

## **Адаптивный виртуальный измеритель вредных веществ в камере сгорания ГТД с применением нечеткой технологии**

**Никулин В.С.\*, Сторожев С.А., Абдуллин Д.М., Хижняков Ю.Н.**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
ПНИПУ, Комсомольский проспект, 29, Пермь, 614990, Россия*

*\*e-mail: [kalif23@yandex.ru](mailto:kalif23@yandex.ru)*

***Статья поступила 18.01.2021***

### **Аннотация**

Рассматривается проектирование на базе нечеткой технологии адаптивного виртуального измерителя вредных веществ и распределение подачи топлива в камеру сгорания между диффузионным и гомогенным коллекторами с целью снижения вредных веществ за взлетно-посадочный режим летательного аппарата в районе аэропорта.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, камера сгорания, измеритель вредных веществ, уравнения Сугено, нечеткий регулятор.

### **Введение**

В настоящее время общепризнано, что неконтролируемые выбросы от двигателей самолетов на аэродромах являются основным источником загрязнения [1, 2]. К ним относятся дым, монооксид углерода ( $CO$ ), несгоревшие углеводороды, оксиды азота ( $NO_x$ ) и окислы серы ( $SO_x$ ). Наиболее опасным являются ( $NO_x$ ) как составной газ из монооксида и диоксида азота.  $NO_x$  разрушает озоновый слой и

увеличивает радиацию на поверхности Земли [1]. Международная организация гражданской авиации с 2020 года приняла новые стандарты по выбросам вредных веществ новых типов самолетов. Поэтому двигатели современных самолетов требуют разработки качественно новых «чистых» камер сгорания [3]. Снижение вредных веществ осуществляется за счет перераспределения топлива (керосина) по различным коллекторам с сохранением газодинамической устойчивости горения в камере сгорания (КС). Это достигается равномерным распределением топливовоздушной смеси (ТВС) за счет поперечных пульсаций, оценка которого характеризуется коэффициентом камеры сгорания  $\alpha_{кс}$  [4, 5, 6].

$$\alpha_{кс} = \frac{G_6}{G_T L_0} \quad (1)$$

где  $G_6$  – расход окислителя;  $G_T$  – расход топлива с выхода дифференциального коллектора;  $L_0 = 14,7-15,2$  – стехиометрический коэффициент.

У нормальной ТВС [7, 8] с соответствующим количеством окислителя (кислорода) происходит полное сгорание углеводородного топлива (керосин) и образование двуокиси углерода с водяным паром в диапазоне температур 1100-1600°С. Если кислорода в ТВС мало, то при температуре ниже 1100°С возможен срыв пламени (режим «бедного» горения), а при температуре свыше 1600°С возникает вибрационное горение с атомарным разложением  $NO_x$  [2]. Протекание режимов «бедного» горения и вибрационного горения зависит от температуры ламинарного течения газов, состава ТВС, температуры и давления в КС, геометрии КС и т.д. В совокупности указанные параметры характеризуют недетерминированный процесс горения в КС с фреймовым математическим описанием [9].

На рис. 1 показаны ограничения по управлению процессом горения.

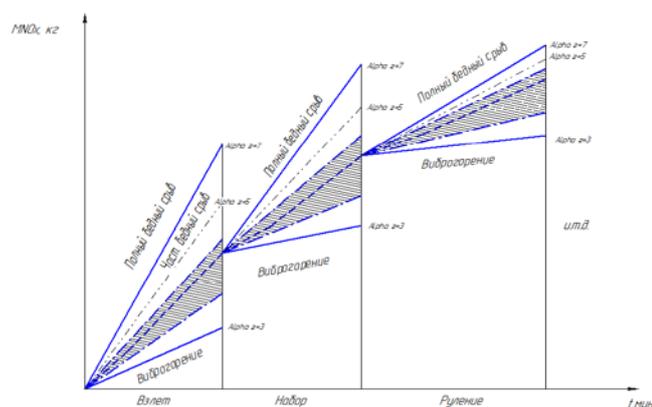


Рис. 1 Ограничения по управлению процессом горения.



– рабочая зона, где необходимо регулировать температуру горения КС

На рис. 2 приведена структурная схема управления расходом топлива дозатора.

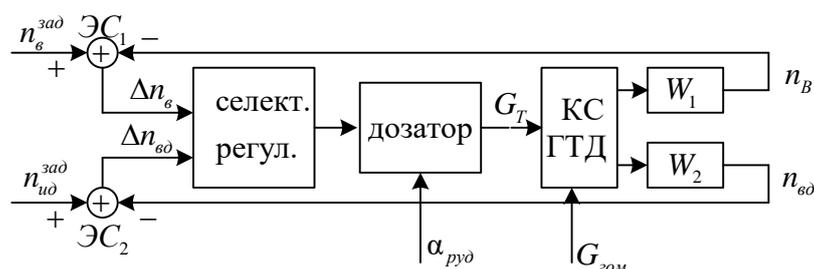


Рис.2 Структурная схема управления расходом топлива дозатора

(дифференциальный коллектор), где ГТД – авиационный газотурбинный двигатель;

КС – камера сгорания;  $W_1$ ,  $W_2$  – передаточные функции газовых турбин ГТД

Задача селективного регулятора исключить газодинамическую связь между контурами  $n_B$  и  $n_{вд}$  (приводами компрессора высокого давления (КВД) и компрессора низкого давления (КНД)) и управлять расходом топлива дозатором. Расход топлива  $G_T$  дозатора (диффузионного коллектора) задается в дроссельном режиме с помощью

изменения угла  $\alpha_{руд}$  пилотом в зависимости от режима полета самолета с коррекцией от штатного селективного регулятора.

На рис. 3 приведена структурная схема виртуального адаптивного датчика вредных веществ.

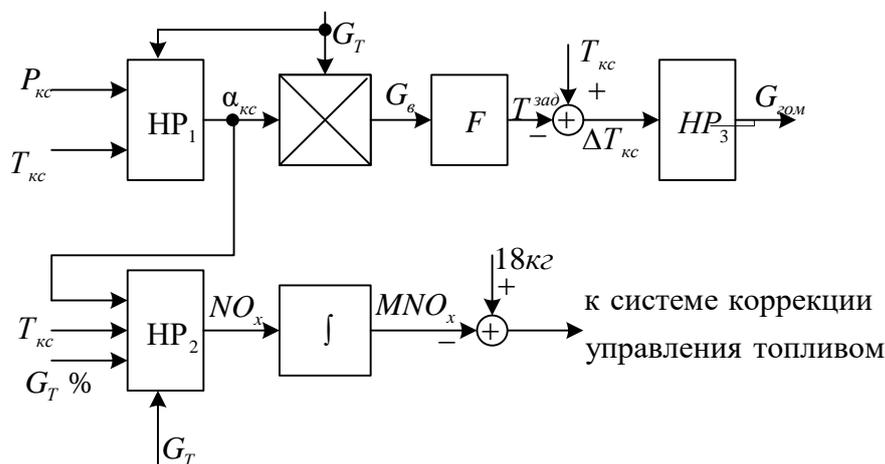


Рис.3. Структурная схема виртуального датчика вредных веществ

Измеритель вредных веществ содержит три нечетких регулятора: первый адаптивный нечеткий регулятор  $HP_1$  рассчитывает текущее значение  $\alpha_{кc}$ . Произведение  $G_T$  и  $\alpha_{кc}$  дает расчетное значение расхода окислителя (воздуха), который корректирует температуру газов с помощью виртуального адаптивного нечеткого регулятора ( $HP_3$ ) в зависимости от программного изменения температуры блоком  $F$  в зонах взлетно-посадочного режима. Измерение температуры газа в камере сгорания  $T_{кc}^{тек}$  выполняется встроенным датчиком температуры (термопара с компенсацией инерционности). Второй нечеткий адаптивный регулятор  $HP_2$  рассчитывает текущее значение  $NO_x$ , который интегрируется с целью определения суммарного значения  $MNO_x$  с ограничением 18 кг. Если выбросов будет больше заданного значения необходимо выполнить настройку параметров виртуального

датчика. Адаптивность виртуального измерителя заложена в нечетких регуляторах, где использован адаптивный фаззификатор [10].

Снижение вредных веществ в КС осуществляется за счет перераспределения топлива (керосина) по различным коллекторам с сохранением газодинамической устойчивости горения в камере. Это достигается равномерным распределением ТВС за счет поперечных пульсаций, оценка которого характеризуется коэффициентом камеры сгорания (коэффициентом избытка кислорода)  $\alpha_{кc}$  (2) [9].

$$\alpha_{кc} = \frac{78 \frac{P_{кc}}{\sqrt{T_{кc} + k \frac{G_T}{P_{кc}}}}}{G_T \cdot 14,7}, \quad (2)$$

где  $G_T$  – расход топлива с выхода дифференциального коллектора; 14,7 – стехиометрический коэффициент,  $P_{кc}$  – давление в КС;  $T_{кc}$  – температура в КС.

На рис. 4 приведена структурная схема адаптивного нечеткого регулятора НР<sub>1</sub>.

На рис. 5 приведена структурная схема адаптивного нечеткого регулятора НР<sub>2</sub>.

На рис. 6 приведена структурная схема адаптивного нечеткого регулятора НР<sub>3</sub>.

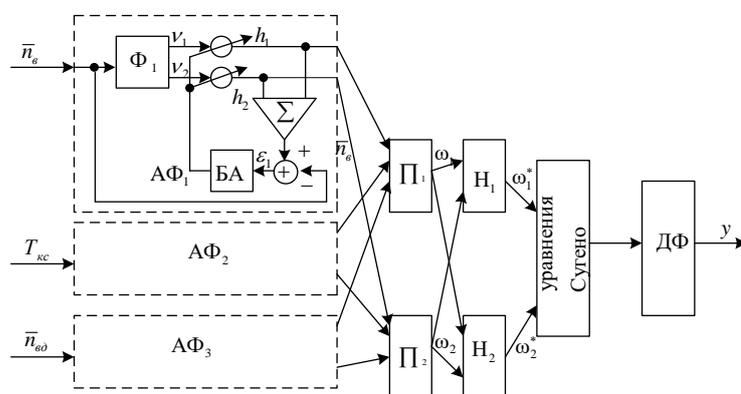


Рис.4. Структурная схема адаптивного нечеткого регулятора НР<sub>1</sub>

Нечеткий регулятор  $НР_1$  содержит три адаптивных фаззификатора, два блока произведений  $П_1, П_2$ , два нормализатора  $Н_1, Н_2$ , блок нечеткой композиции, реализующий уравнения Сугено и дефаззификатор ДФ.

Блоки  $П_1, П_2$  (нечеткие нейроны) реализуют  $\max$ - $\min$  операции над входами для вычисления минимальных значений выражений (3) и (4) [10,11,12]:

$$\omega_1 = T(S(v_1 \cdot h_1)_1, S(v_1 \cdot h_1)_2, S(v_1 \cdot h_1)_3); \quad (3)$$

$$\omega_2 = T(S(v_2 \cdot h_2)_1, S(v_2 \cdot h_2)_2, S(v_2 \cdot h_2)_3). \quad (4)$$

Блоки  $Н_1, Н_2$  нормализуют выходы по формулам:

$$\omega_1^* = \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_2}; \quad \omega_2^* = \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}. \quad (5)$$

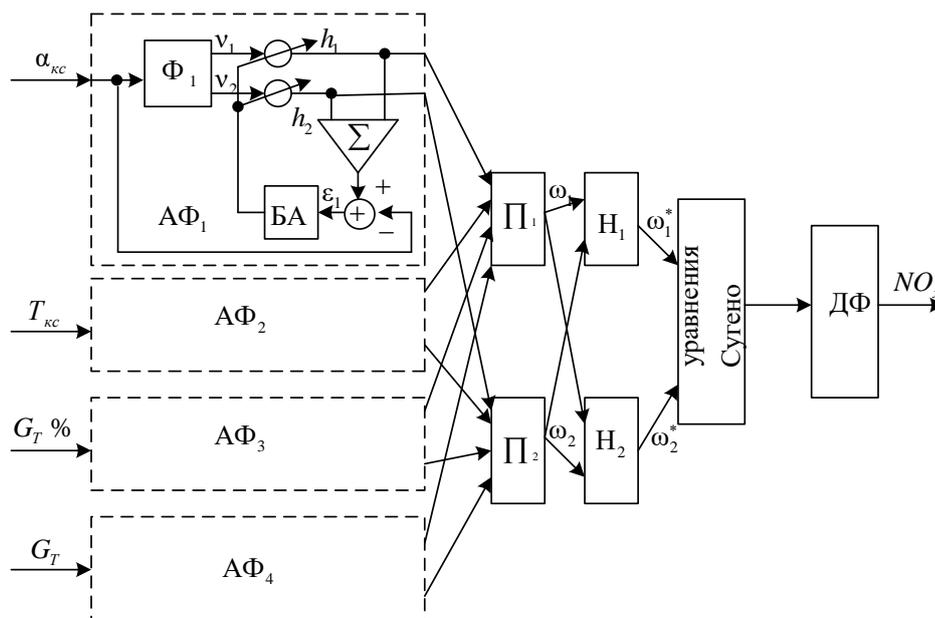
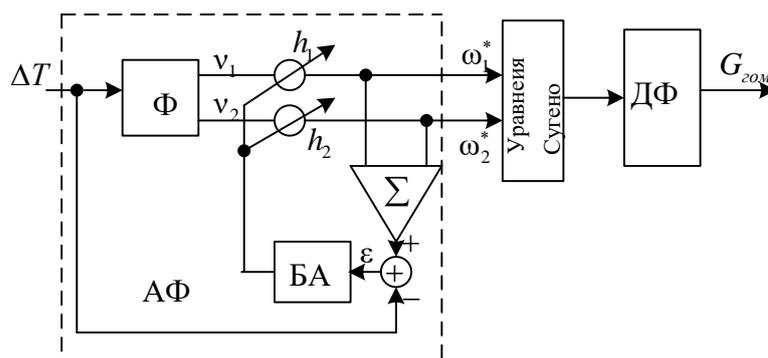
Нечеткий регулятор  $НР_2$  содержит четыре адаптивных фаззификатора, два блока произведений  $П_1, П_2$ , два нормализатора  $Н_1, Н_2$ , блок нечеткой композиции, реализующий уравнения Сугено и дефаззификатор ДФ.

Блоки произведений  $П_1, П_2$  (нечеткие нейроны) реализуют  $\max$ - $\min$  операции над входами для вычисления минимальных значений выражений (6) и (7) [10, 11,12]:

$$\omega_1 = T(S(v_1 \cdot h_1)_1, S(v_1 \cdot h_1)_2, S(v_1 \cdot h_1)_3, S(v_1 \cdot h_1)_4); \quad (6)$$

$$\omega_2 = T(S(v_2 \cdot h_2)_1, S(v_2 \cdot h_2)_2, S(v_2 \cdot h_2)_3, S(v_2 \cdot h_2)_4). \quad (7)$$

Блоки  $Н_1, Н_2$  нормализуют выходы по формулам (5).

Рис.5. Структурная схема адаптивного нечеткого регулятора  $HP_2$ Рис.6. Структурная схема адаптивного нечеткого регулятора  $HP_3$ ,

где  $\Phi$  – фаззификатор; БА – блок адаптации;  $v_1, v_2$  – степени активации выхода фаззификатора;  $h_1, h_2$  – корректирующие коэффициенты;  $\varepsilon$  – вход БА

Адаптивный нечеткий регулятор  $HP_3$  содержит адаптивный фаззификатор АФ, блок нечеткой композиции на базе уравнений Сугено и дефаззификатор ДФ. В

качестве функций принадлежности выбираются асимметричные сигмоидные функции [13-17]:

$$L_i(x_i) = [1 + \exp(-b_i(x_i - C_i))]^{-1};$$

$$H_i(x_i) = [1 + \exp(-b_i(x_i - C_i))]^{-1}; \quad (8)$$

$$H_i(x_i) + L_i(x_i) = 1$$

где  $L_i(x)$  и  $H_i(x)$  – сигмоидные функции принадлежности;  $b_i$  – коэффициент наклона функций принадлежности задаваемых в интервале  $[0..1]$ ;  $C_i$  – заданное значение лингвистических переменных;  $X_i$  – отклонение текущего параметра от заданного значения (синглтон).

На рис.7 приведены кривые сигмоидных функций принадлежности

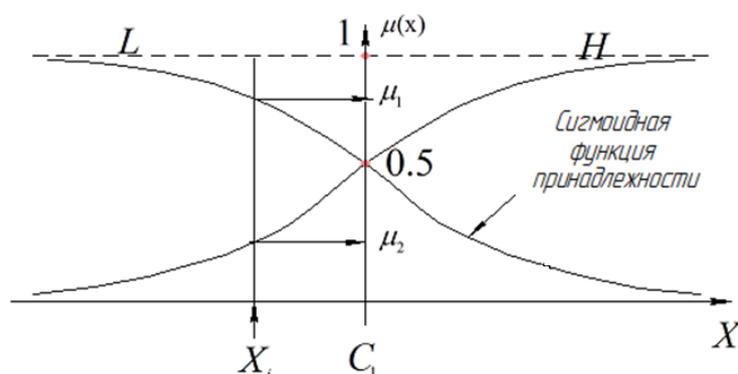


Рис.7. Сигмоидные функции принадлежности

При фаззификации текущего отклонения параметра с помощью синглтона определяются степени принадлежности, сумма которых всегда равна единице. Любые возмущения в контурах не отражаются в текущих значениях степеней принадлежности. Для учета влияния возмущений дополнительно вводятся коэффициенты для коррекции текущих значений степени принадлежности на выходе

фаззификатора, которые корректируются с помощью с помощью рекуррентной формулы (2) [10]:

$$h_{j+1} = h_j + B(x_j - x_{jm}) \frac{v_j}{v_j^T v_j}, \text{ при } 0 < B < 1. \quad (9)$$

Формирование скобки в формуле выполняется сумматором (см. рис.7), выход которого сравнивается с текущим значением синглтона. Скорость работы алгоритма адаптации определяется значением коэффициента  $B$ , задаваемого в интервале от 0 до 1.

Преобразование нечеткой информации с выхода адаптивного фаззификатора выполняется с помощью уравнений Сугено:

$$y_1 = 3(\omega_1^* - \omega_2^*);; y_2 = (\omega_1^* - \omega_2^*). \quad (10)$$

Согласно рис. 8 с помощью формулы средне взвешенного рассчитываем выход адаптивного нечеткого регулятора  $НР_3$  [18-20].

$$y = \frac{y_1 \cdot \omega_1^* + y_2 \cdot \omega_2^*}{\omega_1^* + \omega_2^*} = \frac{3 \cdot (0,65 - 0,25) \cdot 1,2 + (0,65 - 0,25) \cdot 0,4}{0,25 + 0,65} = 1,18,$$

где  $\omega_1^*$  и  $\omega_2^*$  – выход адаптивного фаззификатора;  $y$  – выход адаптивного нечеткого регулятора  $НР_3$ .

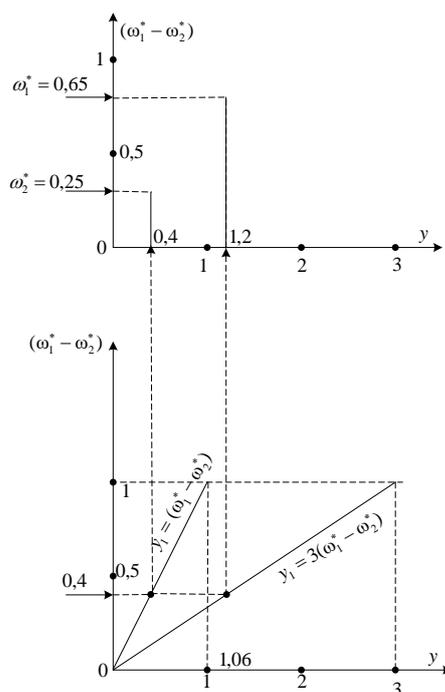


Рис.8. Графическое представление расчетной формулы дефазификатора

На рис.9 приведена осциллограмма измерения  $\alpha_{\text{КС}}$  в функции давления и температуры в камере сгорания и расхода топлива через диффузионный коллектор.

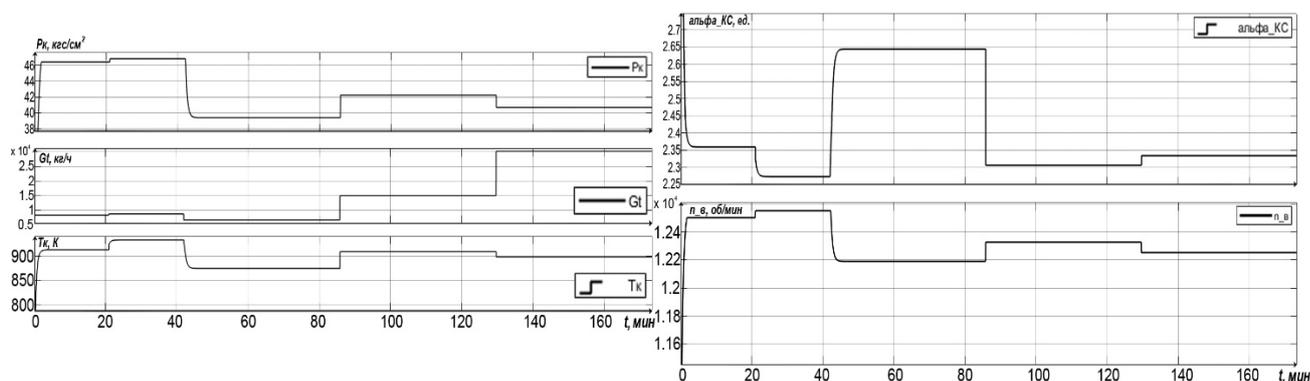


Рис. 9. Осциллограмма изменения избытка кислорода в камере сгорания  $\alpha_{\text{КС}}$

В левой части осциллограммы (см. рис.9) приведены осциллограммы изменения давления в камере сгорания  $P_{\text{КС}}$ , расход топлива дозатора  $G_{\text{T}}$ , температура

в камере сгорания  $T_{кс}$ , а в правой части приведены осциллограммы  $\alpha_{кс}$  и частоты вращения компрессора низкого давления.

На рис.10 приведена осциллограмма работы адаптивного виртуального измерителя  $NO_x$ .

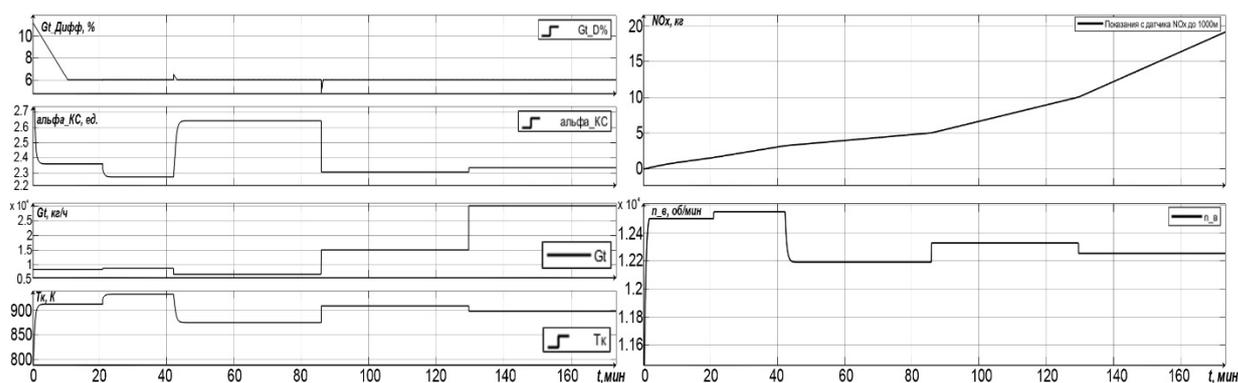


Рис. 10. Осциллограмма работы адаптивного виртуального измерителя  $NO_x$

В левой части осциллограммы (см. рис.10) приведены осциллограммы расход топлива в процентах  $G_T\%$ , расход топлива дозатора  $G_T$ , температура в камере сгорания  $T_{кс}$  и изменения  $\alpha_{кс}$ , а в правой части приведены осциллограммы  $NO_x$  и частоты вращения компрессора низкого давления.

Осциллограммы (рис.9) и (рис.10) подтверждают работоспособность измерителя вредных веществ.

В дальнейшем данный измеритель можно встроить в САР самолета с непрерывным мониторингом выбросов вредных веществ.

## Заключение

1. Разработана система распределения топлива между коллекторами с целью повышения газодинамической устойчивости горения в камере с применением селективного регулятора.

2. Разработана структурная схема измерения избытка кислорода в камере сгорания в текущий момент времени с применением нечеткой технологии.

3. Разработана структурная схема измерения вредных веществ в камере сгорания ГТД в текущий момент времени с применением нечетких регуляторов и суммарного выделения вредных веществ за взлетно-посадочный режим самолета в районе аэропорта с целью контроля заданного значения выбросов.

## Библиографический список

1. Феокистова О.Г., Феокистова Т.Г., Экзерцева Е.В. Безопасность жизнедеятельности. - Ростов на Дону: Феникс, 2006. - 320 с.
2. Гуревич О.С. Управление авиационными газотурбинными двигателями. - М: Изд-во МАИ, 2001. – 100 с.
3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. - М.: Машиностроение, 2008. Т.2. – 368 с.
4. Бакланов А.В., Краснов Д.С., Гараев А.И. Исследование параметров отсека камеры сгорания со струйноэлекционной форсункой // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116314>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-2](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-2)

5. Бендерский Б.Я., Чернова А.А. Теплообмен в камере сгорания ракетного двигателя при изменении геометрии канально-щелевого заряда твердого топлива // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=115121>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-5)
6. Бакланов А.В., Макарова Г.Ф., Васильев А.А., Нуждин А.А. Влияние перфорированного обтекателя фронтального устройства на основные характеристики камеры сгорания ГТД // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100700>
7. 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>
8. Исаев А.И., Майрович Ю.И., Сафарбаков А.М., Ходацкий С.А. Исследование процесса образования топливовоздушной смеси в импульсной камере сгорания и термодинамический расчет импульсного горения // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75583>
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. Нейрончатое управление выбросами вредных веществ авиационного газотурбинного двигателя // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2020. Т. 2. № 6. С. 348 - 355.
10. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление. - Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2013. – 303 с.

11. Larsen P.M. Industrial applications of fuzzy logic control // International Journal of Man-Machine Studies, 1980, vol. 12, issue 1, pp. 3 - 10. URL: [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(80\)80050-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(80)80050-2)
12. Mamdani E.H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant // Proceedings of the IEEE, 1974, vol. 121, no. 12, pp. 1585 – 1588.
13. Девятков В.В. Системы искусственного интеллекта силовыми установками. - М.: Машиностроение, 1991. - 320 с.
14. Ясницкий Л.Н. Интеллектуальные системы. - М.: Лаборатория знаний, 2016. - 221 с.
15. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления. – М.: Высшая школа, 2002. - 183 с.
16. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети. Генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. - 452 с.
17. Смирнов В.А., Хасанова А.А. Особенности реализации системы управления на нечеткой логике // Известия Челябинского научного центра. 2003. № 4 (21). С. 33 - 38.
18. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 798 с.
19. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
20. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTech. - М.: Изд-во «БХВ-Петербург», 2005. – 736 с.

# **Adaptive virtual meter of harmful substances in the combustion chamber of a gas turbine engine using fuzzy technology**

**Nikulin V.S.\*, Storozhev S.A., Abdullin D.M., Khizhnyakov Yu.N.**

*Perm National Research Polytechnic University, PNRPU,*

*29, Komsomolsky Prospekt, Perm, 614990, Russia*

*\*e-mail: [kalif23@yandex.ru](mailto:kalif23@yandex.ru)*

## **Abstract**

The toolkit of soft computing technologies is based on fuzzy systems, probabilistic models, neural networks, genetic algorithms, etc., which have their own advantages and disadvantages. The application of this toolkit is considered for an aircraft gas turbine engine (GTE) of aircraft operating under conditions of uncertainty.

The distribution of fuel between the manifolds is performed using a fuzzy regulator, the inputs of which are the pressure in the combustion chamber, temperature in the combustion chamber, fuel consumption in the diffusion manifold. Fuzzy controller output - calculation of the current value of the coefficient of the combustion chamber or the content of the oxidant in the combustion chamber. The calculation of the amount of harmful substances is carried out using a fuzzy regulator, the inputs of which are the temperature in the combustion chamber, the fuel consumption of the diffusion manifold, the consumption of the diffusion manifold in percent and the current value of the coefficient of the combustion chamber. Fuzzy regulator output - calculation of the current value of harmful substances in the combustion chamber for further calculation of the total emission of harmful substances for the takeoff and landing mode of the aircraft.

On the basis of the total calculation of harmful substances, it is possible to draw a conclusion on the fulfillment of the emission requirements, which is 18 kg.

The research results have confirmed the reduction of the influence of the uncertainty of the combustion process and the reduction of emissions in the airfield area.

**Keywords:** gas turbine engine, the combustion chamber, meter of harmful substances, neural network, fuzzy regulator.

### References

1. Feoktistova O.G., Feoktistova T.G., Ekzertseva E.V. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* (Life Safety), Rostov na Donu, Feniks, 2006, 320 p.
2. Gurevich O.S. *Upravlenie aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigatelyami* (Aircraft Gas Turbine Engine Control), Moscow, Izd-vo MAI, 2001, 100 p.
3. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskii V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok* (Basics of Designing Aircraft Engines and Power Plants), Moscow, Mashinostroenie, 2008, vol. 2, 368 p.
4. Baklanov A.V., Krasnov D.S., Garaev A.I. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116314>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-2](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-2)
5. Benderskii B.Ya., Chernova A.A. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115121>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-5)
6. Baklanov A.V., Makarova G.F., Vasil'ev A.A., Nuzhdin A.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100700>

7. Isaev A.I., Skorobogatov S.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87340>
8. Isaev A.I., Mairovich Yu.I., Safarbakov A.M., Khodatskii S.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75583>
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. 2, no. 6, pp. 348 - 355.
10. Khizhnyakov Yu.N. *Nechetkoe, neironnoe i gibridnoe upravlenie* (Fuzzy, Neural and Hybrid Controls), Perm', Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, 303 p.
11. Larsen P.M. Industrial applications of fuzzy logic control, *International Journal of Man-Machine Studies*, 1980, vol. 12, issue 1, pp. 3 - 10. URL: [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(80\)80050-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(80)80050-2)
12. Mamdani E.H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, *Proceedings of the IEEE*, 1974, vol. 121, no. 12, pp. 1585 – 1588.
13. Devyatkov V.V. *Sistemy iskusstvennogo intellekta silovymi ustanovkami* (Artificial Intelligence Systems by Power Plants), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 320 p.
14. Yasnitskii L.N. *Intellektual'nye sistemy* (Intelligent Systems), Moscow, Laboratoriya znanii, 2016, 221 p.
15. Terekhov V.A. *Neirosetevye sistemy upravleniya* (Neural Network Control Systems), Moscow, Vysshaya shkola, 2002, 183 p.

16. Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. *Neironnye seti. Geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* (Neural Networks. Genetic Algorithms and Fuzzy Systems), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2006, 193 p.
17. Smirnov V.A., Khasanova A.A. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*, 2003, no. 4 (21), pp. 33 - 38.
18. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy Modeling and Control), Moscow, BINOM. Laboratoriya znanii, 2007, 798 p.
19. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* (Design of Fuzzy Systems Using MATLAB), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2007, 288 p.
20. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i FuzzyTech* (Fuzzy Modeling in MATLAB and FuzzyTech), Moscow, Izd-vo «BKhV-Peterburg», 2005, 736 p.

# **Adaptive virtual meter of harmful substances in the combustion chamber of a gas turbine engine using fuzzy technology**

**Nikulin V.S.\*, Storozhev S.A., Abdullin D.M., Khizhnyakov Yu.N.**

*Perm National Research Polytechnic University, PNRPU,*

*29, Komsomolsky Prospekt, Perm, 614990, Russia*

*\*e-mail: [kalif23@yandex.ru](mailto:kalif23@yandex.ru)*

## **Abstract**

The toolkit of soft computing technologies is based on fuzzy systems, probabilistic models, neural networks, genetic algorithms, etc., which have their own advantages and disadvantages. The application of this toolkit is considered for an aircraft gas turbine engine (GTE) of aircraft operating under conditions of uncertainty.

The distribution of fuel between the manifolds is performed using a fuzzy regulator, the inputs of which are the pressure in the combustion chamber, temperature in the combustion chamber, fuel consumption in the diffusion manifold. Fuzzy controller output - calculation of the current value of the coefficient of the combustion chamber or the content of the oxidant in the combustion chamber. The calculation of the amount of harmful substances is carried out using a fuzzy regulator, the inputs of which are the temperature in the combustion chamber, the fuel consumption of the diffusion manifold, the consumption of the diffusion manifold in percent and the current value of the coefficient of the combustion chamber. Fuzzy regulator output - calculation of the current value of harmful substances in the combustion chamber for further calculation of the total emission of harmful substances for the takeoff and landing mode of the aircraft.

On the basis of the total calculation of harmful substances, it is possible to draw a conclusion on the fulfillment of the emission requirements, which is 18 kg.

The research results have confirmed the reduction of the influence of the uncertainty of the combustion process and the reduction of emissions in the airfield area.

**Keywords:** gas turbine engine, the combustion chamber, meter of harmful substances, neural network, fuzzy regulator.

### References

1. Feoktistova O.G., Feoktistova T.G., Ekzertseva E.V. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* (Life Safety), Rostov na Donu, Feniks, 2006, 320 p.
2. Gurevich O.S. *Upravlenie aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigatelyami* (Aircraft Gas Turbine Engine Control), Moscow, Izd-vo MAI, 2001, 100 p.
3. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskii V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok* (Basics of Designing Aircraft Engines and Power Plants), Moscow, Mashinostroenie, 2008, vol. 2, 368 p.
4. Baklanov A.V., Krasnov D.S., Garaev A.I. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116314>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-2](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-2)
5. Benderskii B.Ya., Chernova A.A. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115121>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-5)
6. Baklanov A.V., Makarova G.F., Vasil'ev A.A., Nuzhdin A.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100700>

7. Isaev A.I., Skorobogatov S.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87340>
8. Isaev A.I., Mairovich Yu.I., Safarbakov A.M., Khodatskii S.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75583>
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. 2, no. 6, pp. 348 - 355.
10. Khizhnyakov Yu.N. *Nechetkoe, neironnoe i gibridnoe upravlenie* (Fuzzy, Neural and Hybrid Controls), Perm', Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, 303 p.
11. Larsen P.M. Industrial applications of fuzzy logic control, *International Journal of Man-Machine Studies*, 1980, vol. 12, issue 1, pp. 3 - 10. URL: [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(80\)80050-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(80)80050-2)
12. Mamdani E.H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, *Proceedings of the IEEE*, 1974, vol. 121, no. 12, pp. 1585 – 1588.
13. Devyatkov V.V. *Sistemy iskusstvennogo intellekta silovymi ustanovkami* (Artificial Intelligence Systems by Power Plants), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 320 p.
14. Yasnitskii L.N. *Intellektual'nye sistemy* (Intelligent Systems), Moscow, Laboratoriya znanii, 2016, 221 p.
15. Terekhov V.A. *Neirosetevye sistemy upravleniya* (Neural Network Control Systems), Moscow, Vysshaya shkola, 2002, 183 p.

16. Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. *Neironnye seti. Geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* (Neural Networks. Genetic Algorithms and Fuzzy Systems), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2006, 193 p.
17. Smirnov V.A., Khasanova A.A. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*, 2003, no. 4 (21), pp. 33 - 38.
18. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy Modeling and Control), Moscow, BINOM. Laboratoriya znanii, 2007, 798 p.
19. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* (Design of Fuzzy Systems Using MATLAB), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2007, 288 p.
20. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i FuzzyTech* (Fuzzy Modeling in MATLAB and FuzzyTech), Moscow, Izd-vo «BKhV-Peterburg», 2005, 736 p.