

УДК 62-50

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-161

*Костоглотов Андрей Александрович*<sup>1</sup>,

гл. науч. сотр. лаборатории технологий беспилотного транспорта,

д-р техн. наук, профессор;

*Лазаренко Сергей Валерьевич*<sup>2</sup>,

заведующий лабораторией технологий беспилотного транспорта,

канд. техн. наук, доцент;

*Зехцер Владимир Олегович*<sup>3</sup>,

мл. науч. сотр. лаборатории технологий беспилотного транспорта

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ  
ОРИЕНТАЦИЕЙ БПЛА В НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ СРЕДАХ  
НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ И КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ  
ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ**

<sup>1, 2, 3</sup> Россия, Ростов-на-Дону, Донской государственный  
технический университет;

<sup>1</sup> kostoglotov@me.com, <sup>2</sup> rh3311@mail.ru, <sup>3</sup> vova-zehcer@yandex.ru

**Аннотация.** Мультироторные беспилотные летательные аппараты функционируют в различных режимах полета, что определяет необходимость использования многорежимного управления. В условиях неспокойной атмосферы их система управления должна обеспечивать высокое качество стабилизации, но при этом быть достаточно простой для возможности ее реализации. Эффективное построение системы управления можно реализовать с применением метода квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием аппарата нечёткой логики. В работе проводится сравнительный анализ алгоритмов управления ориентацией БПЛА на основе квазиоптимальных законов управления с использованием нечёткой логики и известного решения на основе нечёткого PID-регулятора.

**Ключевые слова:** БПЛА, динамические системы, синтез управления, нечёткий логический вывод, интеллектуализация.

*Andrey A. Kostoglotov*<sup>1</sup>,  
Chief Researcher, Laboratory of Unmanned Transport Technologies,  
Doctor of Technical Sciences, Professor;  
*Sergey V. Lazarenko*<sup>2</sup>,  
Head of the Laboratory of Unmanned Transport Technologies,  
Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor;  
*Vladimir O. Zekhtser*<sup>3</sup>,  
Junior Researcher, Laboratory of Unmanned Transport Technologies

## COMPARATIVE ANALYSIS OF UAV ORIENTATION CONTROL ALGORITHMS BASED ON FUZZY LOGIC AND QUASI-OPTIMAL CONTROL LAWS

<sup>1, 2, 3</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia;  
<sup>1</sup> kostoglotov@me.com, <sup>2</sup> rh3311@mail.ru, <sup>3</sup> vova-zehcer@yandex.ru

**Abstract.** Multi-rotor unmanned aerial vehicles operate in various flight modes, which determines the need to use multi-mode control. In a turbulent atmosphere, their control system should provide high-quality stabilization, but at the same time be simple enough to be able to implement it. The effective construction of a control system can be implemented using the method of quasi-optimal synthesis of control laws based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem and the condition of the maximum of the generalized power function, as well as using the fuzzy logic apparatus. The paper presents a comparative analysis of UAV orientation control algorithms based on quasi-optimal control laws using fuzzy logic and a known solution based on a fuzzy PID controller.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, dynamic systems, control synthesis, fuzzy inference, intellectualization.

### **Введение**

Важное направление развития современной теории автоматического управления составляют задачи управления подвижными объектами, модель которых описывается уравнениями Лагранжа 2-го рода.

Одним из примеров таких систем являются мультироторные беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые функционируют в различных режимах полета, что определяет необходимость использования многорежимного управления для точного выполнения агрессивных маневров в сложных сценариях, таких как наличие внешних возмущений ветра или изменение условий функционирования. Ввиду относительно малых размеров гражданских БПЛА значительные ограничения на их использование накладывают погодные условия, такие как порывы ветра и атмосферная турбулентность. Также, в условиях полетов вблизи подвижных объектов (поездов, транспортных средств, других летательных аппаратов), их воздушный след способен вызвать потерю устойчивости БПЛА и падение. В таких условиях неспокойной атмосферы система

управления БПЛА должна обеспечивать высокое качество стабилизации, но при этом быть достаточно простой для возможности ее реализации в жестких ограничениях на массогабаритные характеристики [6].

Наиболее эффективным подходом к настройке контроллеров управления по результатам текущей идентификации моделей объектов управления, полученных с использованием данных сенсоров связан с исследованием различных вариантов структур управления и их параметров в условиях нелинейности управляемой системы. Это обеспечивает возможный компромисс между производительностью и надежностью при проектировании современных контроллеров управления беспилотных транспортных средств, работающих в неопределенных средах [4].

Эффективное построение системы управления можно реализовать с применением метода квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче и условия максимума функции обобщенной мощности [2].

На практике функционирование систем управления связано с разрешением структурной неопределенности, которая проявляется по причине пересечения областей фазового пространства с нечеткими границами. При синтезе систем управления с неполной информацией о характеристиках объекта управления эффективным математическим аппаратом является нечеткая логика [3].

Целью работы является сравнительный анализ алгоритмов управления ориентацией БПЛА на основе нечёткой логики и квазиоптимальных законов управления.

## 1. Законы управления угловой ориентацией мультироторного БПЛА

Рассматривается нелинейная управляемая динамическая система, описываемая уравнениями Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = u_i + Q_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^T \in R^n$  — вектор обобщенных координат;

$\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n]^T \in R^n$  — вектор обобщенных скоростей;

$\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_n(t)]^T$  — вектор управляющих воздействий;

$\mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = [Q_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t), \dots, Q_n(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)]^T$  — вектор прочих обобщенных сил, включая неконтролируемые возмущения;

$n = \dim \mathbf{q}$  — число степеней свободы динамической системы;

$^T$  — знак транспонирования; точкой обозначена производная по времени;  $T = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  — кинетическая энергия.

Для системы с 1 степенью свободы рассмотрим закон управления, полученный в работах [2, 7], который может быть представлен в виде

$$U_{\text{фом}} = \text{sat} \left[ k_1 \left( q + k_2 \frac{\dot{q}|\dot{q}|}{|q| + k_3} \right) \right], \quad (2)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  — коэффициенты закона управления.

Для адаптации управления к изменяющимся на практике условиям функционирования рассматривается новый закон управления на основе нечётко-логического вывода, обеспечивающий многорежимность. В качестве двух режимов выбираются PID-регулятор, настраиваемый с помощью нечёткой логики [3] и управление (2).

Принято, что границы областей фазового пространства известны нечётко и области определения имеют вид  $D'_1 = \{(q, \dot{q}) | q \in M_{a1}, \dot{q} \in M_{b1}\}$ ,  $D'_2 = \{(q, \dot{q}) | q \in M_{a2}, \dot{q} \in M_{b2}\}$ , где  $M_{a1}, M_{b1}$  и  $M_{a2}, M_{b2}$  — нечеткие попарно пересекающиеся интервалы,  $m_{a1}(q), m_{a2}(q), m_{b1}(\dot{q}), m_{b2}(\dot{q})$  — функции принадлежности. Тройками  $(a, T_a, A)$  и  $(b, T_b, B)$  заданы лингвистические переменные  $a$  и  $b$ ;  $T_a = \{T_{a1}, T_{a2}\}$ ,  $T_b = \{T_{b1}, T_{b2}\}$  — терм-множества лингвистических значений на нечетких множествах  $A \subseteq M_{a1} \cup M_{a2}$ ,  $B \subseteq M_{b1} \cup M_{b2}$ .

В зоне неопределенности режимов функционирования  $D'_1 \cap D'_2$  структура обобщенных сил полностью не известна. Пусть имеет место аддитивно-мультипликативная структурная неопределенность и управляющая сила в нечетких областях фазового пространства  $D'_1 \cap D'_2$  вычисляется в следующем виде

$$u = \eta_1 u_1 + \eta_2 u_2, \quad (3)$$

где  $u_1, u_2$  — различные режимы функционирования,

$$\eta_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}, \eta_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad (4)$$

здесь  $\alpha_1 = m_{a1}(q) \wedge m_{b1}(\dot{q})$ ,  $\alpha_2 = m_{a2}(q) \wedge m_{b2}(\dot{q})$  — коэффициенты, определяемые областями пересечения функций принадлежности.

Тогда нечеткий вывод определяется *TS*-моделью системы типа *MI-SO* с базой правил следующим образом:

$$\begin{aligned} R^1: & \text{ если } q \text{ есть } T_{a1} \text{ и } \dot{q} \text{ есть } T_{b1}, \text{ то } u = u_1(q, \dot{q}), \text{ иначе} \\ R^2: & \text{ если } q \text{ есть } T_{a2} \text{ и } \dot{q} \text{ есть } T_{b2}, \text{ то } u = u_2(q, \dot{q}). \end{aligned} \quad (5)$$

## 2. Моделирование процесса изменения угловой ориентации мультироторного БПЛА

Проведём анализ эффективности системы управления ориентацией БПЛА по углу крена (тангажа) с различными законами управления под воздействием атмосферных возмущений. Модель атмосферных возмущений может быть получена с использованием передаточных функций Драйдена [1]

$$H(s) = \frac{\pm \frac{s}{V}}{1 + \frac{3b}{\pi V} s} \sigma \sqrt{\frac{2L}{\pi V}} \frac{1 + \frac{2\sqrt{3}L}{V} s}{\left(1 + \frac{2L}{V} s\right)^2}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  — интенсивность турбулентности,  $V$  — скорость БПЛА относительно воздушной массы,  $L$  — пространственная длина волны.

Рассмотрим систему управления ориентацией БПЛА по углу крена (тангажа), которая может быть представлена следующим дифференциальным уравнением [5]

$$\begin{aligned} T^2 \ddot{x}(t) + 2\xi T \dot{x}(t) + x(t) &= kU(t, x, \dot{x}) + h(t), \\ x(0) = 0, \dot{x}(0) &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $T$  — постоянная времени,  $\xi$  — коэффициент демпфирования,  $k$  — коэффициент усиления,  $x$  — угол крена (тангажа),  $h$  — атмосферные возмущения,  $U$  — выход контроллера управления.

Рассмотрим структуру нечёткого контроллера: модель системы с нечётким выводом по алгоритму Такаги-Сугено, заданная в фазовом пространстве с нечеткими границами, имеет базу правил вида

$$\begin{aligned} R^1: \text{если } x \text{ есть } T_{a1} \text{ и } \dot{x} \text{ есть } T_{b1}, \text{ то } U &= u_1(x, \dot{x}), \text{ иначе} \\ R^2: \text{если } x \text{ есть } T_{a2} \text{ и } \dot{x} \text{ есть } T_{b2}, \text{ то } U &= u_2(x, \dot{x}), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $u_1(x, \dot{x})$  — нечёткий PID-регулятор,  $u_2(x, \dot{x})$  — управление на основе условия максимума функции обобщённой мощности (2),  $T_a, T_b$  — термножества.

Смена режимов функционирования динамической системы (7) происходит в фазовом пространстве с границами, неопределенность которых описывается лингвистическими переменными — «положение на фазовой плоскости» с термножеством  $T_a = \{\text{"близко"}, \text{"далеко"}\}$  и «скорость на фазовой плоскости» с термножеством  $T_b = \{\text{"медленно"}, \text{"быстро"}\}$  с изображенными на рисунке 1 функциями принадлежности.

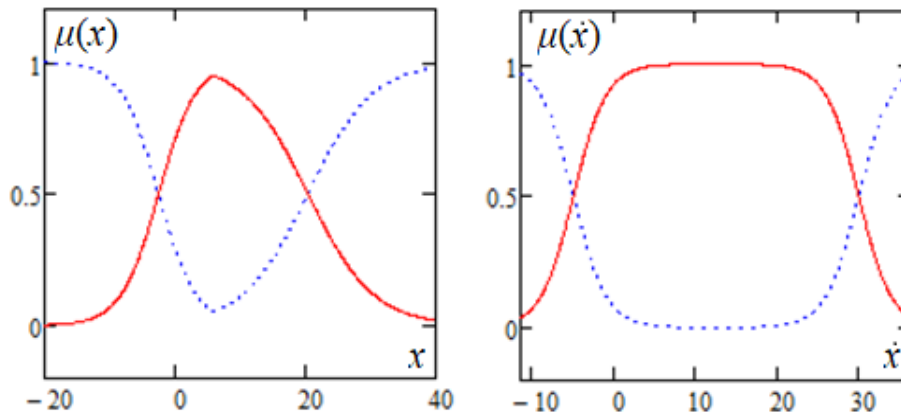


Рис. 1. Функции принадлежности для координаты и скорости

$$\mu(x) = \min\left(\frac{1}{1+e^{-a1(x-b1)}}, 1 - \frac{1}{1+e^{-a2(x-b2)}}\right),$$

$$\mu(\dot{x}) = \min\left(\frac{1}{1+e^{-a3(\dot{x}-b3)}}, 1 - \frac{1}{1+e^{-a4(\dot{x}-b4)}}\right). \quad (9)$$

Композиция функций принадлежности (9), определяющая на фазовом пространстве границы переключения режимов управления, представлена на рисунке 2.

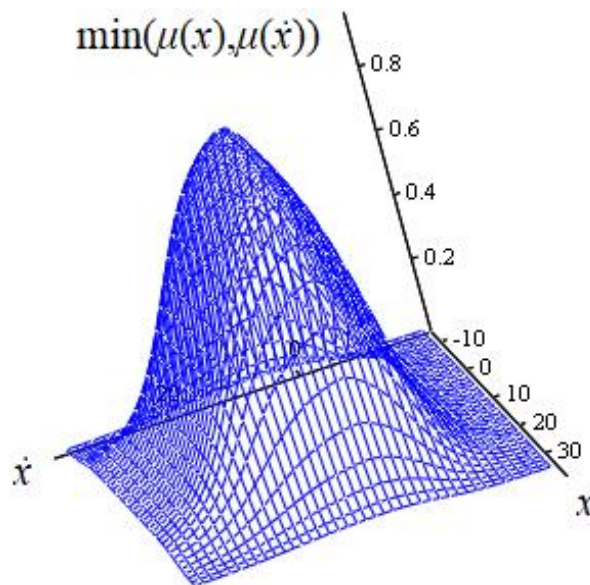


Рис. 2. Композиция функций принадлежности

С учётом (8), для нечётко-логического вывода (3) коэффициенты (4) рассчитываются при  $\alpha_1 = \mu(x) \wedge \mu(\dot{x})$ ,  $\alpha_2 = 1 - \mu(x) \wedge 1 - \mu(\dot{x})$ .

Эффективность системы управления ориентацией БПЛА с нечётко-логическим выводом определяется на основе математического модели-

рования путём поиска параметров функций принадлежности оптимальных по различными критериями: критерий быстродействия процесса сходимости к цели управления, квадратичный критерий, критерий энергетических затрат на управление.

Произведено моделирование процесса изменения угловой ориентации из 0 в  $10^\circ$ . Параметры модели были идентифицированы на основе экспериментально полученных переходных процессов. Графики процесса изменения угловой ориентации представлены на рисунке 3. Сплошной линией обозначены процессы, полученные с использованием синтезированного управления на основе (8), штрихом — процессы, полученные с использованием нечёткого PID-регулятора.

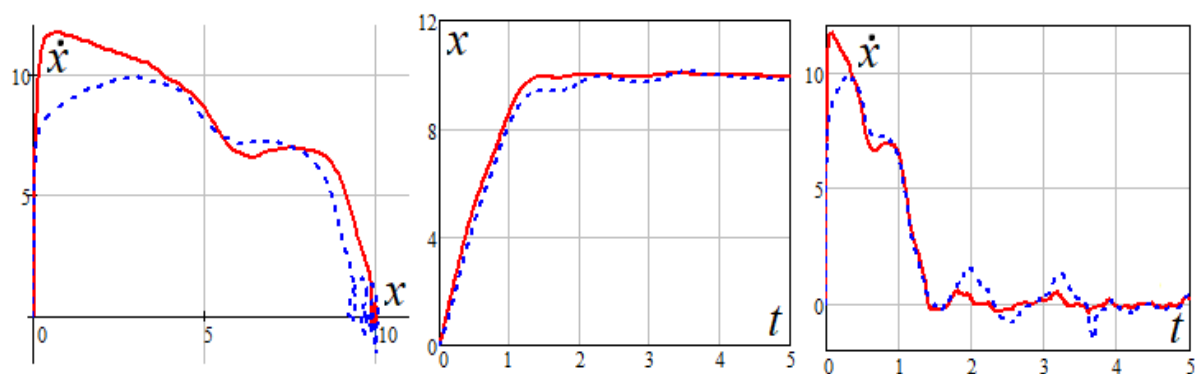


Рис. 3. Процессы изменения угловой ориентации

Проведён анализ изменения нечёткого управления на основе (8) в области перехода от одного вида управления к другому, т. е. внутри границ функций принадлежности. В результате получена зависимость обратной связи от положения на фазовой плоскости  $U(x, \dot{x})$ , которая может быть представлена в виде поверхности управления (рис. 4).

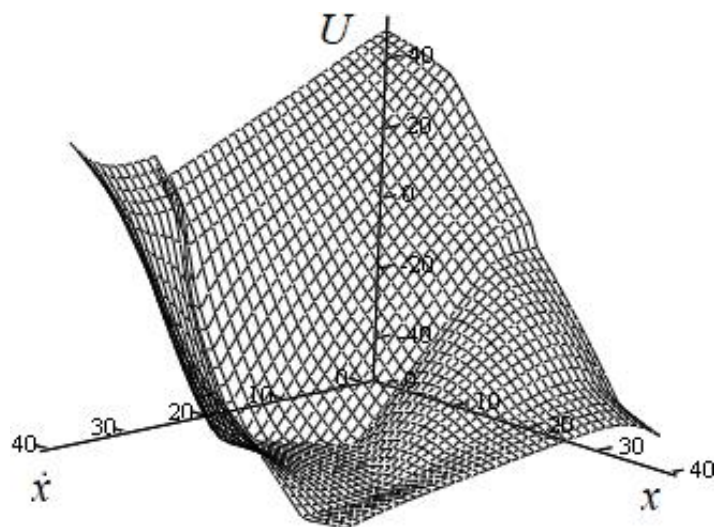


Рис. 4. Поверхность управления

Численное моделирование позволяет выбрать такие значения параметров функций принадлежности (9), при которых предлагаемый нечёткий контроллер в сравнении с нечётким PID-регулятором выигрывает по критерию быстродействия и по критерию точности, при этом незначительно проигрывая по критерию энергетических затрат.

### **Заключение**

Анализ результатов проведённого численного моделирования показывает, что нечёткий контроллер с предлагаемым законом управления позволяет с небольшим увеличением энергетических затрат повысить скорость сходимости к цели управления и точность в установившемся режиме в сравнении с существующим решением на основе нечёткого PID-регулятора.

### **Благодарности**

Работа подготовлена в рамках научной темы «Разработка беспилотных технологий на основе комплексной поэтапной оптимизации с редукцией экстремальных задач и инструментов нейро-нечеткого моделирования» (FZNE-2022-0006).

### **Список литературы**

1. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. – М.: Техносфера, 2015. – 312 с.
2. Костоглотов А.А., Лазаренко С.В. Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2021. – Т. 6. – № 6. – С. 3–12.
3. Лубенцов В.Ф. Интеллектуальная система управления с переменной структурой на основе нечеткой логики // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-2. – С. 252–257.
4. Лященко З.В. Методы синтеза многорежимных алгоритмов управления и обработки информации на основе условия максимума обобщенной мощности: специальность 23.10.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лященко Зоя Владимировна, 2022. – 204 с.
5. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / Под. ред. В.Я. Распопова. – М.: Машиностроение, 2011. – 184 с.
6. Хрусталева М.М., Халина А.С. Идентификаторы пониженной размерности в задаче стабилизации беспилотного летательного аппарата в неспокойной атмосфере // Труды МАИ. – 2018. – № 102. – С. 22.
7. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Pugachev I.V. Method of synthesis of multi-mode control under the expected uncertainty using the analysis of the phase-space decomposition on the basis of the generalized power maximum condition // AIP Conference Proceedings: Proceedings of XV International scientific-technical conference “Dynamics of technical systems” (DTS-2019): electronic edition, Rostov-on-Don. Vol. 2188. – Rostov-on-Don: AIP Publishing, 2019. – P. 030005.