помощью сингтонов, синхронно перемещающихся с выходами пропорций в

соответствии со своими входными сигналами в системе MISO (несколько входов и один выход).

Основная часть

Для исследования динамики проведения моделирования в MATLAB Simulink была выбрана модель ГТД [11, 12] (см. рис. 1). В данной модели определены три контура:

- « $n_{вд}$ » – контур частоты вращения ротора высокого давления;
- « T » – контур температуры газа за турбиной вентилятора;
- « $n_{в}$ » – контур частоты вращения вентилятора.

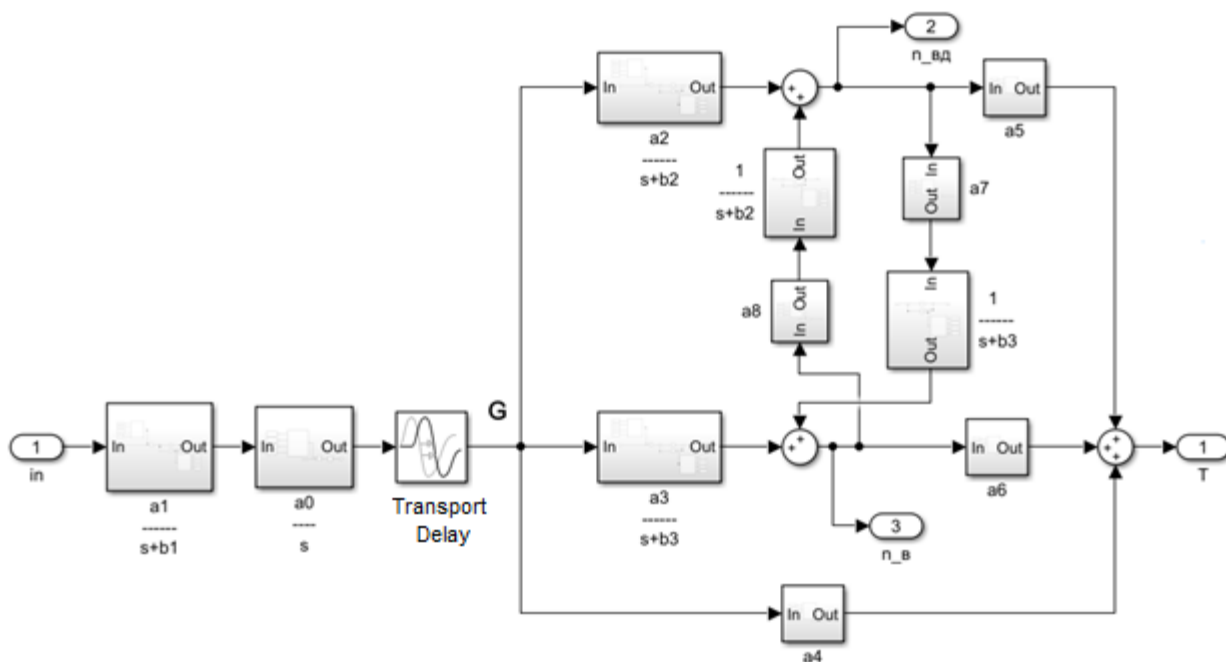


Рис. 1. Модель ГТД, где « in » – входной управляющий сигнал; « T » – текущая температура газа за турбиной вентилятора; « $n_{вд}$ » – текущее значение оборотов ротора высокого давления; « $n_{в}$ » – текущее значение оборотов вентилятора; « $Transport Delay$ » – блок задержки сигнала; « G » – расход топлива в камере сгорания

На рисунке 2 представлена структурная схема регулятора состояния расхода окислителя.

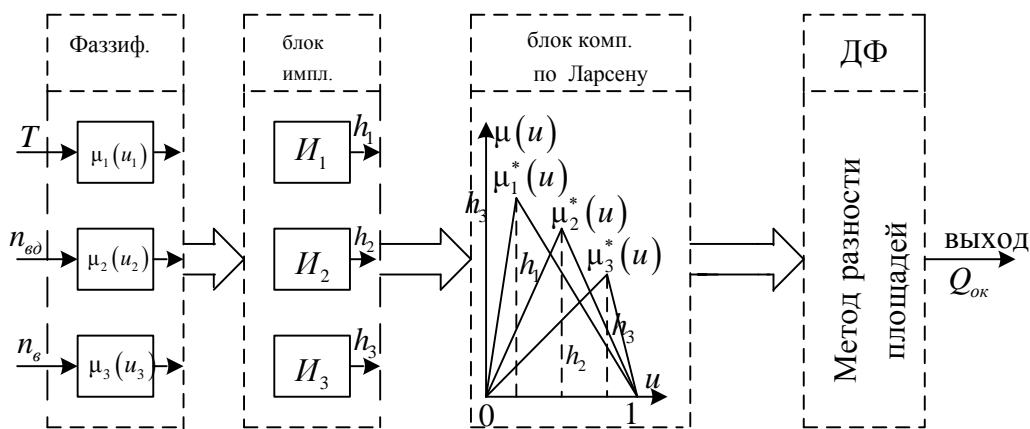


Рис. 2. Структурная схема регулятора состояний расхода окислителя, где $\mu_1(u_1)$, $\mu_2(u_2)$, $\mu_3(u_3)$ – степени принадлежности фаззификатора; I_1, I_2, I_3 – нечеткие нейроны типа «И»; h_1, h_2, h_3 – результат нечеткой импликации; $\mu_1^*(u), \mu_2^*(u), \mu_3^*(u)$ – результат композиции по Ларсену; $Q_{ок}$ – расход окислителя.

Регулятор состояний содержит фаззификатор с тремя треугольными термами (по числу входов), нечеткую импликацию на базе трех нечетких нейронов, блок нечеткой композиции, где свертка трёх терм дефаззификатора выполнена по Ларсену с последующим вычислением четкого выхода (расход окислителя) методом разности площадей.

Входами регулятора состояния являются:

$x_1 = f(T)$ – изменение температуры за камерой сгорания ГТД с диапазоном изменения $(x_{1min} - x_{1max})$;

$x_{2i} = f(n_6)$ – частота вращения компрессора низкого давления (свободная турбина) с диапазоном изменения $(x_{2min} - x_{2max})$;

$x_{3i} = f(n_{\text{вд}})$ – частота вращения компрессора высокого давления (газогенератор) с диапазоном изменения $(x_{3\text{min}} - x_{3\text{max}})$.

Заменяем синглтоны для вычисления степени принадлежности по каждой переменной входа пропорциями вида:

$$\begin{aligned} u_{1i} &= \frac{(x_{1i} - x_{1\text{min}})}{(x_{1\text{max}} - x_{1\text{min}})}; \\ u_{2i} &= \frac{(x_{2i} - x_{2\text{min}})}{(x_{2\text{max}} - x_{2\text{min}})}; \\ u_{3i} &= \frac{(x_{3i} - x_{3\text{min}})}{(x_{3\text{max}} - x_{3\text{min}})}. \end{aligned} \tag{1}$$

Зададимся математическим описанием треугольных терм фаззификатора, основания которых равны интервалу $0 \dots 1$ согласно (2):

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

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

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

При этом, расположение вершин треугольных терм вычисляется как среднеарифметическое значение [7] (математическое ожидание, вероятностное) изменение i -входной переменной (пройденный путь ранее за n интервалов времени (параметр настройки)).

На рисунке 3 приведена схема алгоритма расчета среднеарифметического значения вершины термы для i – входной переменной.

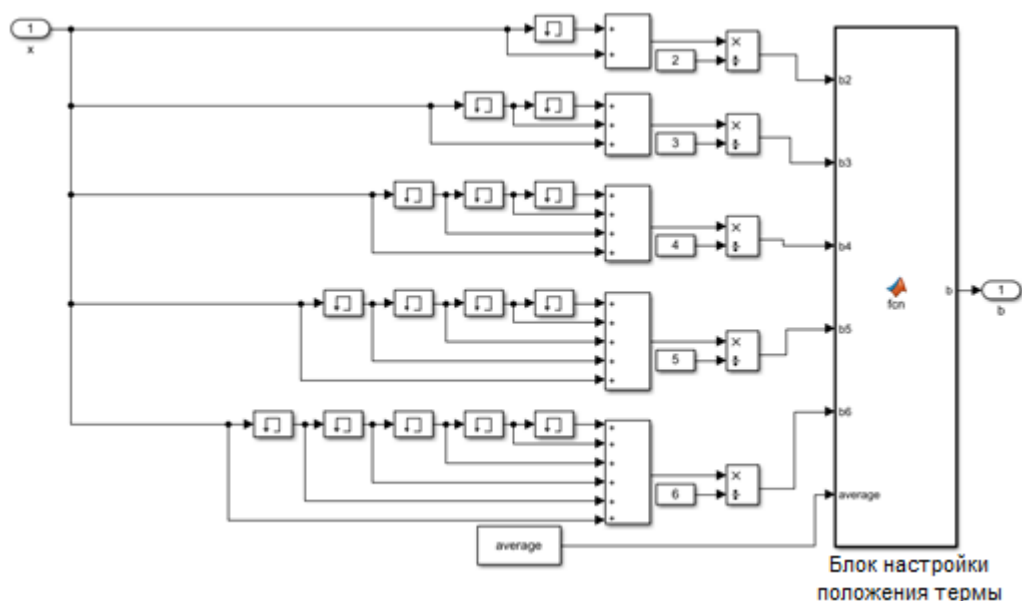


Рис. 3. Схема алгоритма расчета среднеарифметического значения вершины термы для i – входной переменной (пройденного пути), где « x » – текущее значение параметра ГТД; \rightarrow \square \rightarrow – элемент задержки сигнала на 1 такт; «average» – количество тактов, которые учитываются при расчете среднего арифметического значения входа в регулятор состояний; « b » – параметр треугольной функции принадлежности

На рисунке 4 представлен текущий момент расположения функций принадлежности (терм) фаззификатора регулятора состояния [11, 12].

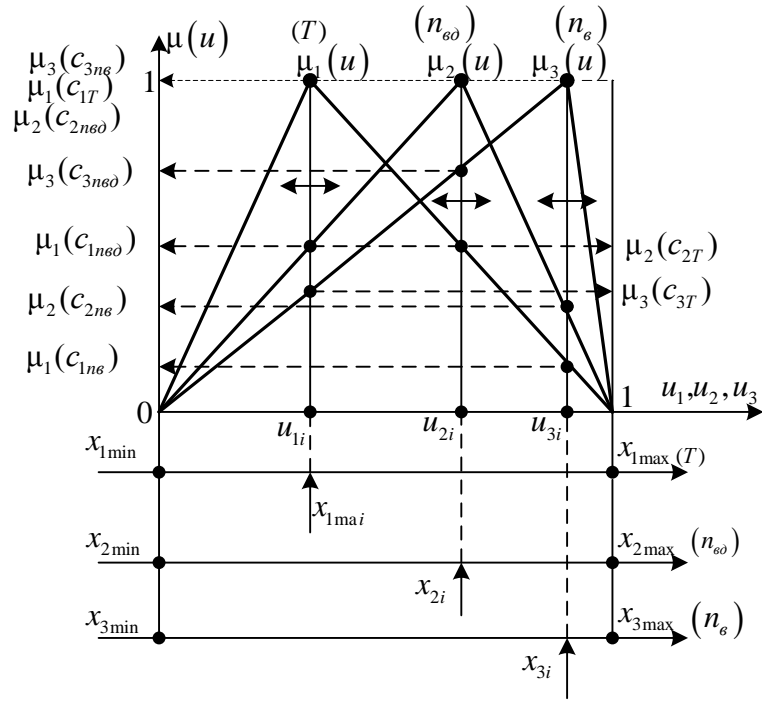


Рис. 4. Текущий момент расположения функций принадлежности

фаззификатора регулятора состояния, где степени принадлежности согласно

алгоритму Мамдани $\mu_1(u)$: $\mu(c_{1T})$, $\mu(c_{1n60})$, $\mu(c_{1n6})$, термы $\mu_2(u)$: $\mu(c_{2T})$, $\mu(c_{2n60})$, $\mu(c_{2n6})$ и термы $\mu_3(u)$: $\mu(c_{3T})$, $\mu(c_{3n60})$, $\mu(c_{3n6})$; x_{1i} , x_{2i} , x_{3i} – текущие значения параметров ГТД

Далее, с помощью нечетких нейронов I_1, I_2, I_3 нечеткой импликации, согласно алгоритму Мамдани, вычисляем их выходы (3) (см. рис.1) [7, 13].

$$h_1 = \min[\mu_1(c_{1n6}), \mu_1(c_{1n60}), \mu_1(c_{1T})];$$

$$h_2 = \min[\mu_2(c_{2n6}), \mu_2(c_{2n60}), \mu_2(c_{2T})]; \quad (3)$$

$$h_3 = \min[\mu_3(c_{3n6}), \mu_3(c_{3n60}), \mu_3(c_{3T})].$$

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 (2), число которых больше двух [7, 8].

После выполнения нечеткой композиции по Ларсену в блоке нечеткого вывода проводятся преобразования в дефаззификаторе с помощью метода разности площадей (методе отношения площадей) [14].

Согласно методу отношения площадей, необходимо выполнить условие, чтобы вершины терм дефаззификатора синхронно смещались как в фаззификаторе, а их основания равны между собой и интервалу $0 \dots 1$.

Отсюда, площади терм дефаззификатора рассчитываются по формуле (4).

$$S = 0,5 \cdot h \cdot a \cdot m \quad (4)$$

В формуле (4): ($h = 1$) – высота терм; ($a = 1$) – основание терм (треугольные трапеции), ($m = 3$) – число треугольных трапеций равное числу входов регулятора состояний.

Однако, площадь S (5) треугольных терм дефаззификатора не зависит от смещения высоты в каждом терме на интервале $0 \dots 1$.

Площади треугольных терм (треугольных трапеций) после преобразований по Ларсену [7] рассчитываются по формуле (5).

$$S_{ii} = 0,5 \cdot a \cdot \sum_{i=1}^3 h_i \quad (5)$$

Тогда коэффициент усиления регулятора состояний равен отношению площадей (4) и (5) или среднеарифметическое значение высоты модифицированных терм дефаззификатора.

$$k = \frac{S_{li}}{S} = \frac{\sum_{i=1}^3 h_i}{m}, \quad (6)$$

Выражение (6) есть коэффициент усиления регулятора состояний, который является переменным в зависимости от входов, подтверждая адаптивность нейро-нечеткого регулятора состояний.

Далее в зависимости от выбранного привода ВНА регулятор состояния регулирует расход окислителя камеры сгорания ГТД согласно формуле (7).

$$Q_{ок} = U \cdot k_1 \cdot k, \quad (7)$$

где U – опорное напряжение; k_1 – коэффициент размерности; k – переменный коэффициент усиления регулятора состояния.

На рисунке 5 представлена структурная схема адаптивного регулятора состояния расхода окислителя $Q_{ок}$, где, как вариант, показано вычисление выхода регулятора состояний по формуле взвешенного среднего.

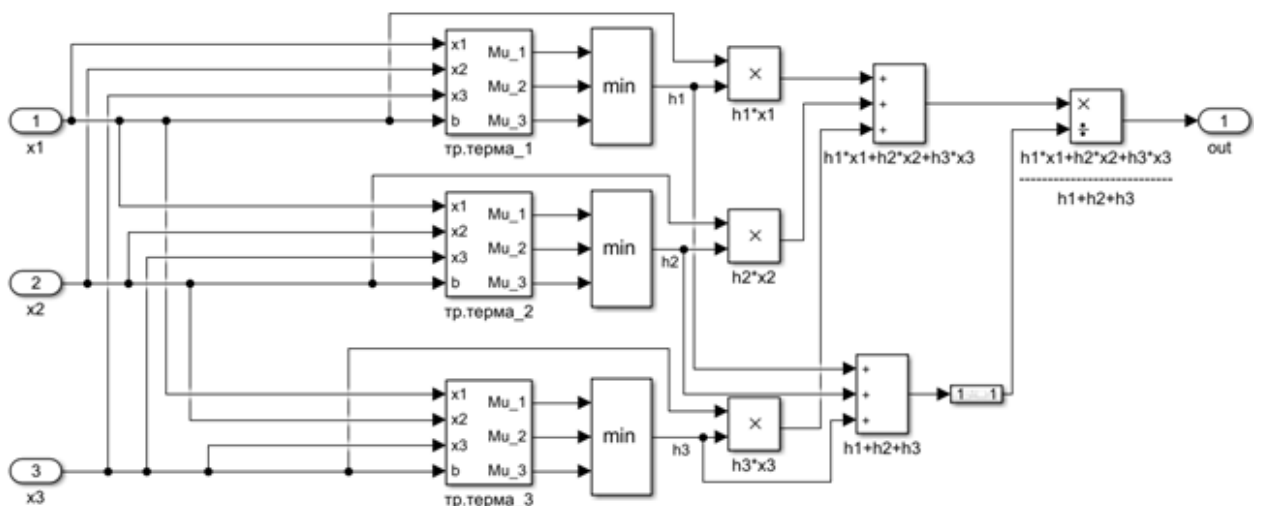


Рис. 5. Структурная схема регулятора состояний расхода окислителя, где x_1, x_2, x_3 – текущие значения параметров ГТД; «тр.терма_1», «тр.терма_2», «тр.терма_3» –

треугольные функции принадлежности адаптивного регулятора состояний; «out» –

расход окислителя $Q_{ок}$.

На рисунке 6 приведены осциллограммы переходных процессов при взлете ГТД с применением штатного селектора подачи топлива дозатором и регулятора состояния подачи окислителя в камеру сгорания ГТД. Для сопоставления вариантов управления ГТД, построена целевая функция (8) [9].

$$F = 0.4 \cdot (t_{nn}^{n-\epsilon\delta} + t_{nn}^T + t_{nn}^{n-\epsilon}) + 0.6 \cdot (\delta^{n-\epsilon\delta} \% + \delta^T \% + \delta^{n-\epsilon} \%),$$

где $t_{nn}^{n-\epsilon\delta}$ – время переходного процесса в контуре "n_вд";
 t_{nn}^T – время переходного процесса в контуре "T";
 $t_{nn}^{n-\epsilon}$ – время переходного процесса в контуре "n_в";

$$\delta^{n-\epsilon\delta} \% \text{ – перерегулирование контура "n_вд" в процентах;}$$

$$\delta^T \% \text{ – перерегулирование контура "T" в процентах;}$$

$$\delta^{n-\epsilon} \% \text{ – перерегулирование контура "n_в" в процентах.}$$
(8)

Повышенный весовой коэффициент 0.6 при перерегулировании ошибки определяется требованием апериодического характера переходного процесса. Цель управления – минимизировать целевую функцию F.

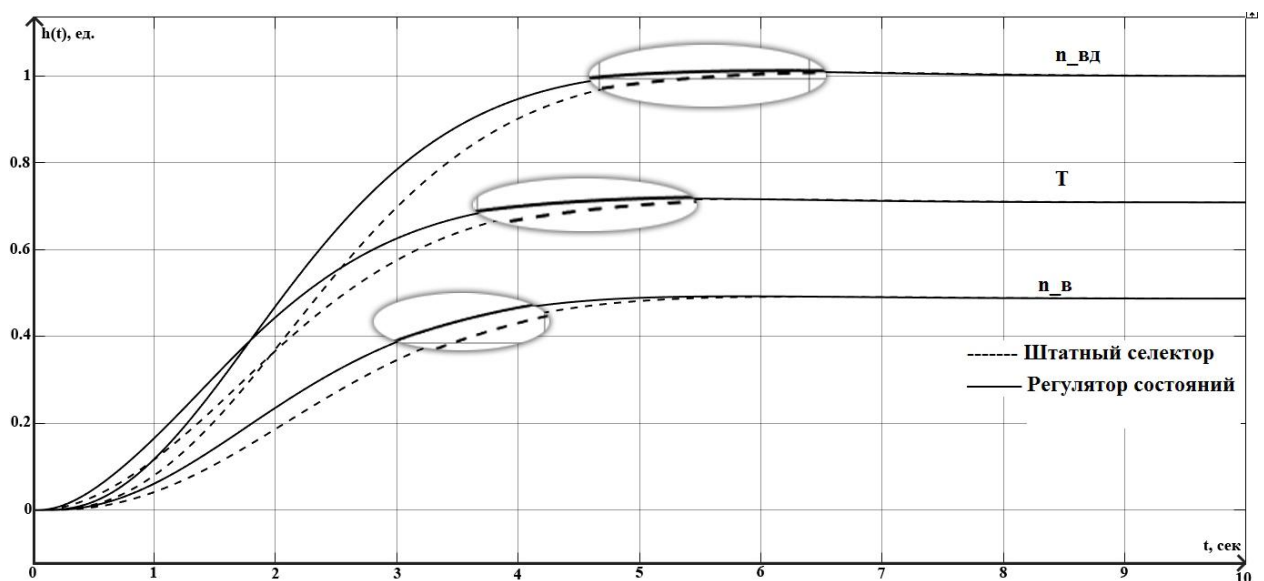


Рис. 6. Осциллограммы переходного процесса при взлете авиационного ГТД

Сравнительный анализ показателей переходного процесса приведен в таблице

1.

Таблица 1 Основные показатели качества управления САУ ГТД

Тип регулятора	Время переходного процесса, с			Перерегулирование, %		
	«n_вд»	«Т»	«n_в»	«n_вд»	«Т»	«n_в»
Штатный селектор	4,45	4,05	4,4	1,07	0,81	0,82
Регулятор состояний	4	3,5	4,05	1,1	0,83	0,85

На основании данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод о том, что метод переключения регуляторов обеспечивает уменьшение времени переходного процесса на 10% при росте перерегулирования не более 6,5%.

Далее, нормализуем основные показатели качества из табл. 1 и проводим оценку качества управления, согласно целевой функции (4). Для нормализации показателей качества делим время переходного процесса на 4,45, а перерегулирование на 1,1.

Таблица 2 Нормированные показатели качества управления САУ ГТД

Тип регулятора	Время переходного процесса, с			Перерегулирование, %			Целевая функция, согласно (4)
	«n_вд»	«Т»	«n_в»	«n_вд»	«Т»	«n_в»	
Штатный селектор	1	0,91	0,99	0,97	0,74	0,75	2,64
Регулятор состояний	0,90	0,79	0,91	1	0,75	0,77	2,55

Исходя из значений целевой функции, представленных в табл. 2, лучшее качество управления САУ ГТД обеспечивается с помощью регулятора состояний $F=2,55$. В сравнении со штатным селектором, целевая функция которого равна 2,64, регулятор состояний улучшает качество управления на 3,4%.

Заключение

1. Предложен новый подход к проектированию адаптивного нейро-нечеткого регулятора состояния недетерминированного объекта расхода окислителя в системе MISO.

2. Адаптивный нейро-нечеткий регулятор состояния предназначен для автоматического регулирования подачи окислителя в камеру сгорания для полного сгорания топлива авиационного ГТД как альтернатива подачи окислителя в камеру сгорания с помощью вычисления по формуле.

3. Предложенный адаптивный нейро-нечеткий регулятор состояния имеет максимальное быстродействие за счет применения метода разности площадей при условии использования треугольных терм (треугольных трапеций) и отвечает требованию реального времени.

4. Проведенное моделирование подтвердило правильность нового подхода проектирования нейро-нечеткого регулятора состояний, что иллюстрируется осциллограммами. Качество управления повысилось на 3,4%.

5. Вновь разработанный адаптивный регулятор состояний дополняет теорию нечетких систем [15 – 20].

Список источников

1. Иноземцев А.А., Нихамкин В.Л., Сандрацкий А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. - М.: Машиностроение, 2008. Т.2. – 368 с.
2. Костюков В.М. Капырин Н.И. Модель газотурбинного двигателя и его системы управления для особых значений углов атаки и метеорологических условий // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28075>
3. Письменный В.Л. Исследование термодинамического цикла форсированного двухкамерного двигателя// Труды МАИ. 2002. № 8. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34593>
4. Системы автоматического управления ГТД: Энциклопедический справочник / Под ред. О.С. Гуревича. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – 208 с.
5. Синяков А.Н., Шаймарданов Ф.А. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
6. Исаев А.И., Скоробогатов С.В. Методологические аспекты экспериментальных исследований процесса горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87340>
7. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 303 с.
8. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 798 с.

9. Андриевская Н.В., Андриевский О.А., Леготкина Т.С., Хижняков Ю.Н., Сторожев А.А., Никулин В.С., Южаков А.А., Кузнецов М.Д. Нейро-нечеткое управление выбросами вредных веществ авиационного газотурбинного двигателя // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2020. Т. 21. № 6. С. 348-355. DOI: [10.17587/mau.21.348-355](https://doi.org/10.17587/mau.21.348-355)
10. Жуковская Э.П., Лебедев М.В. Диагностика и реконфигурация подсистем управления газотурбинным двигателем на основе нечеткой логики // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 3. С. 40-44.
11. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. – СПб: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.
12. Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами. Справочник. – Киев: Техника, 1990. – 280 с.
13. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
14. 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.
15. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1974, vol. 121, no.12, pp. 1585-1588.
16. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах. - СПб: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2001. – 244 с.

17. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2007. – 288 с.
18. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Нейронечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя // Приборы. 2010. № 5. С. 17-21.
19. Чичерова Е.В. Использование алгоритмов нечёткой логики для управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57812>
20. Верещиков Д.В., Волошин В.А., Ивашков С.С., Васильев Д.В. Применение нечеткой логики для создания имитационной модели управляющих действий летчика // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91926>

References

1. Inozemtsev A.A., Nikhamkin V.L., Sandratskii A.A. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok* (Fundamentals of the development of aircraft engines and power plants), Moscow, Mashinostroenie, 2008, vol. 2. 368 p.
2. Kostyukov V.M. Kapyrin N.I. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28075>
3. Pismenniy V.L. *Trudy MAI*, 2002, no. 8, URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34593>

4. Gurevich O.S. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya GTD: Entsiklopedicheskii spravochnik* (GTE automatic control systems: Encyclopedic reference book), Moscow, TORUS PRESS, 2011, 208 p.
5. Sinyakov A.N., Shaimardanov F.A. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya LA i ikh silovymi ustanovkami* (Automatic control systems for aircraft and their power plants), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 320 p.
6. Isaev A.I., Skorobogatov S.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87340>
7. Khizhnyakov Yu.N. *Nechetkoe, neironnoe i gibridnoe upravlenie* (Fuzzy, neural and hybrid control: textbook), Perm', Izd-vo PNIPU, 2013, 303 p.
8. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy modeling and control), Moscow, BINOM. Laboratoriya znanii, 2007, 798 p.
9. Andrievskaya N.V., Andrievskii O.A., Legotkina T.S., Khizhnyakov Yu.N., Storozhev A.A., Nikulin V.S., Yuzhakov A.A., Kuznetsov M.D. *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 348-355. DOI: [10.17587/mau.21.348-355](https://doi.org/10.17587/mau.21.348-355)
10. Zhukovskaya E.P., Lebedev M.V. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2002, no. 3, pp. 40-44.
11. Gostev V.I. *Proektirovanie nechetkikh regulyatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Design of fuzzy controllers for automatic control systems), Saint Petersburg, BKhV-Peterburg, 2011, 416 p.
12. Gostev V.I. *Sistemy upravleniya s tsifrovymi regulyatorami. Spravochnik* (Control with digital controllers. Directory), Kiev, Tekhnika, 1990, 280 p.

13. Yarushkina N.G. *Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh system* (Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems), Moscow, Finansy i statistika, 2004, 320 p.
14. Bobyr' M.V., Kulabukhov S.A. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2015, no. 9, pp. 32–41.
15. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1974, vol. 121, no.12, pp. 1585-1588.
16. Antonov V.N., Terekhov V.A., Tyukin I.Yu. *Adaptivnoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh* (Adaptive control in technical systems), Saint Petersburg, Izd-vo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2001, 244 p.
17. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* (Designing fuzzy systems using MATLAB), Moscow, Goryachaya liniya.Telekom, 2007, 288 p.
18. Khizhnyakov Yu.N., Yuzhakov A.A. *Pribory*, 2010, no. 5, pp. 17-21.
19. Chicherova E.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57812>
20. Vereshchikov D.V., Voloshin V.A., Ivashkov S.S., Vasil'ev D.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91926>

Статья поступила в редакцию 05.04.2022

Статья после доработки 06.04.2022

Одобрена после рецензирования 20.04.2022

Принята к публикации 21.06.2022

The article was submitted on 05.04.2022; approved after reviewing on 20.04.2022; accepted for publication on 21.06.2022