

Новый метод адаптации регулятора состояний с применением нечеткой логики

Сторожев С.А.*, Хижняков Ю.Н.

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

**e-mail: cepra5@mail.ru*

Статья поступила 31.03.2021

Аннотация

Рассматривается новый метод адаптации регулятора состояний на базе нечеткой технологии с применением треугольных терм, координаты оснований и вершин которых располагаются согласно настройкам регулятора состояний. Степени принадлежности определяются с помощью синглтонов, которые перемещаются синхронно с входными переменными. Число терм равно числу входных переменных. Выход регулятора состояний рассчитывается методом средневзвешенного с последующим воздействием на дозатор авиационного газотурбинного двигателя с целью регулирования расхода топлива.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель, адаптивный нечеткий регулятор состояний, адаптивный фаззификатор, дефаззификатор, дозатор.

Введение

Регулятор состояний есть многомерный регулятор, учитывающий в своей структуре взаимосвязь переменных в объекте управления (ОУ). Данный регулятор требует измерения всех компонентов вектора состояния объекта. Рассмотрим применение регулятора состояний применительно к авиационному газотурбинному двигателю (ТРД) [1 – 4]. Состояние ТРД характеризуется тремя переменными: частота вращения свободной турбины (вентилятор или компрессор низкого давления), частота вращения компрессора высокого давления и температура горения газа за камерой сгорания, которые являются проекциями вектора состояния. Положение вектора состояния задается рабочей точкой на статической характеристике, которая перемещается по ней с помощью дозатора (дифференциального коллектора). Все переменные зависят от расхода топлива, его качества и синхронно изменяются в одном направлении в текущий момент времени. В настоящее время все перечисленные параметры регулируются отдельно либо с помощью селектора (селективного регулятора), что является недостатком, так как исключается свойство приспособляемости к изменению внешней среды (адаптация). Предлагается заменить селективный регулятор параметров регулятором состояний, который управляет дозатором ТРД. В статье предлагается новый метод адаптации регулятора состояний с применением нечеткой логики.

Известный метод адаптации (метод активной адаптации) [5, 6] предполагают знание эталонной модели объекта, которая требует постоянной коррекции из-за старения элементов реального лингвистического недетерминированного объекта, ПИ-регулятора и органов управления. Лингвистический недетерминированный

объект – объект, не имеющий математического описания, параметры которого плавно изменяются по времени. При выбранном критерии качества по вновь откорректированной модели объекта корректируют настройки точного ПИ-регулятора согласно итерационной процедуры идентификации и оптимизации (ИПИО [5]). Недостатком метода является ограничение выбора структуры передаточной функции модели объекта, которое исключает наличие комплексных корней в полиноме знаменателя передаточной функции эталонной модели.

Другой метод адаптации предполагает также лингвистический недетерминированный объект, где адаптация выполнена с применением метода последовательного обучения [7]. Здесь возможны разные варианты построения фаззификатора с применением линейных и нелинейных терм (функций принадлежности), задаваемое терм-множество может располагаться в нормированном интервале $-1...+1$, где расположение терм имеет субъективный характер, что является недостатком [7]. Исключить субъективизм в расположении терм можно устранить при выборе нормированного интервала $0...+1$ [8, 9], где основании терм равны и соответствуют интервалу $0...1$. Адаптация в данном случае достигается также методом последовательного обучения.

Новым в концепции проектирования адаптивного регулятора состояний является то, что, если входов регулятора состояний несколько, то для каждого входа используется только одна треугольная функция принадлежности (терма), параметры которой задаются настройками регулятора состояний, учитывающим предыдущее

состояние САР. Степени принадлежности определяются с помощью синглтонов, которые смещаются синхронно с входными переменными.

На рис.1 приведена структурная схема управления авиационным газотурбинным двигателем (ГТД).

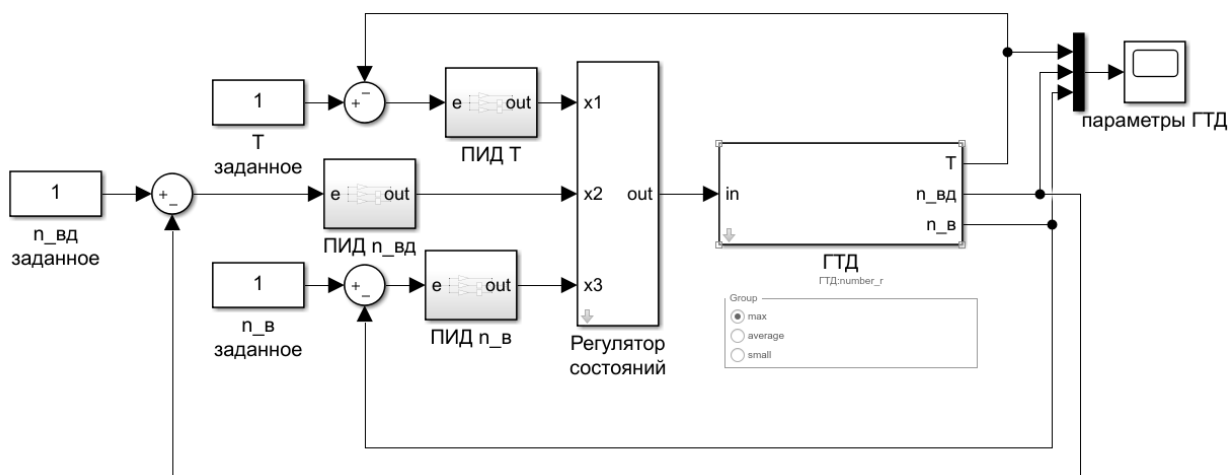


Рис.1. Структурная схема САР ГТД

На приведенной структурной схеме (см. рис.1) введены три ПИД-регулятора [6] в каждый контр управления, выходы которых являются входами регулятора состояний. Регулятор состояний управляет через дозатор подачу топлива в камеру сгорания ГТД.

Метод адаптации регулятора состояний предполагает применение треугольных терм, координаты оснований и вершин которых располагаются согласно его настройкам. Степени принадлежности определяются с помощью синглтонов, которые смещаются синхронно с изменением входных переменных. Число терм равно числу входных переменных.

На рис.2 показано расположение треугольных терм 1, 2, 3 входов и синглтоны по всем переменным x_1, x_2, x_3 , с помощью которых вычисляются степени принадлежности (выход фаззификатора).

Математическое описание треугольной термы адаптивного фаззификатора выполнено согласно выражению [10] (1).

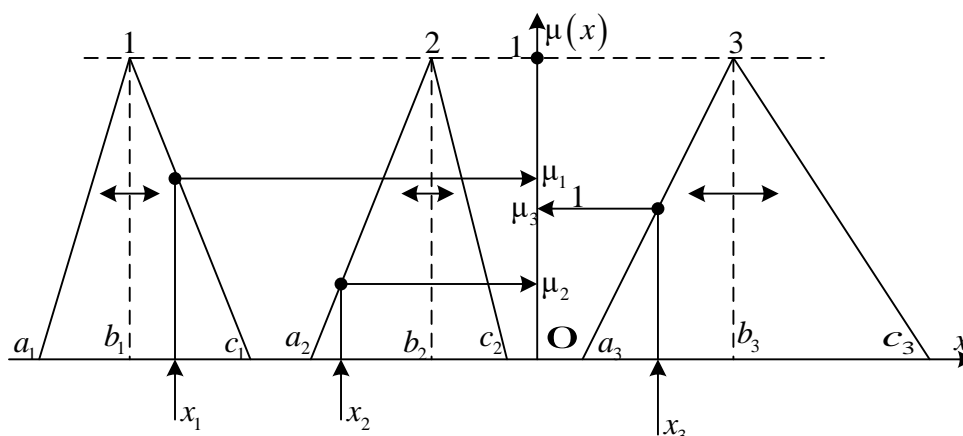


Рис. 2. К пояснению вычисления степеней принадлежности адаптивного фаззификатора регулятора состояний

$$\mu_i(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c; \\ 0, & x \geq c; \end{cases} \quad (1)$$

В формуле (1) x – один из входов регулятора состояний;

координата b вычисляется как среднее арифметическое значение входа регулятора состояний за последние n тактов и реализуется в блоке адаптации (см. рис.3) (значение n является настройкой адаптивного регулятора состояний); расстояния между a и b , b и c являются настройками адаптивного регулятора состояний.

На рис. 3 приведена структурная схема расчета степени принадлежности i -входа.

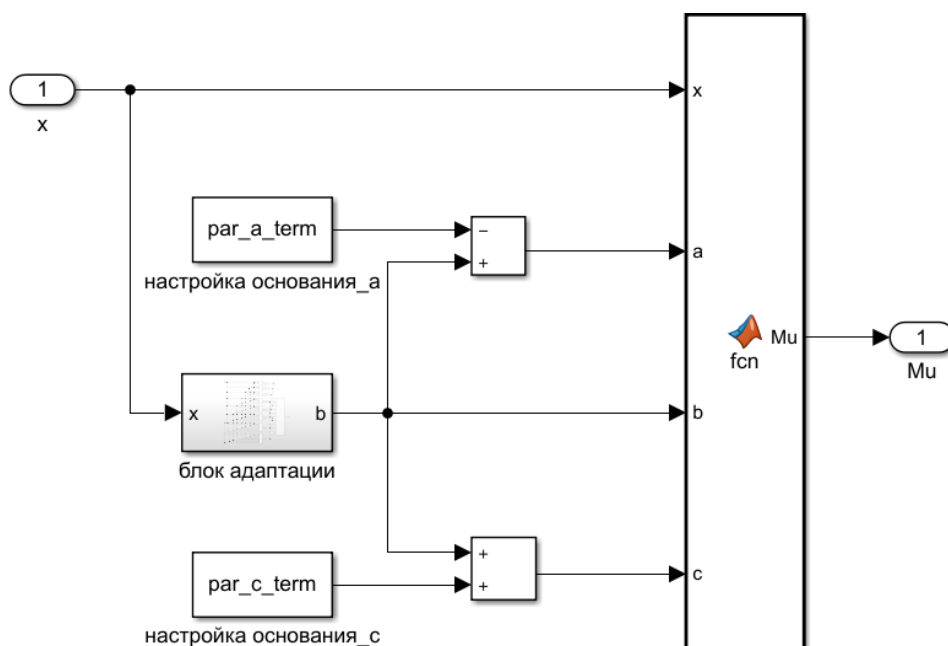


Рис. 3. Структурная схем расчета степени принадлежности i -входа в *Matlab*

На рис. 4 приведена структурная схема расчета среднего арифметического значения расположения вершин треугольных терм регулятора состояний.

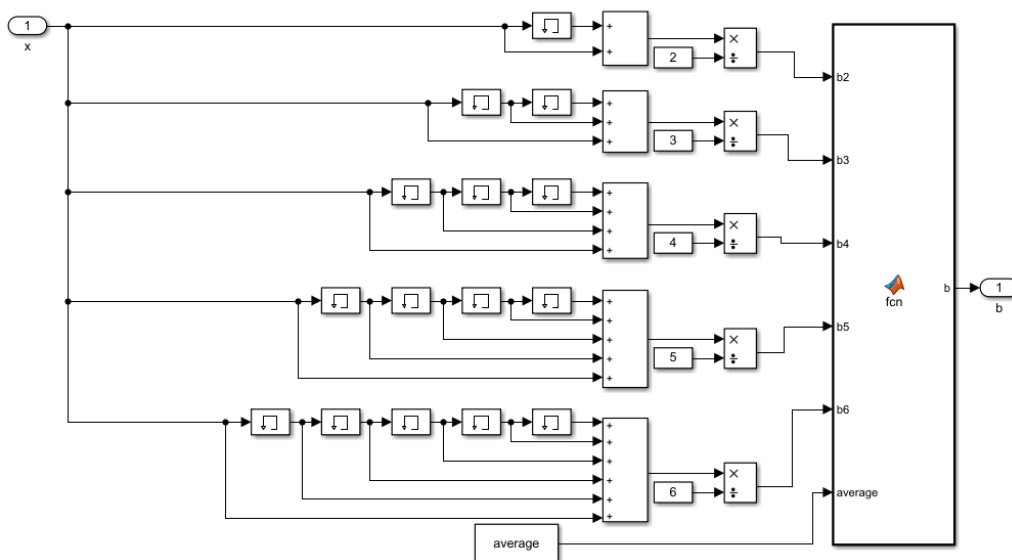


Рис. 4. Блок адаптации фаззификатора регулятора состояний

На рис. 5 приведена структурная схема адаптивно регулятора состояний.

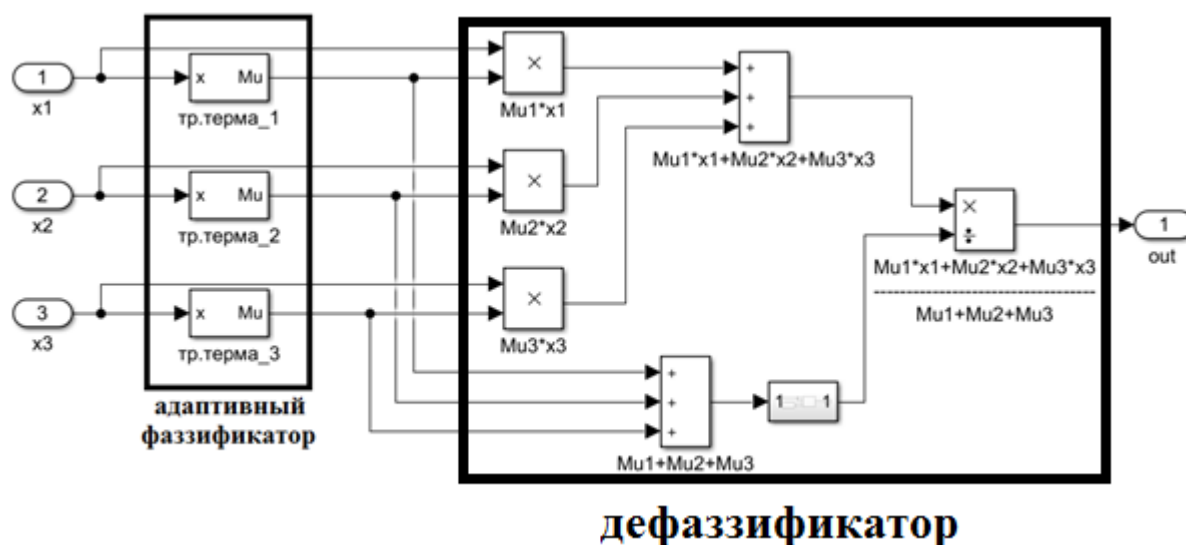


Рис.5. Адаптивный регулятор состояний

После расчета степеней принадлежности в адаптивном фаззификаторе, проводятся преобразования в дефаззификаторе с помощью метода средневзвешенного (2) [7,11–13].

$$k = \frac{\sum_{i=1}^3 \mu_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^3 \mu_i}, \quad (2)$$

где x_i – текущие значения входов адаптивного регулятора состояний;

μ_i – степени принадлежности с выхода фаззификатора;

k – коэффициент усиления адаптивного регулятора состояний.

В качестве модели ГТД [9, 10] выбрана модель с динамическим кольцом с целью повышения газодинамической устойчивости и расчета температуры за камерой сгорания.

Моделирование САУ ГТД, представленной на рис. 1, проводилось на максимальном режиме (взлет) ГТД, [11, 12], с использованием штатного селектора (управление по минимальной ошибке в контурах) и адаптивного регулятора состояний (см. рис. 5). Сравнение переходного процесса контура «n_вд» (см. рис. 6) по основным показателям качества представлено в табл. 1.

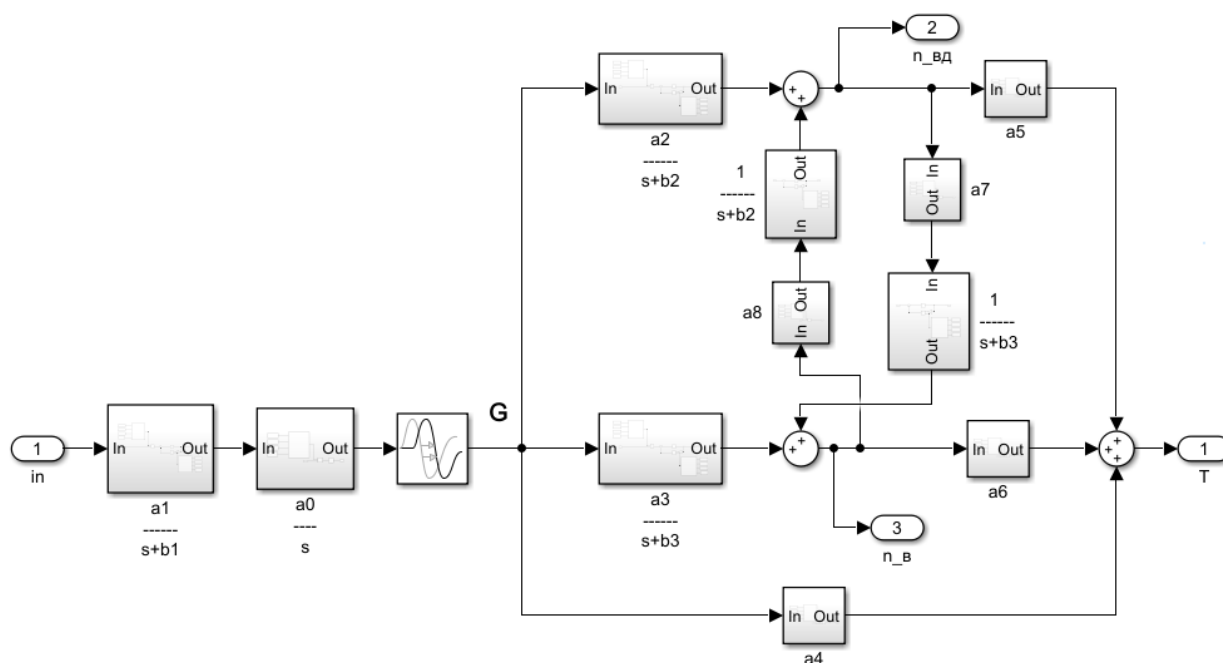


Рис. 6.

Математическая модель газотурбинного двигателя

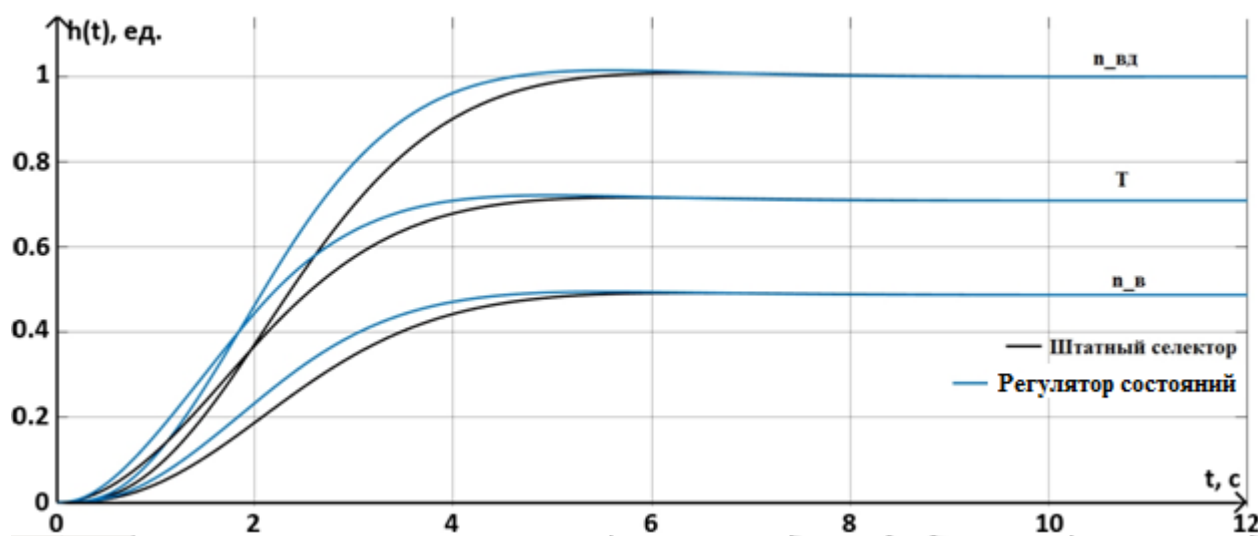


Рис. 7. Переходный процесс при запуске ГТД на максимальном режиме (взлет)

Таблица 1 Сравнение показателей качества САУ ГТД

Тип регулятора контуров ГТД	Время переходного процесса, с	Перерегулирование, %
Штатный селектор	4,5	1,05
Адаптивный регулятор состояний	3,9	1,45

Исходя из полученных данных, вновь разработанный адаптивный регулятор состояний дополняет теорию нечетких систем [14 – 20], а также является дальнейшим развитием метода активной адаптации недетерминированных объектов [5].

Заключение

1. Предложен новый метод адаптации при проектировании регулятора состояний подачи топлива в камеру сгорания ГТД.
2. Адаптивный регулятор состояний предназначен для автоматического регулирования подачи топлива в камеру сгорания ГТД.
3. Адаптивный регулятор состояний имеет преимущества перед штатным селектором за счет введения адаптации в работу дозатора ГТД.
4. Мультиагентный подход к проектированию регуляторов состояний не имеет ограничений по числу входов последнего.

Библиографический список

1. Иноземцев А.А., Нихамкин А.А., Сандрацкий В.Л. 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. Гуревич О.С. Управление авиационными газотурбинными двигателями. – М.: Изд-во МАИ, 2001. - 100 с.
4. Гуревич О.С. Системы автоматического управления ГТД: энциклопедический справочник. - М.: Торус Пресс, 2011. – 208 с.
5. Боровиков Д.А., Ионов А.В., Селиверстов С.Д., Яковлев А.А. Анализ влияния дополнительной осевой ступени компрессора на характеристики малоразмерных турбореактивных двигателей // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85654>
6. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
7. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 303 с.
8. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.
9. Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами: справочник. – Киев: Техника, 1990. – 280 с.
10. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 798 с.

11. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
12. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. - СПб.: БХВ Петербург, 2005. - 736 с.
13. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. - М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
14. 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>
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. 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. DOI: [10.14489/vkit.2015.09.pp.032-041](https://doi.org/10.14489/vkit.2015.09.pp.032-041)
18. Хижняков Ю. Н. Южаков А.А. Нейронечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя // Приборы. 2010. № 5. С. 17 - 21.
19. 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=90175>

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>

A new status regulator adapting method employing fuzzy logic

Storozhev S.A.*, Khizhnyakov Yu.N.

Perm National Research Polytechnic University, PNRPU,

29, Komsomolsky Prospekt, Perm, 614990, Russia

**e-mail: cepra5@mail.ru*

Abstract

From the control theory point of view, an aircraft gas turbine engine (GTE) is a complex nonlinear object, which frame mathematical description is known a priori. While the GTE operation, continuous parameters monitoring, such as gas temperature behind the combustion chamber, rotor speed of a low pressure compressor (free turbine), rotor speed of a high pressure turbocharger (gas generator), is required. Further development of gas turbine engine control may be associated with the fuzzy control application. The goal of the study consists in upgrading control the fuel supplying to the GTE combustion chamber. The article proposes a new approach to the state regulator adaptation employing triangular terms with different bases, which vertices are being displaced depending on the arithmetic mean values of the input variables of the gas turbine engine, and the bases of the terms are attached to the current abscissas of the term vertices. There is a possibility to develop an adaptive fuzzifier from the analysis of the “traversed path” of each input variable, based on the proposed approach to terms adaptation. The grade of membership determining of the fuzzyfier was performed on the singleton base. Defuzzification was performed based on the weight-average formula. This adaptive state regulator allows replacing the standard selector and ensuring adaptability to the GTE external operation conditions. The developed adaptive state regulator is being characterized by better values probability of no-failure of the engine

electronic regulator (EER). The results of the study may be employed for the combustion chamber control. The obtained adaptive state regulator will allow significant reduction of the uncertainty in the combustion chamber operation, ensuring guaranteed thrust of the flying vehicle.

Keywords: aircraft gas turbine engine, adaptive fuzzy status regulator, weighted average method, adaptive fuzzyfier, defuzzyfier, dispenser.

References

1. Inozemtsev A.A., Nikhamkin A.A., Sandratskii V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok* (Fundamentals of aircraft engines and power plants design), 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. Gurevich O.S. *Upravlenie aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigatelyami* (Aircraft gas turbine engine control), Moscow, Izd-vo MAI, 2001, 100 p.
4. Gurevich O.S. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya GTD: entsiklopedicheskii spravochnik* (Automatic control systems for gas turbine engines: Encyclopedic reference book), Moscow, Torus Press, 2011, 208 p.
5. Borovikov D.A., Ionov A.V., Seliverstov S.D., Yakovlev A.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85654>

6. Dorf R., Bishop R. *Sovremennye sistemy upravleniya* (State-of-the-art control systems), Moscow, Laboratoriya bazovykh znanii, 2002, 832 p.
7. Khizhnyakov Yu.N. *Nechetkoe, neironnoe i gibridnoe upravlenie* (Fuzzy, neural and hybrid control: textbook. guide), Perm', Izd-vo PNIPU, 2013, 303 p.
8. Gostev V.I. *Proektirovanie nechetkikh regulyatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Fuzzy controllers design for automatic control systems), Saint Petersburg, BKhV-Peterburg, 2011, 416 p.
9. Gostev V.I. *Sistemy upravleniya s tsifrovymi regulyatorami: spravochnik* (Control systems with digital regulators. Directory), Kiev, Tekhnika, 1990, 280 p.
10. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy modeling and control), Moscow, BINOM. Laboratoriya znanii, 2007, 798 p.
11. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* (Fuzzy systems design with MATLAB), Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2007, 288 p.
12. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* (Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH), Saint Petersburg, BKhV Peterburg, 2005, 736 p.
13. Yarushkina N.G. *Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh sistem* (Fundamentals of fuzzy and hybrid systems theory), Moscow, Finansy i statistika, 2004, 320 p.
14. Chicherova E.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57812>
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. Bobyr' M.V., Kulabukhov S.A. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2015, no. 9, pp. 32 – 41. DOI: [10.14489/vkit.2015.09.pp.032-041](https://doi.org/10.14489/vkit.2015.09.pp.032-041)
18. Khizhnyakov Yu. N. Yuzhakov A.A. *Pribory*, 2010, no. 5, pp. 17 - 21.
19. Isaev A.I., Skorobogatov S.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90175>
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>