

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Объект авторского права

УДК 681.51

ШУМСКИЙ
Андрей Николаевич

**УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.06 – автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами

Минск 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет».

Научный руководитель

Карпович Дмитрий Семенович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Робототехнические системы» Белорусского национального технического университета

Кожевников Михаил Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств учреждения образования «Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий»

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»

Защита состоится «16» марта 2023 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел.: (017) 293 89 89, e-mail: dissovvet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «10» февраля 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



В.А. Рыбак

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются неотъемлемой частью военной сферы, но также нашли свое широкое применение в народно-хозяйственной сфере деятельности человека (мониторинг окружающей среды, использование в качестве метеомодуля и т. д.).

Использование беспилотных летательных аппаратов тесно связано с созданием и работой систем автоматического управления (САУ). Для эффективного применения системы автоматического управления БЛА необходимо передать управляющие сигналы на органы управления летательного аппарата. Значение этих сигналов зависит от логики управления, аэродинамических характеристик БЛА, особенностей работы датчиков и исполнительных механизмов, установленных в летательном аппарате. Качество и устойчивость управления определяются коэффициентами в соответствующих законах управления (ЗУ).

В условиях наличия большого количества неопределенностей во входных каналах системы управления БЛА процесс синтеза регуляторов представляет собой сложно формализуемую задачу. Ввиду этого, является перспективным использование нечетких регуляторов (НР), работа которых основана на нечеткой логике. Особенностью использования таких регуляторов для сложных САУ является отсутствие необходимости в точной математической модели объекта. Кроме того, системы управления, построенные на нечетких регуляторах, способны сохранять свою работоспособность при изменении параметров объекта управления, а также при возникновении внешних воздействий. К тому же отличительной особенностью применения нечеткого регулятора является использование опыта эксперта, полученного на основе знаний функционирования и поведения системы управления БЛА. В работе предложена концепция применения нечетких регуляторов для системы автоматического управления БЛА по шести каналам управления: крен, тангаж, рыскание, скорость, высота и боковое отклонение.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Проводимые исследования согласуются с Перечнем приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы «4. Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: производственные автоматизированные комплексы; электрические и беспилотные транспортные средства».

Тема работы соответствует научному направлению кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники УО «Белорусский государственный технологический университет» (БГТУ). Исследование выполнялось в рамках научно-технической работы ГБ 17-065 «Анализ системы управления беспилотным летательным аппаратом с нечетким регулятором», проводимой БГТУ.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель исследования заключается в синтезе системы управления ориентацией беспилотного летательного аппарата с применением нечетких регуляторов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) провести анализ способов управления БЛА с учетом функционального предназначения всех его подсистем;
- 2) разработать методику применения нечеткого регулятора для компенсации шумовых составляющих в данных гироскопа;
- 3) определить математические модели БЛА по основным каналам управления с учетом динамических характеристик;
- 4) разработать способ синтеза системы управления ориентацией беспилотного летательного аппарата на основе применения нечетких регуляторов.

Объект исследования – система управления ориентацией БЛА.

Предмет исследования – методики и способы использования нечетких регуляторов для формирования управляющих сигналов в контурах ориентации БЛА.

Научная новизна

1. Обоснованы принципы построения систем управления БЛА с нечеткими регуляторами, на основе которых разработаны законы управления на различных этапах эксплуатации для устойчивого управления летательным аппаратом при отсутствии математической модели БЛА.

2. Разработана методика применения нечеткого регулятора для компенсации влияния шумовых составляющих в выходном сигнале гироскопа с применением метода вариации Аллана, что дает возможность более эффективно проводить оценку и идентификацию неблагоприятных факторов, влияющих на работу гироскопа автопилота, а это в свою очередь приводит к увеличению устойчивости БЛА.

3. Разработан способ, который позволяет обеспечить первичную настройку параметров в законах управления системой автоматического управления БЛА с применением пропорционально-интегрально-дифференциального нечеткого регулятора, дающий возможность безаварийного использования БЛА в первых испытательных полетах с учетом особенностей управления на различных этапах полета.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика синтеза законов управления БЛА, при отсутствии математической модели БЛА на основе методов идентификации, учитывающая функциональное предназначение всех его подсистем и динамическое изменение случайных факторов, влияющих на управление системой, позволяющая обеспечить устойчивость управления летательным аппаратом.

2. Методика применения нечеткого регулятора для компенсации случайных воздействий в выходном сигнале гироскопа автопилота БЛА, использующая вариацию Аллана, позволяющая в условиях случайных составляющих сигнала компенсировать ошибку по угловым скоростям гироскопа, что, в свою очередь, увеличивает устойчивость углов ориентации летательного аппарата.

3. Способ управления углами ориентации БЛА на основе применения нечеткого регулятора, позволяющий синтезировать законы управления на различных этапах полета для обеспечения требуемой устойчивости летательного аппарата в условиях наличия информационных неопределенностей.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены лично автором. Научный руководитель принимал участие в постановке задач, определении возможных путей их решения, предварительном анализе, обсуждении результатов исследований, проведенных автором. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками диссертационной работы.

Автор самостоятельно получил основные результаты диссертационной работы. Общая концепция исследований и отдельные теоретические методы разработаны совместно с научным руководителем. Результаты, полученные соавторами, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 79-, 81-, 82-, 84-, 85-й научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов БГТУ (Минск, 2015–2021 гг.), на международных конференциях «Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)» (Вильнюс, Литва, 2016–2020 гг.), 34-й и 35-й научно-технических конференциях ОАО «АГАТ – системы управления» (Минск, 2017–2018 гг.), на международной научно-практической конференции «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» (Воронеж, Россия, 2016 г.), на 8-й международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения «MILEX INNOVATIONS – 2019» (Минск, 2019 г.). Результаты диссертации также докладывались на международных симпозиумах «Topical Problems in the Field

of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology III» (Эстония, 2017–2019 гг.), на международной конференции «Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM)», (Kärdla, Estonia, 2019), на XI Международной научной конференции «ИТС-2021» (Минск, 2021 г.). Результаты научных исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, были внедрены при выполнении проекта «Ястреб» на ОАО «АГАТ – системы управления». Результаты исследования используются в образовательном процессе в УО «БГТУ» при подготовке специалистов по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликованы 4 статьи в научных журналах в соответствии с пунктом 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий общим объемом 1,5 авторского листа, 16 статей в материалах научных конференций, 8 тезисов докладов, 1 патент. Общий объем опубликованных работ – 5 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, трех глав с выводами по каждой из них, заключения, библиографического списка и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 274 страницы. В том числе: 130 страниц основного текста, 66 рисунков, 13 таблиц, расположенных в тексте диссертации, список использованных источников, включающий 108 наименований библиографического списка и 29 авторских публикаций, а также 3 приложения на 144 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении показана актуальность выбранной темы, обоснована необходимость проведения работы по анализу и аналитическому синтезу построенных на новых принципах систем управления беспилотных летательных аппаратов, показана практическая значимость работы.

В **первой главе** рассматривается современное состояние изучаемого вопроса, сформированы требования к системе управления БЛА, проведен синтез законов управления БЛА по шести каналам с учетом продольного и бокового движения летательного аппарата. Основной задачей является синтез системы управления БЛА, которая будет обеспечивать регулирование рулевых поверхностей БЛА с учетом особенностей управления на различных этапах полета. При обосновании математических моделей, используемых для синтеза законов управления БЛА, рассматриваются известные модели эле-

ментов конструкции летательного аппарата, которые характерны для аэродинамической схемы типа «летающее крыло». Прямолинейный горизонтальный полет с поддержанием постоянной скорости можно рассмотреть как невозмущенное движение БЛА. Продольное движение БЛА включает в себя поступательное движение относительно осей Ox , Oy . Кроме того, продольное движение БЛА представляет собой вращательное движение вокруг оси Oz . Данное движение осуществляется с помощью руля высоты. Законы управления стабилизацией тангажа и высоты имеют следующий вид:

$$\delta_B = K_{\omega_z} \omega_z + K_g \Delta\vartheta + K_g^{\int} \int \Delta\vartheta dt; \quad \Delta\vartheta = \vartheta_{\text{тек}} - \vartheta_{\text{зад}}; \quad (1)$$

$$\delta_B = K_{\omega_z} \omega_z + K_g \vartheta + K_{\dot{H}} \dot{H} + K_H \Delta H + K_{H_S} \int \Delta H dt, \quad (2)$$

где δ_B – величина отклонения руля высоты;

ω_z – угловая скорость вращения БЛА относительно оси Oz ;

$\Delta\vartheta$ – ошибка управления по тангажу;

$\vartheta_{\text{зад}}$ и $\vartheta_{\text{тек}}$ – заданное и текущее значения угла тангажа соответственно;

$\Delta H = H - H_{\text{зад}}$ – ошибка управления высотой;

$K_g, K_g^{\int}, K_{\omega_z}, K_H, K_{\dot{H}}, K_{H_S}$ – настраиваемые параметры в ЗУ по каналам

управления тангажом и высотой.

Управление боковым движением БЛА происходит с использованием каналов элеронов и руля направления. В большинстве случаев управление боковым движением происходит с помощью элеронов путем изменения угла крена. Руль направления выполняет роль демпфера угловых колебаний относительно оси Oy , а также в связанной системе координат устраняет угол скольжения. Управление углом рыскания и боковой координатой ведется через контур угла крена. Законы управления креном, углом рыскания и боковой координатой имеют вид:

$$\delta_3 = K_{\omega_x} \omega_x + K_{\gamma} \Delta\gamma + K_{\gamma}^{\int} \int \Delta\gamma dt; \quad \Delta\gamma = \gamma - \gamma_{\text{зад}}; \quad (3)$$

$$\delta_3 = K_{\omega_x} \omega_x + K_{\gamma} \gamma + K_{\psi} \Delta\psi + K_{\psi}^{\int} \int \Delta\psi dt; \quad \Delta\psi = \psi - \psi_{\text{зад}}; \quad (4)$$

$$\delta_3 = K_{\omega_x} \omega_x + K_{\gamma} (\gamma - \gamma_{\text{зад}}) + K_{\dot{z}} \dot{z} + K_z z + K_z^{\int} \int z dt, \quad (5)$$

где δ_3 – величина отклонения элеронов;

ω_x – угловая скорость вращения БЛА относительно оси Ox ;

$K_{\gamma}, K_{\gamma}^{\int}, K_{\omega_x}, K_{\psi}, K_{\psi}^{\int}, K_{\dot{z}}, K_z, K_z^{\int}$ – настраиваемые параметры в ЗУ по ка-

налам управления креном, углом рыскания и бокового отклонения;

$\Delta\gamma, \Delta\psi$ – ошибка управления креном и углом рыскания соответственно;
 γ и $\gamma_{\text{зад}}$ – текущее и заданное значения угла крена соответственно;
 $\psi, \psi_{\text{зад}}$ – текущее и заданное значения угла рыскания соответственно;
 Z – отклонение БЛА от линии заданного пути.

При управлении БЛА необходимо управлять скоростью полета. Закон управления стабилизацией скорости полета тягой двигателя имеет вид:

$$\alpha_{\text{руд}} = K_{\dot{V}}\dot{V} + K_{\Delta V}\Delta V + K_{\Delta V}^{\int} \int \Delta V dt, \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{руд}}$ – отклонение рычага управления двигателем от балансирующего положения;

$K_{\dot{V}}, K_{\Delta V}, K_{\Delta V}^{\int}$ – настраиваемые параметры в ЗУ скоростью;

ΔV – ошибка управления скоростью.

Анализ законов управления БЛА показал, что необходимо решать задачу синтеза регулятора в соответствии с каждым каналом управления, а также с учетом режима полета летательного аппарата. При этом некоторые законы управления имеют больше параметров, чем ПИД-регуляторы. А это, в свою очередь, предполагает использование комбинации двух и более регуляторов и равным образом усложняет настройку законов управления беспилотным летательным аппаратом. Поэтому целесообразно предусмотреть применение нечеткого регулятора вместо ПИД-регулятора. Данное решение позволит использовать для управления информацию качественного характера, которую не всегда можно определить для реализации простых законов управления. Кроме того, ПИД-регулятор возможно применять в сочетании с нечетким, что позволит использовать последний для адаптации параметров регулятора с нечетким выводом. Данное решение позволит нечеткому регулятору самостоятельно изменять параметры в законе управления, опираясь на базу правил.

Во **второй главе** проведен анализ неопределенностей и шумовых составляющих в выходном сигнале гироскопа. Показано, что исходя из физической природы и математических моделей шумовых составляющих гироскопа, неопределенности его выходных сигналов представляют собой ряд случайных факторов. Эти факторы, в свою очередь, являются множеством функций от времени, для которых возможно определить спектральную плотность мощности, которая показывает распределение шума относительно частоты. Кроме того, применен метод вариации Аллана:

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} [\bar{y}_{\text{след}}(T) - \bar{y}_k(T)]^2, \quad (7)$$

где T – временной отрезок;

N – последовательность точек данных, при $n < N / 2$;

$\bar{y}_{\text{след}}(T)$ – последующее среднее значение;

$y_k(T)$ – среднее значение группы объединенных элементов выходной скорости этих элементов, которая начинается с k точки данных и включает в себя n точек данных.

Метод вариации Аллана позволяет провести анализ во временной области для распознавания характера основных случайных процессов, которые вызывают зашумленность сигнала. Это дает возможность более эффективно проводить оценку и идентификацию неблагоприятных факторов, влияющих на работу гироскопа, что в значительной степени облегчает работу по нахождению источника помех и благоприятно сказывается на повышении качества управления беспилотным летальным аппаратом. Проведена оценка шумовых составляющих для данных гироскопа БЛА (рисунок 1).

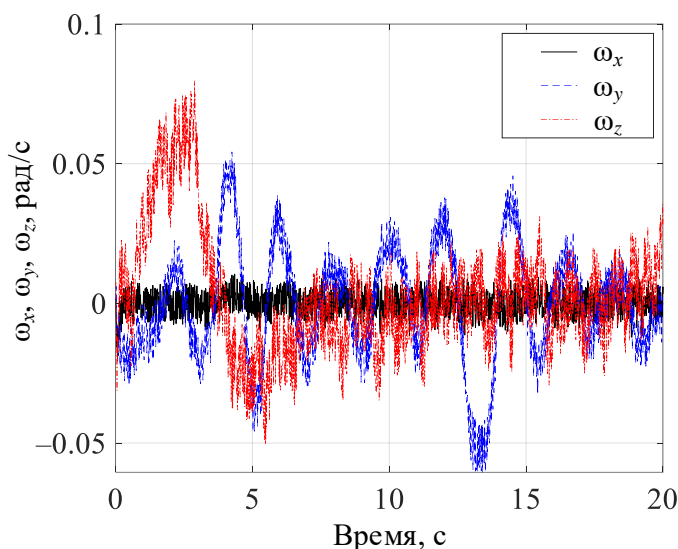


Рисунок 1 – График угловых скоростей гироскопа БЛА

Для угловых скоростей по трем осям были получены графики спектральной плотности мощности и дисперсии Аллана (рисунок 2). На рисунках 3–5 представлены данные гироскопа по угловой скорости по осям Ox , Oy и Oz соответственно.

Результаты математического моделирования работы нечеткого регулятора для фильтрации зашумленного сигнала показали, что нечеткий регулятор позволил скорректировать интенсивность шумовых составляющих выходного сигнала гироскопа более чем в 10 раз.

Размах случайных составляющих для исходного сигнала составляет $\pm 0,008$ рад/с, для фильтра Калмана $\pm 0,00068$ рад/с, для нечеткого регулятора $\pm 0,0007$ рад/с.

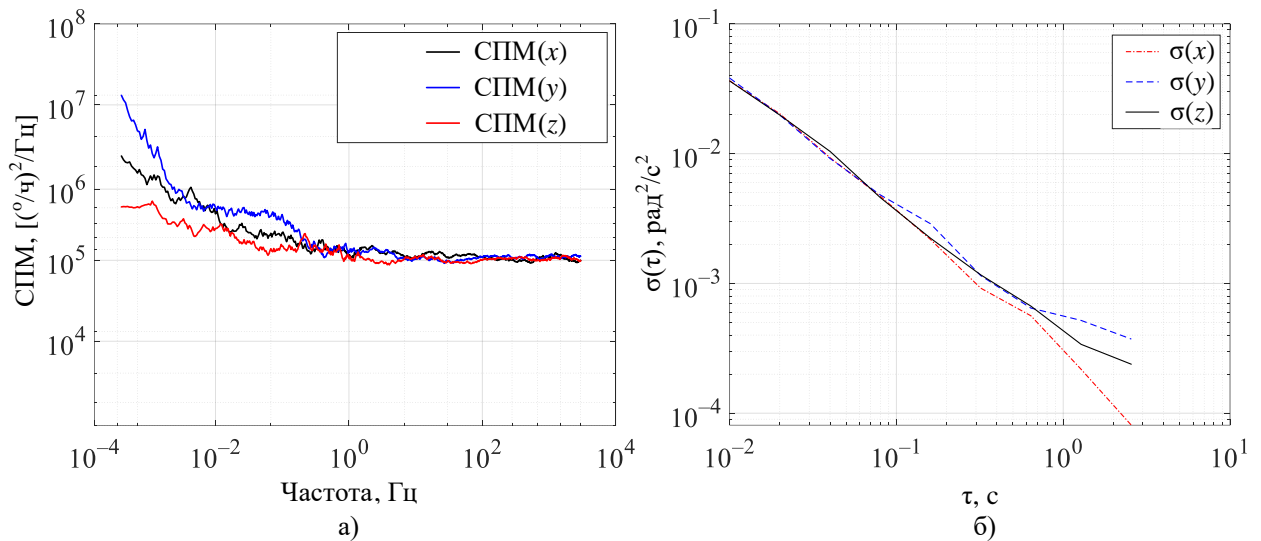


Рисунок 2 – График спектральной плотности мощности для гироскопа по трем осям (а) и дисперсии Аллана для гироскопа по трем осям (б)

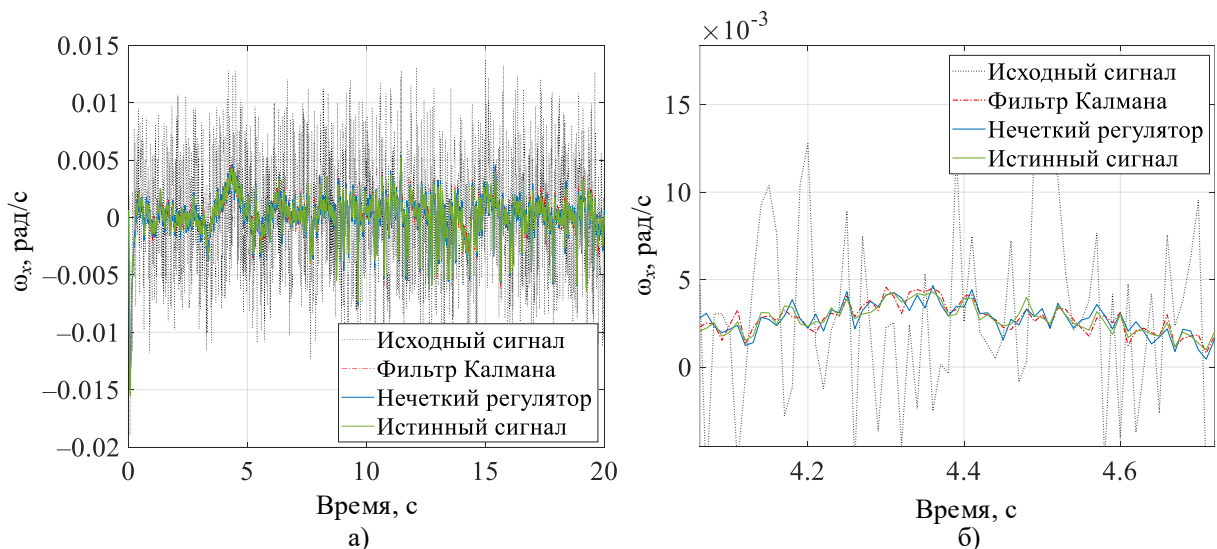


Рисунок 3 – График исходного сигнала угловой скорости ω_x с фильтром Калмана и нечетким регулятором (а) и увеличенный участок (б)

В ходе процесса фильтрации, при увеличении сглаживающих характеристик вместе с подавлением возмущения в виде шума, может происходить потеря полезной составляющей сигнала. Во избежание этого фактора, в данной главе была предложена методика применения нечеткого регулятора для компенсации шумовых составляющих.

Нечеткий регулятор малочувствителен к возмущениям в определенном диапазоне, что позволяет демонстрировать лучшие характеристики по сравнению с другими алгоритмами фильтрации. При проектировании нечеткого регулятора для фильтрации сигнала гироскопа беспилотного летательного аппарата в качестве терм-множеств для функций принадлежности использовались атомарные функции, которые находят широкое применение в цифровой обработке сигналов.

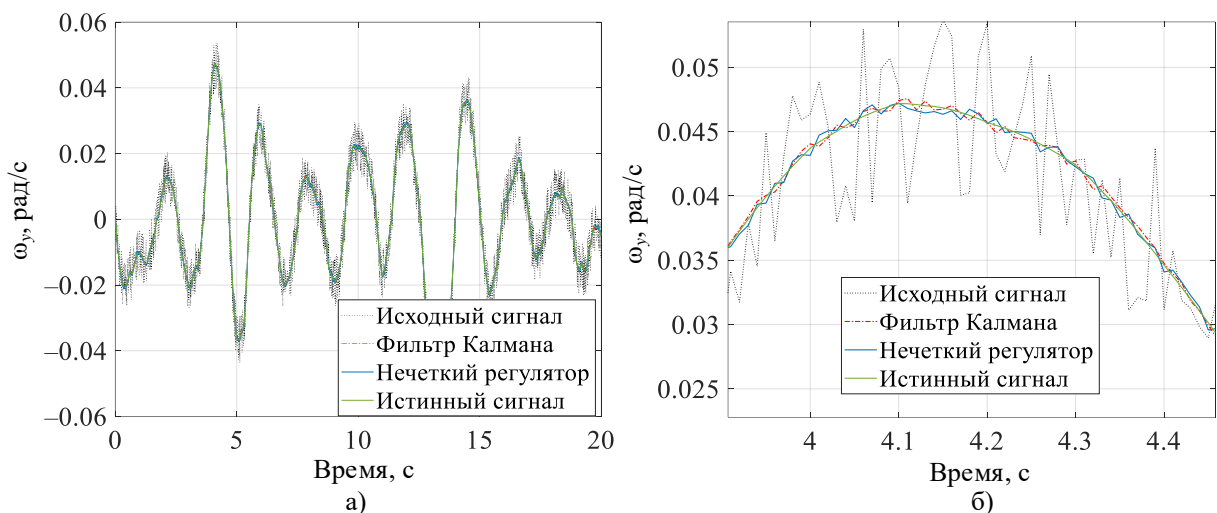


Рисунок 4 – График исходного сигнала угловой скорости ω_y с фильтром Калмана и нечетким регулятором (а) и увеличенный участок (б)

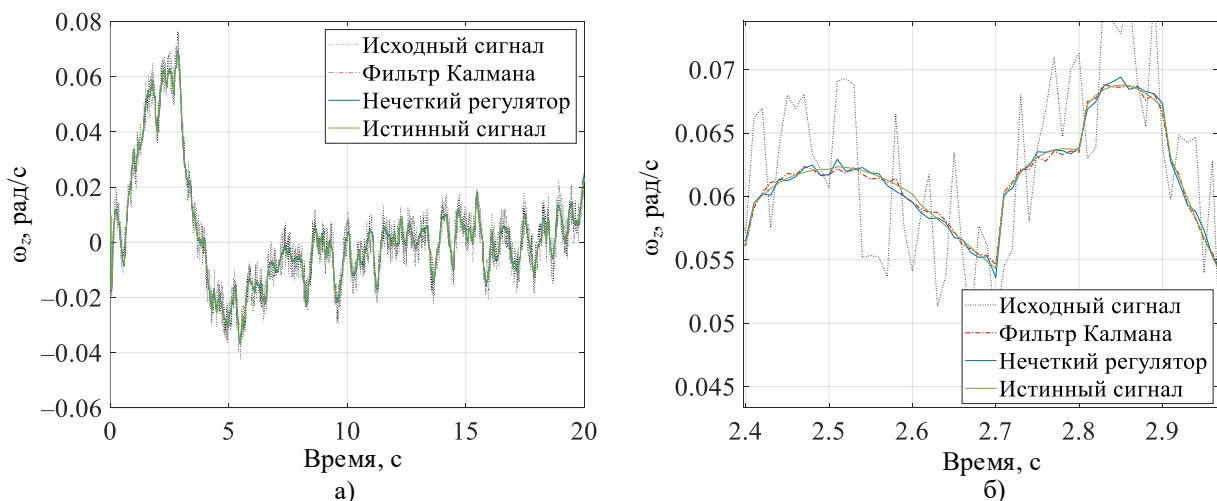


Рисунок 5 – График исходного сигнала угловой скорости ω_z с фильтром Калмана и нечетким регулятором (а) и увеличенный участок (б)

В третьей главе разработан способ управления углами ориентации БЛА на основе применения пропорционально-интегрально-дифференциального нечеткого регулятора, позволяющий синтезировать законы управления на различных этапах полета, для обеспечения требуемой устойчивости летательного аппарата в условиях наличия информационных неопределенностей.

Рассмотрены методы идентификации, а именно: методы инструментальных переменных, фильтра переменных состояний, обобщенной функции Пуассона и оценки подпространства переменных состояний. Данные методы позволяют получить математическое описание беспилотного летательного аппарата в виде передаточных функций по основным каналам управления, основываясь на динамических характеристиках БЛА. Полученные математи-

ческие модели прошли процедуру верификации для сопоставления экспериментальных и исходных данных. В качестве БЛА для проведения исследований способа синтеза системы автоматического управления с применением нечетких регуляторов был рассмотрен летательный аппарат «Ястреб Б-1Р», созданный компанией «АГАТ–системы управления». Данный БЛА имеет тип «летающее крыло» и представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – БЛА «Ястреб Б-1Р»

Изменение физико-механических параметров математической модели БЛА может быть связано с соответствующей вариацией режимов работы. При синтезе регулятора для управления БЛА по соответствующему каналу управления не возникает огромных проблем, если изменение внутренних свойств объекта не оказывает влияния на выходную величину. Однако в случае, если влияние на выходную величину присутствует, то необходимо учитывать его в законе управления. Передаточные функции модели БЛА были определены с возможной погрешностью относительно реального объекта, кроме того, математическая модель может измениться в процессе эксплуатации. Это может привести как к ухудшению качества управления, так и к потере устойчивости. Ввиду этого, синтез регулятора должен проводиться так, чтобы он мог обеспечивать устойчивость и удовлетворительное качество управления при отклонениях математической модели. В зависимости от технологического параметра находятся параметры регуляторов по двум методам настройки (метод синтеза для обеспечения заданной степени затухания и метод синтеза из условия обеспечения системой запаса по фазе и желаемого времени регулирования) для найденных математических описаний в виде передаточных функций. В соответствии с технологическим параметром и заданным каналом управления определяется количество входных сигналов. Найденные параметры регуляторов служат для составления функций принадлежности для терм-множеств лингвистических переменных нечеткого регулятора управления БЛА по соответствующему каналу управления. В работе предложено синтезировать пропорционально-интегрально-дифференциальный нечеткий регулятор. Получение параметров для ПИД-регулятора осуществляется с помощью блока нечет-

кой логики. Данный блок использует систему нечеткого вывода, а именно, получение нечетких заключений о требуемом управлении БЛА на основе базы правил, которая представляет собой конечное множество правил нечетких продукций с учетом входных и выходных лингвистических переменных. Структурная схема нечеткого регулятора представлена на рисунке 7. Его основными элементами являются: интегрирующее звено 1, дифференцирующее звено 2, мультиплексор (объединение входных сигналов в вектор) 3, блок фаззификации 4, блок нечеткого вывода 5, блок базы правил нечетких продукций (основанный на желаемом состоянии объекта управления) 6, блок дефаззификации 7, демультимплексор (разделение выходного векторного сигнала на отдельные составляющие) 8 и сумматор 9.

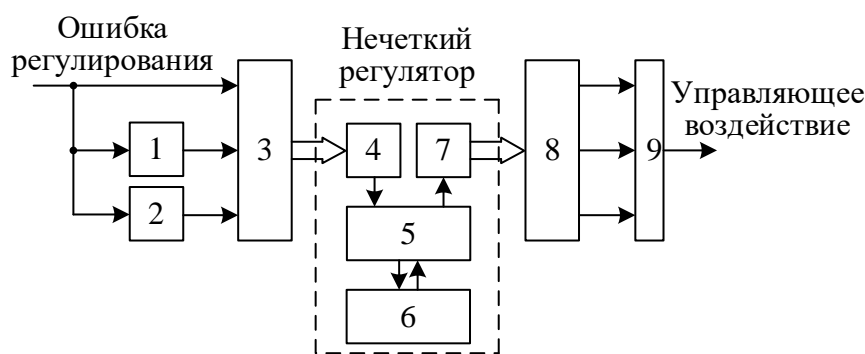


Рисунок 7 – Нечеткий регулятор

Для контроллера стабилизации крена, основанного на нечеткой логике, входными сигналами являются ошибка регулирования крена, интеграл ошибки регулирования крена и угловая скорость вокруг оси Ox . При настройке закона управления стабилизации крена необходимо учитывать, что максимальный/минимальный допустимый крен в полете и отклонение элеронов не должно превышать $\pm 20^\circ$. Входные сигналы используются как входные лингвистические переменные, и для них вводятся следующие термы: отрицательное (minus); среднее (average); положительное (plus).

Для реализации процедур фаззификации и дефаззификации задаются функции принадлежности для каждой входной и выходной переменных. На рисунке 8 представлена структурная схема управления с нечетким регулятором. На рисунке 9 и 10 представлены функции принадлежности входных и выходных лингвистических переменных для треугольных термов соответственно. Для контроллера, основанного на нечеткой логике, выходными сигналами являются пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие ПИД-регулятора. Сигналы используются как выходные лингвистические переменные, и для них вводятся следующие термы: малое (small); среднее (middle); большое (big). База правил для нечеткого регулятора по крену представлена в таблице 1.

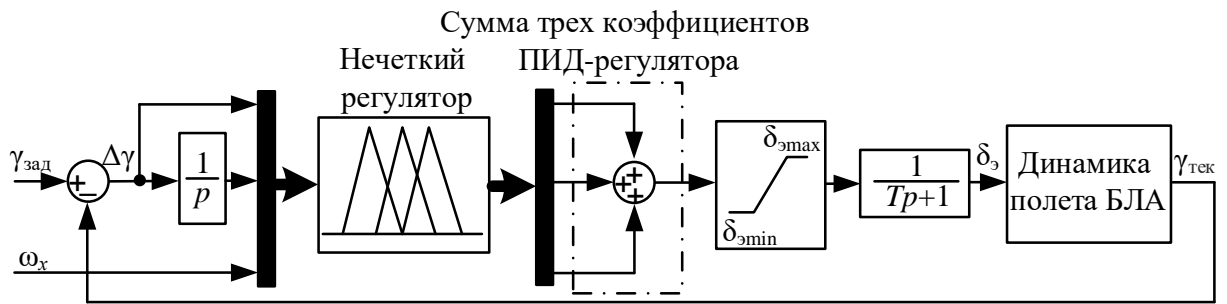


Рисунок 8 – Структурная схема управления с нечетким регулятором

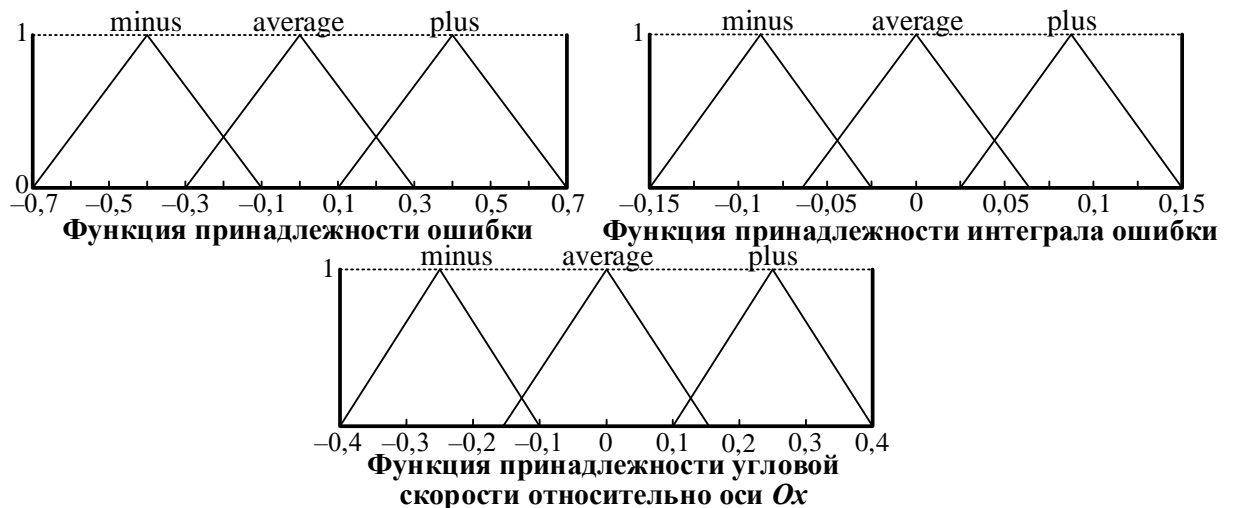


Рисунок 9 – Функции принадлежности входных лингвистических переменных

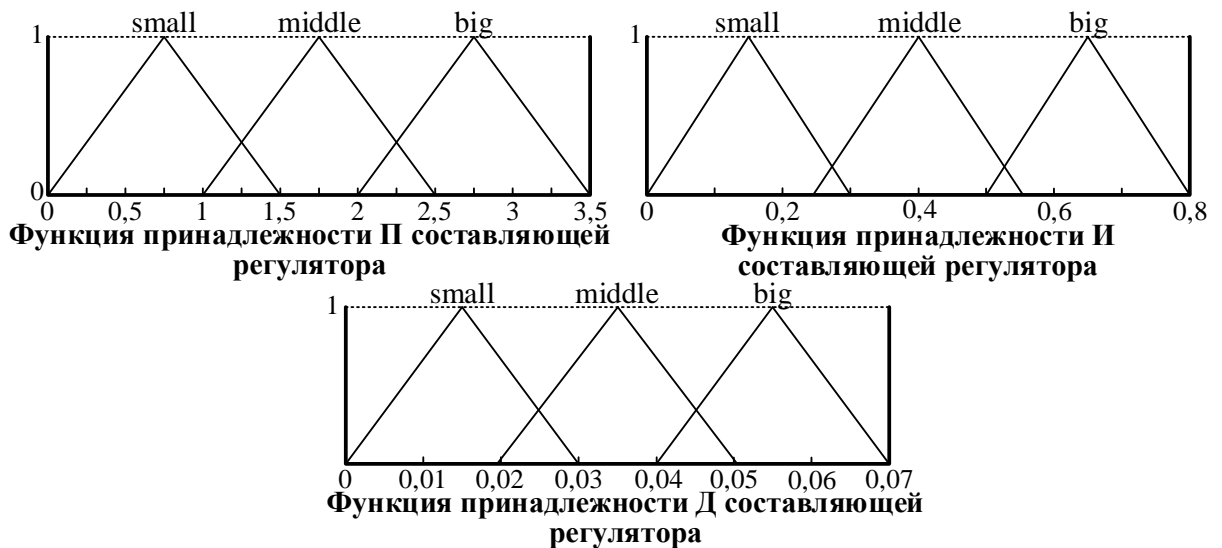


Рисунок 10 – Функции принадлежности выходных лингвистических переменных

В соответствие с выбранным технологическим параметром и заданным каналом управления определяется количество входных сигналов. Далее осуществляют процедуру фаззификации, а именно в соответствие входным сигналам составляются функции принадлежности для терм-множеств лингвистических переменных, т.е. присваиваются определенные входные

значения. Следующим шагом является использование возможностей нечеткого вывода и базы знаний, в которой в соответствии с определенной комбинацией входных значений, присваиваются выходные.

Таблица 1 – База правил для нечеткого регулятора по крену

№	ФП «ошибка»	ФП «интеграл ошибки»	ФП «угловая скорость относительно оси Ox »	ФП «П составляющая регулятора»	ФП «И составляющая регулятора»	ФП «Д составляющая регулятора»
1	minus	minus	minus	big	big	big
2	minus	minus	average	big	big	middle
3	minus	minus	plus	big	big	small
4	minus	average	minus	big	middle	big
5	minus	average	average	big	middle	middle
6	minus	average	plus	big	middle	small
7	minus	plus	minus	big	small	big
8	minus	plus	average	big	small	middle
9	minus	plus	plus	big	small	small
10	average	minus	minus	middle	big	big
11	average	minus	average	middle	big	middle
12	average	minus	plus	middle	big	small
13	average	average	minus	middle	middle	big
14	average	average	average	middle	middle	middle
15	average	average	plus	middle	middle	small
16	average	plus	minus	middle	small	big
17	average	plus	average	middle	small	middle
18	average	plus	plus	middle	small	small
19	plus	minus	minus	small	big	big
20	plus	minus	average	small	big	middle
21	plus	minus	plus	small	big	small
22	plus	average	minus	small	middle	big
23	plus	average	average	small	middle	middle
24	plus	average	plus	small	middle	small
25	plus	plus	minus	small	small	big
26	plus	plus	average	small	small	middle
27	plus	plus	plus	small	small	small

Последующий этап – дефаззификация, а именно, получение выходного сигнала для подачи его на систему автоматического управления для осуществления регулирования. Процедура дефаззификации использует метод центра тяжести. Таким образом, для каждого технологического параметра в соответствии с каналом управления имеется поверхность нечеткого вывода. В зависимости от целей, преследуемых системой автоматического управления БЛА, формы функций принадлежности входных сигналов рассогласо-

ваний и выходного эквивалентного сигнала рассогласования, численные диапазоны значений функций принадлежности, правила нечеткого вывода и дефаззификации могут подвергаться изменению. При наличии трех входных сигналов по каналам обратных связей, описываемых тремя термами, необходимо три терма для трех выходных сигналов. На рисунке 11 представлены графики стабилизации крена от 0 до 5°, от 0 до 10°, от 0 до -5° и от 0 до -10°.

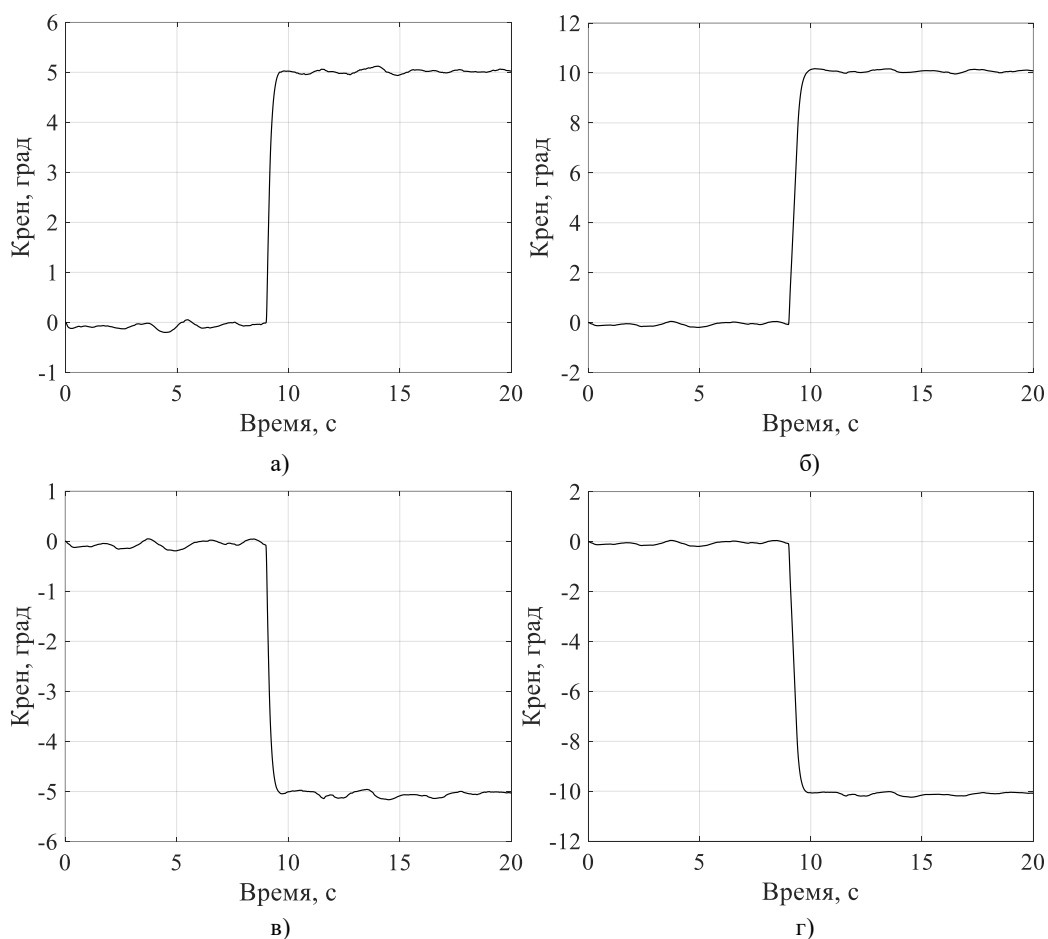


Рисунок 11 – Графики изменения угла крена от 0 до 5° (а), от 0 до 10° (б), от 0 до -5° (в) и от 0 до -10° (г)

Варьируя правила нечеткого вывода и изменяя диапазоны для функций принадлежности терм-множеств выходных лингвистических переменных, можно косвенно влиять на показатели качества переходного процесса по заданному технологическому параметру и расширить функциональные возможности системы управления БЛА. При синтезе нечеткого регулятора для системы управления БЛА было отмечено, что возможно применение как алгоритма Мамдани, так и алгоритма Сугено, поскольку не было получено значительных отличий в показателях качества переходного процесса стабилизации угла крена. На основании этого можно сделать вывод, что выбор алгоритма зависит от удобства реализации конкретного алгоритма в автопилоте.

Разработанный способ управления ориентацией беспилотного летательного аппарата с применением нечеткого регулятора дает возможность выполнять поставленные перед летательным аппаратом задачи и придерживаться желаемого качества регулирования по основным каналам управления. Данный способ позволяет обеспечить автоматическую настройку параметров в ЗУ системы управления полетом любого беспилотного летательного аппарата самолётного типа с соблюдением безаварийности в первых испытательных полетах, что, в свою очередь, минимизирует потерю сырьевых, энергетических и человеческих ресурсов. В приложении представлены оценки динамических характеристик крена, тангажа, рыскания, высоты, скорости и бокового отклонения, а также полученные математические модели и результаты проеденных экспериментов. Кроме того, в приложении представлены патент и акты внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведен анализ способов управления беспилотным летательным аппаратом с учетом функционального предназначения всех его подсистем. Определена структура законов управления для шести основных каналов управления, которые обеспечивают желаемое качество регулирования, позволяющее выполнять поставленные перед БЛА задачи. Реализация закона управления беспилотным летательным аппаратом представляет собой задачу синтеза регулятора в соответствии с каждым каналом управления, а также с учетом режима полета летательного аппарата. При этом некоторые законы управления имеют больше параметров, чем классические регуляторы. Таким образом, требуется использование комбинации двух и более регуляторов, что равным образом усложняет настройку законов управления беспилотным летательным аппаратом. Обоснована возможность применения нечеткого регулятора вместо классического ПИД-регулятора. Данное решение позволит использовать для управления информацию качественного характера, которую не всегда можно определить для реализации классических законов управления. Классический регулятор возможно применять в сочетании с нечетким регулятором, что дает возможность использовать последний для адаптации параметров классического регулятора с применением нечеткого вывода. В результате нечеткий регулятор может самостоятельно изменять параметры в законе управления, основываясь на базе правил [1–А; 5–А; 12–А; 16–А; 21–А; 23–А; 24–А].

2. Разработана методика применения нечеткого регулятора для компенсации шумовых составляющих в данных гироскопа. При этом применен метод вариации Аллана, который позволяет провести анализ во временной области

для распознавания характера основных случайных процессов, вызывающих зашумленность сигнала гироскопа. Это дает возможность более эффективно проводить оценку и идентификацию неблагоприятных факторов, влияющих на работу гироскопа, что в значительной степени облегчает работу по нахождению источника помех и благоприятно сказывается на повышении качества управления беспилотным летательным аппаратом. Кроме того, применение нечеткого регулятора позволяет изменять параметры фильтра в процессе фильтрации. Выявлено, что нечеткий регулятор малочувствителен к возмущениям в определенном диапазоне, а это позволяет демонстрировать лучшие характеристики по сравнению с другими алгоритмами фильтрации. При проектировании нечеткого регулятора для фильтрации сигнала гироскопа беспилотного летательного аппарата в качестве терм-множеств для функций принадлежности использовались атомарные функции, которые находят широкое применение в цифровой обработке сигналов. Результаты математического моделирования работы нечеткого регулятора для фильтрации зашумленного сигнала, а также фильтра Калмана показали, что ошибка фильтрации для графиков угловых скоростей невелика. Т. е. установившиеся значения выходных сигналов для нечеткого регулятора и фильтра Калмана достаточно близки к истинным значениям угловых скоростей (размах случайных составляющих для исходного сигнала составляет $\pm 0,008$ рад/с, для фильтра Калмана $\pm 0,00068$ рад/с, для нечеткого регулятора $\pm 0,0007$ рад/с) [2–А; 4–А; 6–А; 7–А; 13–А; 15–А; 17–А; 18–А; 20–А; 22–А; 26–А; 27–А; 28–А].

3. Определены математические модели БЛА по основным каналам управления с учетом динамических характеристик. Для этого были применены следующие методы идентификации: метод инструментальных переменных, метод фильтра переменных состояний, метод обобщенной функции Пуассона и метод оценки подпространства переменных состояний. Математические модели БЛА получены в виде передаточных функций, а также в виде пространства состояний по основным каналам управления с учетом динамических характеристик. Полученные математические модели прошли процедуру верификации для сопоставления экспериментальных и исходных данных. Результаты математического моделирования показывают, что с увеличением порядка характеристического уравнения передаточной функции повышается точность описания динамической характеристики (в процентном соотношении), уменьшается среднеквадратичная ошибка и значение критерия Акаике для окончательной ошибки прогноза, но при этом снижается робастная устойчивость по Харитонову, что влечет за собой ухудшение качества полученной математической модели [3–А; 9–А; 10–А; 25–А].

4. Разработан способ синтеза системы управления ориентацией беспилотного летательного аппарата на основе применения нечетких регуляторов.

Полученная система управления позволяет выполнять поставленные перед летательным аппаратом задачи и придерживаться желаемого качества регулирования по основным каналам управления. Разработанный способ позволяет обеспечить автоматическую настройку параметров в законах управления системы управления полетом любого беспилотного летательного аппарата самолетного типа с соблюдением безаварийности в первых испытательных полетах, что, в свою очередь, минимизирует потерю сырьевых, энергетических и человеческих ресурсов. Показано, что в процессе синтеза нечеткого регулятора с подстраиваемыми параметрами для нахождения численных значений функций принадлежности выходных лингвистических переменных возможно использовать метод синтеза системы управления для обеспечения заданной степени затухания, а также метод синтеза из условия обеспечения запаса по фазе и желаемого времени регулирования. Данное решение позволяет синтезировать систему автоматического управления беспилотным летательным аппаратом, которая будет отвечать заданным параметрам качества, а именно, времени переходного процесса и перерегулирования [3–А; 8–А–11–А; 14–А; 19–А; 25–А; 29–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученная в диссертационной работе совокупность научных результатов была применена при выполнении технического проекта ОКР «Разработка программного обеспечения системы управления полетом, устанавливаемого в автопилот беспилотного летательного аппарата» (шифр «Ястреб», № гос. регистрации 20180630 от 07.05.2018 г.) на ОАО «АГАТ – системы управления», в частности настройки законов управления системы управления полетом беспилотного летательного аппарата (акт внедрения).

Результаты диссертационных исследований используются в образовательном процессе учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» при подготовке специалистов по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А Карпович Д.С., Шумский А.Н., Сарока В.В. Система управления беспилотным летательным аппаратом с применением теории нечетких множеств // Труды БГТУ. – 2016. – № 6: Физ.-мат. науки и информатика. – С. 110–116.

2–А Карпович Д.С., Шумский А.Н. Синтез системы управления с нечетким регулятором и шумом во входном канале // Труды БГТУ. – Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. – 2017. – № 1. – С. 52–57.

3–А Шумский А.Н., Карпович Д.С. Настройка параметров закона управления для стабилизации высоты беспилотного летательного аппарата // Труды БГТУ. – Сер.3, Физ.-мат. науки и информатика. – 2018. – № 1. – С. 49–54.

4–А Шумский А.Н., Карпович Д.С. Нечеткий регулятор как устройство фильтрации возмущений // Труды БГТУ. – Сер.3, Физ.-мат. науки и информатика. – 2019. – № 1. – С. 34–38.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

5–А Karpovich D.S., Shumski A.N. Synthesis of PI controller with fuzzy set theory // 2016 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 19 April 2016. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/eStream39242.2016.7485913.

6–А Шумский А.Н., Donatas Uznys. Особенности управления беспилотным летательным аппаратом с нечетким регулятором в условиях зашумленности входной информации // Интегрированные системы безопасности: теория, практика, инновации: материалы междунар. заочн. науч.-практ. конф., Минск, 30 июня 2016 г. / Командно-инженер. ин-т. – Минск, 2016. – С. 22–25.

7–А Карпович Д.С., Шумский А.Н., Donatas Uznys. Использование нечетких регуляторов при зашумленных измерительных каналах // Проблемы и инновационные решения в химической технологии: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2016. – С. 109–111.

8–А Shumski A., Karpovich D. Synthesis of the Control System with a Fuzzy Regulator in the Presence of Noise in the Input Data // Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering and Doctoral School of Energy and Geotechnology III: materials of 16th International Symposium, Pärnu, Estonia, January 16–21, 2017 / Tallinn University of Technology. – Pärnu, 2017. – P. 66–68.

9–А Shumski A. Investigation of the transient characteristics of an unmanned aerial vehicle in terms of identifying it as a control object // 2017 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 27 April 2017. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/eStream.2017.7950329.

10–А Шумский А.Н. Идентификация и синтез математической модели стабилизации высоты БЛА с применением теории нечетких множеств // Актуальные проблемы и перспективы развития авиации: материалы II междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25–26 апр. 2018 г. / Белорус. гос. акад. авиации. – Минск, 2018. – Ч.2. – С. 97.

11–А Shumski A., Karpovich D. The control law of an unmanned aerial vehicle during a flight along a route // 2018 Open Conference of Electrical, Electron-

ic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 26 April 2018. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/eStream.2018.8394118.

12–А Шумский А.Н. Нечеткий регулятор как часть СУП БЛА // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 3–6 окт. 2018 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2018. – С. 33–36.

13–А Шумский А.Н. Применение теории нечетких множеств для подавления влияния помех на систему автоматического управления БЛА // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 3–6 окт. 2018 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2018. – С. 66–69.

14–А Shumski A. Modeling of UAV flight / A. Shumski // Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering and Doctoral School of Energy and Geotechnology III: materials of 18th International Symposium, Toila, Estonia, January 14–19, 2019 / TalTech. – Toila, 2019. – P. 93–94.

15–А Shumski A., Karpovich D. Application of Fuzzy Set Theory to Suppress the Effects of Interference // 2019 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 25 April 2019. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/eStream.2019.8732149.

16–А Кулага В.В., Хотько А.К., Шумский А.Н. Технология создания универсального пилотажно-навигационного комплекса для беспилотных летательных аппаратов // MILEX.INNOVATIONS–2019: материалы 8-й междунар. науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения: Минск, 16–17 мая 2019 г. / Гос. воен.-промышл. ком. – Минск, 2019. – Ч.5. – С. 39–42.

17–А Using a Fuzzy Regulator to Reduce Noise / A. Shumski, A. Rasõlkin, S. Autsou, D. Karpovich, A. Kallaste, T. Vaimann // 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM), Kärđla, 12–15 June 2019. – P. 81–84. – DOI: 10.1109/PQ.2019.8818257.

18–А Shumski A., Karpovich D., Gindullin R. Reducing the Effect of White Noise in Gyro Data // 2020 IEEE Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 2020. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/eStream 50540.2020.9108776.

19–А Шумский А.Н., Карпович Д.С. Система управления поддержания траектории полета БПЛА при мониторинге окружающей среды с использованием теории нечетких множеств // Информационные технологии и системы (The International Scientific Conference "Information Technologies and Systems", ITS-2021): материалы XI Междунар. науч. конф., Минск, 24 нояб.

2021 г. / Белорус. гос. ун-т. информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2021. – С. 61–62.

20–А Синтез систем управления с шумами в измерительных каналах / Д.С. Карпович, С.А. Овцов, А.Н. Шумский, Н.Н. Намозов // Материалы LIX отчетной науч. конф. преп. и науч. сотрудников ВГУИТ за 2020 год: в 3-х ч. – Воронеж: Воронеж. гос. унив. инжен. техн., 2021. – Ч. 2. – С. 117–119.

Тезисы докладов на научных конференциях

21–А Шумский А.Н. Разработка адаптивной системы управления БПЛА // Химическая технология и техника: тез. докл. 79-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 2–6 февр. 2015 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2015. – С. 7.

22–А Шумский А.Н. Синтез нечеткого регулятора для системы управления с целью уменьшения воздействия внешних помех // Химическая технология и техника: тез. докл. 81-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–12 февр. 2017 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2017. – С. 98.

23–А Шумский А.Н. Определение первичных настроек ПИД-регулятора для управления беспилотным летательным аппаратом с применением теории нечетких множеств // Беспилотные авиационные комплексы и робототехнические системы: тез. докл. 34-й ежегод. науч.-техн. конф. ОАО «АГАТ – системы управления». Минск, 2–3 мая 2017 г. – Минск, 2017. – С. 134–135.

24–А Шумский А.Н. Настройка параметров закона управления для стабилизации бокового отклонения при полете по маршруту беспилотного летательного аппарата // Химическая технология и техника: тез. докл. 82-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–14 февр. 2018 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2017. – С. 120.

25–А Шумский А.Н. Методика получения параметров в законах управления БЛА с нечетким регулятором, минимальным перерегулированием и желаемым временем регулирования // Беспилотные авиационные комплексы и робототехнические системы: тез. докл. 35-й ежегод. науч.-техн. конф. ОАО «АГАТ – системы управления». Минск, 7–8 мая 2018 г. – Минск, 2018. – С. 71.

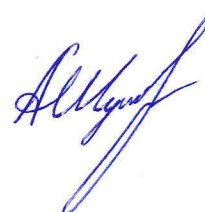
26–А Шумский А.Н. Использование нечеткого регулятора для сглаживания возмущений в САУ БЛА // Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях: тез. докл. междунар. воен.-науч. конф., Минск, 17–18 апр. 2019 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – С. 261.

27–А Шумский А.Н. Методика оценивания и снижения влияния белого шума на данные гироскопа // Химическая технология и техника: тез. докл. 84-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 3–14 февр. 2020 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2020. – С. 277.

28–А Шумский А.Н., Карпович Д.С., Хаусов И.А. Анализ шумовых составляющих сигнала и борьба с ними // Химическая технология и техника: тез. докл. 85-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2021. – С. 272.

Патент

29–А Способ управления беспилотным летательным аппаратом: пат. ВУ 23106 / А.Н. Шумский, Д.С. Карпович, В.В. Кулага, М.В. Клютко. – Оpubл. 30.06.2020.



РЭЗІЮМЭ

Шумскі Андрэй Мікалаевіч

Кіраванне арыентацыяй беспілотнага лятальнага апарата на аснове прымянення невыразных рэгулятараў

Ключавыя словы: беспілотны лятальны апарат, сістэма кіравання, невыразны рэгулятар

Мэта працы: сінтэз сістэмы кіравання арыентацыяй беспілотнага лятальнага апарата з ужываннем невыразных рэгулятараў.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: прымяняліся метады матэматычнага мадэлявання, метады ідэнтыфікацыі, інжынерныя разлікі, аналіз, метады эксперыментальнага даследавання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: прапанаваны прынцыпы пабудовы сістэм кіравання БЛА з невыразнымі рэгулятарамі, на аснове якіх распрацавана метадыка сінтэзу законаў кіравання БЛА з улікам функцыянальнага прызначэння ўсіх яго падсістэм, якая ўлічвае дынамічнае змяненне выпадковых фактараў, якія ўплываюць на кіраванне сістэмай; прапанавана метадыка прымянення невыразнага рэгулятара для кампенсацыі выпадковых уздзеянняў у выходным сігнале гіраскопа аўтапілота БЛА, якая выкарыстоўвае варыяцыю Алана; прапанаваны спосаб кіравання кутамі арыентацыі БЛА на аснове прымянення прапарцыйна-інтэгральна-дыферэнцыяльнага невыразнага рэгулятара, які дазваляе сінтэзаваць законы кіравання на розных этапах палёту для забеспячэння патрабаванай устойлівасці лятальнага апарата ва ўмовах наяўнасці інфармацыйных нявызначанасцяў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі дысертацыйных даследаванняў былі ўжытыя пры выкананні тэхнічнага праекта АКР «Распрацоўка праграмнага забеспячэння сістэмы кіравання палётам, які ўсталёўваецца ў аўтапілот беспілотнага лятальнага апарата» на ААТ «АГАТ – сістэмы кіравання», а таксама выкарыстоўваюцца ў адукацыйным працэсе ўстановы адукацыі «Беларускі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт» пры падрыхтоўцы спецыялістаў па кірунку «Аўтаматызацыя тэхналагічных працэсаў і вытворчасцей».

Вобласць ужывання: сістэмы кіравання беспілотнымі лятальнымі апаратамі.

РЕЗЮМЕ

Шумский Андрей Николаевич

Управление ориентацией беспилотного летательного аппарата на основе применения нечетких регуляторов

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система управления, нечеткий регулятор

Цель работы: синтез системы управления ориентацией беспилотного летательного аппарата с применением нечетких регуляторов.

Методы исследования и использованная аппаратура: применялись методы математического моделирования, методы идентификации, инженерные расчеты, анализ, методы экспериментального исследования.

Полученные результаты и их новизна: предложены принципы построения систем управления БЛА с нечеткими регуляторами, на основе которых разработана методика синтеза законов управления БЛА с учетом функционального предназначения всех его подсистем, учитывающая динамическое изменение случайных факторов, влияющих на управление системой; предложена методика применения нечеткого регулятора для компенсации случайных воздействий в выходном сигнале гироскопа автопилота БЛА, использующая вариацию Аллана; предложен способ управления углами ориентации БЛА на основе применения пропорционально-интегрально-дифференциального нечеткого регулятора, позволяющий синтезировать законы управления на различных этапах полета для обеспечения требуемой устойчивости летательного аппарата в условиях наличия информационных неопределенностей.

Рекомендации по использованию: результаты диссертационных исследований были применены при выполнении технического проекта ОКР «Разработка программного обеспечения системы управления полетом, устанавливаемого в автопилот беспилотного летательного аппарата» на ОАО «АГАТ – системы управления», а также используются в образовательном процессе учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» при подготовке специалистов по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

Область применения: системы управления беспилотными летательными аппаратами.

SUMMARY

Shumski Andrei

Attitude control of an unmanned aerial vehicle based on the use of fuzzy controllers

Key words: unmanned aerial vehicle, control system, fuzzy controller

Purpose of the work: synthesis of an attitude control system for an unmanned aerial vehicle using fuzzy controllers.

Research methods and equipment used: methods of mathematical modeling, identification methods, engineering calculations, analysis, methods of experimental research were used.

The results obtained and their novelty: the principles of constructing UAV control systems with fuzzy controllers are proposed, on the basis of which a method for synthesizing UAV control laws has been developed, taking into account the functional purpose of all its subsystems, taking into account the dynamic change of random factors affecting the system control; a technique for using a fuzzy controller to compensate for random effects in the output signal of the UAV autopilot gyroscope using the Allan variation is proposed; a method is proposed for controlling UAV orientation angles based on the use of a proportional-integral-differential fuzzy controller, which makes it possible to synthesize control laws at various stages of flight to ensure the required stability of the aircraft in the presence of information uncertainties.

Recommendations for use: the results of dissertation research were applied in the implementation of the technical project of the R&D "Development of software for a flight control system installed in the autopilot of an unmanned aerial vehicle" at JSC "AGAT - Control Systems", and are also used in the educational process of the educational institution "Belarusian State Technological University" in the training of specialists in the direction of "Automation of technological processes and production."

Scope: control systems for unmanned aerial vehicles.

Научное издание

ШУМСКИЙ
Андрей Николаевич

УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО
АППАРАТА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.06 – автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами

Подписано в печать 03.02.2023. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60. Заказ 11.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,

№ 2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ул. П. Бровка, 6, 220013, г. Минск