

ПЭНХАО ГУ, ЛОБАТЫЙ А.А.

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ В АВТОПИЛОТЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Республика Беларусь

Статья посвящена исследованию особенностей применения регуляторов, построенных на использовании теоретических положений нечеткой логики, при создании автопилотов беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Проводится обоснование принципов и методик синтеза математической модели автопилота применительно к БЛА мультироторного типа, особенностей применения различных математических моделей регуляторов, их достоинств и недостатков. Сделан обоснованный вывод о том, что применение традиционных подходов, основанных на использовании линейных математических моделей объекта управления, не обеспечивает необходимое качество управления в широком диапазоне условий применения БЛА при наличии ограничений и внешних воздействий на процесс управления. Предложено при построении математической модели автопилота БЛА использовать принципы и методы нечеткой математики, которые лежат в основе получающих все большее распространение регуляторов на основе нечеткой логики (НЛ-регуляторов). Рассматривается построение канала управления БЛА на основе применения регулятора нечеткой логики, приведено описание структуры регулятора, реализованного в компьютерной среде *SimulTech*. Путём математического моделирования проведено сравнение работоспособности и переходных характеристик НЛ-регулятора с ПИД-регулятором и П-регулятором применительно к системе управления одного из каналов БЛА – канала управления креном. Установлено, что применяемые в качестве элементов автопилота БЛА регуляторы нечеткой логики по сравнению с другими регуляторами обеспечивают необходимое качество переходных процессов в системе управления БЛА при устойчивости к нежелательным внешним воздействиям, что делает эти регуляторы перспективными для применения в нелинейных нестационарных системах управления подвижными объектами, к которым относятся БЛА.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, математическая модель, нечеткий регулятор, переходная характеристика

### Введение

Успешное применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в различных областях человеческой деятельности обусловлено многими факторами в том числе тем, что современные малогабаритные системы управления, размещенные на борту БЛА, позволяют решать дистанционно автономное применение БЛА для решения различных задач. В частности, применяемые в сельском хозяйстве БЛА (агродроны) способны не только проводить видеомониторинг полей, садов и других сельскохозяйственных культур, но и применяться для посева и обработки растений различными веществами (удобрениями, гербицидами и прочими веществами) [1, 2].

Одной из задач, стоящих перед разработчиками систем управления БЛА является создание автопилотов – электронной системы, размещенной на борту БЛА и осуществляющей решение задач управления БЛА на различных этапах его применения (запуск, полет по заданной траектории, приземление в заданном пункте). Эти задачи как правило должны решаться с участием человека-оператора [3] или автономно – без участия человека.

### Синтез математической модели автопилота

Синтез автопилота представляет собой отдельную сложную задачу, не имеющую однозначного решения. Данная задача может быть отнесена к классу так называемых обратных задач динамики [4], когда при заданных законах изменения вектора ускорений БЛА  $a_B(t) = [\ddot{x}(t), \ddot{y}(t), \ddot{z}(t)]^T$ , входящих в уравнения движения БЛА [5], необходимо определить и реализовать на борту вектор управляемых воздействий, который например для квадрокоптера имеет вид  $U(t) = [\omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t), \omega_4(t)]^T$  [6]. Компоненты вектора  $U(t)$  представляют собой скорости вращения винтов квадрокоптера.

Известные методы решения обратных задач динамики относятся к группе методов синтеза регуляторов в классе одномерных нелинейных систем. Однако система управления БЛА мультироторного типа (мультикоптеров) является многомерной, поэтому применение данных методов возможно только при реализации развязки каналов управления мультикоптером. После этого может быть решена задача аналитического синтеза структуры регулятора (автопилота БЛА) для одного из каналов управления.

На этапе предварительного проектирования БЛА для синтеза приближенной математической модели автопилота может быть применен метод модального управления [4]. Данный подход к синтезу автопилота БЛА успешно использован в работах [7,

8] при рассмотрении синтеза структуры автопилота БЛА (регулятора системы управления) для одного канала БЛА. Структурная схема формирования управляющего сигнала системы в этом случае представляется в следующем виде (рис. 1) [8].

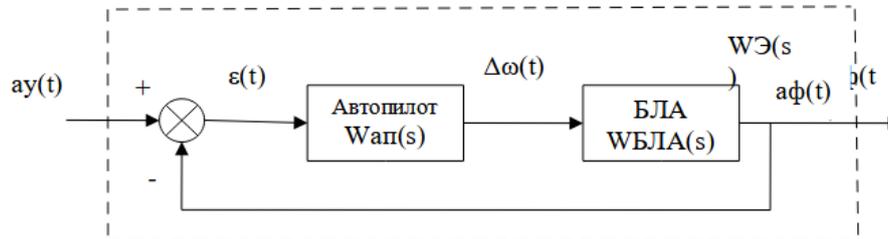


Рисунок 1. Структурная схема системы управления БЛА

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $a_y(t)$  – управляющая перегрузка, приложенная к центру масс БЛА (заданная, требуемая);  $a_\phi(t)$  фактическая перегрузка центра масс БЛА, определяемая его аэродинамическими и конструктивными характеристиками;  $\varepsilon(t) = a_y(t) - a_\phi(t)$ ;  $W_{\text{БЛА}}(s)$  – передаточная функция БЛА, характеризующая его конструктивные особенности;  $W_{\text{ап}}(s)$  – передаточная функция автопилота;  $W_{\text{э}}(s)$  – эталонная передаточная функция замкнутой системы;  $\Delta\omega(t)$  – для БЛА мультироторного типа представляет собой управляющие приращения скоростей вращения винтов [5].

При заданной передаточной функции  $W_{\text{БЛА}}(s)$  для определения  $W_{\text{ап}}(s)$  необходимо задать  $W_{\text{э}}(s)$  исходя из требований к системе в целом. В первую очередь необходимо обеспечить устойчивость синтезированной замкнутой системы управления известными методами, среди которых наиболее распространенными являются алгебраический метод Рауса-Гурвица и частотный метод Найквиста-Михайлова [4].

Необходимо определить закон изменения приложенной к центру масс БЛА силы, под действием которой выполняется движения БЛА по заданной траектории и при этом обеспечиваются заданные свойства системы, определяемые эталонной передаточной функцией  $W_{\text{э}}(s)$ . Применительно к БЛА мультироторного типа необходимо изменять соответствующим образом скорости вращения винтов [5, 9]. После выполнения требований к обеспечению условий устойчивости эталонную передаточную функцию  $W_{\text{э}}(s)$  выбирают исходя из требований, предъявляемых к точности системы при действии на неё полезных и возмущающих сигналов. Система, имеющая  $W_{\text{э}}(s)$  должна фильтровать случайную помеху и обрабатывать полезный сигнал без ошибки в установившемся режиме. Фильтрация случайных помех – отдельная задача, решаемая на основе так называемой «теоремы разделения» перед детерминированной постановкой задачи синтеза управления [4, 8].

Лучшего качества переходных процессов (величины перерегулирования, времени переходного процесса) позволяет достичь применение в системе управления ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференциального) [4]. Основным недостатком такого подхода к синтезу управления системой заключается в том, что ПИД-регулятор применим только в случае, когда объект управления задан линейной стационарной математической моделью в виде передаточной функции, что в реальности, как правило, имеет место в редких случаях. При этом следует учитывать, что ПИД-регулятор имеет чувствительную к изменению условий применения объекта управления амплитудно-фазовую частотную характеристику [4], что приводит к необходимости использования для обеспечения управления системой специальных алгоритмов настройки коэффициентов ПИД-регулятора.

Таким образом, применительно к объекту управления, для которого нет адекватной математической модели, применение ПИД-регулятора может дать результат, который не только не обеспечит требуемое качество управления, но и приведет к неустойчивости системы управления в целом. В этом случае необходимо искать решение задачи синтеза регулятора путем использования методов, применяемый для синтеза управления неформализуемыми или трудноформализуемыми объектами управления.

### Синтез нечеткого регулятора

Система управления любого БЛА, в том числе и мультикоптера, описывается математической моделью нелинейного, нестационарного вида [5, 9], поэтому здесь целесообразно использовать регуляторы с нечеткой логикой, которые активно применяются в нелинейных системах или в системах с нелинейными внешними воздействиями, в системах с большим временем задержки [10].

Рассмотрим применение регулятора с нечеткой логикой – нечеткого регулятора (НЛ-регулятора)

в одном из каналов системы управления БЛА, например – канале крена квадрокоптера. Для БЛА мульти-роторного типа отличия между каналами управления креном, курсом, тангажом являются незначительными и определяются в первую очередь конструктивной компоновкой БЛА, размещением на борту БЛА целевой нагрузки.

На рис. 2 представлена схема канала управления БЛА, выполненная в компьютерной среде SiminTech с регулятором нечеткой логики – НЛ-регулятором (РНЛ). В качестве моделей измерителей выходного сигнала БЛА (угла крена) и его производной используются математические модели установленных на борту БЛА гироскопических датчиков. В данной математической модели они считаются безынерционными, так как их постоянные времени существенно меньше постоянной времени математической модели перемещения БЛА в пространстве [9].

Пакет компьютерного моделирования динамических систем SiminTech получает широкое распространение среди русскоязычных пользователей благодаря удобному интерфейсу и заложенным в его структуре широким возможностям по моделированию электромеханических мехатронных систем [11]. Исходя из этого, пакет SiminTech целесообразно применять для математического моделирования полета БЛА и функционирования его систем [12].

На рис. 3 представлена схема НЛ-регулятора (РНЛ), реализованная в среде SiminTech. На входы РНЛ поступают отклонение регулируемого параметра и скорость изменения данного параметра. Отклонение в данном случае означает разность между заданным (требуемым) и фактическим (измеренным) значениями регулируемого параметра, характеризующего движение БЛА в пространстве, например – изменение углового положения БЛА.

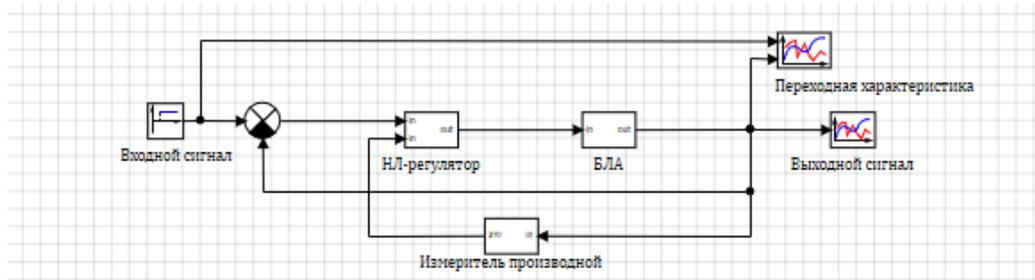


Рисунок 2. Схема канала управления с НЛ-регулятором

На рис. 3 обозначено: => – блоки импликации и & – блоки конъюнкции, которые осуществляют операцию нечеткого логического вывода, включающего вычисление степени истинности заданных условий, соединенных логической операцией (процедура агрегации) и определение истинности для всех условий каждого правила (процедура активизации).

Заключения из каждого правила объединяются для каждого правила (процедура аккумуляции) [11-13]. Блоки фаззификации и демультиплексоры преобразуют конкретные численные значения входных сигналов (отклонение и скорость) в лингвистические переменные (больше, норма, меньше, увеличивается, постоянна, уменьшается).

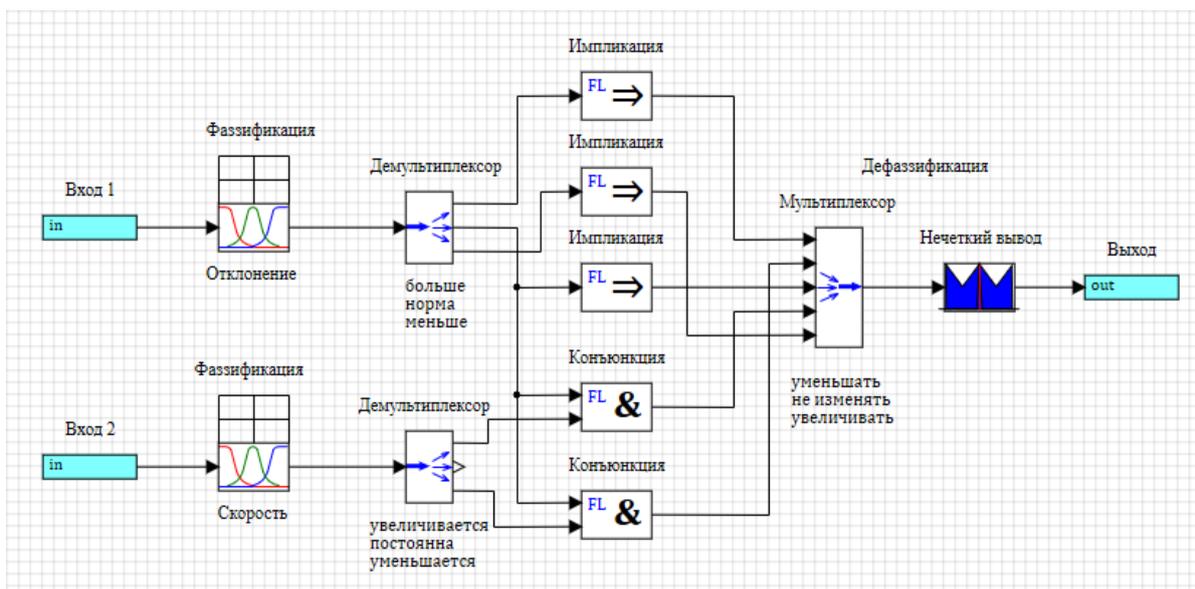


Рисунок 3. Схема НЛ-регулятора

Мультиплексор и блок нечеткого вывода (треугольная функция) выполняют операцию дефаззификации (приведение к четкости) – расчет числового значения выходной переменной.

Среди различных известных систем нечеткого вывода наиболее распространенной является система Мамдани. Подробное описание таких систем приведено в [4, 10, 13].

На рис. 4 изображены переходные характеристики (выходной сигнал системы при единичном ступенчатом входном сигнале), полученные при применении в канале управления мультикоптером и при одних и тех же условиях различных типов регуляторов. Графики изменения во времени входного и выходного сигналов канала управления БЛА получены и представлены в среде SiminTech.

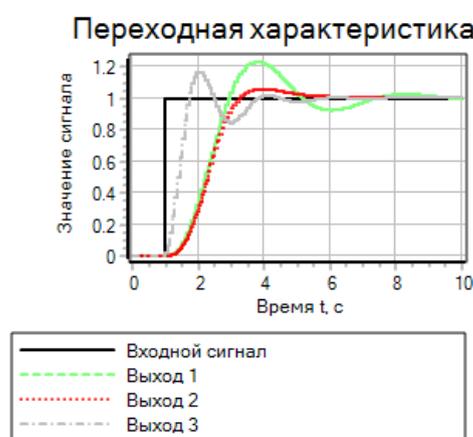


Рисунок 4. Переходные характеристики различных регуляторов

В качестве входного сигнала здесь используется нормированный (приведенный к единице) входной сигнал управления углом разворота мультикоптера. Выход 1 на рис. 4 представляет график изменения во времени выходного сигнала системы управления при применении П-регулятора, выход 2 – НЛ-регулятора, выход 3 – ПИД-регулятора.

### Заключение

Таким образом применяемые в качестве элементов автопилота БЛА регуляторы нечеткой логики по сравнению с другими регуляторами обеспечивают необходимое качество переходных процессов в системе управления БЛА при обеспечении устойчивости к нежелательным внешним воздействиям, что делает эти регуляторы перспективными для применения в нелинейных нестационарных системах управления подвижными объектами, к которым относятся БЛА. Применение в системах управления БЛА регуляторов нечеткой логики позволяет обеспечить надежную работу системы управления, адаптируемую к различным условиям применения и различной целевой нагрузке БЛА.

Современные миниатюрные цифровые автопилоты позволяют реализовать на борту БЛА нечеткие регуляторы различной сложности и конфигурации. Синтез и математическое моделирование таких регуляторов удобно выполнять в компьютерной среде SiminTech, позволяющей разработчикам на этапе предварительного проектирования системы управления решать все поставленные задачи синтеза системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования** / под ред. И.С. Голубева, И.К. Туркина. – М.: МАИ, 2010. – 654 с.
2. **Беспилотные летательные аппараты:** [http://geoportal.by/index/bespilotnye\\_letatelnye\\_apparaty/0-434/](http://geoportal.by/index/bespilotnye_letatelnye_apparaty/0-434/).
3. **Гу Пэнхао.** Особенности моделирования операторного управления беспилотным летательным аппаратом и его целевой нагрузкой / А.А. Лобатый, Гу Пэнхао, П.И. Савёлов // Системный анализ и прикладная информатика. – 2022. – № 4. – С. 24-28.
4. **Методы классической и современной теории автоматического управления:** в 5 т. / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 5 т.
5. **Гу Пэнхао.** Математическое моделирование движения летательных аппаратов мультироторного типа / А.А. Лобатый, Гу Пэнхао // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 1. – С. 10-15.
6. **Гу Пэнхао.** Форсированное управление квадрокоптером / Гу Пэнхао, Ю.А. Леоновец, А.А. Лобатый // Наука и техника. – 2023. – Том 22. – № 2. – С. 91-95.
7. **Лобатый, А.А.** Модальное управление беспилотным летательным аппаратом / А.А. Антаневич, Ю.Ф. Икуас // Вестник БНТУ. – 2010. – № 5. – С. 37-40.
8. **Лобатый, А.А.** Поэтапный аналитический синтез математической модели автопилота беспилотного летательного аппарата / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай, С.С. Прохорович // Системный анализ и прикладная информатика. – 2021. – № 1. – С. 21-28.
9. **Моисеев, В.С.** Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В.С. Моисеев. – Казань: ГБУ РЦМКО, 2013. – 768 с.

10. **Гостев, В.И.** Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления / В.И. Гостев. – СПб.: БХВ. – Петербург, 2011. – 416 с.

11. **Герман-Галкин, С.Г.** Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SiminTech / Б.А. Карташов, С.Н. Литвинов. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 494 с.

12. **Щекатуров, А.М.** Методика моделирования динамики октокоптера / А.М. Щекатуров. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 228 с.

13. **Демичева, Г.Д.** Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами / Г.Д. Демичева, Д.В. Лукичев. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.

## REFERENCES

1. **Unmanned aerial vehicles. Basics of the device and functioning** / edited by I.S. Golubev, I.K. Turkin. – М.: MAI, 2010. – 654 p.

2. **Unmanned aerial vehicles:** [http://geoportal.by/index/bespilotnye\\_letatelnye\\_apparaty/0-434/](http://geoportal.by/index/bespilotnye_letatelnye_apparaty/0-434/).

3. **Gu Penghao.** Features of modeling operator control of an unmanned aerial vehicle and its target load / A.A. Lobaty, Gu Penghao, P.I. Savelov // Systems analysis and applied informatics. – 2022. – No. 4. – P. 24-28.

4. **Methods of classical and modern theory of automatic control:** in 5 volumes / edited by K.A. Pupkov and N.D. Egupov. – М.: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2004. – 5 vol.

5. **Gu Penghao.** Mathematical modeling of multicopter aircraft motion / A.A. Lobaty, Gu Penghao // Systems analysis and applied informatics. – 2023. – No. 1. – P. 10-15.

6. **Gu Penghao.** Forced control of a quadcopter / Gu Penghao, Yu.A. Leonovets, A.A. Lobaty // Science and Technology. – 2023. – Vol. 22. – No. 2. – P. 91-95.

7. **Lobaty, A.A.** Modal control of an unmanned aerial vehicle / A.A. Antanovich, Yu.F. Ikuas // Bulletin of BNTU. – 2010. – No. 5. – P. 37-40.

8. **Lobaty, A.A.** Step-by-step analytical synthesis of a mathematical model of an unmanned aerial vehicle autopilot / A.A. Lobaty, A.Yu. Bumay, S.S. Prokhorovich // Systems analysis and applied informatics. – 2021. – No. 1. – P. 21-28.

9. **Moiseev, V.S.** Applied Theory of Unmanned Aerial Vehicle Control / V.S. Moiseev. – Kazan: GBU RCMKO, 2013. – 768 p.

10. **Gostev, V.I.** Design of Fuzzy Controllers for Automatic Control Systems / V.I. Gostev. – St. Petersburg: BHV. – St. Petersburg, 2011. – 416 p.

11. **German-Galkin, S.G.** Model Design of Electromechanical Mechatronic Motion Modules in the SiminTech Environment / B.A. Kartashov, S.N. Litvinov. – Moscow: DMK Press, 2021. – 494 p.

12. **Shekaturov, A.M.** Methodology for Modeling Octocopter Dynamics / A.M. Shekaturov. – М.: DMK Press, 2021. – 228 p.

13. **Demicheva, G.D.** Fuzzy logic controllers in control systems of technical objects / G.D. Demicheva, D.V. Lukichev. – St. Petersburg: ITMO University, 2017. – 81 p.

GU PENGHAO, LOBATY A.A.

## APPLICATION OF FUZZY CONTROLLERS IN THE AUTOPILOT OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

*The article is devoted to the study of the features of the application of regulators built on the use of theoretical provisions of fuzzy logic, when creating autopilots of unmanned aerial vehicles (UAVs). The substantiation of the principles and methods of synthesizing a mathematical model of an autopilot as applied to a multi-rotor UAV, the features of the application of various mathematical models of regulators, their advantages and disadvantages is carried out. A reasonable conclusion is made that the use of traditional approaches based on the use of linear mathematical models of the control object does not ensure the required quality of control in a wide range of UAV application conditions in the presence of restrictions and external influences on the control process. It is proposed to use the principles and methods of fuzzy mathematics, which underlie the increasingly widespread fuzzy logic controllers (FL controllers), when constructing a mathematical model of a UAV autopilot. The construction of a UAV control channel based on the use of a fuzzy logic controller is considered, and a description of the controller structure implemented in the SiminTech computer environment is given. Using mathematical modeling, a comparison was made of the performance and transient characteristics of the NL controller with the PID controller and the P controller as applied to the control system of one of the UAV channels – the roll control channel. It has been established that fuzzy logic controllers used as elements of UAV autopilots, compared to other controllers, provide the necessary quality of transient processes in the UAV control system with resistance to undesirable external influences, which makes these controllers promising for use in nonlinear non-stationary control systems for moving objects, which include UAVs.*

**Key words:** *unmanned aerial vehicle, mathematical model, fuzzy controller, transient response*



**Лобатый Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления, в том числе - беспилотными летательными аппаратами. Автор и соавтор множества статей в научных журналах и конференциях, автор ряда книг и учебных пособий.

**Lobaty A.A.**, Doctor of Science, Professor. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of control systems including unmanned aerial vehicles. He is the author and co-author of many articles in scientific journals, conferences and books.

**Тел:** +375 (29) 346-82-56

**E-mail:** lobaty@bntu.by



**Гу Пэнхао**, аспирант кафедры «Робототехнические системы» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

**Gu Penghao**, post-graduate student of the Department of Robotic Systems, Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of analysis and synthesis of stochastic control systems in relation to unmanned aerial vehicles.

**E-mail:** gupenghaoby@gmail.com