

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATICS

Научная статья

УДК 681.53

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.2.34>

Нечёткий групповой регулятор системы автоматического управления подачей топлива в камеру сгорания газотурбинного двигателя

А. А. Южаков[✉], С. А. Сторожев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Российская Федерация, 614013, Пермь, ул. Профессора Поздеева, 7
uz@at.pstu.ru[✉]

Аннотация. Разработан нечёткий групповой регулятор системы автоматического управления подачей топлива в камеру сгорания газотурбинного двигателя, который позволяет учитывать значения сразу нескольких каналов управления при формировании управляющего воздействия. Отличием нечёткого группового регулятора от селективного регулятора является зона совместной работы каналов. Нечёткий групповой регулятор позволяет осуществлять плавное переключение каналов управления.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель; камера сгорания; электронный регулятор двигателя; нечёткий групповой регулятор; метод взвешенного среднего; фаззификатор; дефаззификатор

Введение. Развитие важных областей человеческой деятельности – транспорта, робототехники, энергетики, промышленного производства требует совершенствования методов и средств управления техническими объектами, улучшения показателей качества, совершенствования устройств управления, снижения сроков, технических рисков и стоимости разработки.

Необходимость совершенствования методов и средств управления определяется тенденциями расширения практики использования «сложных» объектов, ужесточения требований к режимам эксплуатации систем управления, интеграции

элементов систем управления встраиваемых систем.

В современных условиях разработка устройств систем управления недетерминированными объектами, такими как газотурбинные двигатели (ГТД), методами классической теории управления существенно затруднена, а порой и практически невозможна. Для решения подобных задач всё большую значимость приобретает теория адаптивного нечёткого управления.

Решение задач повышения надёжности эксплуатации, экономии топлива, снижения эксплуатационных затрат силовых установок на базе ГТД делает

© Южаков А. А., Сторожев С. А., 2022.

Для цитирования: Южаков А. А., Сторожев С. А. Нечёткий групповой регулятор системы автоматического управления подачей топлива в камеру сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 2 (54). С. 34-46. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.2.34>

актуальным создание систем автоматического управления, функционирующих на современных принципах управления недетерминированными объектами управления.

ГТД являются объектами управления, число управляющих воздействий которых меньше числа управляемых параметров. Обычно управление в таком случае осуществляется с помощью алгоритмов логического селективного выбора каналов управления ГТД. К таким системам относятся системы автоматического управления (САУ) подачей топлива в камеру сгорания ГТД. При селективном выборе регулируется параметр двигателя, наиболее приблизившийся к величине, определяемой программой регулирования. Селективный выбор реализуется с помощью штатного селектора.

Построением САУ ГТД занимались отечественные учёные О. С. Гуревич, Ф. Д. Гольберг, А. А. Шевяков, В. И. Гостев, В. И. Петунин и др. [1–5]. Стоит отметить вклад таких зарубежных учёных, как В. Wittenmark, R. H. Middleton, G. C. Goodwin, J. D. Mattingly, W. H. Heiser, D. Pratt, H. A. Thompson [6–9] в развитие САУ ГТД.

В развитие применения САУ ГТД с селектором каналов внесли вклад Б.Г. Ильясов, Л.И. Волгин, Ф.Д. Гольберг, Ю.С. Кабальнов. Селекторы вводятся в САУ для устранения зоны совместной работы каналов управления и обеспечивают во всех условиях работы управляющее воздействие только одного из нескольких каналов управления, включаемых в работу в зависимости от режима работы объекта управления.

Однако данный принцип селектирования каналов справедлив лишь для статических режимов работы САУ ГТД. В работах О.С. Гуревича, В.И. Гостева, В.И. Петунина взаимодействие каналов сохраняется на переходных режимах и при воздействии неконтролируемых возмущений. При этом возможно возникновение зоны совместной работы каналов.

Отсюда возникает перерегулирование выходных параметров и увеличение времени переходных процессов в каналах ГТД. Это приводит к снижению ресурса ГТД.

Актуальность разработки группового регулятора на основе нечёткой логики определяется тем, что в имеющихся разработках присутствуют следующие недостатки:

- штатный селектор спроектирован с помощью выбора минимального или максимального сигнала (многозначная логика) в определённой последовательности, а применение многозначной логики приводит к противоречиям выбора каналов управления на переходных режимах ГТД;
- при проектировании регуляторов разработчики ориентируются на среднестатистические характеристики ГТД, не учитывая их отклонения при эксплуатации, что приводит к ухудшению качества управления на переходных режимах работы ГТД;

Цель работы – разработать групповой регулятор САУ подачей топлива в камеру сгорания ГТД на базе нечёткой логики взамен селективного регулятора для улучшения качества управления.

Решаемые задачи:

- 1) построение модели САУ подачей топлива в камеру сгорания ГТД;
- 2) замена селективного регулятора на нечёткий групповой регулятор;
- 3) оценка качества управления САУ с селективным регулятором и с нечётким групповым регулятором по целевой функции.

Имитационное моделирование. В данной работе используется математическая модель ГТД типа «вход–выход» [4].

Учитывая только инерции вращающихся масс роторов, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\vec{n}}_B = k_{BB}\dot{\vec{n}}_B + k_{BK}\dot{\vec{n}}_K + k_{BG}\dot{\vec{G}}_T; \\ \dot{\vec{n}}_K = k_{KB}\dot{\vec{n}}_B + k_{KK}\dot{\vec{n}}_K + k_{KG}\dot{\vec{G}}_T; \\ \dot{\vec{T}}_T = k_{TB}\dot{\vec{n}}_B + k_{TK}\dot{\vec{n}}_K + k_{TG}\dot{\vec{G}}_T, \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot{n}_K = \Delta n_K / n_{K0}$ – относительное отклонение частоты вращения ротора компрессора; $\dot{n}_B = \Delta n_B / n_{B0}$ – относительное отклонение частоты вращения ротора вентилятора; $\dot{T}_T = \Delta T_T / T_{T0}$ – относительное отклонение температуры газа за турбиной вентилятора; $\dot{G}_T = \Delta G_T / G_{T0}$ – относительное отклонение расхода топлива в основной камере сгорания; $n_{K0}, n_{B0}, T_{T0}, G_{T0}$ – значения соответствующих параметров на базовом установившемся режиме работы двигателя; k – коэффициенты влияния, которые выражают изменение регулируемой величины в долях величины приложенного возмущения на установившемся режиме работы ГТД.

В уравнении (1) регулируемые являются три параметра (три выходных переменных): частота вращения ротора вентилятора « n_B », частота вращения ротора компрессора « n_K » и температура газа за турбиной « T_T ». Управляющим параметром (управляющим воздействием) является расход топлива в основной камере сгорания G_T .

Динамическая модель исполнительного устройства представлена в виде:

$$\begin{cases} T_{3T} \ddot{z}_T + \dot{z}_T = k_{ZT} \dot{i}_T; \\ T_{HT} \ddot{G}_{TФОР} = \dot{z}_T; \\ \dot{G}_T = e^{-\tau_1 p} \dot{G}_{TФОР}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\dot{G}_{TФОР}, \dot{G}_T, \dot{z}_T, \dot{i}_T$ – относительные отклонения управляющих сигналов; T_{3T}, k_{ZT}, T_{HT} – постоянные коэффициенты динамической модели исполнительного устройства.

Температура газа за турбинным блоком измеряется термопарой, динамика которой описывается уравнением:

$$T_{TP} \dot{\bar{x}} + \bar{x} = \bar{T}_T, \quad (3)$$

где T_{TP} – постоянная времени термопары.

Вводятся обозначения

$$\begin{aligned} a_0 &= 1/T_{HT}; \quad a_1 = k_{ZT} k_{PH} / T_{3T}; \\ a_2 &= k_{BG}; \quad a_3 = k_{KG}; \quad a_4 = k_{TG}; \quad a_5 = k_{TB}; \\ a_6 &= k_{TK}; \quad a_7 = k_{KB}; \quad a_8 = k_{BK}; \\ b_1 &= 1/T_{3T}; \quad b_2 = -k_{BB}; \quad b_3 = -k_{KK}. \end{aligned} \quad (4)$$

На основании (1) – (3) и обозначений (4) создана динамическая модель ГТД (см. рис. 1) [4].

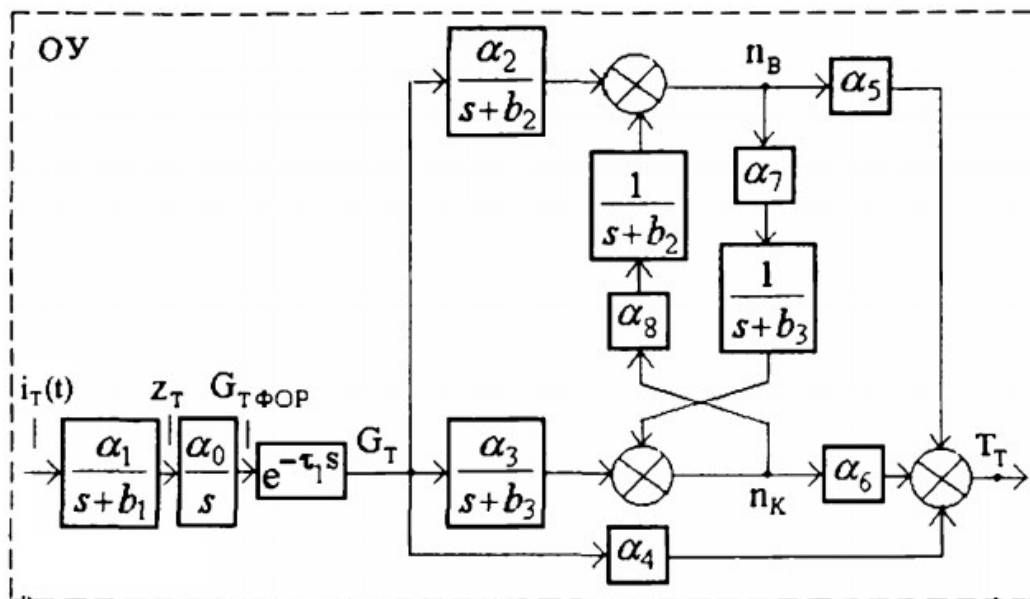


Рис. 1. Структурная схема динамической модели ГТД
Fig. 1. Structural scheme of a dynamic model of a gas turbine engine (GTE)

Рассмотренная модель предусматривает три режима работы ГТД: «максимальный режим», «крейсерский режим», «режим малого газа» [4].

Если применять селективный выбор по минимуму и по максимуму последовательно, то можно поддерживать параметры ГТД в заданных пределах [10]. На рис. 2 представлен пример селектора САУ подачи топлива в камеру сгорания ГТД.

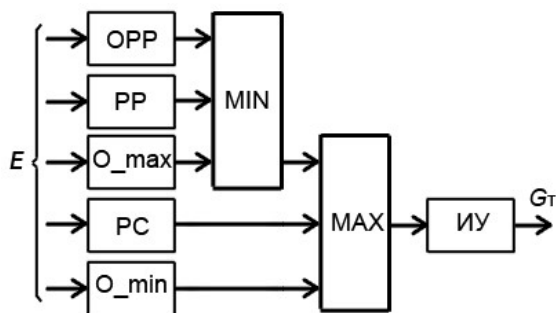


Рис. 2. Структурная схема селектора САУ подачи топлива в камеру сгорания ГТД, где E – текущие отклонения параметров ГТД; OPP – основной регулятор режима; PP – регулятор разгона; PC – регулятор сброса; O – ограничители; ИУ – исполнительное устройство; G_T – расход топлива в камеру сгорания ГТД

Fig. 2. Structural scheme of the selector of the automatic control system (ACS) for fuel supply to the combustion chamber of the GTE, where E – the current deviations of the GTE parameters; MRR – the main regulator of the regime; AR – acceleration regulator (controller); RC – reset controller; O – limiters; ED – executive device; GT – fuel consumption in the combustion chamber of the gas turbine engine

Операции получения минимального сигнала соответствует операция конъюнкции (5), а операции получения максимального сигнала – операция дизъюнкции (6) [11].

$$U_{\min} = \min\{U_1, U_2, \dots, U_m\} = U_1 \wedge U_2 \wedge \dots \wedge U_m = \bigwedge_{i=1}^m U_i; \quad (5)$$

$$U_{\max} = \max\{U_1, U_2, \dots, U_m\} = U_1 \vee U_2 \vee \dots \vee U_m = \bigvee_{i=1}^m U_i. \quad (6)$$

Операции конъюнкции и дизъюнкции могут быть представлены в терминах алгебраических операций. Конъюнкция и

дизъюнкция в общем виде для двух величин представлены в (7) и (8).

$$U_{\min} = \min\{U_1, U_2\} = U_1 \wedge U_2 = \frac{1}{2}(U_1 + U_2 - |U_1 - U_2|); \quad (7)$$

$$U_{\max} = \max\{U_1, U_2\} = U_1 \vee U_2 = \frac{1}{2}(U_1 + U_2 + |U_1 - U_2|). \quad (8)$$

Построена САУ подачи топлива в камеру сгорания ГТД с селектором (см. рис. 3). В анализируемой САУ содержится пять каналов управления:

- 1 – канал частоты вращения вентилятора « n_v » (основной регулятор режима);
- 2 – канал максимальной частоты вращения вентилятора « n_{v_max} » (канал ограничения по максимуму);
- 3 – канал минимальной частоты вращения вентилятора « n_{v_min} » (канал ограничения по минимуму);
- 4 – канал приемистости ускорения частоты вращения вентилятора « $dnv_п$ » (канал разгона);
- 5 – канал сброса ускорения частоты вращения вентилятора « $dnv_с$ » (канал сброса).

Разница программных и текущих значений параметров ГТД подаётся на вход регуляторов каналов управления. Регуляторы каналов представляют собой ПД-регуляторы (9) [12]. Расчёт коэффициентов регуляторов «Кп» и «Кд» выполняется при условии постоянства статических характеристик объекта.

$$W_p(p) = k_p + k_d p = k_p + k_p T_d p = \frac{x(p)}{e(p)} \Rightarrow \Rightarrow x(p) = k_p \cdot e(p) + k_p T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad (9)$$

Управляющие воздействия каналов управления « X_{nv} », « X_{nv_max} », « X_{nv_min} », « X_p » и « X_c » подаются на селектор (см. рис. 4). Назначение селектора связано с контролем параметров ГТД на разгоне и сбросе, а также с контролем параметров в заданных пределах. Селектор работает на экстремальной логике (включает в себя элементы выбора минимума и максимума).

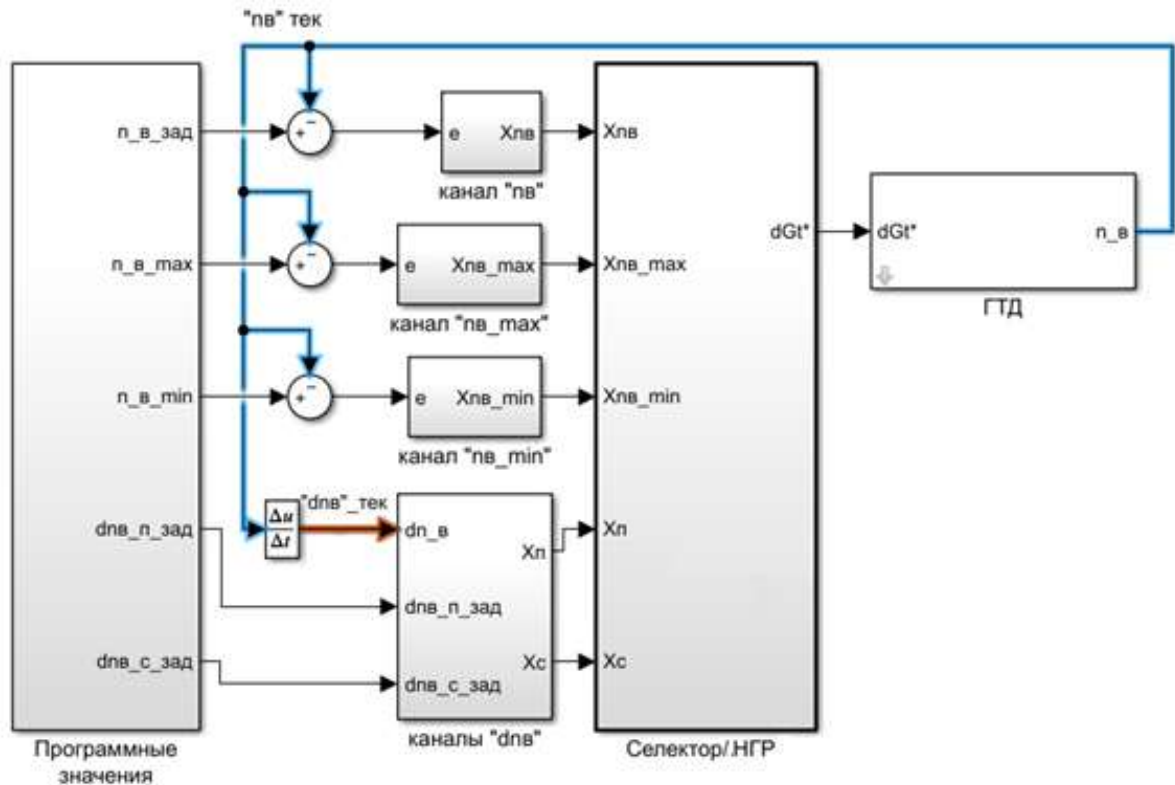


Рис. 3. Структурная схема САУ подачи топлива в камеру сгорания ГТД с селектором, где «канал "nv"», «канал "nv_max"», «канал "nv_min"», «каналы "dnv"» – каналы управления САУ ГТД; «Селектор/НГР» – устройство формирования управляющего воздействия на дозатор ГТД
 Fig. 3. Structural scheme of the automatic control system for supplying fuel to the combustion chamber of the gas turbine engine with a selector, where «channel "nv"», «channel "nv_max"», «channel "nv_min"», «channels "dnv"» are the control channels of the automatic control system of the gas turbine engine

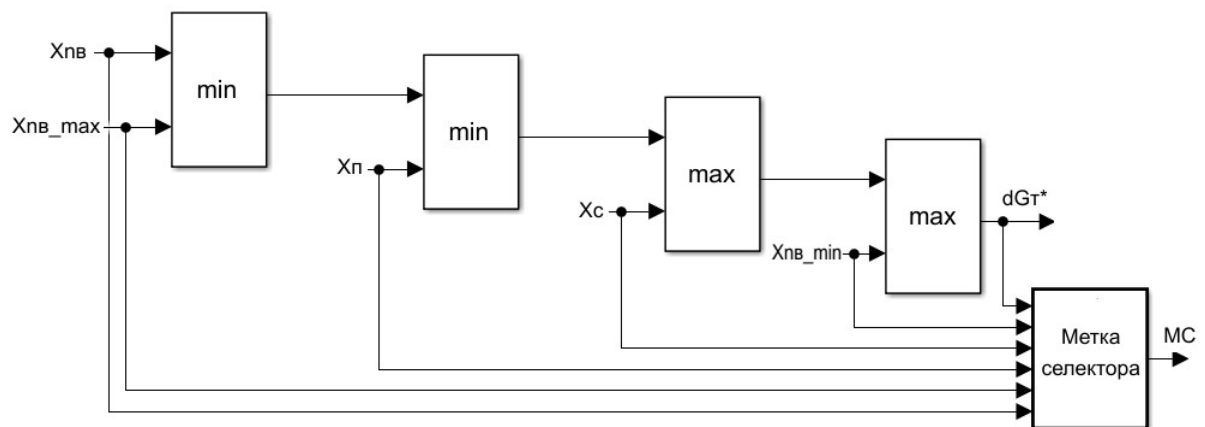


Рис. 4. Структурная схема селектора, где «Xnv», «Xnv_max», «Xnv_min», «Xn», «Xc» – управляющие воздействия каналов управления; «min», «max» – элементы на базе многозначной логики; «Метка селектора» – устройство для индикации работы каналов; «МС» – осциллограф; «dGt*» – управляющее воздействие на дозатор топлива в камеру сгорания ГТД
 Fig. 4. Structural scheme of the selector, where "Xnv", "Xnv_max", "Xnv_min", "Xp", "Xs" are control impact of control channels; "min", "max" – elements based on multivalued logic; "Selector label" – a device for indicating the operation of channels; "MS" – oscilloscope; "dGt*" – control action on the fuel dispenser into the combustion chamber of the gas turbine engine

Выход селектора «dGt*» формируется следующим образом:

1) определяется минимум между значением 1-го канала («Xnv») и значением 2-го канала («Xnv_max»);

2) определяется минимум между результатом «1)» шага и значением 4-го канала («Xп»);

3) определяется максимум между результатом «2)» шага и значением 5-го канала («Xс»);

4) определяется максимум между результатом «3)» шага и значением 3-го канала («Xnv_min»).

Метка селектора отображает работу того или иного канала управления. В селекторе в каждый момент времени может работать только один канал.

При выборе того или иного канала управления выбранный канал управления вступает в работу, а обратные связи

остальных каналов разрываются, что является недостатком использования многозначной логики.

Предлагается заменить селектор на нечёткий групповой регулятор (НГР).

Представленный на рис. 5 НГР отличается от селектора тем, что элементы многозначной логики (минимум и максимум) заменены на нечёткие регуляторы по минимуму «HP_min» и по максимуму «HP_max».

Идея применения нечётких регуляторов по минимуму и по максимуму взамен многозначной логики заключается в том, что выход нечёткого регулятора формируется, учитывая оба входных значения в том случае, когда разница между входными значениями небольшая. Замена многозначной логики на нечёткие регуляторы позволяет осуществлять плавное переключение каналов управления.

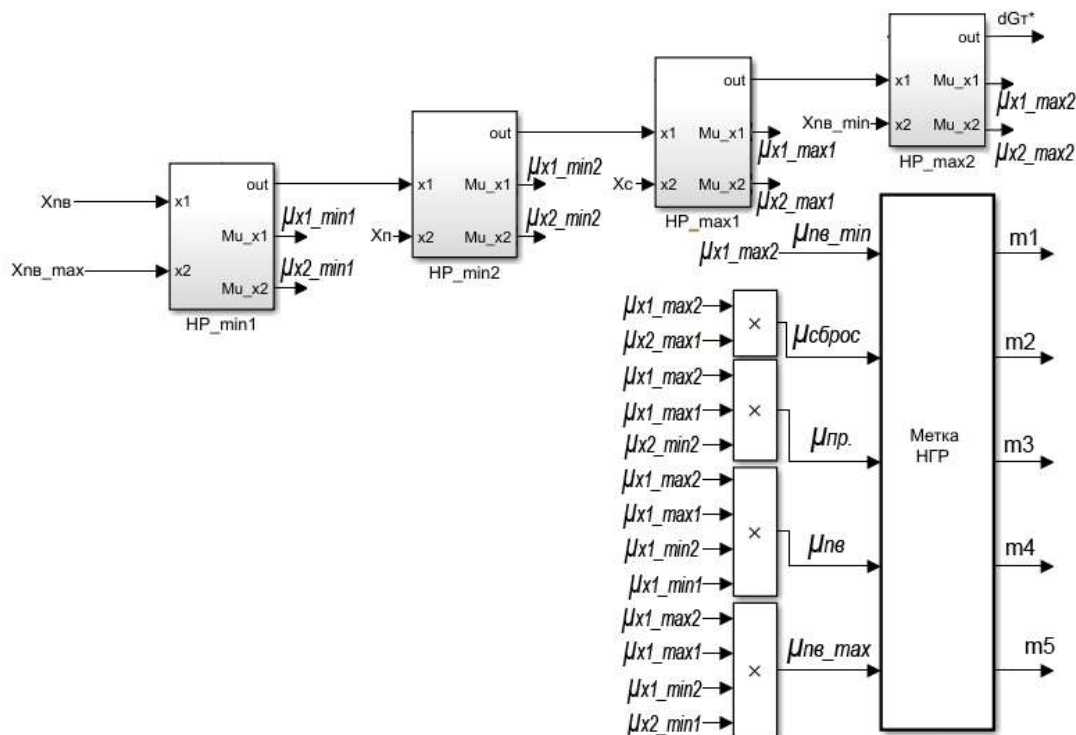


Рис. 5. Структурная схема нечёткого группового регулятора, где «Xnv», «Xnv_max», «Xnv_min», «Xп», «Xс» – управляющие воздействия каналов управления; «HP_min», «HP_max» – нечёткие регуляторы по минимуму и по максимуму; «Метка НГР» – устройство для индикации работы каналов; «dGm*» – управляющее воздействие на дозатор топлива в камеру сгорания ГТД

Fig. 5. Structural scheme of a fuzzy group controller, where "Xnv", "Xnv_max", "Xnv_min", "Xp", "Xs" are the control actions of the control channels; "HP_min", "HP_max" – fuzzy controllers by minimum and maximum; "FGR label" – a device for indicating the operation of channels; "dGT*" – control action on the fuel dispenser into the combustion chamber of the gas turbine engine

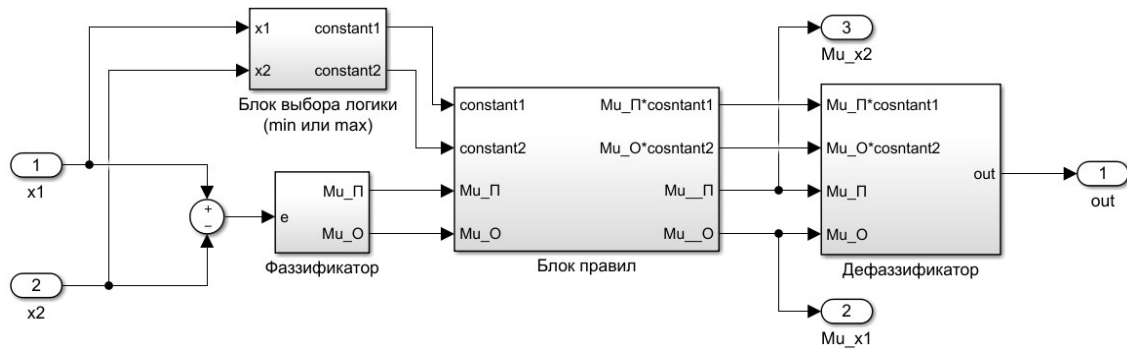


Рис. 6. Структурная схема нечёткого регулятора по минимуму (по максимуму), где «x1», «x2» – входы нечёткого регулятора; «e» – отклонение входа «x2» от входа «x1»; «Mu_P» – степень принадлежности к терм-множеству «П»; «Mu_O» – степень принадлежности к терм-множеству «О»; «constant1», «constant2» – выходы правил; «Mu_x1», «Mu_x2» – значения степеней принадлежности фаззификатора для нечёткого регулятора по минимуму (для нечёткого регулятора по максимуму они меняются местами); «out» – выход нечёткого регулятора

Fig. 6. Structural scheme of the fuzzy controller by minimum (by maximum), where "x1", "x2" are the inputs of the fuzzy controller; "e" - deviation of the input "x2" from the input "x1"; "Mu_P" - degree of belonging to the term-set "P"; "Mu_O" - the degree of belonging to the term-set "O"; "constant1", "constant2" - rule outputs; "Mu_x1", "Mu_x2" - values of degree of belonging of the fuzzifier for fuzzy controller by the minimum (they change places for fuzzy controller by the maximum). "out" - fuzzy controller output

Структура нечётких регуляторов по минимуму и по максимуму приведена на рис. 6.

Нечёткий регулятор состоит из фаззификатора, блока правил и дефаззификатора. Фаззификатор содержит два треугольных терм-множества «О» (отрицательное отклонение входа «x2» от входа «x1») и «П» (положительное отклонение входа «x2» от входа «x1»). Блок правил содержит два правила. Дефаззификатор рассчитывает выход по методу среднего взвешенного значения [13].

Настройкой нечёткого регулятора является параметр «a», он определяет ширину пересечения терм-множеств фаззификатора «О» и «П» (см. рис. 7). Такая

структура фаззификатора позволяет учитывать оба входа «x1» и «x2» при формировании выхода нечёткого регулятора.

Математическое описание терм-множеств «О» и «П» приведено в (10) [12].

$$\mu_P(e, a) = \begin{cases} 0, & e \leq -a; \\ \frac{e+a}{2 \cdot a}, & -a < e < a; \\ 1, & e \geq a; \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_O(e, a) = \begin{cases} 1, & e \leq -a; \\ \frac{a-e}{2 \cdot a}, & -a < e < a; \\ 0, & e \geq a. \end{cases}$$

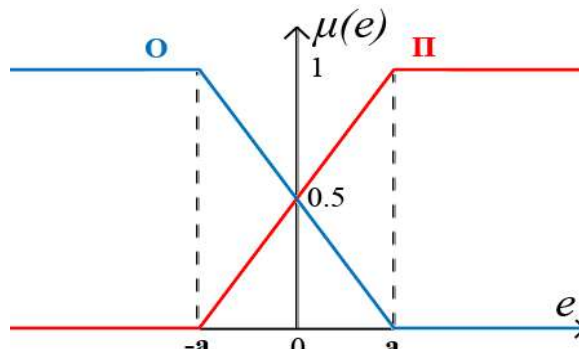


Рис. 7. Фаззификатор нечёткого регулятора, где «e» – отклонение входа «x2» от входа «x1»; «μ(e)» – степень принадлежности; «О», «П» – терм-множества; «a» – параметр нечёткого регулятора

Fig. 7. The fuzzifier of the fuzzy controller, where "e" is the deviation of the input "x2" from the input "x1"; "μ(e)" - degree of belonging; "O", "P" - term-sets; "a" - fuzzy controller parameter

После фаззификации степени принадлежности «Mu_O», «Mu_P» и выходы правил «constant1», «constant2» поступают в блок правил (см. рис. 6). Блок правил содержит два правила.

Для нечёткого регулятора по *минимуму*:

1) если «е» (разность «x1» и «x2») положительная, то выход равен «constant1» (т. е. «x2») (если «е» = «П», то «x2»);

2) если «е» отрицательная, то выход равен «constant2» (т. е. «x1») (если «е» = «О», то «x1»).

Для нечёткого регулятора по *максимуму*:

1) если «е» положительная, то выход равен «constant1» (т. е. «x1») (если «е» = «П», то «x1»);

2) если «е» отрицательная, то выход равен «constant2» (т. е. «x2») (если «е» = «О», то «x2»).

Дефаззификация происходит по методу среднего взвешенного [12].

$$out = \frac{\mu_P \cdot constant1 + \mu_O \cdot constant2}{\mu_P + \mu_O}. \quad (11)$$

Результаты моделирования САУ подачей топлива в камеру сгорания ГТД с селектором и НГР на «максимальном режиме» приведены на рис. 8.

Время переходного процесса (t_1 и t_2) – это время, при котором переходный про-

цесс по выходной координате достигает 5 %-ной зоны от устойчивого значения. Перерегулирование ($\sigma_1\%$ и $\sigma_2\%$) – это процентное соотношение разницы максимального значения и установившегося значения и разницы установившегося значения и начального значения [14].

$$\sigma\% = \frac{|h_{max} - h_{уст}|}{h_{уст} - h_0} = \frac{|h_{max} - h_{уст}|}{dh}. \quad (12)$$

Показатели качества САУ ГТД с селектором:

$$t_1^C = 26,26 - 20 = 6,26 \text{ с};$$

$$t_2^C = 46,57 - 40 = 6,57 \text{ с};$$

$$\sigma_1^C\% = \frac{|h_{max} - h_{уст}|}{dh} = \frac{|1,021 - 1|}{0,5} = 4,2\%;$$

$$\sigma_2^C\% = \frac{|h_{min} - h_{уст}|}{dh} = \frac{|0,489 - 0,5|}{0,5} = 2,2\%.$$

Показатели качества САУ ГТД с НГР:

$$t_1^{НГР} = 25,89 - 20 = 5,89 \text{ с};$$

$$t_2^{НГР} = 46,16 - 40 = 6,16 \text{ с};$$

$$\sigma_1^{НГР}\% = \frac{|h_{max} - h_{уст}|}{dh} = \frac{|1,0225 - 1|}{0,5} = 4,5\%;$$

$$\sigma_2^{НГР}\% = \frac{|h_{min} - h_{уст}|}{dh} = \frac{|0,488 - 0,5|}{0,5} = 2,4\%.$$

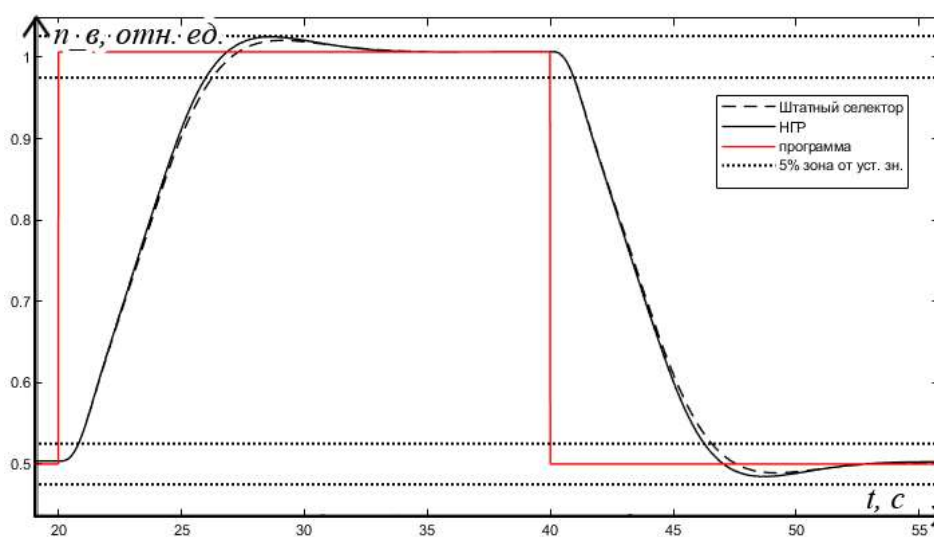


Рис. 8. Сравнение оборотов вентилятора «n_v» САУ ГТД с селектором и НГР

Fig. 8. Comparison of fan speed "n_v" of ACS of GTE with a selector and a fuzzy group regulator (FGR)

На рис. 9 приведена метка селектора, она отражает работу того или иного канала в каждый момент времени.

При использовании селектора в каждый момент времени может работать только один канал. На приемистости работает 4-й канал (приемистость ускорения частоты вращения вентилятора « $d_{nv_п}$ »), а на сбросе 5-й (сброс уско-

рения частоты вращения вентилятора « $d_{nv_с}$ »).

На рис. 10 приведена метка НГР.

В отличие от селектора, в формировании управляющего воздействия учитываются несколько каналов в зависимости от значения степеней принадлежности « M_{nv} », « M_{nv_max} », « M_{nv_min} », « M_p », « M_s » (см. рис. 11).

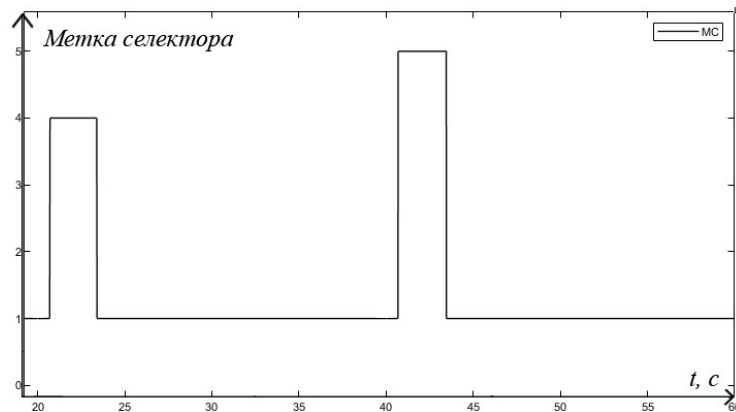


Рис. 9. Метка селектора
Fig. 9. Selector label

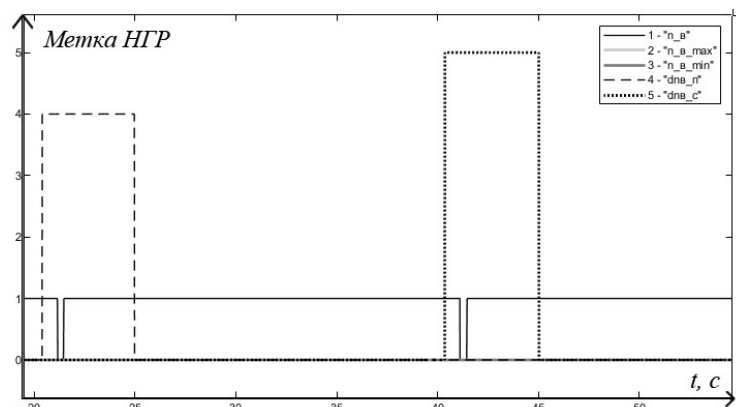


Рис. 10. Метка НГР
Fig. 10. FGR label

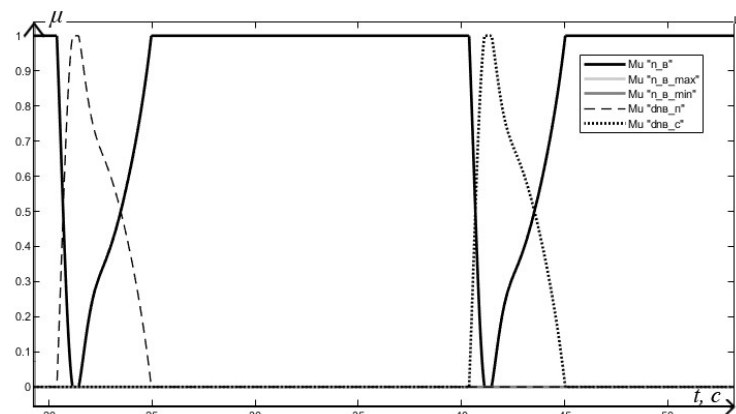


Рис. 11. Степени принадлежности НГР
Fig. 11. Degrees of belonging to the FGR

На приемистости при формировании управляющего воздействия учитываются значения 1 канала (частота вращения вентилятора «п_в») и 4 канала (приемистость ускорения частоты вращения вентилятора «dпв_п»), а на сбросе значения 1 канала и 5 канала (сброс ускорения частоты вращения вентилятора «dпв_с»).

Анализ результатов моделирования САУ ГТД с селектором и НГР показал:

- НГР уменьшает время переходного процесса на приемистости на 0,37 с и на сбросе на 0,41 с, при этом увеличивается перерегулирование на приемистости на 0,3 % и на сбросе на 0,2 % по сравнению с селектором;

- НГР позволяет учитывать несколько значений каналов при формировании управляющего воздействия.

Методика обработки результатов. Для определения оптимального варианта управления построена следующая целевая функция [15]:

$$F = 0,7 \cdot (\sum \dot{t}_1 + \sum \dot{t}_2) + 0,3 \cdot (\sum \dot{\sigma}_1 \% + \sum \dot{\sigma}_2 \%) \rightarrow \min, \quad (13)$$

где $\dot{t}_1$, $\dot{\sigma}_1 \%$ – нормированные значения показателей качества при первом изменении программного значения оборотов вентилятора «п_в»; $\dot{t}_2$, $\dot{\sigma}_2 \%$ – нормированные значения показателей качества при втором изменении программного значения оборотов вентилятора «п_в».

Результаты моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели качества САУ подачи топлива в камеру сгорания ГТД

Table 1. Quality indicators of ACS by fuel supply to the GTE combustion chamber

Регулятор	t_1, c	$\sigma_1, \%$	t_2, c	$\sigma_2, \%$
Селектор	6,26	4,2	6,57	2,2
НГР	5,89	4,5	6,16	2,4
max	6,26	4,5	6,57	2,4

Далее выполняется нормализация показателей качества путём деления значений на максимальное значение в столбце. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Нормированные показатели качества
Table 2. Normalized quality indicators

Регулятор	t_1	σ_1	t_2	σ_2
Селектор	1	0,933333	1	0,916667
НГР	0,940895	1	0,937595	1

Целевая функция каждого регулятора имеет следующие значения:

$$F_{\text{селектор}} = 1,955; F_{\text{НГР}} = 1,915.$$

По показаниям ЦФ, НГР улучшает качество управления на 2,05 % по сравнению с селектором.

Анализ результатов. Анализ результатов моделирования показал, что использование НГР в составе САУ подачи топлива в камеру сгорания ГТД вместо селектора позволяет уменьшить время переходного процесса, но приводит к увеличению перерегулирования.

Выводы

1. Разработан НГР, обеспечивающий формирование управляющего воздействия на дозатор топлива с учётом нескольких каналов управления САУ ГТД.

2. Проведено имитационное моделирование САУ ГТД с селектором и НГР в среде моделирования MATLAB Simulink.

3. Результаты экспериментов показали, что использование НГР взамен селектора приводит к улучшению качества управления на 2,05 % по показателям целевой функции.

4. Намечены направления дальнейших исследований по развитию проблем САУ переопределёнными объектами управления, в том числе представляется целесообразным расширить исследование в области группового управления каналами САУ ГТД, а именно, рассмотреть проблему адаптивного нечёткого управления.

Список источников

1. Гуревич О. С., Гольберг Ф. Д., Селиванов О. Д. Интегрированное управление силовой установкой

многорежимного самолета. Под общ. ред. О. С. Гуревича. М.: Машиностроение, 1993. 304 с.

2. Гольберг Ф. Д., Бетенин А. В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 1999. 80 с.
3. Шевяков А. А. Системы автоматического управления авиационными воздушно-реактивными двигателями. М.: Машиностроение, 1992. 432 с.
4. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: "Радіоаматор", 2008. 972 с.
5. Петунин В.И. Синтез логико-динамических систем автоматического управления газотурбинными двигателями на основе согласования и адаптации каналов управления: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.13.01. Уфимский гос. авиационный техн. университет. Уфа, 2011. 332 с.
6. Wittenmark B., Middleton R. H. and Goodwin G. C. Adaptive decoupling of multivariable systems // Int. J. Control. 1987. Vol. 46, no. 6. Pp. 1993-2009.
7. Jay L. C., Mattingly J. D. Aircraft engine controls. AIAA education series. Published by AIAA, 2009. 384 p.
8. Mattingly J. D., Heiser W. H., Pratt D. T. Aircraft engine design. 2nd edition. AIAA education series. Published by AIAA, 2002. 719 p.
9. 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.
10. Интегральные системы автоматического управления силовыми установками самолетов / Под ред. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1983. 283 с.
11. Гинзбург С. А. Математическая непрерывная логика и изображение функций. М.: Энергия, 1968. 136 с.
12. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 303 с.
13. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия–Телеком, 2007. 288 с.
14. Мирошник И. В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. Учебное пособие для студентов вузов. СПб.: Питер, 2006. 272 с.
15. Селективное управление газотурбинным двигателем / С. А. Сторожев, А. А. Южаков, Ю. Н. Хижняков и др. // Электротехника. 2020. № 11. С. 18-21.

Статья поступила в редакцию 07.05.2022; одобрена после рецензирования 07.06.2022; принята к публикации 15.06.2022

Информация об авторах

ЮЖАКОВ Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики и телемеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Область научных интересов – нейронные измерительные устройства и системы; адаптивные информационно-управляющие системы на основе нейронной технологии; распознавание образов и информационная безопасность. Автор 300 научных публикаций.

СТОРОЖЕВ Сергей Александрович – ассистент кафедры автоматики и телемеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Область научных интересов – управление в технических системах. Автор 20 научных публикаций.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 681.53

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.2.34>

Fuzzy Group Regulator of the Automatic Control System for Fuel Supply to the Combustion Chamber of a Gas Turbine Engine

A. A. Yuzhakov[✉], S. A. Storozhev

Perm National Research Polytechnic University,
7, Professor Pozdeev str., Perm, 614013, Russian Federation
uz@at.pstu.ru[✉]

Keywords: aircraft gas turbine engine; the combustion chamber; electronic engine controller; fuzzy group controller; weighted average method; fuzzifier; defuzzifier

ABSTRACT

Introduction. The relevance of developing a group controller based on fuzzy logic is manifested in the fact that when selective controllers are used as part of an automatic control system (ACS) for fuel supply to the combustion chamber of a gas turbine engine (GTE), there is a contradiction in the choice of control channels in transient modes. **The aim** of the research is to develop a group controller for automatic control of fuel supply to the combustion chamber of a gas turbine engine based on fuzzy logic instead of a selective controller to improve the quality of control. To achieve this goal, the following tasks were posed: 1) building an ACS model by supplying fuel to the combustion chamber of a gas turbine engine; 2) replacement of the selective controller with a fuzzy group controller; estimation of the quality of control of an ACS with a selective controller and with a fuzzy group controller according to the objective function. **Methods.** The idea of using minimum and maximum fuzzy controllers instead of elements based on multivalued logic is that the output of the fuzzy controller is formed considering both input values in the case when the difference between the input values is small. Replacing multi-valued logic with fuzzy controllers allows smooth switching of control channels. The fuzzy controller consists of a fuzzifier, a block of rules, and a defuzzifier. The fuzzifier contains two triangular term-sets "O" (negative deviation of input "x2" from input "x1") and "P" (positive deviation of input "x2" from input "x1"). The rule block contains two rules. The defuzzifier calculates the output using the weighted average method. An analysis of the simulation results showed that the use of fuzzy group regulator (FGR) as part of the ACS by supplying fuel to the combustion chamber of the GTE instead of the selector allows one to reduce the time of the transient process, but leads to an increase in over regulation. **Conclusions:** 1) we developed FGR, which provides the formation of a control action on the fuel dispenser, taking into account several control channels of ACS of GTE; 2) simulation modeling of ACS of GTE with a selector and FGR was carried out in the MATLAB Simulink; 3) the results of the experiments showed that the use of the FGR instead of the selector leads to an improvement in the quality of control by 2.05% in terms of the target function; 4) further research on the development of ACS problems by overdetermined control objects have been outlined; in addition to this it seems reasonable to expand the study in the field of group control of GTE ACS channels, in particular, to consider the problem of adaptive fuzzy control.

REFERENCES

1. Gurevich O. S., Golberg F. D., Selivanov O. D. *Integrirovannoe upravlenie silovoj ustanovkoj mnogorezhimnogo samoleta. Pod obshh. red. O. S. Gurevicha* [Integrated control of the power plant of a multi-mode aircraft. Under total ed. O. S. Gurevich]. Moscow, Mashinostroenie, 1993. 304 p. (In Russ.).
2. Golberg F. D., Betenin A. V. *Matematicheskie modeli gazoturbinnih dvigatelej kak ob#ektov upravlenija: Uchebnoe posobie* [Mathematical Models of Gas Turbine Engines as Control Objects: Textbook]. Moscow, MAI Publ., 1999. 80 p. (In Russ.).
3. Shevyakov A. A. *Sistemy avtomaticheskogo upravlenija aviacionnymi vozdušno-reaktivnymi dvigateljami* [Automatic control systems for aircraft jet engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 432 p. (In Russ.).
4. Gostev V.I. *Nechetkie reguljatory v sistemah avtomaticheskogo upravlenija* [Fuzzy controllers in automatic control systems]. Kiev, Radioamator, 2008. 972 p. (In Russ.).
5. Petunin V.I. *Sintez logiko-dinamicheskikh sistem avtomaticheskogo upravlenija gazoturbinnymi dvigateljami na osnove soglasovanija i adaptacii kanalov upravlenija. Diss. dokt. tehn. nauk* [Synthesis of logic-dynamic systems for automatic control of gas turbine engines based on coordination and adaptation of control channels. Dr. tech. sci. diss.]. Ufa, 2011. 332 p. (In Russ.).

6. Wittenmark B., Middleton R. H. and Goodwin G. C. Adaptive decoupling of multivariable systems. *Int. J. Control.* 1987. Vol. 46, no. 6. Pp. 1993-2009.
7. Jay L. C., Mattingly J. D. Aircraft engine controls. AIAA education series. Published by AIAA, 2009. 384 p.
8. Mattingly J. D., Heiser W. H., Pratt D. T. Aircraft engine design. 2nd edition. AIAA education series. Published by AIAA, 2002. 719 p.
9. 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.
10. Integralnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya silovymi ustanovkami samoletov. Pod red. A. A. Shevjakova [Integrated systems for automatic control of aircraft power plants. Ed. A. A. Shevjakova]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1983. 283 p. (In Russ.).
11. Ginzburg S. A. *Matematicheskaya nepreryvnaya logika i izobrazhenie funktsiy* [Mathematical continuous logic and representation of functions]. Moscow, Jenergiya, 1968. 136 p. (In Russ.).
12. Khizhnyakov Yu.N. *Nechetkoe, neyronnoe i gibridnoe upravlenie: ucheb. posobie* [Fuzzy, neural and hybrid control: textbook]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ., 2013. 303 p.
13. Shtovba S.D. *Proektirovaniye nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Designing fuzzy systems using MATLAB]. Moscow, Gorjakhaja liniya–Telekom, 2007. 288 p. (In Russ.).
14. Miroshnik I.V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Nelinejnye i optimal'nye sistemy. Uchebnoye posobie dlja studentov vuzov* [Theory of automatic control. Non-linear and optimal systems. Textbook for university students]. Saint Petersburg, Piter, 2006. 272 p. (In Russ.).
15. Khizhnyakov Y.N., Yuzhakov A.A., Storozhev S.A., Nikulin V.S. Selektivnoye upravlenie gazoturbinnym dvigatelem [Selective control of a gas-turbine engine]. *Jelektrotehnika* [Electrical engineering]. 2020. No 11. P. 18-21. (In Russ.).

The article was submitted 07.05.2022; approved after reviewing 07.06.2022; accepted for publication 15.06.2022

For citation: Yuzhakov A. A., Storozhev S. A. Fuzzy Group Regulator of the Automatic Control System for Fuel Supply to the Combustion Chamber of a Gas Turbine Engine. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No 2 (54). Pp. 34–46. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.2.34>

Information about the authors

Alexander A. Yuzhakov – Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Department for Automation and Telemechanics of Perm National Research Polytechnic University. Research interests – neural measuring devices and systems; adaptive information and control systems based on neural technology; pattern recognition and information security. The author of 300 scientific publications.

Sergey A. Storozhev – assistant at the Department for Automation and Telemechanics of Perm National Research Polytechnic University. Research interests – control in technical systems. The author of 20 scientific publications.

Contribution of the authors: All authors made an equivalent contribution to the paper preparation. The authors declare that they have no conflict of interest. All authors read and approved the final manuscript.