

Ю. Н. Хижняков, д-р техн. наук, проф., luda@at.pstu.ru, А. А. Южаков, д-р техн. наук, проф., uz@at.pstu.ru,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Д. А. Сулимова, dsulimova@list.ru,
АО "ОДК-СТАР", г. Пермь

Модификация многорежимного управления воздушным реактивным двигателем

В настоящее время широкое применение находит концепция многорежимного управления сложными регулируемы-ми объектами, ключевым понятием которой является анализатор динамических ситуаций. В статье предлагается замена данного анализатора регулятором состояний на примере управления воздушным реактивным двигателем. Состояние воздушного реактивного двигателя характеризуется следующими переменными: частота вращения свободной турбины (вентилятор или компрессор низкого давления), частота вращения компрессора высокого давления, давление и температура горения газа за камерой сгорания и т. д., которые являются проекциями вектора состояния, где рабочая точка в текущий момент времени перемещается по статической характеристике. Все переменные зависят от расхода топлива, его качества и синхронно изменяются в текущий момент времени. В настоящее время все перечисленные параметры воздушного реактивного двигателя регулируются отдельно, что является недостатком. Предлагается заменить линейные регуляторы перечисленных параметров одним регулятором состояния, который управляет дозатором воздушного реактивного двигателя. Задача адаптивного нечеткого регулятора состояний — изменять расход топлива дозатором в целях управления параметрами для реализации различных режимов работы воздушного реактивного двигателя с применением нейронечеткой технологии. Разработанная модель регулятора состояний отвечает требованиям системы реального времени, а также снижает аппаратные затраты на построение системы управления за счет исключения селектора.

Ключевые слова: воздушно-реактивный двигатель, датчики, дозатор, адаптивный нечеткий регулятор состояний, селектор

Введение

Решение сложных задач регулирования целесообразно основывать на декомпозиции общей задачи регулирования. Такая декомпозиция предполагает, что все многообразие движений системы разделяется на ряд режимов исходя из технических, технологических, динамических или функциональных признаков [1]. Следует различать режимы движения объекта и режимы регулирования. По существу, многорежимное управление рассмотрено в работах [2—8]. В работе [9] выдвинута концепция многорежимного регулирования, базирующаяся на понятии динамической ситуации, при которой происходит учет информативных признаков ситуации, формируемых на основе поступающей от измерительных датчиков информации о текущем состоянии объекта и характере неконтролирующих возмущений. В структуру многорежимного регулятора входит совокупность регуляторов для управления текущими параметрами регулируемого объекта и анализатор динамических ситуаций. В свою очередь, анализатор динамических ситуаций включает датчики контролируемых параметров объекта регулирования и неконтролируемых возмущений от внешней и внутренней сред, а также

оцениватели ситуации и формирователь сигнала переключений [1].

Многорежимное управление ВРД

Рассмотрим применение концепции многорежимного управления к воздушному реактивному двигателю (ВРД).

Эффективность любого летательного аппарата зависит от совершенства системы автоматического управления силовой установкой. Повышение надежности эксплуатации, экономия топлива, снижение эксплуатационных затрат силовых установок на базе ВРД, снижение их массы и стоимости делают актуальным создание комплексных систем управления, интегрируемых по аппаратуре и по способам управления ВРД [10—12].

ВРД есть нелинейный многорежимный объект с мерой неопределенности математического описания. Данный объект, имеющий один вход (дозирующее устройство) и n селективно управляемых выходов, подвержен влиянию внутренних возмущений (протечка разогретого топлива в дозаторе, изменение зазора в регуляторе сопло—заслонка дозатора и т. д.) и внешних неконтролируемых возмущений (от-

клонения температуры и давления воздуха от заданных значений по высоте и т. д.) [13, 14].

Штатное управление построено на предположении, что ВРД есть линейный объект (в малом) с математическим описанием в виде передаточных функций с переменными коэффициентами по всем контролируемым параметрам [15–17].

Цифровое управление ВРД не снимает проблемы, связанные с недетерминированностью (параметрической неопределенностью) объекта при работе в условиях помех. Необходимо учитывать инерционные свойства ВРД, гарантируемый запас устойчивости по модулю и фазе, применение адаптивных регуляторов, встроенных эталонных моделей ВРД и поведение системы управления в целом. При этом необходимо соблюдать требования системы реального времени (СРВ) в целях обеспечения функциональности и корректности при проектировании систем.

Состояние ВРД характеризуется следующими переменными: частота вращения свободной турбины (вентилятор или компрессор низкого давления), частота вращения компрессора высокого давления, давление и температура горения газа за камерой сгорания и т. д., которые являются проекциями вектора состояния. Рабочая точка в текущий момент времени перемещается по статической характеристике ВРД с изменением расхода топлива дозатором. Все переменные зависят от расхода топлива, его качества и синхронно изменяются в текущий момент времени. Анализатором динамических ситуаций и формирователем переключений сигналов здесь является селектор (асинхронный переключатель), подключающий дозатор к выходу регулятора параметра, вышедшего за допустимые пределы.

Постоянно растущая сложность и разнообразие задач, решение которых возлагается на автоматические системы, в последнее время определяют повышенную потребность в системах управления с более универсальными свойствами. Подходящим для решения большинства задач являются системы, основанные на нечеткой логике и нейронных элементах. Объединение элементов нечеткой логики и нейронных элементов позволяет реализовать "мягкие" вычисления в целях реализации адаптивных нечетких регуляторов [18].

По сравнению с традиционными методами анализа и вероятностным подходом адаптивное нечеткое управление позволяет решать задачи управления стохастическими объектами, получать результаты с заданной точностью, обеспечивать необходимое быстроедействие процессов управления, где нецелесообразно применять методы традиционной математики.

Учитывая назначение ВРД, необходимо рассмотреть его особенности при проектировании для повышения эффективности работы, вопросы селективности статических и динамических контуров, построения дозирующего устройства, диагностики работы оборудования.

В последнее десятилетие возникло несоответствие между достигнутым уровнем теории и новыми задачами развития теории управления ВРД [17, 18].

Известно, что автоматические системы управления можно разделить на два больших класса — неадаптивные и адаптивные. Работа неадаптивных систем основана на предположении, что внешние и внутренние условия работы системы изменяются в малых пределах.

Характерным признаком адаптивных систем является отсутствие полной информации об объекте управления, внешних возмущениях и граничных условиях, т. е. им присущ индетерминизм (неопределенность). Раскрытие неопределенности обеспечивается благодаря избыточности системы, логичности ее действия, прогнозированию ее состояния и анализу накапливаемой информации в целях самообучения.

К адаптивным системам можно отнести [19]:

- *экстремальные системы с нулевым заданием*, где поиск экстремума достигается с помощью формирования управляющих воздействий;
- *самонастраивающиеся системы*, где изменяются управляющие воздействия и параметры системы;
- *самоорганизующиеся системы*, где изменяются управляющие воздействия, параметры и структура системы;
- *обучающиеся системы*, где изменяются управляющие воздействия, параметры, структура, алгоритм функционирования, а в случае самообучения — и целевая функция.

Наиболее эффективными адаптивными системами являются аналитические активные замкнутые обучающиеся системы [20, 21].

На примере адаптивного нечеткого регулятора состояния ВРД рассмотрим возможность построения аналитических активных замкнутых обучающихся систем.

Модифицированный многорежимный регулятор состояния

В настоящее время все перечисленные параметры ВРД регулируются отдельно, что является недостатком. Предлагается заменить линейные регуляторы таких параметров, как частота вращения свободной турбины (венти-

лятор или компрессор низкого давления), частота вращения компрессора высокого давления, давления и температура горения газа за камерой сгорания и т. д., одним регулятором состояния, который управляет дозатором ВРД, т. е. реализовать многорежимный подход.

Задача адаптивного нечеткого регулятора состояний — изменять расход топлива дозатором для управления параметрами ВРД в заданных пределах и реализовать различные режимы работы ВРД. Учитывая отсутствие датчика расхода топлива, нельзя рассчитывать текущий расход топлива в функции текущих значений параметров ВРД. Данную проблему можно устранить применением прямых моделей для опосредованного расчета текущих значений расхода топлива в соответствии с текущим значением параметров ВРД.

На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема модифицированного многорежимного управления объектом управления.

Для расчета параметров эталонных моделей ВРД нормируем их:

- частота вращения вентилятора

$$\sigma_1 = \frac{n_{\text{в}}}{n_{\text{в ном}}};$$

частота вращения компрессора высокого давления

$$\sigma_2 = \frac{n_{\text{тк}}}{n_{\text{тк ном}}};$$

температура горения газов за камерой сгорания

$$\sigma_3 = \frac{t}{t_{\text{ном}}}.$$

На рис. 2 приведен вариант модифицированного многорежимного управления с применением адаптивного нечеткого регулятора состояния.

На рис. 3 представлена структурная схема прямой модели по отдельному параметру (частота вращения вентилятора). Прямая модель реализует нейронечеткую технологию и включает адаптивный фаззификатор и блок активационных функций.

Терм-множество фаззификатора Φ содержит три линейных термина: a , b , c , как показано на рис. 4,

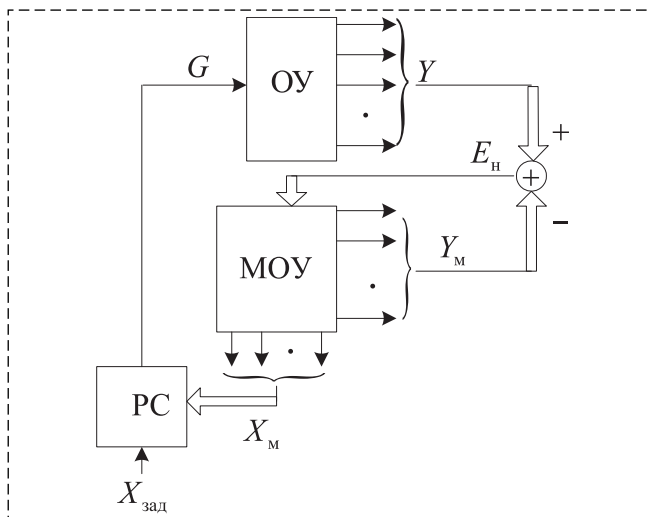


Рис. 1. Обобщенная структурная схема многорежимного управления объектом управления:

ОУ — объект управления; МОУ — модель объекта управления; РС — регулятор состояний; Y — вектор переменных выхода ОУ; Y_M — вектор переменных выхода МОУ; $X_{\text{зад}}$ — задание рабочей точки статической характеристики ОУ; X_M — вектор переменных обратных связей; G — текущее значение расхода топлива

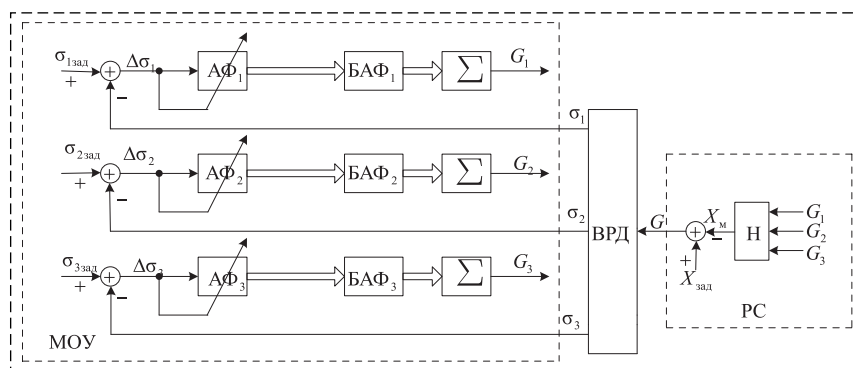


Рис. 2. Структурная схема модифицированного многорежимного управления ВРД:

$\Delta\sigma_{1\text{зад}}$, $\Delta\sigma_{2\text{зад}}$, $\Delta\sigma_{3\text{зад}}$ — значения переменных ВРД; $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$ — отклонения переменных ВРД от заданных значений; АФ₁, АФ₂, АФ₃ — адаптивные фаззификаторы; БАФ₁, БАФ₂, БАФ₃ — блоки активационных функций; G_1 , G_2 , G_3 — выходы прямых адаптивных нечетких моделей переменных ВРД; G — расход топлива дозатора ТВД; Н — нормализатор сигналов G_1 , G_2 , G_3

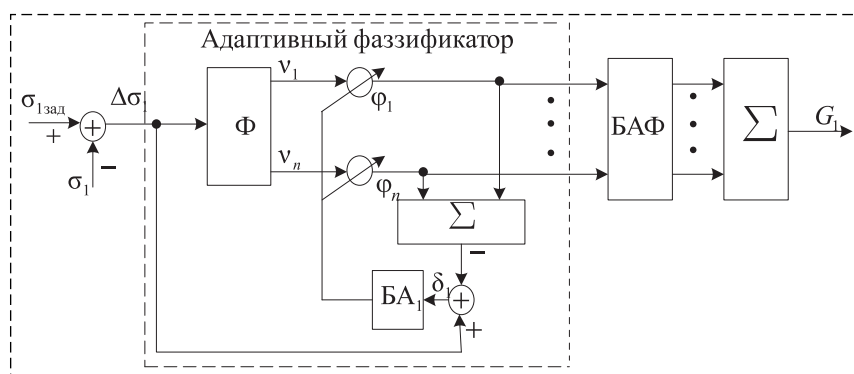


Рис. 3. Структурная схема прямой адаптивной нечеткой модели по текущему параметру:

Φ — фаззификатор; v_1 , v_2 , ..., v_n — степени принадлежности; ϕ_1 , ϕ_2 , ..., ϕ_n — синапсы адаптивного фаззификатора; БАФ — блок активационных функций; БА₁ — блок адаптации; δ_1 — функции невязки адаптивного фаззификатора

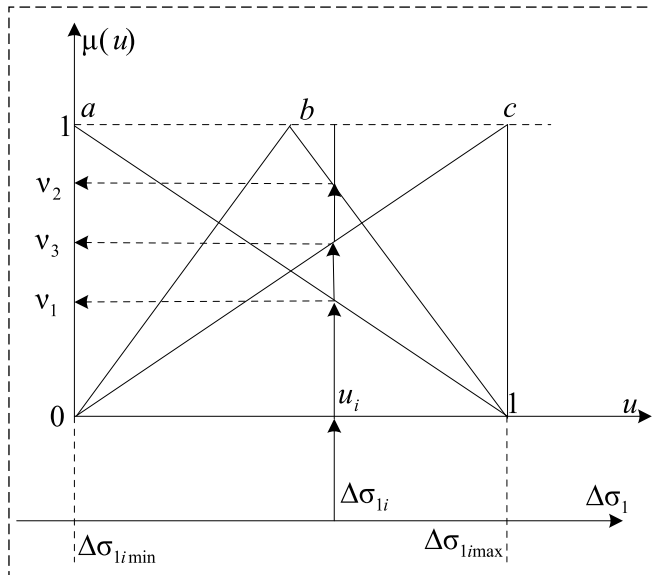


Рис. 4. Фаззификация отклонения входного сигнала от заданного значения

размещенных на интервале 0...1, где синглетон представлен пропорцией [22]

$$u_i = \frac{(\Delta\sigma_{li} - \Delta\sigma_{li \min})}{(\Delta\sigma_{li \max} - \Delta\sigma_{li \min})}.$$

Математическое описание терм-множества фаззификатора имеет вид

$$\begin{aligned} \mu_1(u) &= 1 - u, u \in [0, 1]; \\ \mu_2(u) &= \begin{cases} 2u, u \in \left[0, \frac{1}{2}\right]; \\ 2(1 - u), u \in \left[\frac{1}{2}, 1\right]; \end{cases} \\ \mu_3(u) &= u, u \in [0, 1]. \end{aligned}$$

Согласно текущему значению $\Delta\sigma_i$ определяются степени принадлежности v_1, v_2, v_3 (рис. 4).

Адаптация фаззификатора выполнена на базе линейного нейрона с помощью алгоритма последовательного обучения на основании рекуррентной формулы [23, 24]

$$\varphi_{j+1} = \varphi_j + C_1 \delta_{lj} \frac{\Delta\sigma_{lj}}{\Delta\sigma_{lj}^T \Delta\sigma_{lj}},$$

где φ_{j+1} — последующий $(j+1)$ -й шаг итерации; φ_j — предыдущий j -й шаг итерации; $\Delta\sigma_{lj}$ — дискретная форма j -итерации входного сигнала; $\Delta\sigma_{lmj}$ — оценка выхода модели; $\delta_{lj} = (\Delta\sigma_{lj} - \Delta\sigma_{lmj})$ — ошибка в оценке $\Delta\sigma_{lj}$; T — транспонирование; C_1 — коэффициент коррекции.

Цель адаптации степеней принадлежности фаззификатора — обеспечить сумму текущих

значений синапсов равной текущему отклонению, в котором отражается текущее состояние системы в целом.

Блок активационных функций (БАФ) включает активационные функции на базе гиперболического тангенса. Данная функция знакопеременная, ослабляет сильные и усиливает слабые входные сигналы [25–28].

Математическое описание прямых адаптивных нечетких моделей по другим текущим параметрам (частота вращения компрессора высокого давления и температуры горения газов в камере сгорания) аналогично математическому описанию прямой адаптивной нечеткой модели по частоте вращения вентилятора ТВД.

Для определения результирующего расхода топлива дозатором адаптивным нечетким регулятором состояния вводится нормализатор N сигналов (см. рис. 2) с последующим их суммированием и усреднением

$$G = X_{\text{зад}} - X_m,$$

$$\text{где } X_m = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{3}.$$

Заключение

1. Для реализации предлагаемого модифицированного многорежимного управления ВРД необходимо измерять все текущие параметры.
2. Разработка моделей ВРД по текущим параметрам эффективна с применением нейро-нечеткой технологии.
3. Формирование прямых моделей по текущим параметрам необходимо выполнять в пределах одного такта с учетом требований систем "реального времени".
4. Модифицированное многорежимное управление ВРД обеспечивает высокое качество управления и снимает аппаратные затраты на построение системы управления за счет исключения селектора.

Список литературы

1. Филимонов Н. Б. Системы многорежимного регулирования: концепция, принципы построения, проблемы синтеза // Известия высших учебных заведений "Приборостроение". 1988. Т. XXXI, № 2. С. 18–33.
2. Жук К. Д., Тимченко А. А., Доленко Т. И. Исследование структур и моделирование логико-динамических систем. Киев: Наукова думка, 1975. Тез. докл. X Всесоюз. совещ. по проблемам управления. Кн. 1. М.: ВИНТИ. 1986. С. 10–11.
3. Джафаров Э. М. Принципы построения и методы реализации комплекса многоструктурных автоматических систем и регуляторов на скользящих режимах // Тез. докл.

Х Всесоюз. совещ. по проблемам управления. М.: ВИНТИ. 1986. С. 41–42.

4. **Щавель В. В., Дорохов Е. Д., Исаков С. А., Земцов В. И.** Двухзонные следящие системы. М.: Энергоатомиздат, 1984.

5. **Ашимов А. А., Соколова Т. П.** Проектирование многомерных нелинейных систем управления с изменяющейся конфигурацией на основе метода сравнения // Тез. докл. X Всесоюз. совещ. по проблемам управления. Кн. 1. М.: ВИНТИ. 1986. С. 10–11.

6. **Стариков М. В.** Исследование автоматических систем с логическим управляющими устройствами. М.: Машиностроение, 1978.

7. **Колушев В. В., Мукасейева В. Н., Мунасыков Р. А.** К синтезу оптимальных многофункциональных систем автоматического управления. Современные проблемы автоматического управления // Тез. докл. 51 Всесоюз. совещ.-семинара молодых ученых. МВТУ. 1985. С. 71–72.

8. **Теория систем с переменной структурой** / Под ред. С. В. Емельянова. М.: Наука, 1967.

9. **Солодовников В. В., Филимонов Н. Б.** Динамическое качество систем автоматического регулирования. М.: Изд. МВТУ, 1987.

10. **Клячкин А. Л.** Теория воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1969.

11. **Пономарев Б. А.** Двухконтурные турбореактивные двигатели. М.: Воениздат, 1973. 133 с.

12. **Шульгин В. А., Гайсинский С. Я.** Двухконтурные турбореактивные двигатели маломощных самолетов. М.: Машиностроение, 1984. 168 с.

13. **Шляхтенко С. М.** Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1987. 568 с.

14. **Синяков А. Н., Шаймарданов Ф. А.** Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками. М.: Машиностроение, 1991. 32 с.

15. **Августинович В. Г.** и др. Идентификация систем управления авиационных ГТД / Под общ. ред. В. Т. Дедеша. М.: Машиностроение, 1984. 196 с.

16. **Августинович В. Г., Кузнецова Т. А.** Повышение надежности систем автоматического управления газотурбин-

ными двигателями с применением алгоритмических методов // Изв. Томского политехнического университета, 2015. Т. 326, № 9. С. 68–77.

17. **Августинович В. Г., Кузнецова Т. А.** Система автоматической параметрической диагностики газозвдушного тракта авиационного двигателя на базе робастной бортовой математической модели // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14, № 9. С. 17–23.

18. **Круглов В. В., Голунов Р. Ю.** Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. 224 с.

19. **Власов К. П.** Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета: учеб. пособ. Харьков: Изд-во Гуманитарный центр, 2013. 544 с.

20. **Дудкин Ю. П., Титов Ю. К., Филиппенков Р. Г., Хижняков Ю. Н.** Нечеткое управление частотой вращения свободной турбиной газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института (государственный технический университет). 2010. Т. 17, № 6. С. 55–60.

21. **Хижняков Ю. Н., Южаков А. А.** Нейронечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя // Приборы. 2010. № 5. С. 17–21.

22. **Гостев В. И.** Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.

23. **Гропп Д.** Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979.

24. **Леготкина Т. С., Данилова С. А.** Методы идентификации систем. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 155 с.

25. **Халов Е. А.** Одномерные многопараметрические функции принадлежности в задачах нечеткого моделирования и управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 2–10.

26. **Хижняков Ю. Н.** Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейронечеткого управления в системах реального времени: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 156 с.

27. **Хижняков Ю. Н.** Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 303 с.

28. **Хижняков Ю. Н.** Современные проблемы теории управления. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. 237 с.

Modification of Multimode Control of an Air Jet Engine

Yu. N. Khizhnyakov, A. A. Yuzhakov, luda@at.pstu.ru,

Perm National Research Polytechnic University, Department of Automation and Remote Control,

D. A. Sulimova, AO "ODK — STAR"

Corresponding author: Khizhnyakov Yuri N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Department of Automation and Remote Control, Professor of the Department of Automation and Remote Control, e-mail: luda@at.pstu.ru

Accepted on May 15, 2018

Currently, multi-mode control is widely used in the management of complex controlled objects. The actual solution of this article is the replacement of the dynamic situation analyzer by the state controller by the example of controlling the air jet engine. The state of the air jet engine is characterized by the following variables: the rotary frequency of the free turbine (fan or low-pressure compressor), the rotary frequency of the high-pressure compressor, the pressure and combustion temperature of the gas in the combustion chamber, etc., which are projections of the state vector, where the operating point in the current time moves on the static characteristic. All variables depend on the fuel consumption, its quality and synchronously change at the current time. Currently, all listed parameters of the air jet engine are regulated separately, which is a disadvantage. It is proposed to replace the linear regulators of the above parameters with a single state regulator that controls the dispenser of an air jet engine. The task of the fuzzy adaptive controller state is to change the fuel consumption of the dispenser in order to control the parameters for implementing the various operating modes of the air jet engine using neural-fuzzy technology. The developed model of the state controller meets the requirements of the real-time system, and reduces the hardware costs for building the control system by eliminating the selector.

Keywords: air-jet engine, sensors, dispenser, adaptive fuzzy state controller, selector

For citation:

Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A. A., Sulimova D. A. Modification of Multimode Control of an Air Jet Engine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 595–600.

DOI: 10.17587/mau.19.595-600

References

1. **Filimonov N. B.** *Sistemy mnogorezhimnogo regulirovaniya: koncepciya, principy postroeniya, problem sinteza* (Multimode regulation systems: concept, principles of construction, synthesis problems), *The News of Higher Educational Institutions "Instrument-Making"*, 1988, vol. XXXI, no. 2, pp. 18–33 (in Russian).
2. **Zhuk K. D., Timchenko A. A., Dolenko T. I.** *Issledovanie struktur i modelirovanie logiko-dinamicheskikh sistem* (Investigation of structures and modeling of logical-dynamic systems), Kiev, Naukova Dumka, 1975, Thesis. doc. X All-Union. sovshch. on problems of management. Book 1, Moscow, VINITI, 1986, pp. 10–11 (in Russian).
3. **Dzhafarov E. M.** *Principy postroeniya i metody realizacii kompleksa mnogostrukturnykh avtomaticheskikh sistem i regulatorov na skolzyaschikh rezhimakh* (Principles of construction and methods for realizing a complex of multi-structure automatic systems and regulators on sliding regimes), *Tez. doc. X All-Union. Soveshch. on Problems of Management*, Book 1, Moscow, VINITI, 1986, pp. 41–42 (in Russian).
4. **Dorokhov E. D., Isakov S. A., Zemcov V. I.** *Dvukhzonnye sledyashchie sistemy* (Two-zonetracking systems), Moscow, Energoatom izdat, 1984 (in Russian).
5. **Ashimov A. A., Sokolova T. P.** *Proektirovanie mnogomernykh nelineynykh sistem upravleniya s izmenyayusheysya konfiguratsiei na osnove metoda sravneniya* (Designing multidimensional nonlinear control systems with a changing configuration based on the comparison method), *Tez. doc. X All-Union. Soveshch. on Problems of Management*, Book 1, Moscow, VINITI, 1986, pp. 10–11 (in Russian).
6. **Starikova M. V.** *Issledovanie avtomaticheskikh sistem s logicheskimi upravlyayuschimi ustroystvami* (Investigation of automatic systems with logic control devices), Moscow, Mechanical Engineering, 1978 (in Russian).
7. **Kolushev V. V., Mukaseeva V. N., Munasykov R. A. K** *sintezu optimalnykh mnogofunktsionalnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* (To the synthesis of optimal multifunctional automatic control systems), *Modern problems of automatic control: Tez. doc. 51 All-Union. sovsh.-seminar of young scientists*, Moscow, Publishing house of MVТУ, 1985, pp. 71–72 (in Russian).
8. **Emelyanova S. V.** ed. *Teoriya sistem s peremennoi strukturoi* (Theory of systems with variable structure), Moscow, Nauka, 1967 (in Russian).
9. **Solodovnikov V. V., Filimonov N. B.** *Dinamicheskoe kachestvo sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (Dynamic quality of automatic control systems), Moscow, Publishing house of MVТУ, 1987 (in Russian).
10. **Klyachkin A. L.** *Teoriya vozdušno-reaktivnykh dvigatelei* (Theory of air-jet engines), Moscow, Publishing house "Mechanical Engineering", 1969 (in Russian).
11. **Ponomarev B. A.** *Dvukhkonturnye turboreaktivnye dvigateli* (Two-circuit turbojet engines), Moscow, Military Publishing, 1973, 133 p. (in Russian).
12. **Shulgin V. A., Gaisinskii S. Ya.** *Dvukhkonturnye turboreaktivnye dvigateli malomoschnykh samoletov* (Two-circuit turbojet engines of low-powered aircraft), Moscow, Mechanical Engineering, 1984, 168 p. (in Russian).
13. **Shlyakhtenko S. M.** *Teoriya i rachet vozdušno-reaktivnykh dvigatelei* (Theory and calculation of air-jet engines: a textbook for high schools), Moscow, Mechanical Engineering, 1987, 568 p. (in Russian).
14. **Sinyakov A. N., Shaimardanov F. A.** *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya LA i ikh silovymi ustanovkami* (Automatic control systems for aircraft and their power plants), Moscow, Mechanical Engineering, 1991, 32 p. (in Russian).
15. **Avgustinovich V. G., Kusnecova T. A.** *Identifikatsiya sistem upravleniya aviacionnykh GTD* (Identification of control systems for aviation GTE / Under the general), Moscow, Machine Building, 1984, 196 p. (in Russian).
16. **Avgustinovich V. G., Kusnecova T. A.** *Povyshenie nadezhnosti sistem avtomaticheskogo upravleniya gazoturbinnymi dvigatelyami c primeneniem algoritmicheskikh metodov* (Improving the reliability of automatic control systems for gas turbine engines using algorithmic methods), *Izv. Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 68–77 (in Russian).
17. **Avgustinovich V. G., Kusnecova T. A.** *Sistem avtomaticheskoi parametricheskoi diagnostiki gazovozdushnogo trakta aviacionnogo dvigatelya na baze robustnoi bortovoi matematicheskoi modeli* (The system of automatic parametric diagnostics of a gas-air tract of an aircraft engine on the basis of a robust onboard mathematical model), *Information-measuring and control systems*, 2016, vol. 14, no. 9, pp. 17–23 (in Russian).
18. **Kruglov V. V., Golunov R. Yu.** *Nechetkaya logika i iskustvennyye neironnye seti*. (Fuzzy logic and artificial neural net works), Moscow, Fizmatlit, 2001, 224 p. (in Russian).
19. **Vlasov K. P.** *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Osnovnye polozheniya. Primery racheta* (Theory of automatic control. Basic provisions. Examples of calculation. Tutorial), Publishing house of the Humanitarian Center, 2013, 544 p. (in Russian).
20. **Dudkin Yu. P., Titov Yu. K., Filippenkov R. G., Khizhnyakov Yu. N.** *Nechetkoe upravlenie chastotoi vrascheniya svobodnoi turbinoi gazoturbinnogo dvigatelya*. (Unclear control of the speed of rotation of a free turbine of a gas turbine engine), *Bulletin of the Moscow Aviation Institute (State Technical University)*, 2010, vol. 17, no. 6, pp. 55–60 (in Russian).
21. **Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A. A.** *Neiro-nechetkii regulator chastoty gazoturbinnogo dvigatelya* (Neuro-fuzzy frequency control of a gas turbine engine. Devices), 2010, no. 5, pp. 17–21 (in Russian).
22. **Gostev V. I.** *Proektirovanie nechetkikh regulatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Designing fuzzy controllers for automatic control systems), St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2011, 416 p. (in Russian).
23. **Gropp D.** *Metody identifikatsii sistem* (Method of System Identification. D. Gropp), Moscow, Mir, 1979 (in Russian).
24. **Legotkina T. S., Danilova S. A.** *Metody identifikatsii sistem* (Method of system identification), Perm, Publishinghouse of Perm. state. tech. University, 2008, 155 p. (in Russian).
25. **Khalov E. A.** *Odnomernye mnogoparametricheskie funktsii prinaldlezhnosti v zadachakh nechetkogo modelirovaniya i upravleniya* (One-dimensional multiparameter membership functions in problems of fuzzy modeling and control), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2007, no. 4, pp. 2–10 (in Russian).
26. **Khizhnyakov Yu. N.** *Algoritmy nechetkogo, neironnogo i neiro-nechetkogo upravleniya v sistemakh realnogo vremeni* (Algorithms of fuzzy, neural and neuro-fuzzy control in real-time systems: Proc. Allowance), Perm, Publishing house of Perm. nat. Issled. polytechnical. University, 2013, 156 p. (in Russian).
27. **Khizhnyakov Yu. N.** *Nechetkoe, neironnoe i gibridnoe upravlenie* (Fuzzy, Neural and Hybrid Control: Textbook. Allowance), Perm, Publishinghouse of Perm. nat. Issled. polytechnical. University, 2013, 303 p. (in Russian).
28. **Khizhnyakov Yu. N.** *Sovremennyye problemy teorii upravleniya* (Modern problems of control theory), Perm, Publishing house of Perm. nat. Issled. polytechnical. University, 2015, 237 p. (in Russian).