

# АДАПТАЦИЯ ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ К ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**С.А. Сторожев**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*  
614990, Пермский край, Пермь, Комсомольский проспект, 29  
E-mail: sastorozhev@pstu.ru

**А.А. Южаков**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*  
614990, Пермский край, Пермь, Комсомольский проспект, 29  
E-mail: uz@at.pstu.ru

**Ключевые слова:** Авиационный газотурбинный двигатель, логико-динамическая система автоматического управления, селектор, блок адаптации, адаптивный нечеткий групповой регулятор.

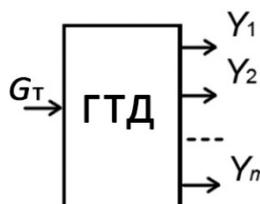
**Аннотация:** рассматривается логико-динамическая система автоматического управления авиационного газотурбинного двигателя, содержащая селектирующее устройство, которое формирует управляющее воздействие путем выбора одного из контуров с помощью многозначной логики. Предлагается замена многозначной логики на нечеткую в селектирующем устройстве с учетом адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации газотурбинного двигателя. Блок адаптации формирует сигнал, который сдвигает терм-множества по горизонтали. За определение условий эксплуатации отвечает разработанный алгоритм. Выход адаптивного нечеткого группового регулятора рассчитывается с помощью метода взвешенного среднего значения контуров.

## 1. Введение

С момента появления первых авиационных газотурбинных двигателей произошли значительные изменения. В течение последних десятилетий инженеры постоянно совершенствовали конструкцию и технологии производства, чтобы улучшить экономию топлива, снизить уровень шума, повысить надежность и продолжительность службы двигателей. Одним из ключевых направлений развития газотурбинных двигателей является увеличение их эффективности. Инженеры постоянно работают над улучшением аэродинамических характеристик компонентов двигателя, разработкой новых материалов с высокой теплостойкостью, а также усовершенствованием системы сжигания топлива.

Газотурбинные двигатели (ГТД) являются объектами управления, число управляющих воздействий которых меньше числа управляемых параметров. Такие

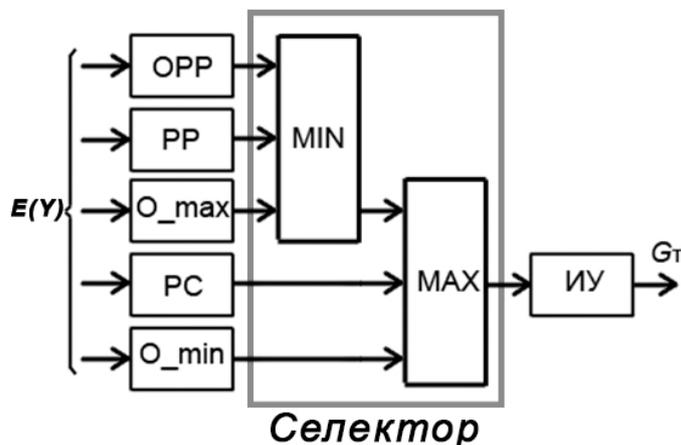
объекты управления называются переопределенными [1]. Пример представлен на рисунке 1.



**Рис. 1.** ГТД как переопределенный объект управления, где  $Y$  – измеряемые параметры ГТД,  $G_T$  – расход топлива.

К системам управления переопределенными объектами управления относятся логико-динамические системы автоматического управления (ЛД САУ) [2].

В логико-динамических САУ ГТД для формирования управляющего воздействия используется селектор (см. рис. 2). Селективный выбор реализуется с помощью элементов минимума и максимума на базе многозначной логики и применяются в САУ ГТД для устранения зоны совместной работы контуров управления.



**Рис. 2.** Структурная схема селектора, где  $E(Y)$  – текущие отклонения параметров ГТД; OPP – основной регулятор режима; PP – регулятор разгона; PC – регулятор сброса; O – ограничители; ИУ – исполнительное устройство;  $G_T$  – расход топлива в камере сгорания ГТД.

В работе А.Н. Добрынина доказано, что селекторы эффективны только для статических режимов работы САУ ГТД [3]. При переходных режимах и при воздействии помех появляются противоречия выбора того или иного контура, из-за этого возникают скачки и перерегулирование параметров ГТД. Следовательно, ухудшаются динамические характеристики САУ и снижается ресурс ГТД.

Алгоритмы адаптации САУ ГТД с селектором рассмотрены в работе В.И. Петунина [4]. Адаптация позволяет подготовить разомкнутые контуры к моменту их включения за счет согласования контуров управления.

Применение нечеткой логики в селекторе ранее не рассматривалось. В данной работе предлагается замена многозначной логики на нечеткую.

## 2. Адаптивный нечеткий групповой регулятор

На рис. 3 приведены примеры селектора, нечеткого группового регулятора (НГР) и адаптивного нечеткого группового регулятора (АНГР). Особенностью схем является их

реализация на основе попарного сравнения входных воздействий, что значительно сокращает аппаратные затраты.

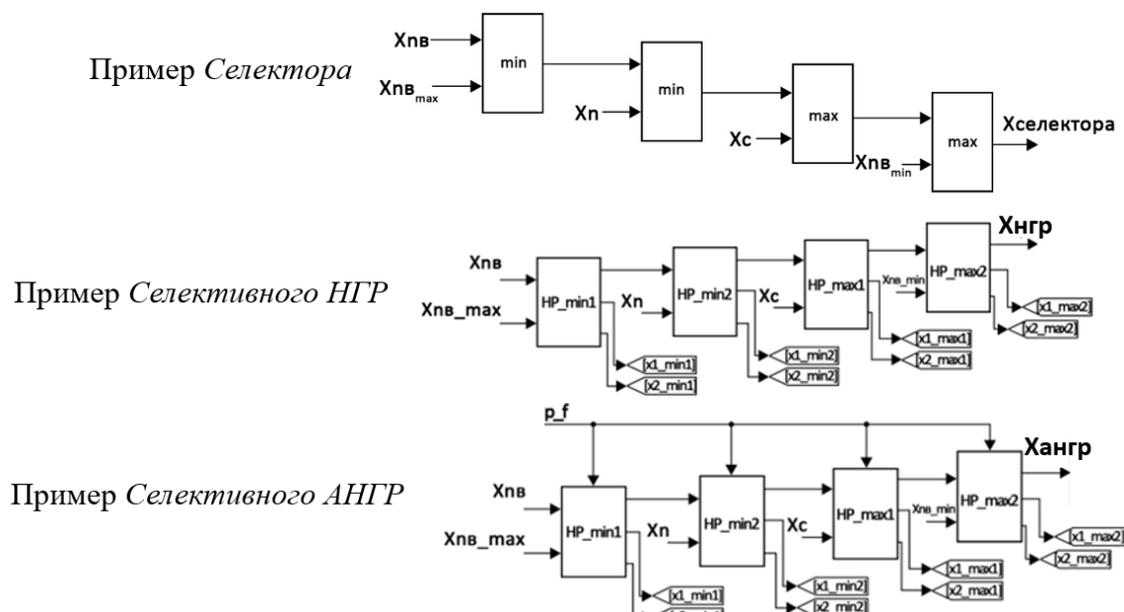


Рис. 3. Пример формирования АНГР из селектора.

На рис. 4 приведена структурная схема элементов выбора минимума и максимума на базе нечеткой логики, из которых состоит АНГР. Как любой нечеткий регулятор, она содержит фаззификатор, блок правил и дефаззификатор [5].

Главным отличием данного элемента от элемента на базе многозначной логики является то, что на интервале пересечения терм-множеств «О» - отрицательная разница входных значений и «П» - положительная разница выход элемента формируется, учитывая оба входа по методу среднего взвешенного значения. Вне этого интервала данный элемент повторяет элемент, построенный на базе многозначной логики.

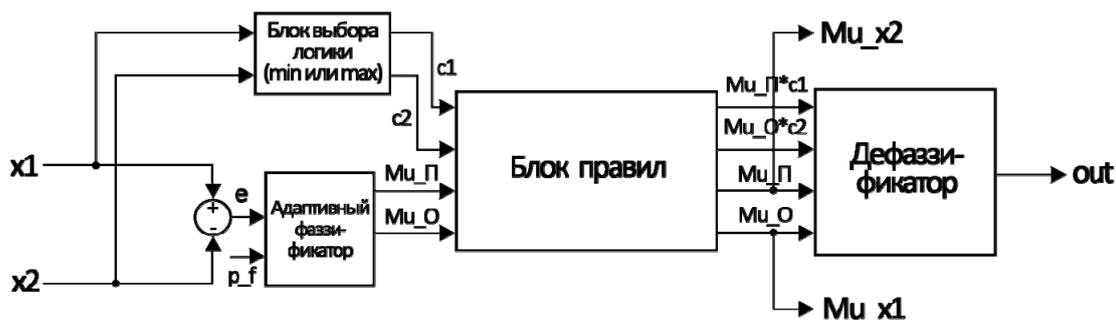
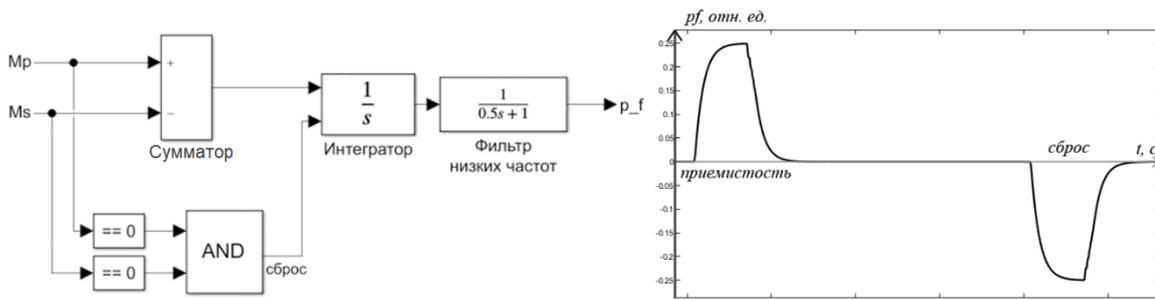


Рис. 4. Структурная схема элемента выбора минимума (максимума) на базе нечеткой логики с учетом адаптации, где « $x_1$ », « $x_2$ » – входы; « $e$ » – отклонение входа « $x_2$ » от входа « $x_1$ »; « $\mu_P$ » – степень принадлежности к терм-множеству «П»; « $p_f$ » – значение параметра для адаптации фаззификатора; « $\mu_O$ » – степень принадлежности к терм-множеству «О»; « $c_1$ », « $c_2$ » – выходы правил; « $\mu_{x_1}$ », « $\mu_{x_2}$ » – значения степеней принадлежности фаззификатора выбора минимума (для выбора максимума они меняются местами); « $out$ » – выход.

АНГР учитывает изменяющиеся условия эксплуатации ГТД, а именно состояния приемистости и сброса. Адаптация заключается в изменении момента переключения контуров за счет смещения терм-множеств вдоль горизонтальной оси. Структурная схема блока адаптации приведена на рис. 5.



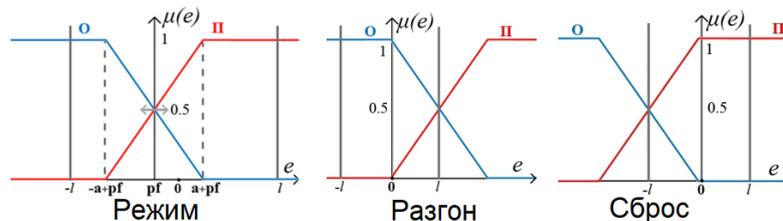
**Рис. 5.** Структурная схема блока адаптации, где «Mp», «Ms» – индикаторы работы контуров приемистости и сброса; «pf» – значение сдвига терм-множеств и пример изменения параметра «pf».

Предлагается метод создания АНГР, который включает в себя 3 этапа:

На первом этапе необходимо определить порядок селектирования контуров логико-динамической САУ.

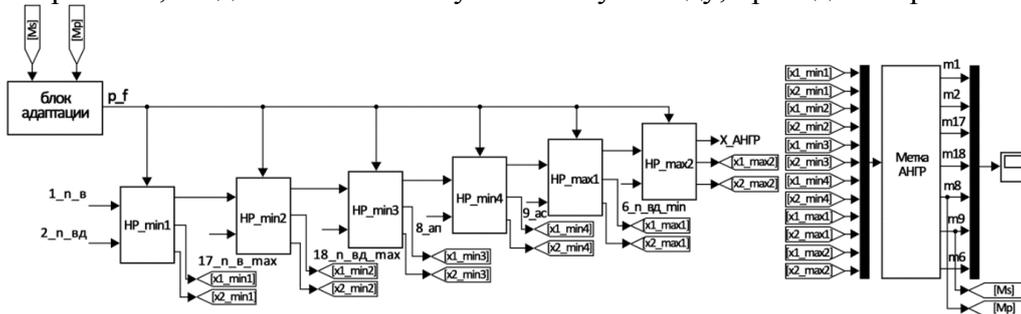
На втором этапе задаются параметры элементов выбора минимума и максимума на базе нечеткой логики, отвечающие за зону совместной работы контуров управления (параметр «а» на рис. 6).

На третьем этапе необходимо определить параметр блока адаптации, задающий величину смещения терм множеств (параметр «pf» на рисунке 6) и предел смещения терм-множеств (параметр «l»).



**Рис. 6.** Адаптивный фаззикатор, где «e» – отклонение входа «x2» от входа «x1»; «μ(e)» – степень принадлежности; «O», «П» – терм-множества; «a» – параметр АНГР; «pf» – значение, сформированное блоком адаптации; «l» – ограничение на смещение терм-множеств.

Пример АНГР, созданного по вышеуказанному методу, приведен на рис. 7.



**Рис. 7.** Структурная схема селективного АНГР, где «БА» – блок адаптации; «X\_АНГР» – выход АНГР; «M\_АНГР» – метка АНГР.

### 3. Эксперимент

В ходе исследований был проведен эксперимент имитирующий процессы взлета и посадки состоящий в том, что во время запуска ГТД программное значение изменяется согласно рисунку 8, а программа контура приемистости ускорения частоты вращения

ротора высокого давления «ап» равняется 391 и 630, программа контура сброса ускорения частоты вращения ротора высокого давления «ас» равняется -600.

На рис. 8 представлено сравнение оборотов вентилятора «п\_в» ГТД в случае применения селектора и АНГР.

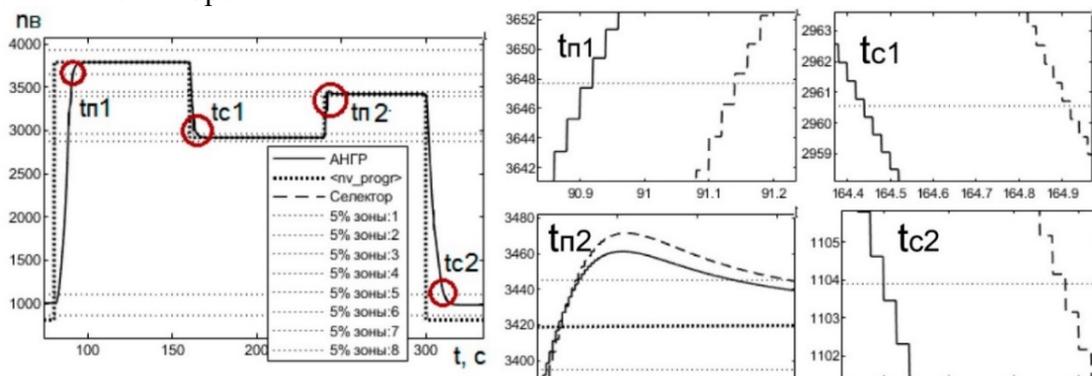


Рис. 8. Сравнение оборотов вентилятора «п\_в» ГТД с селектором и АНГР.

Результаты эксперимента:

$$\begin{aligned}
 t_{n1}^{\text{селектор}} &= 11.12 \text{ с}; \quad t_{n1}^{\text{АНГР}} = 10.92 \text{ с}; \quad t_{c1}^{\text{селектор}} = 4.90 \text{ с}; \quad t_{c1}^{\text{АНГР}} = 4.44 \text{ с}; \\
 t_{n2}^{\text{селектор}} &= 2.06 \text{ с}; \quad t_{n2}^{\text{АНГР}} = 2.06 \text{ с}; \quad t_{c2}^{\text{селектор}} = 11.06 \text{ с}; \quad t_{c2}^{\text{АНГР}} = 10.80 \text{ с}; \\
 \sigma_{n1}^{\text{селектор}} &= 0\%; \quad \sigma_{n1}^{\text{АНГР}} = 0\%; \quad \sigma_{c1}^{\text{селектор}} = 0\%; \quad \sigma_{c1}^{\text{АНГР}} = 0\%; \\
 \sigma_{n2}^{\text{селектор}} &= 10.32\%; \quad \sigma_{n2}^{\text{АНГР}} = 8.13\%; \quad \sigma_{c2}^{\text{селектор}} = 0\%; \quad \sigma_{c2}^{\text{АНГР}} = 0\%;
 \end{aligned}$$

Применение селективного АНГР позволяет сократить время переходного процесса на 0,92 с. и уменьшает перерегулирование на 2.19%.

Особенностью эксперимента являлось то, что параметры настройки всех контуров не изменялись.

## 4. Заключение

В результате работы проанализированы принципы построения САУ ГТД с селективным выбором контуров. Разработаны элементы выбора минимального и максимального значений на базе нечеткой логики. Предложен метод создания селективных групповых регуляторов с помощью элементов на базе нечеткой логики. Представлены результаты эксперимента сравнения селектора и АНГР в составе САУ ГТД, которые показали улучшение параметров регулирования без изменения настроек всех контуров. Перестройка контуров в составе измененной САУ может увеличить выигрыш во времени переходного процесса и уменьшении перерегулирования.

## Список литературы

1. Ахметгалеев, И. И. Об одном виде двумерных систем с переменной структурой // Электронные узлы систем контроля и управления летательных аппаратов: Труды. Вып. 51. Уфа: УАИ, 1974. С. 94-100.
2. 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.
3. Добрынин А.Н. Устройства, обеспечивающие исключение совместной работы нескольких регуляторов в гидромеханических системах ТРД // Автоматическое регулирование двигателей летательных аппаратов. Труды № 519. Вып. 13. ЦИАМ, 1972. С. 106-125.
4. 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.
5. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: Радиоматор, 2008. 972 с.