

АДАПТАЦИЯ НЕЧЕТКОГО ГРУППОВОГО РЕГУЛЯТОРА К ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Сторожев С. А.¹

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) летательных аппаратов с точки зрения теории управления есть сложный нелинейный объект, фрейм-математическое описание которого известно априори. При эксплуатации ГТД требуется непрерывный контроль параметров (температуры газа за камерой сгорания, частоты вращения ротора компрессора низкого давления (свободная турбина), частоты вращения ротора турбокомпрессора высокого давления (газогенератор)). Дальнейшее развитие управления ГТД можно связать с применением нечеткого управления. Целью исследования является совершенствование управления дозатором топлива в камеру сгорания ГТД. Адаптивный нечеткий групповой регулятор позволяет учитывать значения нескольких контуров по методу среднего взвешенного при формировании управляющего воздействия на дозатор топлива в камеру сгорания ГТД. Предлагается новый подход адаптации нечеткого группового регулятора со смещением терм-множеств по горизонтали в зависимости от изменяющихся условий эксплуатации. Разработанный адаптивный нечеткий групповой регулятор позволяет заменить штатный селектор и обеспечить адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации ГТД. Разработанный адаптивный нечеткий групповой регулятор характеризуется лучшими значениями оценки вероятности безотказной работы РЭД (регулятор электронный двигателя). Результаты исследований могут быть использованы в управлении дозатором топлива в камеру сгорания ГТД. Полученный адаптивный нечеткий групповой регулятор позволит существенно снизить неопределенность в работе камеры сгорания, обеспечив гарантированную тягу летательного аппарата.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель, штатный селектор, адаптивный нечеткий групповой регулятор, адаптивный фазификатор, дефазификатор, дозатор.

¹ Сергей Александрович Сторожев, аспирант (serpa5@mail.ru).

1. Введение

В настоящее время авиационная техника активно развивается. Появляются ГТД с высокими параметрами рабочего процесса, которые позволяют улучшить тяговые, массовые, экономические и др. характеристики летательных аппаратов. Такое улучшение эксплуатационных и технических характеристик ГТД стало возможно благодаря применению новых схем двигателей, увеличению величин параметров рабочего процесса, уменьшению потерь мощностей и применению новых способов управления [7, 19]. Кроме этого, расширяются диапазоны скоростей полета и высот летательных аппаратов, а, следовательно, улучшаются высотные и скоростные характеристики ГТД.

ГТД как объект управления исследовали В.И. Гостев, В.А. Боднер, А.А. Шевяков, Ю.А. Рязанов, С.А. Сиротин, Т.С. Мартыанова, Ю.В. Любомудров, Б.А. Черкасов, Г.В. Добрянский, Г.Г. Куликов и др. [2, 4, 5, 8, 10–18, 20, 21]. Исследования вышеперечисленных авторов характеризуют современный ГТД как сложную нелинейную динамическую систему, в которой происходят физико-химические процессы преобразования энергии. Эти процессы являются нестационарными и изменяются по режимам работы двигателя. Кроме этого, ГТД подвергается влиянию внешних и внутренних возмущений, содержащих регулярную и случайную составляющие.

Известный метод адаптации (метод активной адаптации) [3, 9] предполагает 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. Недостатком метода является ограничение выбора структуры передаточной функции модели объекта, которое исключает наличие комплексных корней в полиноме знаменателя передаточной функции эталонной модели. Данный недостаток компенсируется адаптивным нечетким групповым регулятором.

2. Адаптивный нечеткий групповой регулятор

Идея применения нечетких регуляторов по минимуму и по максимуму взамен экстремальной логики заключается в том, что выход нечеткого регулятора формируется с учетом обоих входных значений в том случае, когда разница между входными значениями небольшая. Замена экстремальной логики на нечеткие регуляторы позволяет осуществлять плавное переключение контуров управления.

Блок адаптации меняет положение терм фаззификатора в зависимости от текущих значений контуров управления. Разрабатываемый нечеткий групповой регулятор, представленный на рис. 1, адаптируется к изменяющимся условиям эксплуатации ГТД, а именно к приемистости и сбросу частоты вращения вентилятора.

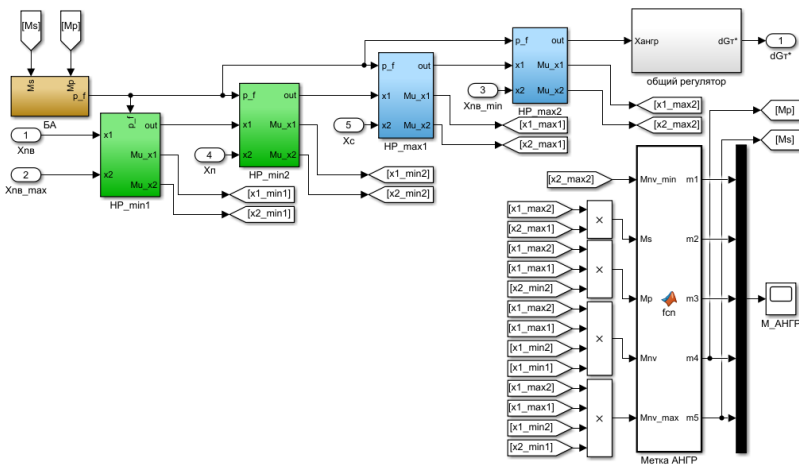


Рис. 1. Структурная схема адаптивного нечеткого группового регулятора

На рис. 1 «Xпв», «Xпв_max», «Xпв_min», «Xп», «Xс» – управляющие воздействия контуров управления; «HP_min», «HP_max» – нечеткие регуляторы по минимуму и по максимуму с учетом адаптации; «X_ангр» – выход нечеткого адаптивного

группового регулятора; «общий регулятор» – ПИ-регулятор значения определенного адаптивным нечетким групповым регулятором; «Mr», «Ms» – индикаторы работы контуров приемистости и сброса; «Метка АНГР» – устройство для индикации работы контуров; «M_АНГР» – осциллограф; «dGt*» – управляющее воздействие на дозатор топлива в камеру сгорания ГТД; «БА» – блок адаптации; «r_f» – параметр адаптации нечетких регуляторов.

Адаптивный нечеткий групповой регулятор состоит из нечетких регуляторов по минимуму и по максимуму и блока адаптации.

2.1. НЕЧЕТКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПО МИНИМУМУ И ПО МАКСИМУМУ

Структура нечетких регуляторов по минимуму и по максимуму приведена на рис. 2. Здесь обозначены «x1», «x2» – входы нечеткого регулятора; «e» – отклонение входа «x2» от входа «x1»; «Mu_П» – степень принадлежности к терм-множеству «П»; «pf» – значение параметра для адаптации фаззификатора; «Mu_О» – степень принадлежности к терм-множеству «О»; «constant1», «constant2» – выходы правил; «Mu_x1», «Mu_x2» – значения степеней принадлежности фаззификатора для нечеткого регулятора по минимуму (для нечеткого регулятора по максимуму они меняются местами); «out» – выход нечеткого регулятора.

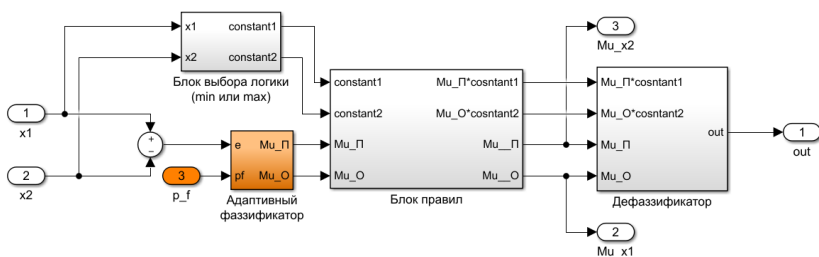


Рис. 2. Структурная схема нечеткого регулятора по минимуму (по максимуму) с учетом адаптации

Нечеткий 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.

Фаззификатор представлен на рис. 3, где «e» – отклонение входа «x2» от входа «x1»; « $\mu(e)$ » – степень принадлежности; «О», «П» – терм-множества; «a» – параметр нечеткого регулятора; «pf» – значение сформированное блоком адаптации. Входом фаззификатора является отклонение входа «x2» от входа «x1» – «e». Выходами фаззификатора являются степени принадлежности к треугольным терм-множествам «О» и «П». Настройкой нечеткого регулятора является параметр «a», он определяет ширину пересечения терм-множеств фаззификатора «О» и «П». Такой структура фаззификатора позволяет учитывать оба входа «x1» и «x2» при формировании выхода нечеткого регулятора. Значение параметра «pf» сдвигает оба терм-множества вдоль горизонтальной оси.

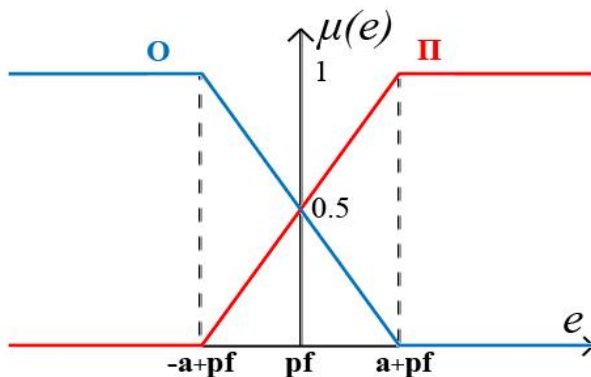


Рис. 3. Адаптивный фаззификатор нечеткого регулятора

Математическое описание терм-множеств «О» и «П» приведено в (1) [6]:

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

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

Блок правил для нечеткого регулятора по минимуму:

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

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

Блок правил для нечеткого регулятора по максимуму:

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

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

Значения из блока правил поступают на дефаззификатор. Дефаззификация происходит по методу среднего взвешенного (2) [6]:

$$(2) \quad out = \frac{\mu_{\Pi} \cdot const_1 + \mu_{\text{O}} \cdot const_2}{\mu_{\Pi} + \mu_{\text{O}}}.$$

2.2. БЛОК АДАПТАЦИИ

На рис. 4 приведен блок адаптации, где «Mr», «Ms» – индикаторы работы контуров приемистости и сброса; «pf» – значение сдвига терм-множеств. Во время работы контура приемистости (см. «Mr») терм-множества сдвигаются вправо (знак «+»), а во время работы контура сброса (см. «Ms») – влево (знак «-»). Интегратор имеет ограничения минимального и максимального значений ± 1 (крайнее левое и крайнее правое положения терм-множеств). Сигнал сброса формируется в момент отключения контуров приемистости и сброса. Фильтр обеспечивает плавное перемещение терм-множеств.

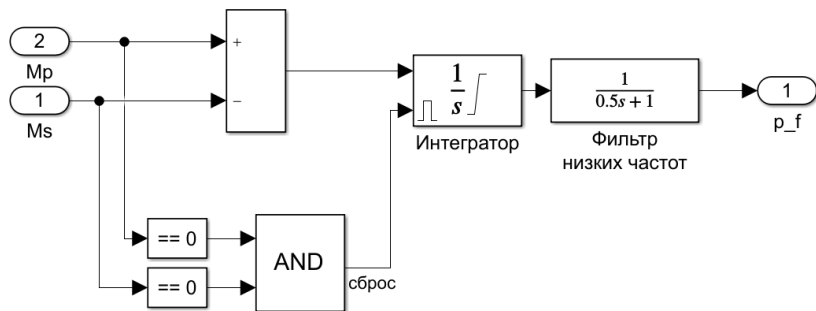


Рис. 4 Структурная схема блока адаптации

Введение адаптации позволяет улучшить показатели качества управления в сравнении с селектором за счет учета нескольких значений контуров при формировании управляющего воздействия и смещения терм-множеств фаззификатора во время приемистости и сброса.

3. Эксперимент

3.1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 5 приведена САУ подачи топлива в камеру сгорания ГТД с адаптивным нечетким групповым регулятором. Здесь «пв_зад», «пв_max», «пв_min», «dпв_п_зад», «dпв_с_зад» – программные значения контуров управления; «Р контура “пв”», «Р контура “пв_max”», «Р контура “пв_min”», «Р контуров “dпв”» – регуляторы контуров управления; «Адаптивный нечеткий групповой регулятор» – устройство формирования управляющего воздействия на дозатор камеры сгорания ГТД; «ГТД» – динамическая модель ГТД; «п_в», «Г_т», «п_к» – динамические параметры ГТД; «dпв/dt» – блок для вычисления производной «п_в»; «параметры ГТД» и «dn_в/dt» – осциллографы. Адаптивный нечеткий групповой регулятор (см. рис. 1) используется взамен селектора (см. рис. 6).

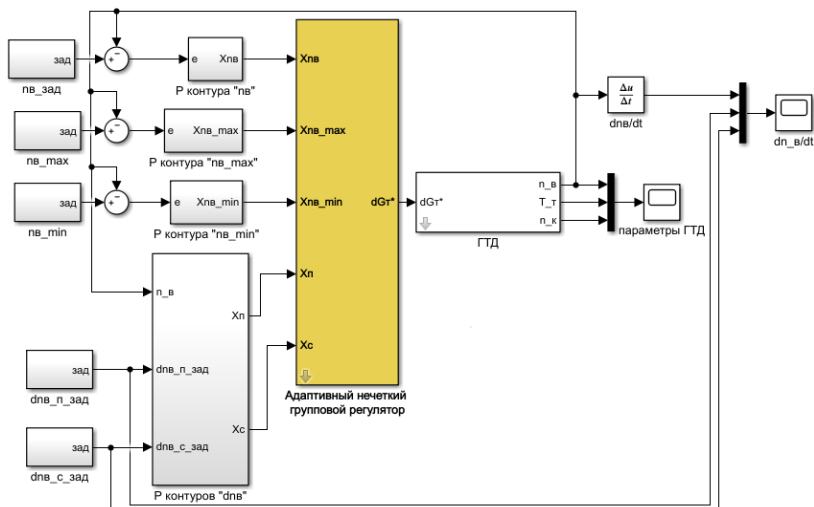


Рис. 5 Структурная схема САУ подачей топлива в камеру сгорания ГТД с адаптивным нечетким групповым регулятором

На рис. 6 приведена структурная схема селектора, где «Xпв», «Xпв_max», «Xпв_min», «Xп», «Xс» – управляющие воздействия контуров управления; «min», «max» – элементы на экстремальной логике; «Xселектора» – выход селектора; «общий регулятор» – ПИ-регулятор значения определенного селектором; «Метка селектора» – устройство для индикации работы контуров; «МС» – осциллограф; «dGт*» – управляющее воздействие на дозатор топлива в камеру сгорания ГТД. 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). При выборе того или иного контура управления, выбранный контур управления вступает в работу, а обратные связи остальных контуров разрываются, что является недостатком использования экстремальной логики.

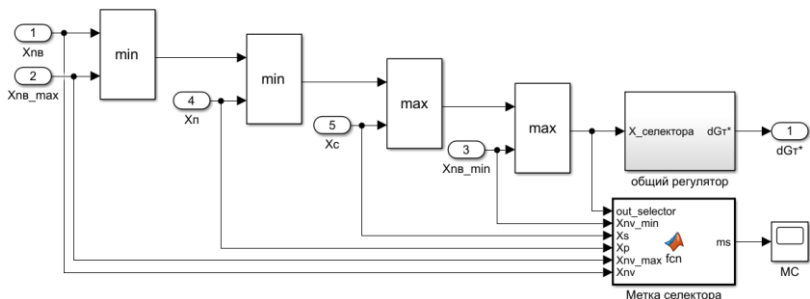


Рис. 6. Структурная схема селектора

Выход селектора «Xселектора» формируется следующим образом:

- 1) определяется минимум между значением 1-го контура («X_{пв}») и значением 2-го контура («X_{пв_max}»);
- 2) определяется минимум между результатом «1)» шага и значением 4-го контура «X_п»;
- 3) определяется максимум между результатом «2)» шага и значением 5-го контура («X_с»);
- 4) определяется максимум между результатом «3)» шага и значением 3-го контура «X_{пв_min}»).

Метка селектора отображает работу того или иного контура. В селекторе в каждый момент времени может работать только один контур.

На рис. 7 приведен способ оценки результатов эксперимента.

Время переходного процесса – это время, при котором переходный процесс по выходной координате достигает 5%-й зоны от устойчивого значения. Перерегулирование – это процентное соотношение разницы максимального значения и установившегося значения и разницы установившегося значения и начального значения (3) [14]:

$$(3) \quad \sigma\% = \frac{|h_{max} - h_{уст}|}{h_{уст} - h_0} = \frac{|h_{max} - h_{уст}|}{dh}.$$

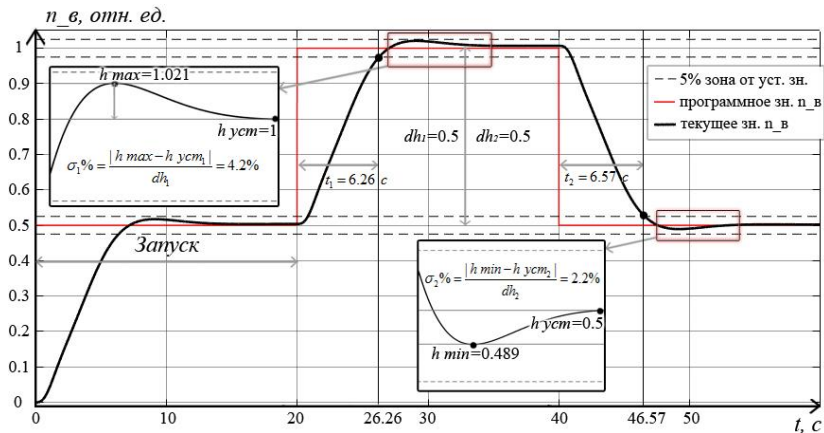


Рис. 7. Результаты эксперимента САУ ГТД с селектором

3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента САУ подачи топлива в камеру сгорания ГТД с селектором и АНГР представлены на рис. 8–15.

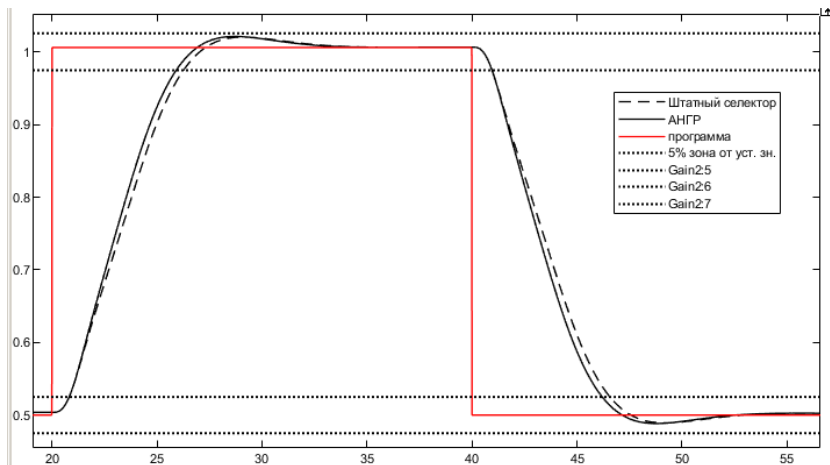


Рис. 8. Сравнение оборотов вентилятора « $n \text{ в}$ » САУ ГТД с селектором и АНГР

Показатели качества САУ ГТД с селектором:

$$t_1^C = 26,26 - 20 = 6,26 \text{ с}; \quad t_2^C = 46,57 - 40 = 6,57 \text{ с};$$

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

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

Показатели качества САУ ГТД с АНГР:

$$t_1^{АНГР} = 25,91 - 20 = 5,91 \text{ с}; \quad t_2^{АНГР} = 46,20 - 40 = 6,20 \text{ с};$$

$$\sigma_1^{АНГР} \% = \frac{|h_{max} - h_{уст}|}{dh} = \frac{|1,02135 - 1|}{0,5} = 4,27\%;$$

$$\sigma_2^{АНГР} \% = \frac{|h_{min} - h_{уст}|}{dh} = \frac{|0,4890 - 0,5|}{0,5} = 2,26\%;$$

АНГР уменьшает время переходного процесса на приемистости на 0,35 с и на сбросе – на 0,37 с, при этом увеличивается перегулирование на приемистости на 0,12% и на сбросе – на 0,12% по сравнению с селектором.

На рис. 9 приведены ускорения частоты вращения вентилятора «dпв», ограничения приемистости «dпв_п_зад» и сброса «dпв_с_зад».

Результаты моделирования, представленные на рис. 9, показывают выполнение программ на приемистости и сбросе как при использовании селектора, так и при использовании АНГР в составе САУ ГТД.

На рис. 10 приведены управляющие воздействия на дозатор топлива в камеру сгорания «dГт*».

На рис. 11 приведено количество топлива в камеру сгорания САУ ГТД.

На рис. 12 и 13 приведены сигналы контуров селектора и АНГР, сформированные регуляторами контуров.

На рис. 14 приведена метка селектора. В один момент времени может учитываться значения только одного контура при формировании управляющего воздействия.

На рис. 15 приведена метка АНГР. Это доказывает работу нескольких контуров при формировании управляющего воздействия.

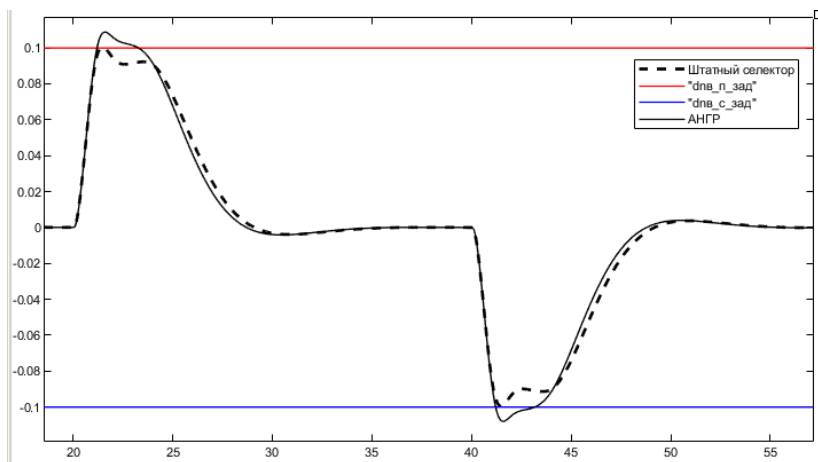


Рис. 9. Сравнение ускорений частоты вращения вентилятора «дпв» САУ ГТД с селектором и АНГР

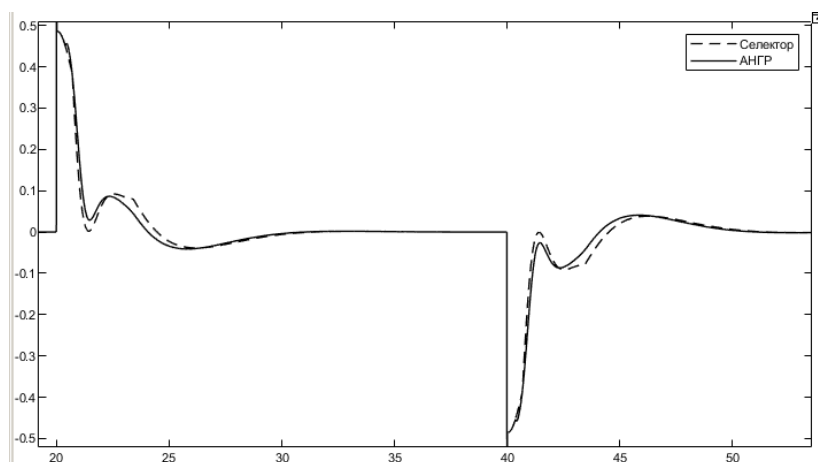


Рис. 10. Сравнение управляющих воздействий на дозатор топлива в камеру сгорания «dGm*» САУ ГТД с селектором и АНГР

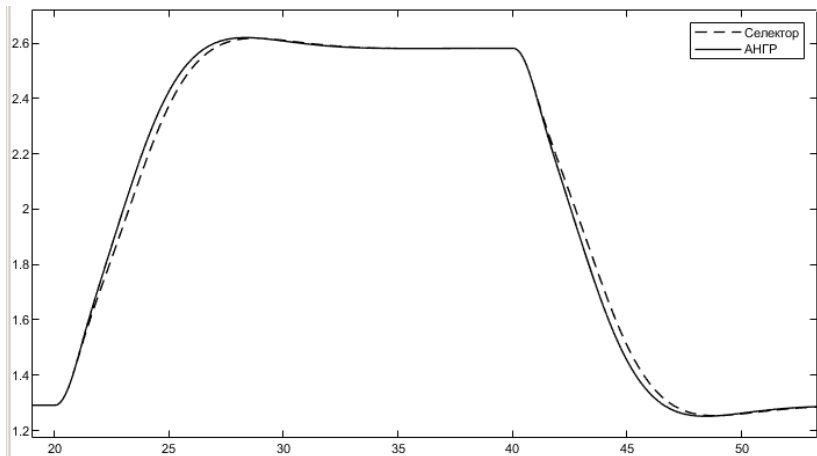


Рис. 11. Сравнение количества топлива в камеру сгорания «Gт» САУ ГТД с селектором и АНГР

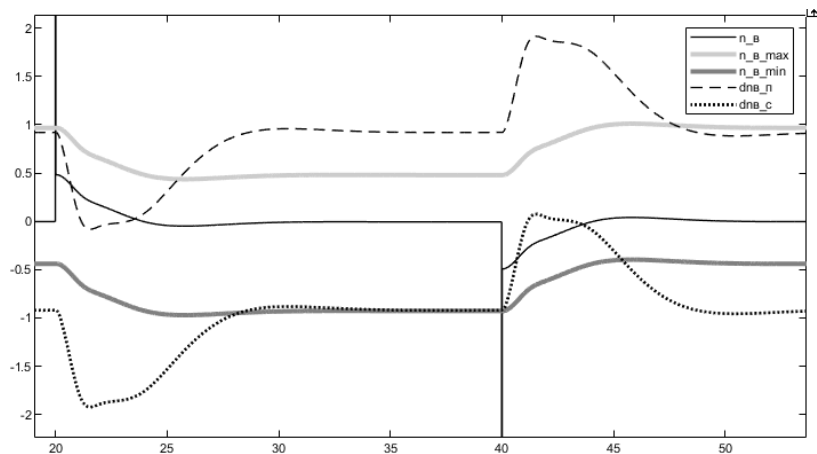


Рис. 12. Сигналы регуляторов контуров САУ ГТД с селектором

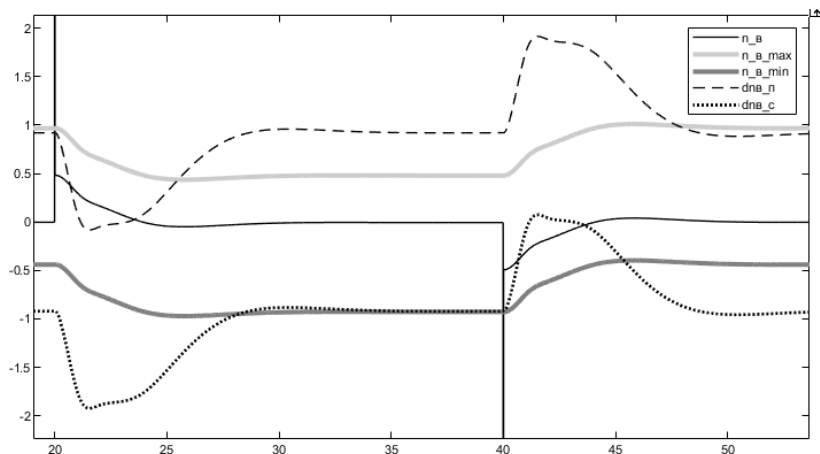


Рис. 13. Сигналы регуляторов контуров САУ ГТД с АНПР

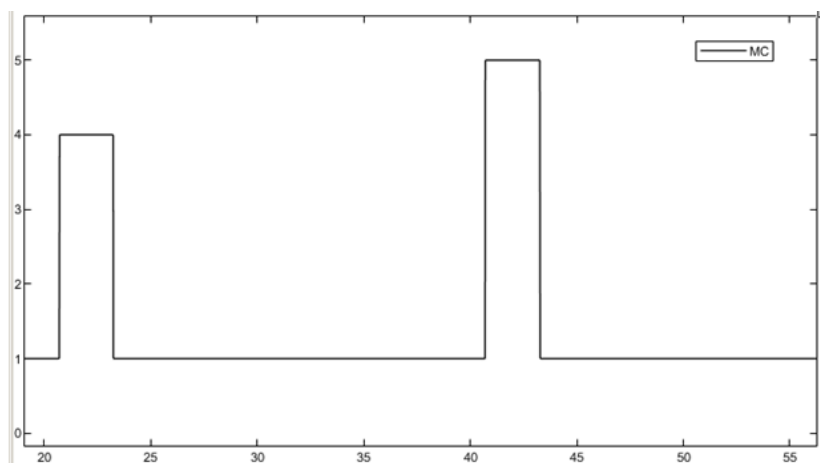


Рис. 14. Метка селектора САУ ГТД

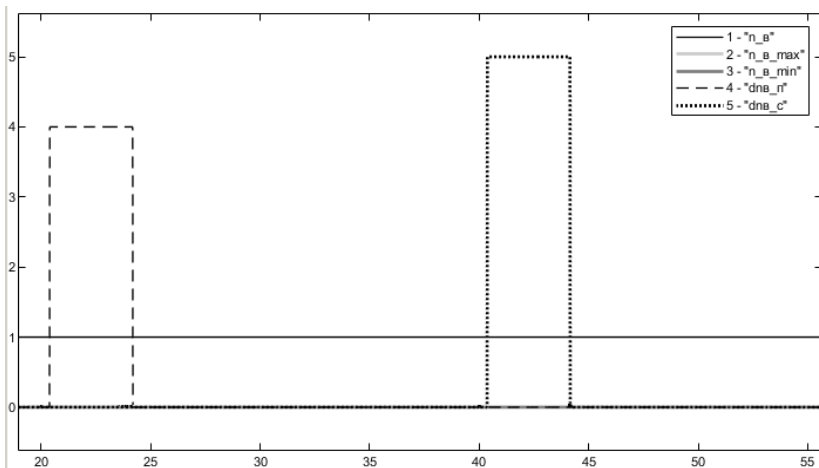


Рис. 15. Метка АНГР САУ ГТД

Значения степеней принадлежности «Mnv», «Mnv_max», «Mnv_min», «Mr», «Ms» приведены на рис. 16. Данные степени принадлежности отражают вклад значений каждого контура в формирование управляющего воздействия.

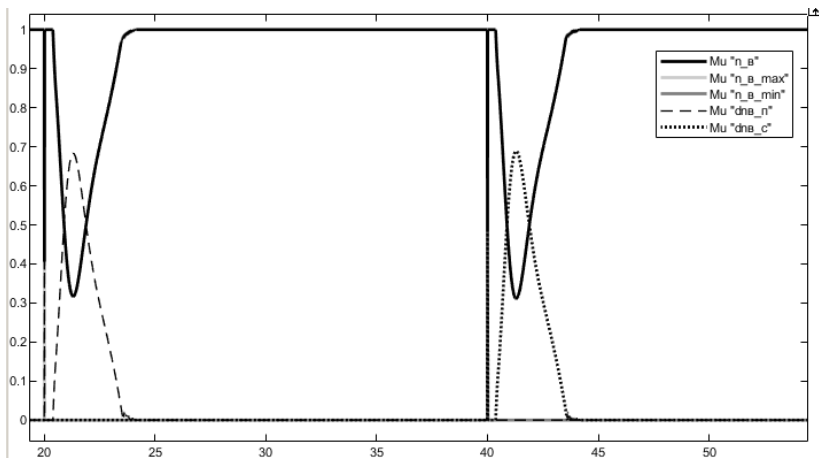


Рис. 16. Степени принадлежности АНГР САУ ГТД

На рис. 17 приведено значение параметра адаптации АНГР « pf », который отвечает за сдвиг терм множеств.

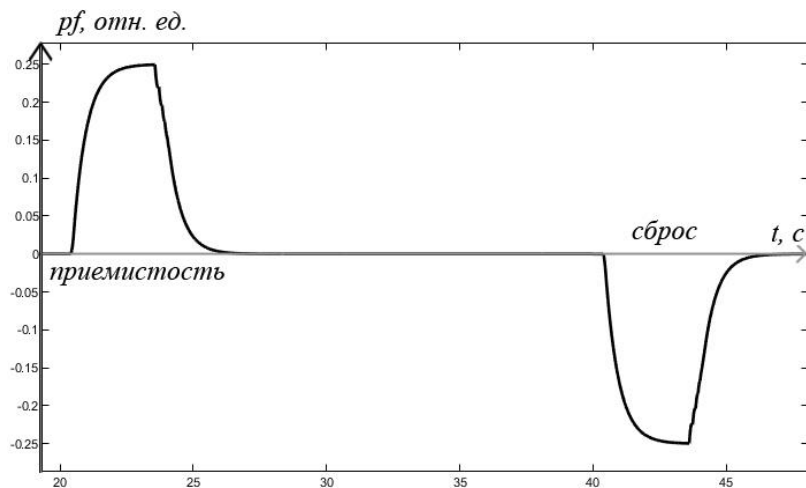


Рис. 17. Значение параметра « pf » АНГР САУ ГТД

3.3. ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента с селектором и АНГР приведены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели качества управления

Регулятор	t_1, c	$\sigma_1\%$	t_2, c	$\sigma_2\%$
Селектор	6,26	4,20	6,57	2,20
АНГР	5,91	4,27	6,20	2,26

Для определения оптимального варианта управления построена следующая целевая функция (4) [1]:

$$(4) F = 0,4 \cdot (\sum \dot{t}_1 + \sum \dot{t}_2) + 0,6 \cdot (\sum \dot{\sigma}_1\% + \sum \dot{\sigma}_2\%) \rightarrow \min ,$$

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

качества при втором изменении программного значения оборотов вентилятора «п_в».

Для нормализации показателей качества каждое значение в столбце делится на максимальное значение в столбце. Нормированные значения показателей качества приведены в таблице 2.

Таблица 2. Нормированные показатели качества управления

Регулятор	\dot{t}_1	$\dot{\sigma}_1$	\dot{t}_2	$\dot{\sigma}_2$
Селектор	1	0,983607	1	0,973451
АНГР	0,944089	1	0,943683	1

Исходя из значений целевой функции, представленных в таблице 2, лучшее качество управления САУ ГТД обеспечивается АНГР ($F = 1,95$). В сравнении с селектором ($F = 1,97$), АНГР улучшает качество управления на 1,02%.

4. Заключение

1. Предложен новый метод адаптации при проектировании нечеткого группового регулятора подачи топлива в камеру сгорания ГТД.

2. Адаптивный нечеткий групповой регулятор повышает качество управления на 1,02% по сравнению с селектором.

3. Адаптивный нечеткий групповой регулятор дополняет теорию нечетких систем.

Литература

1. АНДРИЕВСКАЯ Н.В., АНДРИЕВСКИЙ О.А., ЛЕГОТКИНА Т.С., ХИЖНЯКОВ Ю.Н. и др. *Нейронечеткое управление выбросами вредных веществ авиационного газотурбинного двигателя* // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2020. – Т. 2, №6. – С. 348–355.

2. БОДНЕР В.А., РЯЗАНОВ Ю.А., ШАЙМАРДАНОВ Ф.А. *Системы автоматического управления двигателями летательных аппаратов.* – М.: Машиностроение, 1973. – 248 с.
3. 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>.
4. ГАЕВСКИЙ С.А., МОРОЗОВ Ф.Н., ТИХОМИРОВ Ю. П. *Автоматика авиационных газотурбинных силовых установок* / Под ред. А.В. Штоды. – М. Воениздат, 1980. – 247 с.
5. ГОЛЬБЕРГ Ф.Д., БЕТЕНИН А.В. *Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления: Учебное пособие.* – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 80 с.
6. ГОСТЕВ В.И. *Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления.* – К.: Радиомотор, 2008. – 972с.
7. 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.
8. ДОБРЯНСКИЙ Г.В., МАРТЪЯНОВА Г. С. *Динамика авиационных ГТД.* – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
9. ДОРФ Р., БИШОП Р. *Современные системы управления* / Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
10. *Интегральные системы автоматического управления силовыми установками самолетов* / Под ред. А.А. Шевякова. – М.: Машиностроение, 1983. – 283 с.
11. ЛЮБОМУДРОВ Ю.В. *Применение теории подобия при проектировании систем управления газотурбинных двигателей.* – М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.
12. ОБРУБОВА Э.Н. *Инженерный метод расчета параметров многорежимной упрощенной модели многовального ГТД* // Автоматическое регулирование двигателей летательных аппаратов: Труды № 895 / ЦИАМ – 1980. – Вып. 19. – С. 79–95.

13. *Теория автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов* / Под ред. А.А. Шевякова. – М.: Машиностроение, 1976. – 344 с.
14. ЧЕРКАСОВ Б.А. *Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей*. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.
15. ЧЕРКЕЗ А.Я. *Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений*. – М.: Машиностроение, 1975. – 380 с.
16. ШЕВЯКОВ А.А. *Системы автоматического управления авиационными воздушно-реактивными двигателями*. – М.: Машиностроение, 1992. – 432 с.
17. ШЕВЯКОВ А.А., МАРТЪЯНОВА Т.С., РУТКОВСКИЙ В.Ю. и др. *Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов* / Под общ. ред. А.А. Шевякова и Т.С. Мартъяновой. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
18. ШТОДА А.В., МОРОЗОВ Ф.Н., ШНУКОВ А.Г. *Системы управления и регулирования авиационных двигателей* / Под ред. А.В. Штоды. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1977. – 267 с.
19. JAY L.C., MATTINGLY J.D. *Aircraft engine controls* // AIAA education series. Published by AIAA, 2009. – 384 p.
20. 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.
21. MATTINGLY J.D., HEISER W.H., PRATT D.T. *Aircraft engine design* // AIAA education series. – Published by AIAA, 2002. – 719 p.

ADAPTATION OF A FUZZY GROUP CONTROLLER TO CHANGING OPERATING CONDITIONS

Sergey Storozhev, Perm National Research Polytechnic University, Perm, postgraduate student (cepra5@mail.ru).

Abstract: An aircraft gas turbine engine (GTE) of aircraft from the point of view of control theory is a complex nonlinear object, the frame mathematical description of

which is known a priori. During the operation of a gas turbine engine, continuous monitoring of parameters is required (gas temperature behind the combustion chamber, the rotor speed of the low-pressure compressor (free turbine), the rotor speed of the high-pressure turbocharger (gas generator). Further development of the control of the gas turbine engine can be associated with the use of fuzzy control. The aim of the study is to improve The adaptive fuzzy group controller allows taking into account the values of several circuits by the weighted average method when forming the control action on the fuel dispenser into the combustion chamber of the gas turbine engine. changing operating conditions. The developed adaptive fuzzy group controller allows you to replace the standard selector and ensure adaptability to changing operating conditions of the gas turbine engine. The new controller is characterized by the best values for assessing the probability of failure-free operation of the electronic engine controller. The results of the research can be used to control the fuel dispenser into the combustion chamber of the gas turbine engine. The resulting adaptive fuzzy group controller will significantly reduce the uncertainty in the operation of the combustion chamber, providing a guaranteed thrust of the aircraft.

Keywords: aircraft gas turbine engine, selector, adaptive fuzzy group controller, adaptive fuzzifier, defuzzifier, batcher.

УДК 681.53

ББК 30в6

DOI: 10.25728/ubs.2022.100.8

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии П.С. Щербаковым.*

Поступила в редакцию 10.07.2022.

Опубликована 30.11.2022.