



# Применение нечеткого регулятора для устранения флуктуаций переходного процесса возмущенной системы автоматического управления углом тангажа летательного аппарата

М. Е. Иванов<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0002-7584-6946](https://orcid.org/0000-0002-7584-6946)

В. В. Езерский<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-1223-6841](https://orcid.org/0000-0002-1223-6841), [ezerskiy2010@yandex.ru](mailto:ezerskiy2010@yandex.ru)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** к системе автоматического управления углом тангажа летательного аппарата приложены многочисленные возмущающие воздействия, вследствие которых возникают значительные флуктуации переходного процесса по тангажу данной системы. **Цель:** преобразовать схему управления углом тангажа и разработать для нее нечеткий регулятор, который позволит уменьшить флуктуации и улучшить качество переходного процесса; провести моделирование исходной и модернизированной систем управления. **Результаты:** проведено моделирование с использованием Matlab Simulink работы классической и интеллектуальной систем управления углом тангажа. По результатам моделирования достигнуто улучшение качества переходного процесса системы управления за счет значительного уменьшения флуктуаций. Для этого в схему системы управления добавлен пропорционально-интегрирующий регулятор, использующий один из методов искусственного интеллекта – нечеткую логику. Настройка нечеткого регулятора осуществлена преобразованием типового алгоритма: для входных лингвистических переменных в два раза уменьшен интервал универсального множества, на котором определены функции принадлежности. Моделирование нечеткой системы произведено в Matlab Fuzzy Logic Toolbox. **Практическая значимость:** оптимальная настройка нечеткого регулятора позволяет значительно улучшить качество переходного процесса системы управления, на которую действует большое число возмущающих воздействий.

**Ключевые слова** – флуктуация, возмущающее воздействие, искусственный интеллект, система автоматического управления, нечеткий регулятор, переходный процесс.

**Для цитирования:** Иванов М. Е., Езерский В. В. Применение нечеткого регулятора для устранения флуктуаций переходного процесса возмущенной системы автоматического управления углом тангажа летательного аппарата. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 3, с. 51–58. doi:10.31799/1684-8853-2023-3-51-58, EDN: DACXFO

**For citation:** Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. The use of the intelligent fuzzy controller for the elimination of fluctuations in the transient process of the perturbed automatic pitch angle control system of an aircraft. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 3, pp. 51–58 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-3-51-58, EDN: DACXFO

## Введение

Основная теоретическая база и математический аппарат систем автоматического управления (САУ; Automatic Control Systems, ACS) были разработаны еще в середине XX в. Однако и сегодня данные системы являются объектом регулярных модернизаций, преобразований [1–4]. Происходит интеграция систем в единые измерительные комплексы [5–8], разрабатываются новые инструменты для улучшения качества переходных процессов (уменьшения флуктуаций, уменьшения времени переходного процесса) и т. п. Для этих целей разрабатываются перспективные регуляторы, синтезированные с применением методов искусственного интеллекта – нечеткой логики и искусственной нейронной сети. Так, в статье [9] А. С. Коноваловым и П. Е. Шумиловым исследуется возможность применять нечеткую логику в авиационных систе-

мах антиюзовой автоматики. В более современной работе [10] Н. В. Гридина, И. А. Евдокимов и В. И. Солодовников рассматривают использование нечеткой логики для синтеза гибридных искусственных нейронных сетей. Д. О. Пушкарев, Д. Ю. Киселев, Ю. В. Киселев в статье [11] составили математическую модель нейронной сети применительно к расчету авиационных рычажно-поплавковых клапанов. А. В. Шилоносов, Д. В. Молдован, авторы труда [12], провели анализ и синтез сложного нейросетевого регулятора для динамической коррекции управляющих воздействий системы управления воздушно-космического самолета.

Таким образом, создание интеллектуального регулятора САУ является типовой научно-технической задачей, решаемой широким кругом ученых применительно к различным областям в самых разных технических агрегатах. В данной статье рассмотрено использование нечеткого регулятора для

компенсирования возмущающих воздействий на САУ углом тангажа летательного аппарата с целью улучшить качество переходного процесса (по каналу тангажа) системы. Выбор темы для исследования связан с целеполаганием снижения колебательности переходного процесса системы в условиях большого количества возмущающих воздействий.

**Краткие теоретические сведения**

Рассматриваемая система управления угла тангажа является непрерывной нелинейной системой с незначительной степенью нелинейности. Данную САУ целесообразно заменить линейной моделью: аналитическая линейризация может быть достигнута разложением функции  $\delta_B(t)$  в ряд Тейлора

$$\delta_B(t) = K_{\vartheta} \cdot \vartheta + K_{\dot{\vartheta}} \cdot \dot{\vartheta} + K_{\ddot{\vartheta}} \cdot \ddot{\vartheta} + \dots + K_{\vartheta^{(n)}} \cdot \vartheta^{(n)}$$

с последующим исключением из ряда слагаемых второй степени и выше. Члены ряда второго и высшего порядков исключаются в предположении о достаточной малости изменения параметра  $\vartheta$  (отклонения от установившегося значения). Таким образом, для линейризованной САУ угла тангажа будут справедливы линейные алгоритмы управления, которые используются далее.

В идеальном случае, когда исполнительные устройства являются безынерционными, закон отклонения рулей высоты для управления углом тангажа имеет вид [13–15]

$$\delta_B = K_{\dot{\vartheta}} \cdot \dot{\vartheta} + K_{\vartheta} \cdot (\vartheta - \vartheta_3), \tag{1}$$

где  $K_{\dot{\vartheta}}$  – коэффициент обратной связи по угловой скорости;  $K_{\vartheta}$  – коэффициент усиления ошибки по углу тангажа;  $\vartheta - \vartheta_3$  – разница между реальным значением угла тангажа и заданным значением этого угла с учетом запаздывания системы.

Синтезируемая САУ угла тангажа требует наложения сразу нескольких условий:

1) появления инерционности – необходимо учитывать дисперсию воздействующего на систему возмущающего воздействия  $M$ , состоящего из значений дисперсий локальных возмущающих воздействий: угловой скорости тангажа  $M_{\dot{\vartheta}}$ , угловой скорости атаки  $M_{\dot{\alpha}}$ , угла атаки  $M_{\alpha}$  и дисперсии случайных погрешностей  $M_{\delta}$ :

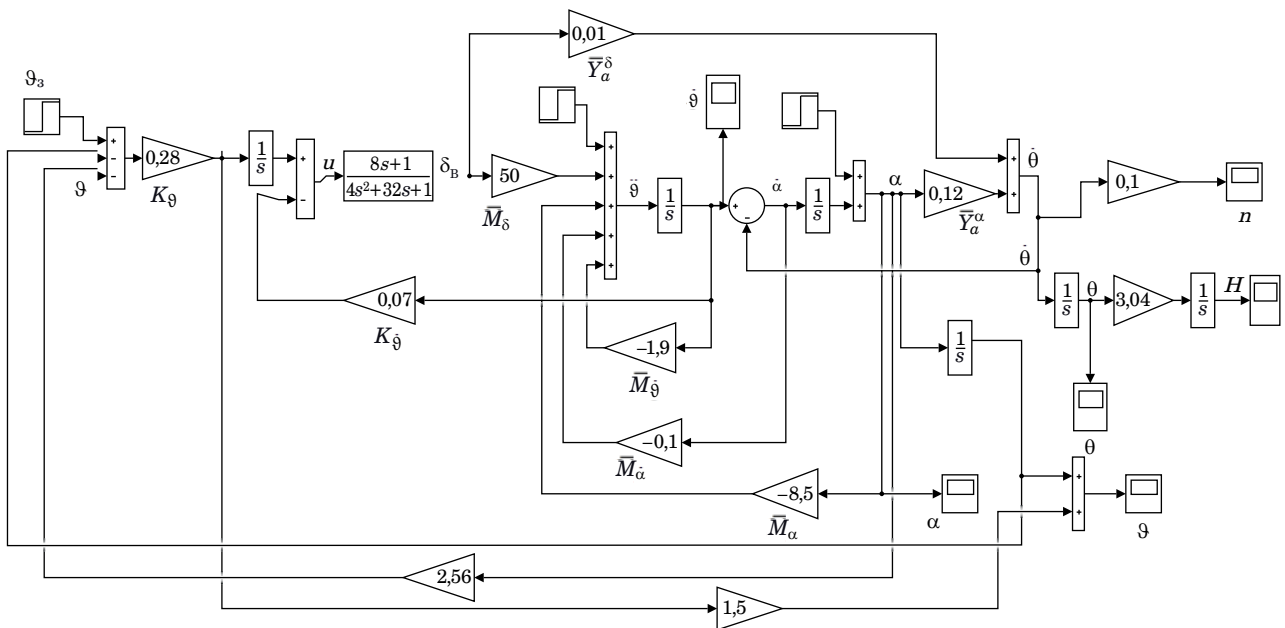
$$\{M\} = \{M_{\dot{\vartheta}}, M_{\dot{\alpha}}, M_{\alpha}, M_{\delta}\}; \tag{2}$$

2) добавления в САУ звеньев астатизма для сведения к нулю накапливающихся ошибок регулирования. В качестве звена астатизма используется интегратор  $1/s$ , в таком случае закон управления преобразуется к виду

$$\delta_B = K_{\dot{\vartheta}} \cdot \dot{\vartheta} + K_{\vartheta} \cdot \int (\vartheta - \vartheta_3) dt; \tag{3}$$

3) составления оптимальной передаточной функции рулевого привода руля высоты  $W_{p.n} \neq 1$ .

Полная структурная схема САУ параметров полета в плоскости симметрии летательного аппарата (рис. 1) позволяет осуществлять управле-



■ **Рис. 1.** САУ параметров полета в вертикальной плоскости симметрии  
 ■ **Fig. 1.** Automatic control system for flight parameters in the vertical plane of symmetry

ние не только углом тангажа  $\vartheta$ , но и остальными параметрами полета, измеряемыми в плоскости симметрии: углом атаки  $\alpha$ , углом наклона траектории  $\theta$ , текущей высотой полета  $H$  и нормальной (вертикальной) перегрузкой  $n$ . Все коэффициенты усилительных звеньев выбраны таким образом, чтобы получить наиболее приемлемые зависимости и обеспечить максимальное быстродействие системы с наименьшим временем переходного процесса по углу тангажа  $\vartheta$  и углу атаки  $\alpha$ .

### Переходный процесс возмущенной системы управления

Заданы следующие параметры системы, необходимые для моделирования:

- на вход системы подается детерминированное входное воздействие — единичная ступенчатая функция Хевисайда с параметрами:  $\vartheta_3(t) = 1$  (final value), временной шаг 1 (step time), начальное значение 0 (initial value);

- коэффициенты, отвечающие за быстродействие системы, т. е. за качество переходного процесса:  $K_{\vartheta} = 0,07$ ,  $K_{\alpha} = 0,28$ ;

- передаточная функция руля высоты

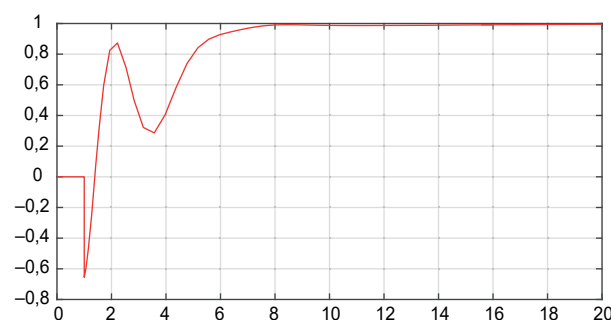
$$W_{p.l}(s) = \frac{8s + 1}{4s^2 + 32s + 1}; \quad (4)$$

- дисперсия случайных погрешностей  $\delta = 50$ , дисперсии возмущающих воздействий по угловой скорости  $M_{\dot{\vartheta}}$ , угловой скорости по углу атаки  $M_{\dot{\alpha}}$  и самому углу атаки  $M_{\alpha}$  соответственно равны  $-1,9$ ,  $-0,1$  и  $-8,5$ ;

- коэффициент усиления всей системы, связанный с подъемной силой,  $Y_{\alpha}$  равен 0,01, а этот же коэффициент усиления по углу атаки  $Y_{\alpha}^{\alpha} = 0,12$ . Коэффициенты усиления, связанные с вертикальной перегрузкой и с высотой полета, приняты равными 0,1 и 2,34 соответственно. Дополнительные звенья обратной связи и усиления для угла тангажа  $\vartheta$  соответственно имеют значения 2,56 и 1,5.

В ходе моделирования, время  $t$  которого составило 20 с, был получен следующий результат. С помощью заранее заданных коэффициентов усиления при данной передаточной функции рулей высоты удалось максимально улучшить качество переходного процесса от включения системы к установившемуся режиму работы по каналу угла тангажа  $\vartheta$  (рис. 2).

Увеличение коэффициента усиления ошибки по углу тангажа  $K_{\vartheta}$  приводит к потере устойчивости системы, а уменьшение — к значительному ухудшению качества переходного процесса без потери устойчивости. Увеличение коэффициента обратной связи аналогично ухудшает



■ **Рис. 2.** Переходный процесс САУ по каналу угла тангажа  $\vartheta$

■ **Fig. 2.** The ACS transient process along the pitch angle  $\vartheta$  channel

качество переходного процесса и увеличивает время установления рабочего режима, а уменьшение этого коэффициента принципиально не влияет на переходный процесс и не изменяет его.

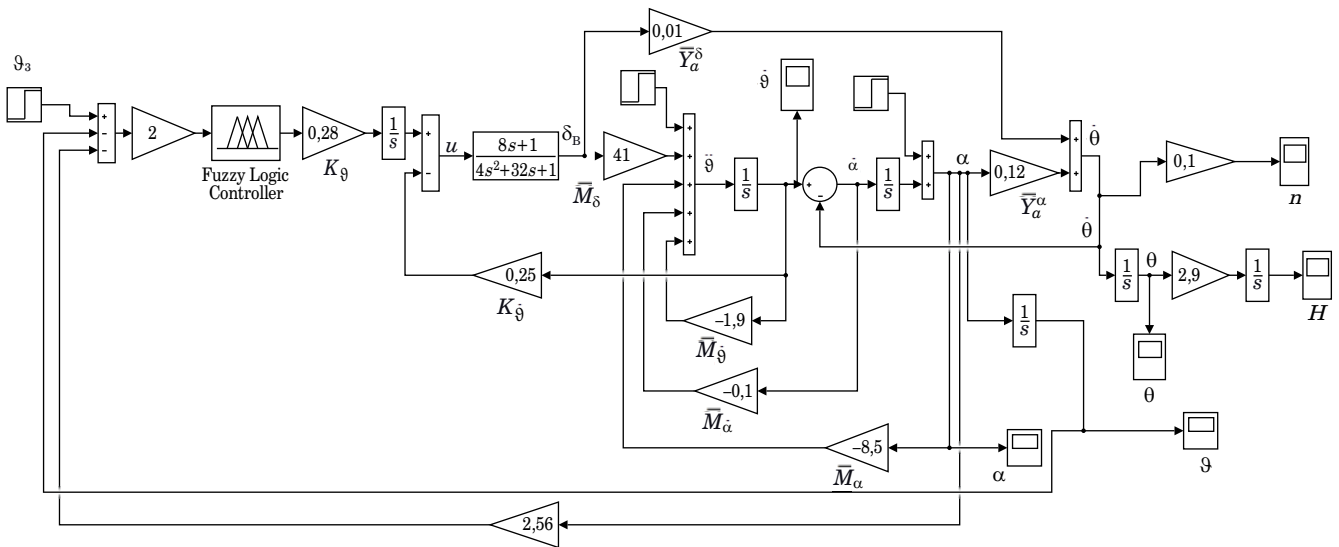
### Модернизация системы управления звеном с искусственным интеллектом

Применение интеллектуального нечеткого регулятора позволяет получить более качественный переходный процесс по каналу угла тангажа  $\vartheta$  даже при наличии большого количества дестабилизирующих возмущений  $M_i$ . Нечеткий регулятор может не только значительно снизить флуктуации переходного процесса, но и исключает увеличение амплитудного значения недорегулирования  $Y_{\min}$  переходного процесса, возникающего вследствие действия на систему возмущающих воздействий по угловой скорости  $M_{\dot{\vartheta}}$ , угловой скорости атаки  $M_{\dot{\alpha}}$  и углу атаки  $M_{\alpha}$ .

Схема измерителей параметров в вертикальной плоскости симметрии (см. рис. 2) с учетом добавления интеллектуального нечеткого регулятора Fuzzy Logic Controller примет вид, представленный на рис. 3. При сохранении той же передаточной функции (4) системы увеличился коэффициент  $K_{\dot{\vartheta}} = 0,25$ , а также уменьшилась дисперсия  $M_{\delta} = 41$ . Кроме того, наличие нечеткого регулятора исключает необходимость в отдельном звене усиления по каналу тангажа  $K_U$  1,5, которое было добавлено для стабилизации исходной САУ. В контур САУ включено усиленное звено перед регулятором  $K_{FUZZY} = 2$ .

### Параметрический синтез нечеткой системы регулятора

Задание параметров нечеткой системы осуществляется по стандартному алгоритму [16–21].



■ **Рис. 3.** Интеллектуальная САУ параметров вертикальной плоскости симметрии  
 ■ **Fig. 3.** Intelligent ACS parameters of the vertical plane of symmetry

1. Задаются входные лингвистические переменные  $\tilde{\alpha}$  (term), для каждой из которых составляются функции принадлежности  $\mu_N(x)$  треугольного типа (trimf) в количестве  $N$  штук на универсальном множестве  $[-1; 1]$ .

2. Задаются выходные лингвистические переменные  $\beta$  с  $M$  треугольными (trimf) функциями принадлежности  $\mu_M(y)$ .

3. Перед дефаззификацией входных лингвистических переменных на выходе в центральном блоке нечеткой системы записываются правила (Rules) вида "If < input1 is  $i$  > then < output1 is  $j$  >".

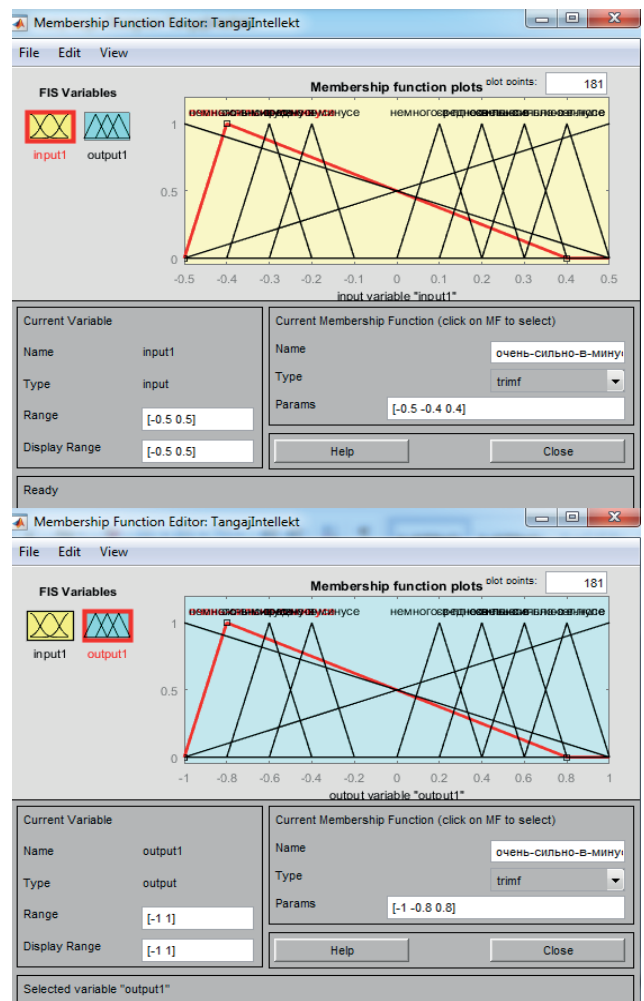
4. Анализируется полученная статическая характеристика output1 (input1) синтезированной нечеткой системы.

Представленный типовой алгоритм был преобразован в целях улучшения качества переходного процесса следующим образом.

1. Для input и output были изменены три симметричные треугольные функции принадлежности: «очень-сильно-в-минусе», «немного-в-минусе» и «в-нуле». Модифицированные функции принадлежности имеют интервалы  $[-1 -0,8 0,8]$ ,  $[-1,2 -1 1]$  и  $[-1 1 1,2]$  соответственно.

2. Для input был уменьшен в два раза интервал универсального множества, на котором определены  $\mu_N(x)$ , до  $[-0,5 0,5]$ . Таким образом, изменили свои значения как стандартные функции принадлежности, так и модифицированные «очень-сильно-в-минусе», «немного-в-минусе» и «в-нуле», получившие новые интервалы  $[-0,5 -0,4 0,4]$ ,  $[-0,6 -0,5 0,5]$  и  $[-0,5 0,5 0,6]$  соответственно (рис. 4).

3. В блоке Rule Editor были прописаны решающие правила для функций принадлежности. Всего записано девять неповторяющихся пра-



■ **Рис. 4.** Функции принадлежности блоков input и output нечеткой системы  
 ■ **Fig. 4.** Membership functions of the input and output blocks of a fuzzy system

вил вида “If input is  $\tilde{\alpha}$  then output is  $\tilde{\beta}$ ”, связывающих входные лингвистические переменные с выходными.

Значения интервалов, которые принимают функции принадлежности  $\mu_M(y)$  и  $\mu_N(x)$  для  $\beta$  и  $\tilde{\alpha}$ , представлены в табл. 1.

Девять решающих правил (табл. 2) связывают некоторые входные и выходные термины таким образом, чтобы регулятор сформировал целевой показатель устойчивости и качества переходного процесса.

С полученной нечеткой системы была снята следующая статическая характеристика (рис. 5), которая возрастает на всем участке от min input1 до max input1. Она показывает характер нелинейности нечеткого регулятора как отдельного нелинейного звена в составе нелинейной САУ угла тангажа.

■ **Таблица 1.** Значения интервалов функций принадлежности

■ **Table 1.** Values of intervals of membership functions

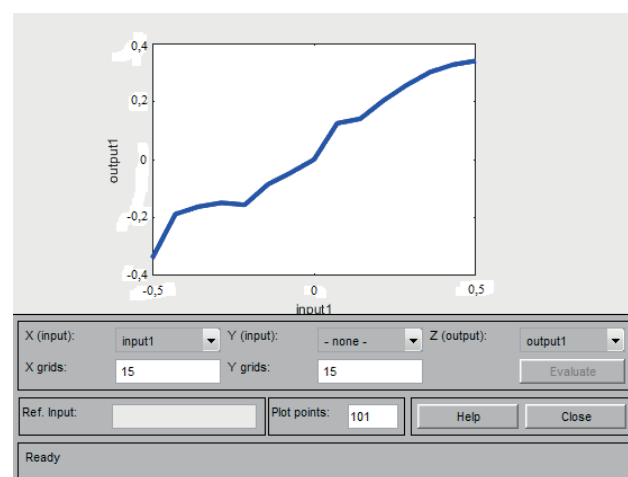
Термы лингвистических переменных	Интервалы параметров и координаты вершин функций принадлежности	
	для output	для input
Очень-сильно-в-минусе	[-1 -0,8 0,8]	[-0,5 -0,4 0,4]
Сильно-в-минусе	[-0,8 -0,6 -0,4]	[-0,4 -0,3 -0,2]
Средне-в-минусе	[-0,6 -0,4 -0,2]	[-0,3 -0,2 -0,1]
Немного-в-минусе	[-1,2 -1 1]	[-0,6 -0,5 0,5]
В-нуле	[-1 1 1,2]	[-0,5 0,5 0,6]
Немного-в-плюсе	[0 0,2 0,4]	[0 0,1 0,2]
Средне-в-плюсе	[0,2 0,4 0,6]	[0,1 0,2 0,3]
Сильно-в-плюсе	[0,4 0,6 0,8]	[0,2 0,3 0,4]
Очень-сильно-в-плюсе	[0,6 0,8 1]	[0,3 0,4 0,5]

### Сравнительный анализ классической и интеллектуальной систем управления

С учетом интеллектуализации САУ был получен следующий переходный процесс по каналу измерения угла тангажа  $\vartheta$  (рис. 6). Данный график позволяет провести сравнительный анализ переходных процессов канала измерения угла тангажа  $\vartheta$  в случае классической и интеллектуальной САУ (рис. 7).

Исходя из данных моделирования, можно сделать следующие выводы.

1. Применение интеллектуального нечеткого регулятора позволило существенно снизить колебательность переходного процесса, в том числе полностью исключить необходимость в недорегулировании системы, что было обязательным условием достижения устойчивости классической САУ.



■ **Рис. 5.** Статическая характеристика нечеткого регулятора САУ параметров вертикальной плоскости симметрии

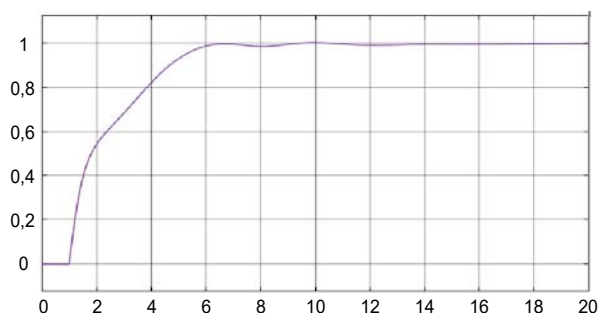
■ **Fig. 5.** Static characteristic of the fuzzy controller of the ACS parameters of the vertical plane of symmetry

■ **Таблица 2.** Правила нечеткой системы для нечеткого регулятора исследуемой САУ

■ **Table 2.** Rules of the fuzzy system for the fuzzy controller of the researched ACS

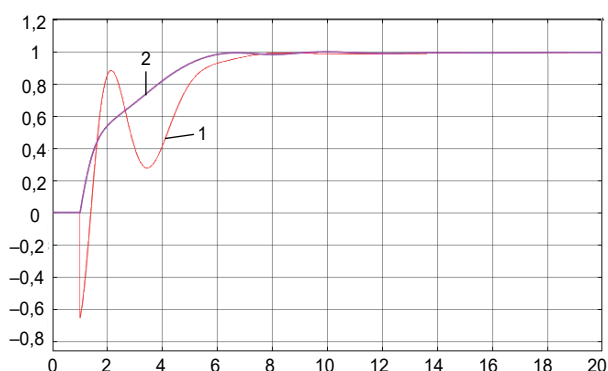
№	Правило							
	If	input1	is	термин	then	output1	is	термин
1	If	input1	is	очень-сильно-в-минусе	then	output1	is	очень-сильно-в-минусе
2	If	input1	is	сильно-в-минусе	then	output1	is	средне-в-минусе
3	If	input1	is	средне-в-минусе	then	output1	is	немного-в-минусе
4	If	input1	is	немного-в-минусе	then	output1	is	немного-в-минусе
5	If	input1	is	в-нуле	then	output1	is	в-нуле
6	If	input1	is	немного-в-плюсе	then	output1	is	в-нуле
7	If	input1	is	средне-в-плюсе	then	output1	is	немного-в-плюсе
8	If	input1	is	сильно-в-плюсе	then	output1	is	немного-в-плюсе
9	If	input1	is	очень-сильно-в-плюсе	then	output1	is	немного-в-плюсе





■ **Рис. 6.** Переходный процесс угла тангажа  $\theta$  интеллектуальной САУ

■ **Fig. 6.** Transient process of pitch angle  $\theta$  measurement intelligent ACS



■ **Рис. 7.** Переходные процессы классической 1 и интеллектуальной 2 САУ по каналу измерения угла тангажа  $\theta$

■ **Fig. 7.** Transient processes of classical 1 and intelligent 2 ACS through the pitch angle  $\theta$  measurement channel

2. Интеллектуализация САУ позволила не только компенсировать флуктуации, но и снизить время установления рабочего режима. Для классической САУ оно составило  $t_{\text{п}} \approx 7$  с, для интеллектуальной САУ  $t_{\text{п}} \approx 5,2$  с.

3. Применение нечеткого регулятора хоть и позволило существенно снизить колебания переходного процесса, однако не исключило их полностью. Ввиду большого количества возмущающих воздействий в исследуемой САУ небольшие флуктуации наблюдаются до момента времени  $t \approx 15$  с, после чего система окончательно стабилизируется.

4. Улучшение качества переходного процесса по каналу угла тангажа  $\theta$  немного ухудшает качество переходных процессов по каналам угла атаки  $\alpha$  и нормальной перегрузки  $n$  (увеличивает их время  $t_{\text{п}}$ , однако не нарушает устойчивость САУ по другим летным параметрам). Это связано с подключением нечеткого регулятора к общему каналу системы управления, формирующему качество переходных процессов всех параметров, измеряемых системой. Таким образом, оптими-

зация регулятора в целях улучшения качества переходного процесса по тангажу незначительно влияет на аналогичные показатели других летных параметров в вертикальной плоскости симметрии летательного аппарата.

## Заключение

В ходе данного исследования было произведено моделирование работы системы управления угла тангажа в классическом исполнении и с использованием звена нечеткой регуляции. На основании проведенного сравнительного анализа двух систем был сделан вывод о целесообразности применения интеллектуального нечеткого регулятора в САУ параметров вертикальной плоскости симметрии для улучшения качества переходного процесса канала измерения угла тангажа  $\theta$ .

Несмотря на основополагающие преимущества, которыми обладает нечеткий регулятор (лучшее качество переходного процесса, быстродействие), он не имеет универсального алгоритма настройки функций принадлежности. Эти функции формируются эмпирически: в текущем исследовании  $\mu_N(x)$  и  $\mu_M(y)$  были подобраны за 15–20 итераций. Этот показатель может быть выше для нечетких регуляторов, применяемых в более сложных САУ с еще большим числом возмущающих воздействий, что на практике может затруднить процесс адаптивной настройки системы управления. Поэтому целесообразно провести дополнительный анализ, связанный с применимостью нечетких регуляторов для локальных задач управления, имеющих конкретные начальные условия.

В рамках дальнейших исследований и усовершенствования рассмотренной в данной статье модели интеллектуальной САУ по углу тангажа предполагается:

- реализовать имитационное моделирование САУ по тангажу в случае стохастического входного воздействия и провести дополнительную оптимизацию звеньев системы для улучшения качества переходного процесса;
- для повышения качества характеристик измерения угла атаки  $\alpha$  и нормальной перегрузки  $n_y$  провести дополнительную настройку системы по каналам других параметров;
- рассмотреть нелинейный режим работы системы управления, линеаризованной в ходе исследования, проведенного в данной статье;
- осуществить синтез САУ по тангажу с применением другого интеллектуального звена – нейросетевого регулятора, провести сравнительный анализ качества переходного процесса полученного и переходного процесса САУ с нечетким регулятором.

## Литература

1. **Zhang X., Qian L.** Heading control of the air cushion vehicle based on fuzzy PID. *2022 Intern. Conf. on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI)*, 2022. doi:10.1109/ICCSI55536.2022.9970669
2. **Титов Ю. К.** Адаптивные нечеткие устройства систем управления с гарантированной устойчивостью: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, ПНИПУ, 2019. 204 с.
3. **Княжский А. Ю.** Разработка и исследование алгоритма управления движением низколетящего аппарата над неровной поверхностью, минимизирующего его среднюю высоту: дис. ... канд. техн. наук. СПб., СПбГУТ им. проф. Бонч-Бруевича, 2018. 135 с.
4. **Ахрамович С. А., Баринов А. В., Малышев В. В., Старков А. В.** Синтез системы управления беспилотного летательного аппарата по высоте методом бэкстеппинга. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2018, т. 17, № 2, с. 7–22. doi:10.18287/2541-7533-2018-17-2-7-22
5. **Иванов М. Е., Езерский В. В.** Применение методов искусственного интеллекта в системе управления воздушным движением тяжелого многоцелевого экраноплана. *Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: материалы 14-й Междунар. науч. конф. В 3 ч. Ч. 2.* СПб., 2021, с. 323–330. EDN: GXGBAX
6. **Kulik A.** Artificial intelligence-based aircraft accident threat parrying method. *Proc. of Telecommunication Universities*, 2021, vol. 7, no. 4, pp. 110–117. doi:10.31854/1813-324X2021-7-4-110-117, EDN: UWGRXJ
7. **Иванов М. Е., Езерский В. В.** Моделирование системы управления низколетящим аппаратом по каналу рысканья в Matlab Simulink. *3-я Междунар. науч. конф. «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии»: сб. докл.*, Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2022 г. СПб., 2022, с. 162–165. EDN: YINSAZ
8. **Кулида Е. Л., Лебедев В. Г.** Перспективы использования методов искусственного интеллекта в авиации. *Управление развитием крупномасштабных систем: тр. 13-й Междунар. конф.*, Москва, 28–30 сентября 2020 г. М., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2020, с. 1535–1541. EDN: OIJOYG
9. **Коновалов А. С., Шумилов П. Е.** Применение нечеткой логики в авиационных системах антиюзовой автоматики. *Информационно-управляющие системы*, 2003, № 5, с. 12–17. EDN: KXZXCB
10. **Гридина Н. В., Евдокимов И. А., Солодовников В. И.** Построение гибридных нейронных сетей с использованием элементов нечеткой логики. *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2019, № 2, с. 91–97. doi:10.14357/20718594190209, EDN: ZUOMUP
11. **Пушкарев Д. О., Киселев Д. Ю., Киселев Ю. В.** Расчет авиационных рычажно-поплавковых клапанов с помощью нейронных сетей. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2022, т. 21, № 4, с. 44–51. doi:10.18287/2541-7533-2022-21-4-44-51
12. **Шилоносков А. В., Молдован Д. В.** Динамическая коррекция управляющих воздействий системы управления сложного технического объекта с использованием нейросетевых технологий. *Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии*, 2021, № 4 (4), с. 415–422. EDN: SYZWBBS
13. **Петуний В. И.** Синтез законов управления канала тангажа автопилота. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, 2007, т. 9, № 2 (20), с. 25–31. EDN: IBJMNВ
14. **Абдулина Э. Ю., Ефанов В. Н.** Синтез системы управления углом тангажа с каналом ограничения угла атаки. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2020, № 1, с. 25–32. EDN: IKOPOO
15. *Управление углом тангажа ЛА.* <https://helpiks.org/5-70621.html> (дата обращения: 13.10.2015).
16. **Бураков М. В., Коновалов А. С.** Синтез нечетких логических регуляторов. *Информационно-управляющие системы*, 2011, № 1, с. 22–27.
17. **Бураков М. В., Коновалов А. С.** Нечеткий супервизор ПИД-регулятора. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 5, с. 13–21. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21
18. **Althubaiti M., Bernard M., Musilek P.** Fuzzy logic controller for hybrid renewable energy system with multiple types of storage. *2017 IEEE 30th Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2017. doi:10.1109/CCECE.2017.7946738
19. **Чертилин К. Э., Ивченко В. Д.** Настройка адаптивных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя. *Российский технологический журнал*, 2020, т. 8, № 6 (38), с. 143–156. doi:10.32362/2500-316X-2020-8-6-143-156. <https://rtj.mirea.ru/> (дата обращения: 13.01.2023).
20. **Демидова Г. Л.** Разработка и исследование регуляторов с нечеткой логикой для следящих электроприводов оптико-механических комплексов: дис. ... канд. техн. наук. СПб., НИУ ИТМО, 2016. 210 с.
21. **Андриевская Н. В., Билоус О. А., Семенов С. В.** Методика проектирования нечеткого регулятора на базе ПИ-регулятора в среде MATLAB. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*, 2012, № 6, с. 282–287. EDN: PWNZBX

UDC 621.396

doi:10.31799/1684-8853-2023-3-51-58

EDN: DACXFO

**The use of the intelligent fuzzy controller for the elimination of fluctuations in the transient process of the perturbed automatic pitch angle control system of an aircraft**M. E. Ivanov<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0002-7584-6946V. V. Yezerskiy<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, orcid.org/0000-0002-1223-6841, ezerskiy2010@yandex.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The system of automatic control of the pitch angle of an aircraft is affected by numerous disturbing effects, which results in significant fluctuations in the transient process along the pitch of this system. **Purpose:** To transform the pitch angle control scheme and develop a fuzzy controller for it which will reduce the fluctuations of the transient process and improve the quality of the transient process. **Results:** The simulation using Matlab Simulink of the operation of the classical and modernized pitch angle control systems was carried out. An improvement in the quality of the transient process of the pitch angle control system has been achieved due to a significant reduction in fluctuations. To do this, a proportional-integrating controller has been added to the control system scheme using one of the methods of artificial intelligence – fuzzy logic. The adjustment of the fuzzy controller is carried out by converting a typical algorithm: for input linguistic variables we halve the interval of the universal set on which the membership functions are defined. **Practical relevance:** The correct adjustment of the fuzzy controller can significantly improve the quality of the transient process of the control system, which is affected by a large number of disturbing effects.

**Keywords** – fluctuation, disturbing effect, artificial intelligence, automatic control system, fuzzy controller, transient process.

**For citation:** Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. The use of the intelligent fuzzy controller for the elimination of fluctuations in the transient process of the perturbed automatic pitch angle control system of an aircraft. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 3, pp. 51–58 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-3-51-58, EDN: DACXFO

**References**

- Zhang X., Qian L. Heading control of the air cushion vehicle based on fuzzy PID. *2022 Intern. Conf. on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI)*, 2022. doi:10.1109/ICCSI55536.2022.9970669
- Titov Yu. K. *Adaptivnye nechetkie ustrojstva sistem upravleniya s garantirovannoj ustojchivost'yu*. Dis. kand. tech. nauk [Adaptive fuzzy control system devices with guaranteed stability. Cand. tech. sci. diss.]. Perm, PNIPU Publ., 2019. 204 p. (In Russian).
- Knyazhskij A. Yu. *Razrabotka i issledovanie algoritma upravleniya dvizheniem nizkoletyashhego apparata nad nerovnoj poverxnost'yu, minimiziruyushhego ego srednyuyu vysotu*. Dis. kand. tech. nauk [Development and research of an algorithm for controlling the movement of a low-flying vehicle over an uneven surface, minimizing its average height. Cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, SPbGUT im. prof. Bonch-Bruевича Publ., 2018. 135 p. (In Russian).
- Akhramovich S. A., Barinov A. V., Malyshev V. V., Starkov A. V. Backstepping synthesis of the height control system of an unmanned aerial vehicle. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 7–22 (In Russian). doi:10.18287/2541-7533-2018-17-2-7-22
- Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. Application of artificial intelligence methods in the air traffic control system of a heavy multipurpose WIG-craft. *Materialy 14-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Volnovaya elektronika i infokommunikacionnye sistemy". Chast' 2* [Proc. of the 14th Intern. Scientific Conf. "Wave electronics and infocommunication systems". Part 2]. Saint-Petersburg, 2021, pp. 323–330 (In Russian). EDN: GXGBAX
- Kulik A. Artificial intelligence-based aircraft accident threat parrying method. *Proc. of Telecommunication Universities*, 2021, vol. 7, no. 4, pp. 110–117. doi:10.31854/1813-324X2021-7-4-110-117, EDN: UWGRXJ
- Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. Modeling the operation of an automatic control system for a low-flying vehicle along the yaw channel in Matlab Simulink. *Sbornik dokladov tret'ej Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Aerokosmicheskoe priborostroenie i ekspluatacionnye tekhnologii"* [Proc. of the 3rd Intern. Scient. Conf. "Aerospace instrumentation and operational technologies"]. Saint-Petersburg, 2022, pp. 162–165 (In Russian). EDN: YINSAZ
- Kulida E. L., Lebedev V. G. Prospects for the use of artificial intelligence methods in aviation. *Trudy 13-j Mezhdunarodnoj konferencii "Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem"* [Proc. 13th Intern. Conf. "Managing the development of large-scale systems"]. Moscow, 2020, pp. 1535–1541 (In Russian). EDN: OIJOYG
- Konovalev A. S., Shumilov P. E. Application of fuzzy logic in aircraft antilock braking systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2003, no. 5, pp. 12–17 (In Russian). EDN: KXZXCБ
- Gridina N. V., Evdokimov I. A., Solodovnikov V. I. Construction of hybrid neural networks using fuzzy logic elements. *Scientific and Technical Information Processing*, 2019, no. 2, pp. 91–97 (In Russian). doi:10.14357/20718594190209, EDN: ZUOMUP
- Pushkarev D. O., Kiselev D. Yu., Kiselev Yu. V. Calculation of aircraft lever-float valves using neural networks. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2022, vol. 21, no. 4, pp. 44–51 (In Russian). doi:10.18287/2541-7533-2022-21-4-44-51
- Shilonosov A. V., Moldovan D. V. Dynamic correction of control actions of the control system of a complex technical object using neural network technologies. *Al'manah Permskogo voennogo instituta vojsk nacional'noj gardii*, 2021, no. 4, pp. 415–422 (In Russian). EDN: SYZWBS
- Petunin V. I. Synthesis of control laws of a pitch channel of the autopilot. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, vol. 9, no. 2, pp. 25–31 (In Russian). EDN: IBJMNB
- Abdullina E. Y., Efanov V. N. Synthesis of pitch angle control system with angle of attack limiting channel. *Russian Aeronautics*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 25–32 (In Russian).
- Control of the pitch angle of the aircraft*. Available at: <https://helpiks.org/5-70621.html> (accessed 13 October 2015).
- Burakov M. V., Konovalev A. S. Fuzzy controllers design. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 1, pp. 22–27 (In Russian).
- Burakov M. V., Konovalev A. S. Fuzzy supervisor for PID controller. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 5, pp. 13–21 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21
- Althubaiti M., Bernard M., Musilek P. Fuzzy logic controller for hybrid renewable energy system with multiple types of storage. *2017 IEEE 30th Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2017. doi:10.1109/CCECE.2017.7946738
- Chertulin K. E., Ivchenko V. D. Configuring adaptive PID-controllers of the automatic speed control system of the GTE. *Russian Technological Journal*, 2020, vol. 8, no. 6, pp. 143–156 (In Russian). doi:10.32362/2500316X-2020-8-6-143-156. Available at: <https://rtj.mirea.ru/> (accessed 13 January 2023).
- Demidova G. L. *Razrabotka i issledovanie regulyatorov s nechetkoj logikoj dlya sledyashhix elektroprivodov optiko-mexanicheskix kompleksov*. Dis. kand. tech. nauk [Development and research of fuzzy logic controllers for optical-mexanicheskix kompleksov tracking electric drives. Cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, ITMO Publ., 2016. 210 p. (In Russian).
- Andrievskaya N. V., Bilous O. A., Semenov S. V. The methodology of designing a fuzzy controller based on a PI-controller in the Matlab environment. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*, 2012, no. 6, pp. 282–287 (In Russian). EDN: PWNZBX