

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2023.3.04

УДК 681.51:681

В.С. Никулин, С.А. Сторожев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

ВИРТУАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Виртуальные измерители являются программными алгоритмами или моделями, которые используются для оценки или предсказания различных параметров на основе доступных данных. Они могут быть настроены и адаптированы для различных условий, не требуют наличия физического датчика, могут обрабатывать данные в режиме реального времени и применяться для повышения эффективности функционирования и управления различными техническими объектами в таких отраслях, как медицина, промышленность, энергетика и другие. Несмотря на преимущества, виртуальные измерители также имеют свои ограничения. Они могут быть менее точными, чем физические датчики, особенно в случаях, когда требуется высокая точность измерения. Кроме того, они могут быть чувствительны к качеству и доступности данных, поэтому требуются тщательное моделирование и калибровка для достижения наилучших результатов с использованием современных подходов. **Цель исследования:** создание виртуального измерителя температуры камеры сгорания на базе нечеткой логики, обеспечивающего мгновенное измерение с помощью значений параметров газотурбинного двигателя (ГТД). **Методы:** предлагается новый подход к построению виртуальных измерителей на базе нечеткой логики, основанный на оптимизации затрат вычислительных ресурсов. Моделирование осуществляется с помощью пакета прикладных программ MatLab в среде моделирования Simulink. Экспериментальные данные предоставлены одним из ведущих предприятий в области разработки и производства систем управления ГТД. **Результаты:** разработанный виртуальный измеритель температуры камеры сгорания на базе нечеткой логики обеспечивает мгновенное измерение на основании значений параметров ГТД, при соблюдении требований по затратам вычислительных ресурсов и точности. **Значимость:** результаты исследования могут быть использованы для построения или модификации систем управления ГТД. Применение виртуального измерителя температуры камеры сгорания на базе нечеткой логики взамен измерителя на основе термопары позволит значительно ускорить процесс измерения и, следовательно, улучшить основные показатели качества системы автоматического управления ГТД.

Ключевые слова: камера сгорания, ГТД, виртуальный измеритель, температура камеры, нейронечеткая система вывода.

V.S. Nikulin, S.A. Storozhev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

VIRTUAL COMBUSTION CHAMBER TEMPERATURE MEASUREMENT BASED ON FUZZY LOGIC

Virtual meters are software algorithms or models that are used to estimate or predict various parameters based on available data. They can be configured and adapted to various conditions, do not require a physical sensor, can process data in real time and are used to improve the efficiency of functioning and control of various technical objects in such industries as medicine, industry, energy and others. Despite the advantages, virtual temperature meters also have their limitations. They may be less accurate than physical sensors, especially in applications where high measurement accuracy is required. In addition, they can be sensitive to data quality and availability, so careful modeling and calibration is required to achieve the best results using modern approaches. **Research goal:** the creation of a virtual combustion chamber temperature meter based on fuzzy logic, which provides instantaneous measurement using the values of the gas turbine engine (GTE) parameters. **Methods:** a new approach to the construction of virtual meters based on fuzzy logic based on the optimization of computational resources is proposed. Simulation is carried out using the MatLab application package in the Simulink simulation environment. Experimental data were provided by one of the leading enterprises in the development and production of gas turbine engine control systems. **Results:** The developed virtual combustion chamber temperature meter based on fuzzy logic provides instant measurement based on the values of GTE parameters, while meeting the requirements for computational resources and accuracy. **Significance:** the results of the study can be used to build or modify GTE control systems. The use of a virtual combustion chamber temperature meter based on fuzzy logic instead of a thermocouple-based meter will significantly speed up the measurement process and, consequently, improve the main quality indicators of the GTE automatic control system.

Keywords: combustion chamber, gas turbine engine, virtual meter, chamber temperature, neuro-fuzzy inference system.

Введение

Применение виртуального датчика температуры камеры сгорания газотурбинного двигателя взамен термопары является актуальным и перспективным направлением развития в области мониторинга и контроля работы двигателей. Виртуальный датчик температуры представляет собой программное обеспечение, которое использует данные о значениях параметров ГТД и алгоритмы обработки информации для определения температуры камеры сгорания [1–5].

Одним из основных преимуществ виртуального датчика температуры является его способность работать без прямого контакта с газами высокой температуры внутри камеры сгорания. Это позволяет избежать проблем, связанных с износом и повреждением термопары, которая может быть подвержена высоким температурам и агрессивной среде [6]. Еще одним преимуществом виртуального датчика температуры является

быстродействие. Это позволяет более эффективно контролировать работу двигателя и предотвращать различные аварийные ситуации [7].

В целом, применение виртуального датчика температуры камеры сгорания газотурбинного двигателя взамен термопары представляет собой современное и эффективное решение для контроля и мониторинга работы двигателей. Оно обеспечивает большую гибкость, точность и надежность, что является важным фактором для обеспечения безопасности и эффективности работы газотурбинных двигателей [8–11].

В работе приводится новый подход к построению виртуальных измерителей на базе нечеткой логики, основанный на оптимизации затрат вычислительных ресурсов.

1. Основная часть

На рис. 1 приведена структурная схема системы управления ГТД. Программа поступает в электронный регулятор двигателя (РЭД), где формируются управляющие воздействия на ГТД с помощью сравнения программных и текущих значений параметров ГТД [12–18].

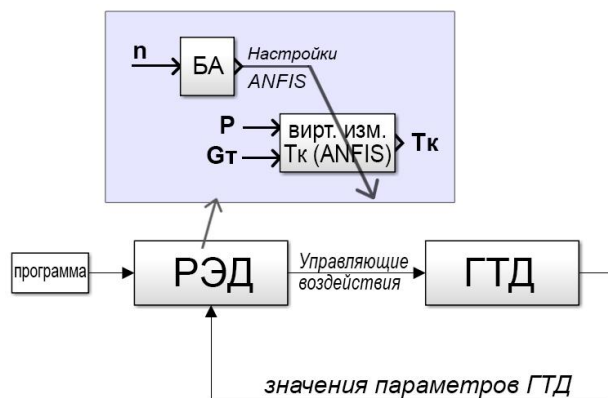


Рис. 1. Структурная схема системы управления ГТД

В данной работе разрабатывается виртуальный измеритель температуры камеры сгорания « T_k » (см. рис. 1), основанный на оценке параметров ГТД: « P » – давление в камере сгорания, « G_t » – расход топлива.

На рис. 2 приводится структура нейронечеткой системы вывода ANFIS [19–22].

ANFIS содержит по 3 треугольных терм-множества на каждый вход (« L », « M » и « H ») и 9 правил (таблица). Данная структура подобрана, исходя из ограничений по вычислительным затратам РЭД.

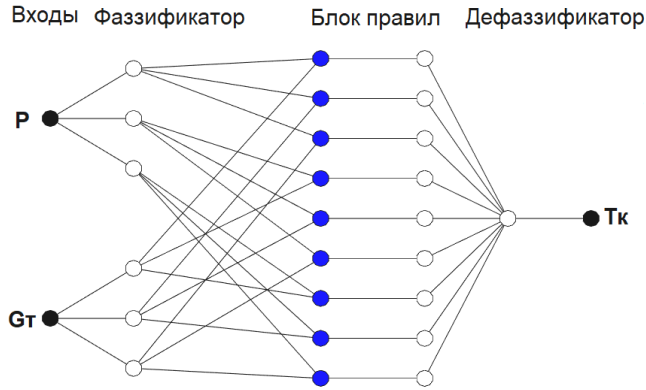


Рис. 2. Структура нейронечеткой системы вывода ANFIS

Блок правил

G_{τ} \ P	L	M	H
L	out1	out2	out3
M	out4	out5	out6
H	out7	out8	out9

Дефаззификация выполняется по методу среднего взвешенного значения (1) [23].

$$T_k = \frac{\sum \mu_i \cdot out_i}{\sum \mu_i},$$

где

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \min(\mu_{L}^{G_{\tau}}, \mu_{L}^P); \mu_2 = \min(\mu_{L}^{G_{\tau}}, \mu_{M}^P); \mu_3 = \min(\mu_{L}^{G_{\tau}}, \mu_{H}^P); \\ \mu_4 &= \min(\mu_{M}^{G_{\tau}}, \mu_{L}^P); \mu_5 = \min(\mu_{M}^{G_{\tau}}, \mu_{M}^P); \mu_6 = \min(\mu_{M}^{G_{\tau}}, \mu_{H}^P); \\ \mu_7 &= \min(\mu_{H}^{G_{\tau}}, \mu_{L}^P); \mu_8 = \min(\mu_{H}^{G_{\tau}}, \mu_{M}^P); \mu_9 = \min(\mu_{H}^{G_{\tau}}, \mu_{H}^P). \end{aligned}$$

Данные для обучения нейронечеткой системы вывода ANFIS содержали 15 000 строк, учитывающие 5 режимов работы ГТД: «Взлет», «Набор 1», «Набор 0.5», «Набор 0.1» и «Руление» (по 3000 строк на каждый из режимов). Обучение нейронечеткой системы вывода проводилось в пакете прикладных программ MatLab [24–25].

Результат работы виртуального измерителя, обученного на всем диапазоне данных, приведены на рис. 3. Красными звездочками обозначены выходы виртуального измерителя, а синими окружностями – исходные данные. Как видно из рисунка, данные разнятся на большинстве режимов.

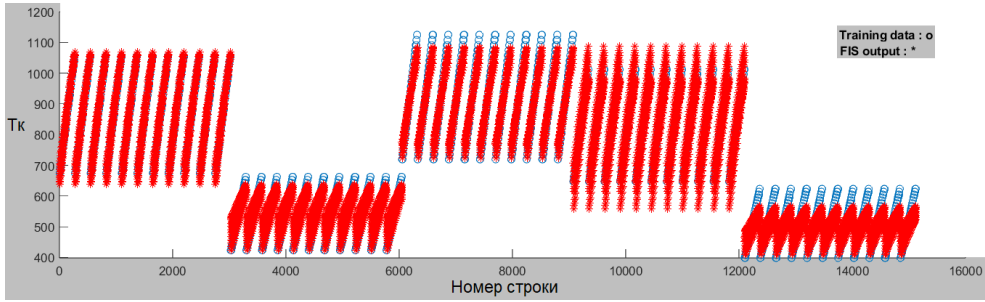


Рис. 3. Результаты работы виртуального измерителя без блока адаптации

Среднее квадратическое отклонение (СКО) при обучении нейронечеткой системы вывода ANFIS на всем диапазоне данных равняется 51,353. Полученное значение СКО обусловлено малой вычислительной мощностью, отведенной для виртуального измерителя температуры камеры сгорания.

В данной работе предлагается уменьшение значения СКО за счет разбиения данных на режимы и получения индивидуальных настроек нейронечеткой системы вывода на каждом из режимов. Настройки расположения терм-множеств входа « G_T » на «режиме набора 0,1» и на «режиме набора 0,5» приведены на рис. 4.

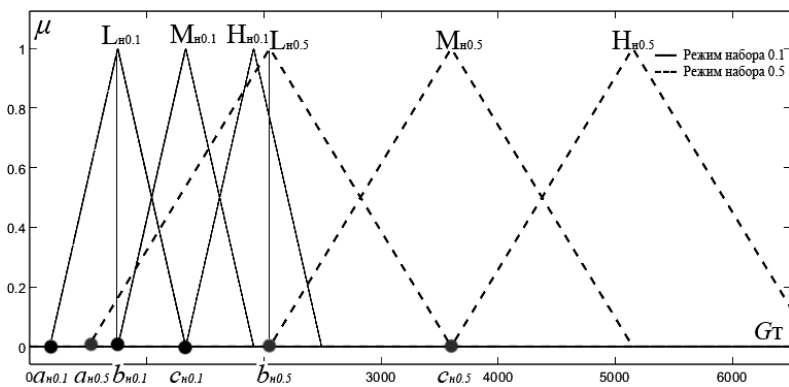


Рис. 4. Расположение терм-множеств входа « G_T » на «режиме набора 0,1» и на «режиме набора 0,5»

Настройки расположения терм-множеств входа « P » на «режиме набора 0,1» и на «режиме набора 0,5» приведены на рис. 5.

Для определения текущих настроек нейронечеткой системы вывода разработан блок адаптации (см. «БА», рис. 1). Каждому из режимов соответствует определенное значение оборотов ротора высокого давле-

ния « n »: «Взлет» – 1615; «Набор 1» – 1190; «Набор 0.5» – 565; «Набор 0.1» – 215; «Руление» – 160. Некоторые зависимости параметров виртуального измерителя от оборотов ГТД приведены на рис. 6.

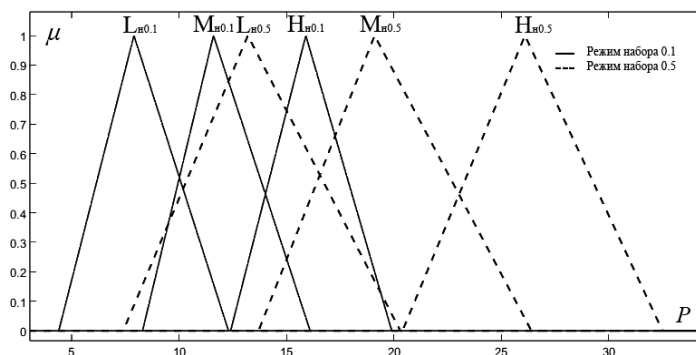
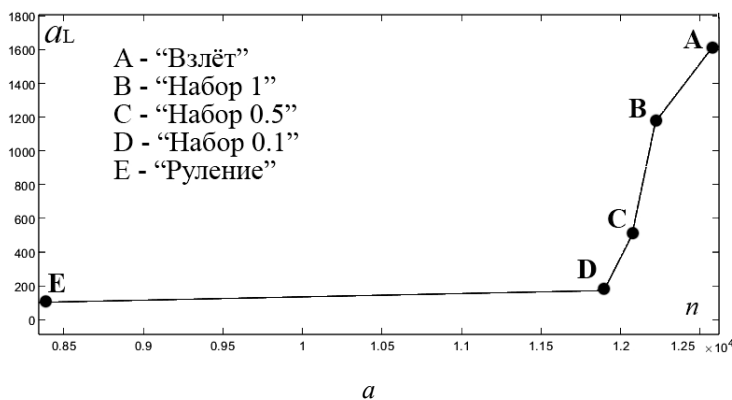
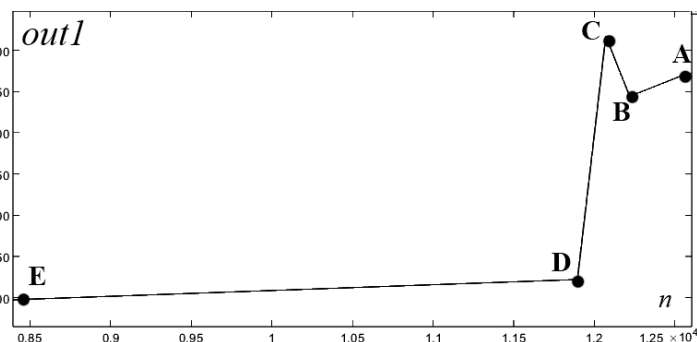


Рис. 5. Расположение терм-множеств входа « P » на «режиме набора 0,1» и на «режиме набора 0,5»



a



б

Рис. 6. Зависимости параметров виртуального измерителя от оборотов ГТД: *a* – параметра « a » терм-множества « L » для входа « G_1 »; *б* – индивидуального выхода первого правила « $out1$ »

Результаты работы виртуального измерителя температуры камеры сгорания после разбиения данных на режимы и введения блока адаптации приведены на рис. 7, значение СКО равняется 5,136.

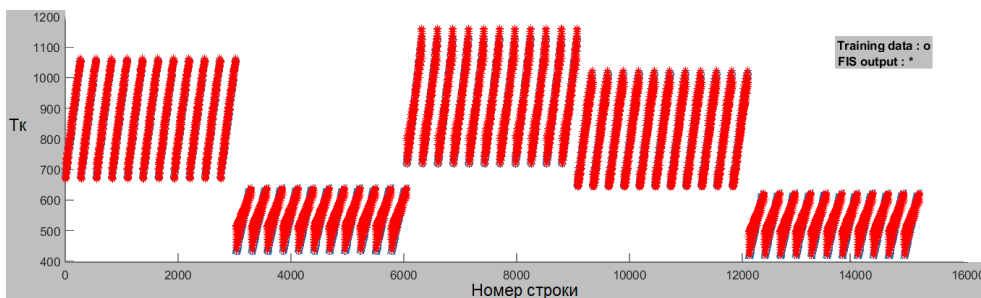


Рис. 7. Результаты работы виртуального измерителя с учетом блока адаптации

Благодаря применению нового подхода к построению виртуального измерителя на базе нечеткой логики, описанного выше, удалось увеличить точность (СКО уменьшилось с 51,353 до 5,136).

Заключение

В статье приведен и апробирован новый подход к построению виртуальных измерителей на базе нечеткой логики, основанный на оптимизации затрат вычислительных ресурсов на примере измерителя температуры камеры сгорания газотурбинного двигателя.

Получены результаты в пакете прикладных программ MatLab, подтверждающие эффективность нового подхода к построению виртуальных измерителей, которые являются значимыми для развития науки и техники в области управления в технических системах.

Перспективы дальнейших исследований по данной тематике следующие: усовершенствование блока адаптации, использование различных структур нейронечетких систем вывода и способов обучения.

Библиографический список

1. Сафина Э.Ф. Пирометр для измерения температуры лопатки ГТД // Мавлютовские чтения: материалы XVI Всерос. молодеж. науч. конф.: в 6 т.; Уфа, 25–27 октября 2022 г. – Уфа: Изд-во Уфим. гос. авиац. техн. ун-та, 2022. – Т. 3. – С. 58–64.
2. 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>

3. Смышляев А.О., Кутлин Н.А., Гильмутдинов А.М. Исследование содержания вредных выбросов газотурбинных установок // Научный журнал. – 2019. – № 6 (40). – С. 31–32.

4. Экспериментальное исследование термоэлектрических генераторов автономного питания беспроводных датчиков САУ ГТД / М.Г. Кессельман, А.С. Трофимов, В.И. Чернышов, А.А. Семин // Системы автоматического управления авиационными силовыми установками: сб. науч. тр. / под ред. О.С. Гуревича. – М.: Изд-во Центр. ин-та авиац. моторостроения им. П.И. Баранова, 2020. – С. 113–119.

5. Нейронечеткое управление выбросами вредных веществ авиационного газотурбинного двигателя / Н.В. Андриевская, О.А. Андриевский, М.Д. Кузнецов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, № 6. – С. 348–355. DOI: 10.17587/mau.21.348-355

6. Применение бортовой математической модели для управления газотурбинным двигателем с дополнительной камерой сгорания / Ф.Д. Гольберг, О.С. Гуревич, С.А. Зуев, А.А. Петухов // Вестник Моск. авиац. ин-та. – 2019. – Т. 26, № 4. – С. 90–97. DOI: 10.34759/vst-2019-4-90-97

7. Цифровой двойник установки для испытаний центробежного компрессора малоразмерного ГТД / Ю.М. Темис, А.В. Соловьева, Ю.Н. Журенков [и др.] // Авиационные двигатели. – 2021. – № 1 (10). – С. 5–16. DOI: 10.54349/26586061_2021_1_5

8. Гуревич О.С. Управление авиационными газотурбинными двигателями: учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 100 с.

9. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления и контроля ГТД: проблемы и перспективы // Авиадвигатели XXI века: матер. III Междунар. науч.-техн. конф. – М.: ЦИАМ, 2010. – С. 854–855.

10. Kulikov G.G., Thompson H.A. Dynamic modeling of gas turbines: identification, simulation, condition monitoring and optimal control // Advances in Industrial Control. – London: Springer-Verlag, 2004. – 309 p.

11. Гольберг Ф.Д., Бетенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления: учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 80 с.

12. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А., Титов Ю.К. Проектирование адаптивного нечеткого регулятора положения дозатора ВРД // Электротехника. – 2018. – № 11. – С. 6–11.

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

14. Селективное управление газотурбинным двигателем / С.А. Сторожев, А.А. Южаков, Ю.Н. Хижняков, В.С. Никулин // Электротехника. – 2020. – № 11. – С. 18–21.

15. Самоорганизующаяся система управления ГТД / Б.Г. Ильясов, В.И. Васильев, Е.В. Денисова, Г.А. Сайтова // Мехатроника, автоматизация, управление: тр. Второй Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. – Уфа, 2005. – Т. 1. – С. 277–280.

16. Жуковская Э.П., Лебедев М.В. Диагностика и реконфигурация подсистем управления газотурбинным двигателем на основе нечеткой логики // Авиакосмическое приборостроение. – 2002. – № 3. – С. 40–44.

17. Кофман В.М. Математическая модель и программа на ЭВМ для осреднения параметров неравномерных воздушных и газовых потоков при обработке результатов испытаний ГТД и его узлов // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2019. – № 26–1. – С. 41–54.

18. Черкасов Б.А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.

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

20. Artificial intelligence simulation of suspended sediment load with different membership functions of ANFIS / M. Babanezhad, I. Behroyan, A. Marjani, S. Shirazian // Neural Computing & Applications. – 2020. DOI: 10.1007/s00521-020-05458-6

21. Assessing landslide susceptibility using machine learning models: a comparison between ANN, ANFIS, and ANFIS-ICA / M. Sadighi, B. Motamedvaziri, H. Ahmadi, A. Moeini // Environmental Earth Sciences. – 2020. – Vol. 79, № 24. – P. 1–14. DOI: 10.1007/s12665-020-09294-8

22. Игнатъев В.В., Соловьев В.В. Разработка ANFIS-системы для управления неустойчивым нелинейным техническим объектом // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2021. – № 11–12 (79). – С. 94–99.

23. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – Киев: Радиоматор, 2008. – 972 с.

24. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MatLab и FuzzyTech. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – С. 736.

25. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.

References

1. Safina E.F. Piometr dlia izmereniia temperatury lopatki GTD [Pyrometer for measuring GTE blade temperature]. Mavliutovskie chteniia. *Materialy XVI Vserossiiskoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii; Ufa, 25-27 October 2022*. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet, 2022, vol. 3, pp. 58-64.

2. 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>

3. Smyshliaev A.O., Kutlin N.A., Gil'mutdinov A.M. Issledovanie sodержaniia vrednykh vybrosov gazoturbinnnykh ustanovok [Study of the content of harmful emissions from gas turbine plants]. *Nauchnyi zhurnal*, 2019, no. 6 (40), pp. 31-32.

4. Kessel'man M.G., Trofimov A.S., Chernyshov V.I., Semin A.A. Eksperimental'noe issledovanie termoelektricheskikh generatorov avtonomnogo pitaniia besprovodnykh datchikov SAU GTD [Experimental study of thermoelectric generators for autonomous power supply of wireless sensors of ACS GTE]. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniia aviatsionnymi silovymi ustanovkami. Sbornik nauchnykh trudov*. Ed. O.S. Gurevich. Moscow: Tsentr. instituta aviatsionnogo motorostroeniia imeni P.I. Baranova, 2020, pp. 113-119.

5. Andrievskaia N.V., Andrievskii O.A., Kuznetsov M.D. [et al.] Neironechetkoe upravlenie vybrosami vrednykh veshchestv aviatsionnogo

gazoturbinnogo dvigatel'ia [Neuro-Fuzzy Control of Emissions of Harmful Substances of an Aviation Gas Turbine Engine]. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 348-355. DOI: 10.17587/mau.21.348-355

6. Gol'berg F.D., Gurevich O.S., Zuev S.A., Petukhov A.A. Primenenie bortovoi matematicheskoi modeli dlia upravleniia gazoturbinnym dvigatelem s dopolnitel'noi kameroy sgoraniia [Application of an onboard mathematical model for controlling a gas turbine engine with an additional combustion chamber]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 90-97. DOI: 10.34759/vst-2019-4-90-97

7. Temis Iu.M., Solov'eva A.V., Zhurenkov Iu.N. [et al.] Tsifrovoy dvoynik ustanovki dlia ispytaniia tsentrobezhnogo kompressora malorazmernogo GTD [Digital twin of a small GTE centrifugal compressor test facility]. *Aviatsionnye dvigateli*, 2021, no. 1 (10), pp. 5-16. DOI: 10.54349/26586061_2021_1_5

8. Gurevich O.S. Upravlenie aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigateliami [Aircraft Gas Turbine Engine Control]. Moscow: Moskovskii aviatsionnyi institut, 2001, 100 p.

9. Vasil'ev V.I., Il'iasov B.G. Intellektual'nye sistemy upravleniia i kontrolya GTD: problemy i perspektivy [Intelligent control and monitoring systems for gas turbine engines: problems and prospects]. *Aviadvigateli XXI veka. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Moscow: ЦИАМ, 2010, pp. 854-855.

10. Kulikov G.G., Thompson H.A. Dynamic modeling of gas turbines: identification, simulation, condition monitoring and optimal control. *Advances in Industrial Control*. London: Springer-Verlag, 2004, 309 p.

11. Gol'berg F.D., Betenin A.V. Matematicheskie modeli gazoturbinnikh dvigatelei kak ob"ektov upravleniia [Mathematical Models of Gas Turbine Engines as Control Objects]. Moscow: Moskovskii aviatsionnyi institut, 1999, 80 p.

12. Khizhniakov Iu.N., Iuzhakov A.A., Titov Iu.K. Proektirovanie adaptivnogo nechetkogo reguliatora polozheniia dozatora VRD [A Way to Design an Adaptive Fuzzy Controller for the Dispenser Position of an Air-Breathing Engine]. *Elektrotekhnika*, 2018, no. 11, pp. 6-11.

13. 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 institute*, 2018, no. 99, available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91926>

14. Storozhev S.A., Iuzhakov A.A., Khizhniakov Iu.N., Nikulin V.S. Selektivnoe upravlenie gazoturbinnym dvigatelem [Selective Control of a Gas-Turbine Engine]. *Elektrotehnika*, 2020, no. 11, pp. 18-21.

15. Il'iasov B.G., Vasil'ev V.I., Denisova E.V., Saitova G.A. Samoorganizuiushchiasia sistema upravleniia GTD [Self-organizing GTE control system]. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie. Trudy Vtoroi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Ufa, 2005, vol. 1, pp. 277-280.

16. Zhukovskaia E.P., Lebedev M.V. Diagnostika i rekonfiguratsiia podsistem upravleniia gazoturbinnym dvigatelem na osnove nechetkoi logiki [Diagnostics and reconfiguration of gas turbine engine control subsystems based on fuzzy logic]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2002, no. 3, pp. 40-44.

17. Kofman V.M. Matematicheskaia model' i programma na EVM dlia osredneniia parametrov neravnomernykh vozdushnykh i gazovykh potokov pri obrabotke rezul'tatov ispytaniia GTD i ego uzlov [Mathematical model and computer program for averaging the parameters of non-uniform air and gas flows when processing the test results of gas turbine engines and its components]. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 2019, no. 26-1, pp. 41-54.

18. Cherkasov B.A. Avtomatika i regulirovanie vozdušno-reaktivnykh dvigatelei [Automation and regulation of jet engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 360 p.

19. Nikulin V.S. Modifikatsiia seti Anfis [Modification of the Anfis network]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2022, no. 42, pp. 178-193. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.09

20. Babanezhad M., Behroyan I., Marjani A., Shirazian S. Artificial intelligence simulation of suspended sediment load with different membership functions of ANFIS. *Neural Computing & Applications*, 2020. DOI: 10.1007/s00521-020-05458-6

21. Sadighi M., Motamedvaziri B., Ahmadi H., Moeini A. Assessing landslide susceptibility using machine learning models: a comparison be-

tween ANN, ANFIS, and ANFIS-ICA. *Environmental Earth Sciences*, 2020, vol. 79, no. 24, pp. 1-14. DOI: 10.1007/s12665-020-09294-8

22. Ignat'ev V.V., Solov'ev V.V. Razrabotka ANFIS-sistemy dlia upravleniia neustoichivym nelineinym tekhnicheskim ob"ektom [Development of an ANFIS-system for the control of an unstable non-linear technical object]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniia v sovremennom mire*, 2021, no. 11-12 (79), pp. 94-99.

23. Gostev V.I. Nechetkie regulatory v sistemakh avtomaticheskogo upravleniia [Fuzzy controllers in automatic control systems]. Kiev: Radiomator, 2008, 972 p.

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

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

Сведения об авторах

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

Сторожев Сергей Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sastorozhev@pstu.ru).

About the authors

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).

Sergey A. Storozhev (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: sastorozhev@pstu.ru).

Поступила: 04.08.2023. Одобрена: 25.08.2023. Принята к публикации: 01.10.2023.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Никулин, В.С. Виртуальный измеритель температуры камеры сгорания на базе нечеткой логики / В.С. Никулин, С.А. Сторожев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 47. – С. 71–84. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.3.04

Please cite this article in English as:

Nikulin V.S., Storozhev S.A. Virtual combustion chamber temperature measurement based on fuzzy logic. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2023, no. 47, pp. 71-84. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.3.04