

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 629.735.33

АЛЬ-МАШХАДАНИ
Мохаммед Абдулрахман

**СИНТЕЗ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ
ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ В УСЛОВИЯХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Минск, 2014

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель: Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: Татур Михаил Михайлович, доктор технических наук, заведующий кафедрой Электронных вычислительных машин Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники;

Калитин Сергей Борисович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника авиационного факультета Военной академии Республики Беларусь

Оппонирующая организация: Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится 16 декабря 2014 г. в 15 часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, тел. (017) 293-95-64, E-mail: gurski2010@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «14» ноября 2014 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент

Н.Н. Гурский

© Аль-Машхадани Мохаммед Абдулрахман , 2014
© Белорусский национальный технический университет, 2014

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются эффективным средством для решения широкого спектра задач, как в военной, так и народнохозяйственной сфере. Одной из важнейших задач является разработка и реализация методов синтеза и анализа систем управления (СУ) БЛА как сложных динамических стохастических систем. В условиях наличия существенных ограничений и неопределенностей входной информации СУ БЛА представляет значительную трудность формализация задач синтеза регуляторов автопилотов БЛА. В этом случае представляется перспективным использование в автопилотах регуляторов (контроллеров), работа которых основана на правилах нечеткой логики. Преимущество таких контроллеров состоит в том, что при их синтезе нет необходимости подробного математического моделирования системы управления, и при этом может использоваться опыт инженера-оператора, полученный на основе знаний о поведении системы управления.

В диссертации рассмотрены вопросы синтеза программного управления БЛА при полете по траектории, проходящей через заданные точки пространства с учетом неопределенностей, обусловленными ошибками определения параметров управления. Задача синтеза автопилота БЛА решается на основе статистической линеаризации математической модели системы управления, что позволяет провести фаззификацию входных сигналов нечеткого контроллера автопилота с учетом имеющихся неопределенностей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема работы соответствует научному направлению кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета. Работа проводилась в рамках научно-технической работы ГБ №10-114 «Математическое и программное обеспечение систем обработки информации в образовании и автоматизированных системах управления техническими объектами», проводимой БНТУ, а также в рамках научных программ Республики Ирак.

Цель и задачи исследований

Целью работы является разработка алгоритмов обработки информации для управления беспилотным летательным аппаратом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ БЛА, их математических моделей и параметрических неопределённостей, оказывающих влияние на точность и работоспособность систем управления БЛА.

2. Разработать методику аналитического синтеза управления БЛА на заданной траектории полёта.

3. Разработать методики и алгоритмы формирования параметров управления автопилота БЛА для различных условий применения.

4. Разработать методику и алгоритмы реализации закона управления в автопилоте БЛА на основе нечеткого регулятора.

Научная новизна

1. Предложен метод синтеза закона управления БЛА для заданного критерия качества, позволяющий реализовать оптимальную траекторию, проходящую через заданные точки пространства, основанный на решении задачи оптимизации для математической модели системы наведения, описанной в изменяющейся пространственной системе координат

2. Разработан способ получения функций принадлежности сигнала управления нечеткого регулятора нелинейной системы, основанный на гауссовой аппроксимации стохастических неопределенностей и статистической линеаризации нелинейностей системы.

3. Разработана и исследована методика формирования управляющего сигнала автопилота БЛА с регулятором нечеткой логики, обеспечивающая требуемое качество управления в переходных и установившихся режимах объектом, не поддающимся точному формализованному описанию.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод аналитического синтеза закона управления БЛА для заданного критерия качества при наведении по траектории, проходящей через заданные точки пространства, отличающийся решением задачи оптимизации на основе математической модели наведения БЛА, описанной в дискретно изменяющейся системе координат, позволяющий формировать оптимальный закон управления в изменяющихся условиях применения БЛА.

2. Способ фаззификации сигналов нелинейной стохастической системы управления, основанный на статистической линеаризации нелинейностей математической модели системы управления БЛА, позволяющий в условиях наличия информационных неопределенностей получить функции принадлежности не поддающегося точному формализованному описанию сигнала управления для нечеткого регулятора автопилота БЛА.

3. Методика формирования управляющего сигнала автопилота БЛА на основе нечеткого регулятора, включающая алгоритмы формирования оптимальной траектории БЛА, фаззификации случайных входных сигналов,

вычисления параметров управления и получения управляющих сигналов автопилота БЛА, позволяющая обеспечить требуемое качество управления в условиях наличия информационных неопределенностей.

Личный вклад соискателя ученой степени

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.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на десятой, одиннадцатой и двенадцатой международных научно-технических конференциях БНТУ «Наука - образованию, производству, экономике» 2011 - 2014 гг., Полоцкого государственного университета, международных интернет-конференциях. Результаты диссертации также докладывались на научных семинарах кафедры «Информационные системы и технологии» и кафедры «Информационные технологии в управлении» Белорусского национального технического университета.

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликованы 4 научные статьи в рецензируемых журналах согласно перечня ВАК Республики Беларусь общим объемом 2.7 авторских листов, 4 статьи в других журналах, в том числе 3 за рубежом и 8 тезисов докладов на научных конференциях. Количество и объем публикаций по теме диссертации соответствуют пункту 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, трёх глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложения.

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, даётся обоснование круга рассмотренных вопросов. В первой главе проведён анализ БЛА и их математических моделей, обоснованы подходы к моделированию, разработан и исследован метод аналитического синтеза закона управления БЛА для заданного критерия качества при наведении по траектории, проходящей через заданные точки пространства. Во второй главе решаются задачи фаззификации сигналов нечеткого регулятора нелинейной

стохастической системы управления на основе статистической линейзации нелинейностей системы. В третьей главе приведена методика и алгоритмы реализации управления в автопилоте БЛА на основе нечеткого регулятора. В приложении приведен акт внедрения результатов диссертационной работы.

Общий объём диссертации составляет 118 страниц. В том числе: 99 страниц основного текста, 59 рисунков, 4 таблицы, расположенные в тексте диссертации, список использованных источников, насчитывающий 100 наименований и список публикаций автора по теме диссертации на 10 страницах, а также приложение на 1 странице.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении показана актуальность 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, проводится обоснование облика системы управления БЛА, анализ законов управления БЛА, обоснована структура математической модели БЛА. Основной задачей является создание системы управления (СУ) БЛА, которая будет регулировать отклонения управляющих поверхностей для полета БЛА по желаемой траектории. При обосновании математической модели, используемой для синтеза управлений БЛА, рассматриваются распространенные системы координат и известные модели элементов конструкции БЛА.

При анализе законов управления предполагается, что задачи оптимизации системы управления СУ БЛА необходимо решать в два этапа: аналитический синтез управлений в зависимости от поставленной задачи наведения для упрощённой математической модели – на первом этапе и решение задачи синтеза и параметрической оптимизации регулятора для полной математической модели БЛА – на втором этапе.

Так как одной из основных задач БЛА является мониторинг отдельных участков земной поверхности, то представляет интерес наведение БЛА по траектории, заданной опорными точками в инерциальной (стартовой) системе координат параметрами $(O^{(k)} X^{(k)} Y^{(k)} Z^{(k)})$, где k – номер точки пространства, через которую должна пройти траектория БЛА ($k = \overline{1, n}$), $O^{(k)}$ – точка начала отсчёта. Предлагается траекторию БЛА составлять из отдельных интервалов, на которых необходимо обеспечить оптимальное наведение БЛА с учётом выполнения требований точности и устойчивости траекторного наведения.

На рисунке 1 представлена предлагаемая кинематическая схема наведения БЛА в инерциальной (стартовой) системе координат. Для простоты

рассматривается наведение в горизонтальной плоскости. При этом пространственная модель принципиальных отличий иметь не будет. На рисунке 1 обозначено \vec{V} - вектор скорости БЛА. Считаем, что $|\vec{V}| = \text{const}$. $\nu^{(k)}$ - угол ориентации вектора скорости БЛА в конце k -го интервала наведения. $\vec{D}^{(k)}$ - вектор дальности от начальной до конечной точки k -го интервала наведения. $O^{(k)}$ - Начало заданной инерциальной системы координат на k -м интервале наведения.

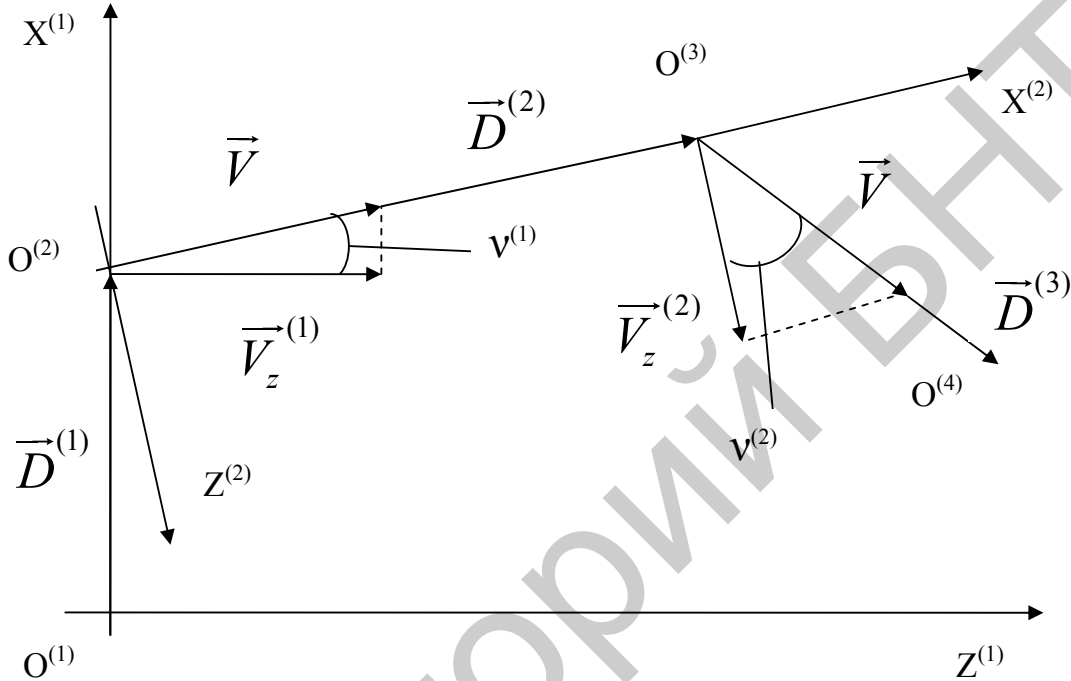


Рисунок 1. – Кинематическая схема наведения БЛА по заданному маршруту

Особенностью данной постановки задачи является задание на каждом интервале наведения новой инерциальной системы ординат ($O^{(k)}X^{(k)}Y^{(k)}Z^{(k)}$). На каждом интервале начало системы координат $O^{(k)}$ совпадает с исходной точкой траектории. Ось $O^{(k)}X^{(k)}$ направлена на следующую точку траектории. Ось $O^{(k)}Y^{(k)}$ направлена вертикально вверх. Ось $O^{(k)}Z^{(k)}$ составляет с осями $O^{(k)}X^{(k)}$ и $O^{(k)}Y^{(k)}$ правую систему координат.

Оптимальное управление (ускорение) БЛА определяется на k -м интервале наведения. Индекс k при этом для упрощения записи опустим. Критерий оптимизации будем рассматривать обычный для задач наведения квадратичный вида

$$J = \frac{1}{2} \left[c_1 (V_z - V_{зад})^2 + c_2 (Z - Z_{зад})^2 \right]_{t=t_f} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^t c_3 a_z^2 dt, \quad (1)$$

где t_f - момент встречи БЛА с требуемой точкой пространства. $V_{зад}$ заданное значение проекции скорости БЛА на ось $O^{(k)}Z^{(k)}$ соответствующей инерциальной системы координат в конце наведения на k -м интервале. $Z_{зад}$ -

боковая координата заданной точки траектории. c_1, c_2, c_3 – коэффициенты оптимизируемого функционала (1). Рассматривается движение БЛА относительно заданной (инерциальной) системы координат для наглядности в горизонтальной плоскости на k -м интервале наведения, которое описывается системой линейных дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}^{(k)} &= V_x^{(k)}, & X^{(k)}(0) &= X_0^{(k)}, \\ \dot{Z}^{(k)} &= V_z^{(k)}, & Z^{(k)}(0) &= Z_0^{(k)}, \\ \dot{V}_x^{(k)} &= a_x^{(k)}, & V_x^{(k)}(0) &= V_{x0}^{(k)}, \\ \dot{V}_z^{(k)} &= a_z^{(k)}, & V_z^{(k)}(0) &= V_{z0}^{(k)}. \end{aligned} \right\} (2)$$

Здесь $X^{(k)}, Z^{(k)}$ – координаты БЛА в k -й системе координат, $V_x^{(k)}, V_z^{(k)}$ – проекции вектора скорости БЛА \vec{V} на оси k -й системы координат. $a_x^{(k)}, a_z^{(k)}$ – проекции ускорения БЛА в k -й системе координат. В качестве управления будем рассматривать боковое ускорение БЛА $a_z^{(k)}(t)$.

Задача определения оптимального бокового ускорения $a_z(t)$, минимизирующего функционал (1), решается применением известных методов аналитического конструирования. При этом получено решение, которое для данной постановки задачи будет иметь вид

$$a_z(V_z, Z, t) = -\Lambda_v(t)[V_z(t) - V_{z\dot{c}\ddot{a}}] - \Lambda_z(t)[Z(t) - Z_{z\dot{c}\ddot{a}}], \quad (3)$$

где
$$\Lambda_v(t) = \frac{(1/c_2) + (1/c_1)(t_f - t)^2 + 1/3(t_f - t)^3}{D(t_f - t)}, \quad (4)$$

$$\Lambda_z(t) = \frac{(1/c_1)(t_f - t) + 1/2(t_f - t)^2}{D(t_f - t)}, \quad (5)$$

$$D(t_f - t) = \left[\frac{1}{c_2} + \frac{1}{3}(t_f - t)^3 \right] \left[\frac{1}{c_1} + t_f - t \right] - \frac{1}{4}(t_f - t)^4. \quad (6)$$

В частном случае можно принять $c_1 \rightarrow \infty$ и $c_2 \rightarrow \infty$. Это соответствует случаю, когда интегральным слагаемым функционала (1) можно пренебречь. Данное допущение справедливо в случае, когда БЛА обладает достаточным запасом топлива на траектории при относительно небольшой скорости полёта в отличие от ракеты, у которой значительные боковые перегрузки приводят к существенной потере скорости и следовательно – к потере управляемости на траектории полёта. Выражения (3)-(6) справедливы и для пространственной задачи наведения БЛА. При этом соответствующие координаты, скорости и ускорения БЛА могут быть заменены соответствующими трехмерными векторами.

В выражениях (3)-(6) $t_f - t = t_{i\dot{n}0}$ – время, оставшееся до встречи БЛА с очередной заданной точкой пространства. $V_{z\dot{a}d} = V_{z\dot{a}d}^{(k)} = V_z^{(k)}(t_f) \sin \nu_{z\dot{a}d}^{(k)}$, где

$V_z^{(k)}(t_f)$ – значение модуля скорости БЛА в момент окончания наведения на k -м интервале. $V_{\text{çää}}^{(k)}$ – заданный угол подхода БЛА к соответствующей точке траектории $O^{(k+1)}$, определяемый ориентацией вектора \vec{V} относительно системы координат $(O^{(k)} X^{(k)} Z^{(k)})$.

$$t_{\text{ocm}} = t_{\text{ocm}}^{(k)} = \frac{D^{(k)}}{|\dot{D}|^{(k)}}, \quad (7)$$

где $D^{(k)}$ – в данном случае текущая дальность БЛА до заданной точки $O^{(k+1)}$ на k -м интервале наведения, $|\dot{D}|^{(k)}$ – скорость сближения БЛА с точкой $O^{(k+1)}$.

В качестве примера рассматривается управление БЛА на k -м интервале траектории полёта. На рисунке 2 представлены графики изменения $V_z(t)$ и $a_z(t)$, полученные путём моделирования полета БЛА при следующих условиях применения: $X_0^{(k)} = 1000$ м, $V = 50$ м/с, $v^{(k)} = 60^\circ$.

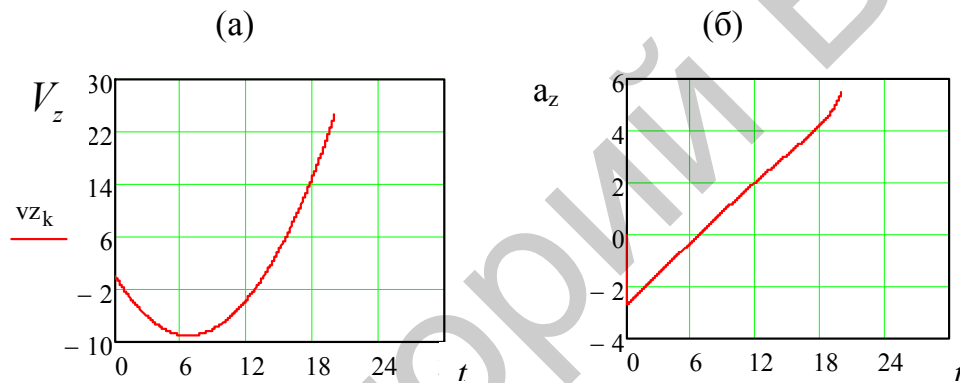


Рисунок 2. – Графики изменения скорости (а) и ускорения (б) БЛА

На рисунке 3 приведены траектории БЛА $X(Z)$ в метрах при $v^{(k)} = 60^\circ$ (а) и $v^{(k)} = 30^\circ$ (б) и тех же условиях наведения БЛА.

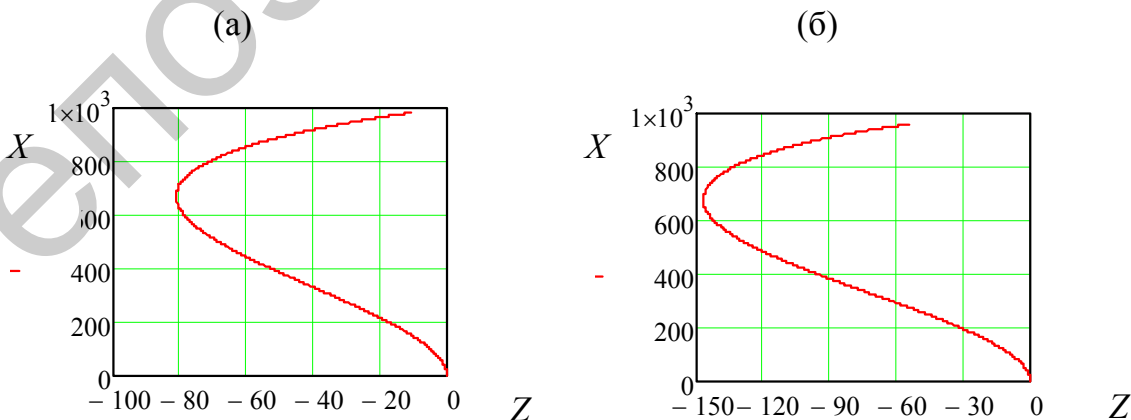


Рисунок 3. – Траектории БЛА при $v^{(k)} = 60^\circ$ (а) и $v^{(k)} = 30^\circ$ (б)

В результате математического моделирования траектории полета БЛА с разработанным законом управления установлено, что ошибки отклонения БЛА от конечной точки наведения в зависимости от заданного угла подхода к данной точке (вида траектории наведения) составляют от 7 до 20 метров, что вполне приемлемо для задач мониторинга земной поверхности с помощью БЛА с высот полета, составляющих для реальных БЛА не менее нескольких сотен метров

Во второй главе проведен анализ неопределенностей беспилотных инерциальных навигационных систем (БИНС) и неопределенностей спутниковых навигационных систем (СНС). Показано, что исходя из физической природы и математических моделей источников погрешностей БИНС и СНС, неопределенности их выходных сигналов представляют собой ряд систематических и случайных факторов, которые при формализации могут быть сведены к совокупности стохастических процессов, для которых могут быть составлены математические модели в виде формирующих фильтров. Следовательно, математические модели входных сигналов автопилота БЛА могут быть представлены совокупностью векторно-матричных стохастических дифференциальных уравнений в форме Ланжевена.

Решать задачи выделения полезного (однозначного) сигнала (параметра управления) из множества неопределенностей предлагается с помощью системы нечеткой логики (СНЛ). В таких системах неоднозначность того или иного значения параметра (сигнала) формализуется с помощью функций принадлежности, являющихся некоторым аналогом вероятностных характеристик неопределенностей. Так как входной сигнал автопилота БЛА является случайным, то блок фазификации СНЛ должен преобразовывать в нечёткие числа вероятностные данные. При этом должна быть определена процедура преобразования вероятностного значения сигнала управления в функцию принадлежности.

Математическая модель автопилота БЛА в общем случае может быть описана векторным нелинейным уравнением в виде

$$\dot{X}(t) = \varphi(X, t) + \xi(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (8)$$

где $X(t)$ - в общем случае n -мерный случайный вектор (матрица-столбец); $\varphi(X, t)$ - векторная детерминированная нелинейная функция с компонентами $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$; $\xi(t)$ - вектор белого гауссова шума, имеющий математическое ожидание $m_\xi(t)$ и матрицу интенсивностей $G(t)$.

Применив метод статистической линеаризации к векторной нелинейности $\varphi(X, t)$, получим линеаризованное уравнение

$$\dot{X}(t) = \varphi_0(m_x, \theta_x, t) + K(m_x, \theta_x, t)X + \xi(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (9)$$

где статистическая характеристика φ_0 и матрица K статистических коэффициентов усиления зависят от вектора математических ожиданий $m_x(t)$ и корреляционной матрицы $\theta_x(t)$. Статистические коэффициенты усиления K_i могут вычисляться любым из известных способов.

После несложных преобразований из выражения (9) получаются дифференциальные уравнения для вектора $m_x(t)$ и матрицы $\theta_x(t)$, решение которых позволяет в любой момент времени вычислить значения составляющих $m_x(t)$ и $\theta_x(t)$ для определения гауссовой плотности вероятности распределения $f(x)$ процесса $X(t)$.

Переход от плотности вероятности $f(x)$ к функции принадлежности $\mu(x)$ предлагается производить путём нормирования $f(x)$. При этом предполагается, что

$$\mu(x) = \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_n, t)}{f(x_1 = m_{x1}, x_2 = m_{x2}, \dots, x_n = m_{xn}, t)}. \quad (10)$$

Так как для практического применения в СНЛ используются, как правило, одномерные функции $\mu(x)$, то получение их из многомерной плотности вероятности не составляет труда, учитывая, что распределение компонент $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ вектора $X(t)$ также гауссово.

В качестве примера применения предложенного способа фаззификации сигнала управления нечеткого регулятора рассмотрена система автоматической стабилизации БЛА по крену, которая должна обеспечить полет БЛА с заданным углом крена, несмотря на воздействие возмущающего момента M_b , стремящегося развернуть БЛА относительно продольной оси. Считается, что система управления содержит гироскопические измерительные устройства, измеряющие угол крена γ и угловую скорость крена $\dot{\gamma}$. Показание измерителей в виде суммарного напряжения u , подаваемого на привод элеронов описывается выражением

$$u = k_\gamma \gamma + k_{\dot{\gamma}} \dot{\gamma}. \quad (11)$$

$\varphi(u)$ - нелинейная функция, характеризующая в данном случае ограничения в отклонении элеронов.

Уравнение для угла крена имеет вид

$$J_{xx} \ddot{\gamma} + m_x^\gamma \dot{\gamma} + m_x^\delta \varphi(k_\gamma \gamma + k_{\dot{\gamma}} \dot{\gamma}) = M_b, \quad (12)$$

где J_{xx} - момент инерции БЛА относительно продольной оси, коэффициенты m_x^γ и m_x^δ зависят от конструкции БЛА и его параметров полета. M_b является входной переменной. $\varphi(u)$ - нелинейная функция, характеризующая в данном случае ограничения в отклонении элеронов

Для определения математического ожидания и дисперсии крена составлены уравнения для вероятностных моментов m_γ и θ_γ , предварительно

перепишав уравнение системы (13) в форме Коши и статистически линеаризовав математическую модель нелинейности $\varphi(u)$, записав её в виде

$$\varphi(u) = \varphi_0(m_u, \theta_u) + k_1(m_u, \theta_u)(u - m_u), \quad (13)$$

где φ_0 и k_1 - статистические параметры линеаризации для данной нелинейности, зависящие от переменных m_u и θ_u , вычисляемых путём решения уравнений для вероятностных моментов.

Выражения для коэффициентов статистической линеаризации нелинейности типа (12) вычисляются известными способами. Для гауссовой плотности вероятности распределения параметра управления γ автопилота получены выражения для плотности вероятности $f(\gamma)$ и функции принадлежности $\mu(\gamma)$.

$$f(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\theta_\gamma}} \exp\left(-\frac{(u - m_\gamma)^2}{2\theta_\gamma}\right), \quad (14)$$

$$\mu(\gamma) = \exp\left(-\frac{(u - m_\gamma)^2}{2\theta_\gamma}\right). \quad (15)$$

Математическим моделированием проведено исследование разработанной методики определения функции $\mu(\gamma)$ при следующих условиях: $J_{xx}=0.9$, $m_x^s=0.17$, $m_x^z=0.25$, $m_x(t)=0.09$, $K=3$, $T_1=0.01$, $m_1(0)=m_2(0)=0$, $G=9$. На рисунке 4 представлены графики изменения во времени $t=t_k$ математического ожидания $m_\gamma = m1_k$ и дисперсии $\theta_\gamma = \theta1_k$ угла крена БЛА.

На рисунке 5 представлены графики изменения коэффициентов статистической линеаризации $\varphi_0(m_u, \theta_u)$ и $k_1(m_u, \theta_u)$.

На рисунке 6 представлены графики изменения плотности вероятности $f_1(u)$ и $f_2(u)$ и функции принадлежности $\mu_1(u)$ и $\mu_2(u)$ в моменты времени $t_1=0.01c$ и $t_2=1c$, соответственно.

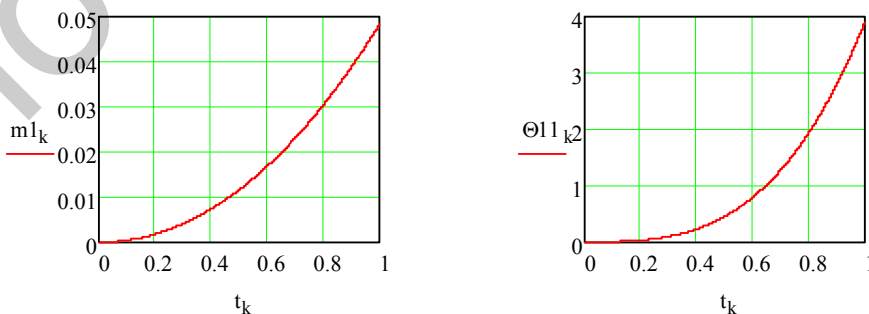


Рисунок 4. - Математическое ожидание и дисперсия угла крена БЛА

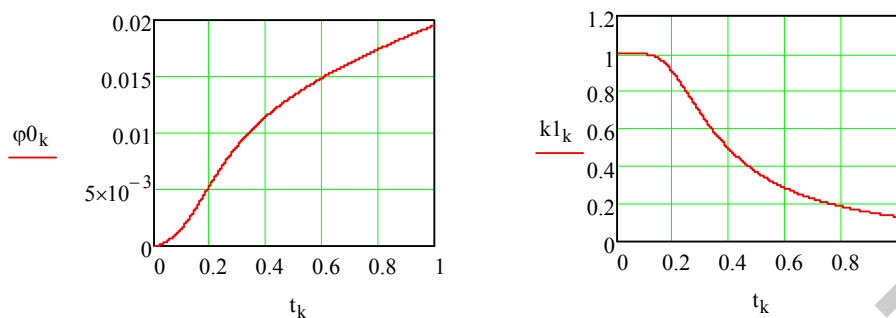


Рисунок 5. - Коэффициенты статистической линеаризации

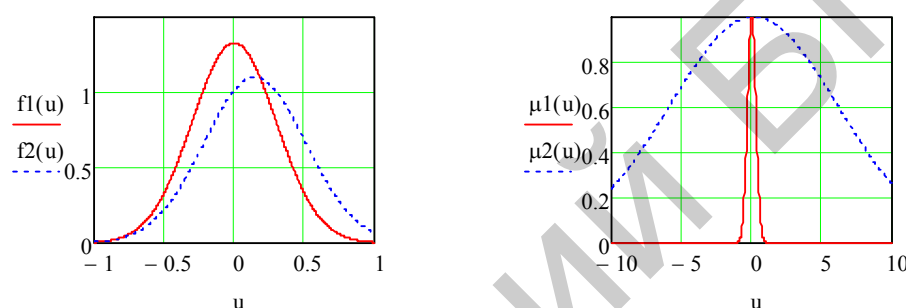


Рисунок 6. - Плотности вероятности и функции принадлежности

Результаты математического моделирования показывают, что применение статистической линеаризации недифференцируемых функций нелинейностей при гауссовой аппроксимации плотности вероятности распределения фазовых координат динамической системы позволяет вычислять функцию принадлежности выходных параметров данной системы. Полученная таким способом функция принадлежности используется в качестве параметра управления нечеткого регулятора автопилота БЛА.

Третья глава посвящена разработке и оптимизации автопилота БЛА на основе нечеткого регулятора. Проведенный анализ принципов построения автопилотов беспилотных летательных аппаратов показал общие закономерности их математического описания и моделирования. В качестве примера рассматривается упрощенная структурная схема системы управления угловой ориентацией БЛА, представленная на рисунке 7.

Система управления представлена приближенной с передаточной функцией вида

$$W(s) = \frac{47.645}{s^2 + 8.376\zeta s + 47.645}. \quad (16)$$

На вход нечеткого контроллера поступают сигнал ошибки e и изменения в ошибке \dot{e} в виде функций принадлежности, имеющей семь диапазонов (рисунок 8).

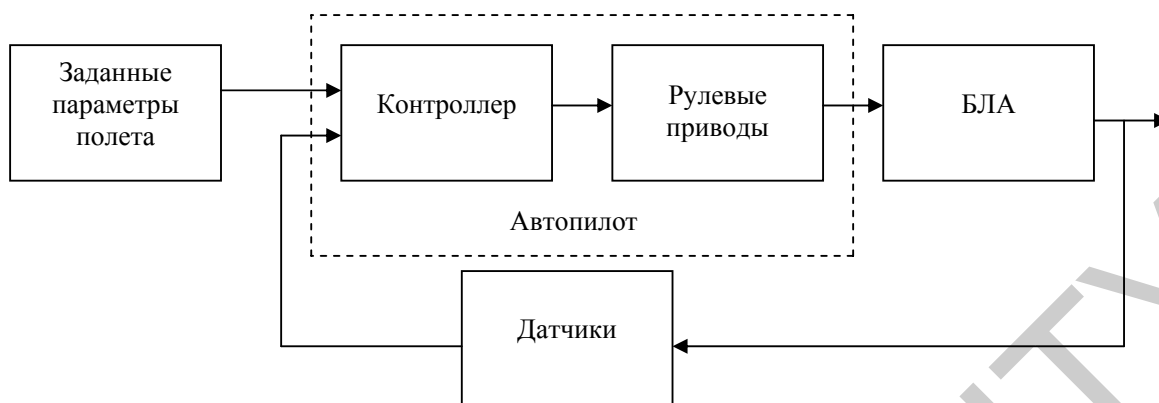


Рисунок 7. – Структурная схема системы управления БЛА

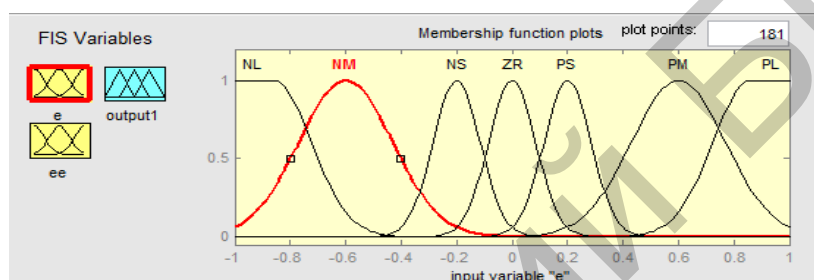


Рисунок 8. – Функции принадлежности для входных сигналов e и ee

Диапазоны обозначены следующим образом: отрицательный большой (NL), отрицательный средний (NM), отрицательный малый (NS), нулевой (Z), положительный малый (PS), положительный средний (PM) и положительный большой (PL). На рисунке 9 представлены функции принадлежности выходного сигнала управления контроллера автопилота БЛА.

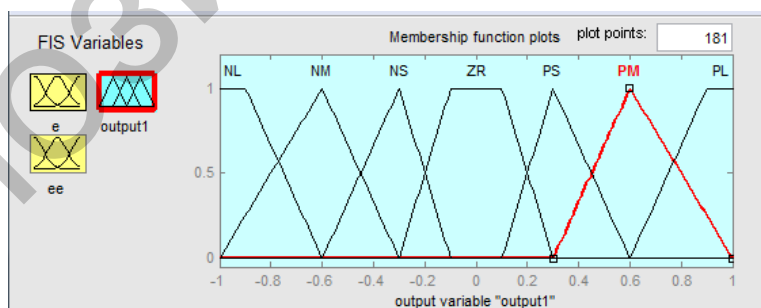


Рисунок 9. – Функция принадлежности выхода нечеткого контроллера

В таблице 1 для данного примера приведены правила нечеткой логики ЕСЛИ-ТО контроллера с использованием метода Мамдани.

На рисунке 10 приведена зависимость выходной переменной (поверхность отклика) от входных переменных для гауссовых функций принадлежности входных сигналов.

Таблица 1. – Правила нечеткой логики контроллера

Диапазон ФП переменной (ee)	Диапазон ФП переменной (e)						
	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NM	NS	NS	ZR
NM	NL	NL	NM	NS	NS	ZR	PS
NS	NL	NM	NS	NS	ZR	PS	PM
ZR	NM	NM	NS	ZR	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZR	PS	PS	PM	PL
PM	NS	ZR	PS	PS	PM	PL	PL
PL	ZR	PS	PS	PM	PL	PL	PL

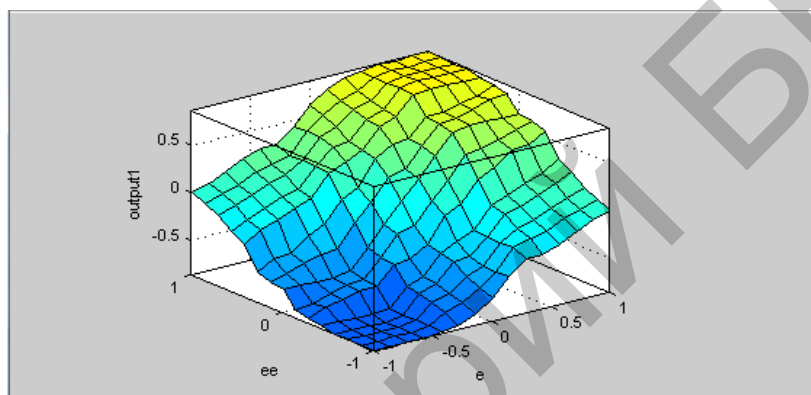


Рисунок 10. – Поверхность отклика

На рисунке 11 приведен график изменения выходного сигнала автопилота БЛА, полученного путем моделирования в среде Matlab-Simulink при входном сигнале в виде последовательности прямоугольных импульсов заданного угла крена.

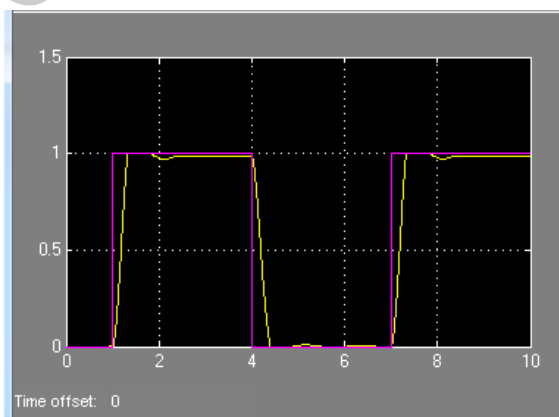


Рисунок 11. – Выходной сигнал системы

Проведенные исследования динамических свойств различных математических моделей автопилотов показали, что при использовании треугольных функций принадлежности результат управления оказывается несколько лучше, чем при использовании гауссовых функций принадлежности, что обусловлено особенностями обработки сигналов в конкретной Simulink-схеме.

Так как создать точную математическую модель автопилота, адекватную реальному объекту, на практике не удается, то необходимо после аналитического синтеза проводить дополнительно оптимизацию (подстройку) параметров регулятора. Для решения данной задачи выбран сеточно-параметрический метод, основанный на программной реализации численных методов решения дифференциальных и интегральных уравнений, представленных в виде разностных (сеточных) схем.

Задача безусловной оптимизации параметров автопилота БЛА ставится следующим образом: найти $\min F(X)$, где D — область пространства, в которой ведется поиск; X — m -мерный вектор переменных автопилота; $F(X)$ — заданная функция n переменных, определенная в области D .

Определим глобальный минимум $F(X)$ как наименьший из всех локальных, т.е. точка X^* является точкой глобального минимума на области, определенной выше, если справедливо неравенство $F(X^*) \leq F(X)$, $\forall X \in D$. Быстродействие автопилота оценивается с помощью ее линеаризованной модели по собственным значениям матрицы динамики (корням характеристического уравнения). Цель оптимизации — выбор параметров системы, обеспечивающих при условии ее устойчивости минимальное время переходного процесса.

В качестве примера автопилота БЛА рассмотрена система управления, передаточная функция которой имеет вид

$$W(s) = \frac{K_1(T_2s + 1)}{T_1s + 1}, \quad (17)$$

где T_1 и T_2 — постоянные времена, (K_1 — коэффициент передачи прямой цепи системы, размерности Гц/В). Оптимизация параметров системы производится в области $0,1 \cdot 10^6 \leq K_1 \leq 0,1 \cdot 10^9$, $0,2 \cdot 10^{-7} \leq T_1 \leq 0,2 \cdot 10^{-6}$, $0,3 \cdot 10^{-7} \leq T_2 \leq 0,3 \cdot 10^{-6}$. После выполнения оптимизации получены значения минимума целевой функции имеем оптимальные значения параметров автопилота: $K_1 = 1,883125 \cdot 10^8$ Гц/В; $T_1 = 0,5374999 \cdot 10^{-7}$ с; $T_2 = 0,4687499 \cdot 10^{-7}$ с. Минимальное время переходного процесса составило $0,648 \cdot 10^{-5}$ с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе анализа принципов построения БЛА и функционального предназначения всех его подсистем определена структура математической модели, включающей в себя блоки моделирования как подсистем БЛА, так и внешних факторов, влияющих на их функционирование. Принципы построения данной модели применимы как для аналитического, так и для имитационного моделирования управления полетом БЛА на всех этапах его применения.

Предложенный метод аналитического синтеза закона управления перегрузкой БЛА на этапе предварительной разработки системы управления позволяет получить оптимальный для заданного критерия качества закон управления при наведении БЛА по траектории, проходящей через заданные точки пространства [2-А, 5-А, 15-А].

Реализация разработанного закона управления перегрузкой в автопилоте беспилотного или пилотируемого летательного аппарата представляет собой известную задачу синтеза регулятора, решение которой определяется заданными энерго-баллистическими и аэродинамическими характеристиками конкретного летательного аппарата.

В результате математического моделирования полета БЛА с разработанным законом управления установлено, что ошибки отклонения БЛА от конечной точки наведения в зависимости от угла $v^{(k)}$ составляют от 7 до 20 метров, что для задач мониторинга земной поверхности с помощью БЛА с высот сотен метров вполне приемлемо [2-А, 11-А].

2. Проведенный анализ неопределенностей бесплатформенных инерциальных навигационных систем и спутниковых навигационных систем, которые являются источниками входной информации системы управления БЛА, показал, что математические модели их выходных сигналов с учетом ошибок и помех представляют собой случайные марковские процессы, которые могут быть формализованы в виде векторных стохастических дифференциальных уравнений в форме Ланжевена относительно переменных, характеризующих состояние системы и уравнений Фоккера-Планка-Колмогорова для функции плотности распределения вероятности.

Применение метода статистической линеаризации к не дифференцируемым нелинейным функциям математической модели системы управления БЛА позволяет составить систему дифференциальных уравнений для математических ожиданий и корреляционных моментов фазовых координат системы управления. На основе решения данных уравнений для моментов получаются необходимые параметры гауссовой плотности вероятности,

используемой для аппроксимации вычисляемых функций принадлежности системы нечеткой логики, используемой в автопилоте БЛА [1-А, 6-А].

3. Определение с помощью систем нечеткой логики полезного сигнала из совокупности случайных шумов и неопределенностей в отличие от традиционных алгоритмов оптимального оценивания (фильтрации) переменных, характеризующих состояние системы, может позволить избежать нежелательного эффекта расходимости алгоритмов оценивания. При этом имеется возможность учета статистического характера процессов, происходящих в системе, и использования дополнительной информации, в том числе – априорной, необходимой для получения нужного результата управления [1-А, 6-А, 10-А].

4. При анализе принципов построения автопилотов беспилотных летательных аппаратов выявлены общие закономерности построения их математических моделей. При этом конкретные виды законов управления определяются назначением, конструкцией БЛА, типом системы управления и методом наведения. Эти законы управления можно получить аналитически на основе математической модели конкретного БЛА.

Применение нечетких регуляторов в автопилотах беспилотных летательных аппаратов позволяет обеспечить управление объектами, которые не поддаются формализованному математическому описанию, и позволяет получить требуемое качество управления в переходных и установившихся режимах работы системы управления. Результаты математического моделирования работы автопилота БЛА с нечетким регулятором показали, что требуемые динамические свойства БЛА обеспечиваются при относительно простой реализации регулятора. При этом вид функций принадлежности нечеткого регулятора определяется особенностями обработки сигналов в конкретной Simulink-схеме, используемой для моделирования системы управления [3-А, 9-А, 12-А, 14-А].

5. Для параметрической оптимизации автопилота БЛА представляется перспективным сеточно-параметрический метод, основанный на программной реализации одного из численных методов решения дифференциальных или интегральных уравнений, представленных в виде разностных (сеточных) схем. Для автопилота БЛА предложен и исследован метод оптимального параметрического синтеза по критерию максимального быстродействия. Метод обладает малыми затратами машинного времени и применим для математических моделей автопилота высокой размерности. Результаты исследований, проведенных путем математического моделирования, показали, что применение данного метода позволяет определить оптимальные значения параметров, обеспечивающие эффективную работу автопилота БЛА [4-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученную в диссертационной работе совокупность научных результатов можно квалифицировать как возможное направление в области задач аналитического исследования систем управления беспилотных летательных аппаратов, в том числе применительно к решению задач синтеза нечетких регуляторов для обеспечения требуемых динамических свойств системы.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы в организациях занимающихся вопросами анализа и синтеза систем автоматического управления техническими объектами, а также – в учебном процессе учреждений образования Республики Беларусь и Республики Ирак.

Работа выполнена на действующих основных фондах и не требует дополнительных капитальных вложений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1-А. Аль-Машхадани, М.А. Фаззификация сигналов нелинейной стохастической системы / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Вестник БНТУ. – 2013. – № 2. – С. 28-32.

2-А. Аль-Машхадани, М.А. Сеточно-параметрическая оптимизация дискретных систем с фазовым управлением / А.А. Лобатый, Л.В. Русак, М.А. Аль-Машхадани // Системный анализ и прикладная информатика. – 2013. – № 1-2. – С. 13-16.

3-А. AL-Mashhadani, M.A. Optimal and PID Controller for controlling Camera's Position in Unmanned Aerial Vehicles / M.A. AL-Mashhadani // International Journal of Information Technology, Modeling and Computing (IJITMC). – 2013. – Vol.1 № 4. – P. 23-31.

4-А. AL-Mashhadani, M.A. Fuzzy logic controller for cooling process in refinery / M.A. AL-Mashhadani / LAP Lambert Academic Publishing , Germany. – 2013. – P.72

5-А. AL-Mashhadani, M.A. Fuzzification mode for signal in nonlinear stochastic systems / M.A. AL-Mashhadani , A.A. Lobaty // International Journal of Information Technology, Control and Automation (IJITCA) – January 2013. – Vol.3 № 1. – P. 71-83.

6-А. Аль-Машхадани, М.А. Интервально-оптимальное программное управление летательным аппаратом / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Вестник БНТУ. – 2014. – №.1 – С. 25-29.

7-А. Аль-Машхадани, М.А. Обеспечение требуемых динамических свойств системы с помощью нечеткого регулятора / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Вестник БНТУ. – 2014. – №.3 – С. 7-11.

8-А. AL-Mashhadani, M.A. Flight path control for unmanned aerial vehicle / M.A. AL-Mashhadani // System analysis and applied information science. – 2014. – № 1-3. – P. 38-40.

Материалы конференций

9-А. AL-Mashhadani, M.A. Fuzzy logic control system for industrial parameters regulation / M.A. AL-Mashhadani, S. Kukhta // Materials of junior researchers' conference PSU. – Novopolotsk, 2010. – P. 124-126.

10-А. Аль-Машхадани, М.А. Цифровой регулятор в системе управления беспилотным летательным аппаратом / М.А. Аль-Машхадани // Материалы десятой международной научно-технической конференции БНТУ. – Минск, 2012. – С. 279.

11-А. Аль-Машхадани, М.А. Определение функции принадлежности выходных сигналов нелинейной системы / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Материалы десятой международной научно-технической конференции БНТУ. – Минск, 2012. – С. 289.

12-А. Аль-Машхадани, М.А. Параметрическая оптимизация регулятора при наличии неопределённостей / А.А.Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции БНТУ. – Минск, 2013. – С. 190.

13-А. Аль-Машхадани, М.А. Сравнительный анализ регуляторов системы управления / М.А. Аль-Машхадани // Материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции БНТУ. – Минск, 2013. – С. 192.

14-А. Аль-Машхадани, М.А. Нечеткий регулятор автопилота подвижного объекта / М.А. Аль-Машхадани // Материалы двенадцатой международной научно-технической конференции БНТУ. – Минск, 2014. – С. 192.

15-А. Аль-Машхадани, М.А. Оптимизация управления беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Материалы двенадцатой международной научно-технической конференции БНТУ. – Минск, 2014. – С. 193.

16-А. AL-Mashhadani, M.A. Design a control system for the movements of camera in unmanned aerial vehicles(UAV) / M.A. AL-Mashhadani, A.A. Lobaty // Materials of VI of junior researchers' conference PSU. – Novopolotsk, 2014. – P. 120-123.

РЭЗІЮМЭ

Аль-Машхадані Махаммед Абдулрахман

Сінтэз праграмага кіравання беспілотным лятальным апаратам ва ўмовах інфармацыйных нявызначанасцяў

Ключавыя словы: кіраванне, матэматычная мадэль, нявызначанасці, фазіфікацыя, невыразны рэгулятар.

Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка алгарытмаў апрацоўкі інфармацыі для кіравання беспілотным лятальным апаратам (БЛА) ва ўмовах наяўнасці інфармацыйных нявызначанасцяў.

Пры правядзенні навуковых даследаванняў выкарыстоўваліся класічныя і сучасныя метады аптымізацыі сістэм кіравання па зададзенаму крытэру, метады карэляцыйнага аналізу нелінейных стахастычных сістэм, элементы тэорыі недакладных мностваў.

Прапанаваны метады сінтэзу закона кіравання БЛА для зададзенага крытэра якасці, які дазваляе рэалізаваць аптымальную траекторыю, якая праходзіць праз канкрэтныя кропкі прасторы, заснаваны на вырашэнні задачы аптымізацыі для матэматычнай мадэлі сістэмы навядзення, апісанай у зменлівай прасторавай сістэме каардынатаў.

Распрацаваны спосаб атрымання функцый прыналежнасці сігналу кіравання невыразнага рэгулятара нелінейнай сістэмы, заснаваны на гаусавой апраксімацыі стахастычных нявызначанасцяў і статыстычнай лінеарізацыі нелінейнасцяў сістэмы.

Распрацавана і даследавана метадыка фарміравання кіравальнага сігналу аўтапілота БЛА з рэгулятарам невыразнай логікі, якая забяспечвае патрэбную якасць кіравання ў пераходных і ўсталяваных рэжымах аб'ектам, які не паддаецца дакладнаму фармалізаванаму апісанню.

Распрацаваныя метадыкі і алгарытмы могуць быць выкарыстаны ў арганізацыях, якія займаюцца пытаннямі аналізу і сінтэзу сістэм аўтаматычнага кіравання тэхнічнымі аб'ектамі.

РЕЗЮМЕ

Аль-Машхадани Мохаммед Абдулрахман

Синтез программного управления беспилотным летательным аппаратом в условиях информационных неопределенностей

Ключевые слова: управление, математическая модель, неопределенности, фазсификация, нечеткий регулятор.

Целью работы является разработка алгоритмов обработки информации для управления беспилотным летательным аппаратом (БЛА) в условиях наличия информационных неопределенностей.

При проведении научных исследований использовались классические и современные методы оптимизации систем управления по заданному критерию, методы корреляционного анализа нелинейных стохастических систем, элементы теории нечетких множеств.

Предложен метод синтеза закона управления БЛА для заданного критерия качества, позволяющий реализовать оптимальную траекторию, проходящую через конкретные точки пространства, основанный на решении задачи оптимизации для математической модели системы наведения, описанной в изменяющейся пространственной системе координат

Разработан способ получения функций принадлежности сигнала управления нечеткого регулятора нелинейной системы, основанный на гауссовой аппроксимации стохастических неопределенностей и статистической линеаризации нелинейностей системы.

Разработана и исследована методика формирования управляющего сигнала автопилота БЛА с регулятором нечеткой логики, обеспечивающая требуемое качество управления в переходных и установившихся режимах объектом, не поддающимся точному формализованному описанию.

Разработанные методики и алгоритмы могут быть использованы в организациях занимающихся вопросами анализа и синтеза систем автоматического управления техническими объектами.

Полученная в диссертационной работе совокупность научных результатов является возможным направлением в области задач анализа и аналитического синтеза систем управления БЛА, обеспечивающим повышение эффективности их применения.

SUMMARY

AL-Mashhadani Mohammad Abdulrahman

Synthesis of program control for unmanned aerial vehicles in conditions of uncertainty information

Keywords: control, mathematical model, uncertainty, fuzzification, fuzzy controller.

The aim is to develop a data processing algorithm for controlling unmanned aerial vehicles (UAVs) in the presence of information uncertainty.

For research use classical and modern methods of optimization of control systems according to predetermined criteria, methods of correlation analysis of nonlinear stochastic systems, elements of the theory of fuzzy sets.

The method of synthesis of the control law UAVs for a given quality criterion that allows to implement the optimal trajectory passing through the specific point in space, based on the solution of the optimization problem to a mathematical model of the guidance system, described in a changing spatial coordinate system

A method for producing a control signal of membership functions of fuzzy control of nonlinear system based on the Gaussian approximation of stochastic uncertainties and statistical linearization of the nonlinear system.

Developed and investigated methods of control signal generation in UAV's autopilot with fuzzy logic controller, which provides the required quality control in transient and steady state conditions the object cannot be precisely formalized description.

Methods and algorithms can be used in organizations concerned with the analysis and synthesis of automatic control systems of technical objects.

Obtained in the thesis collection of scientific results is a possible direction in problems of analysis and analytical synthesis of control systems UAV, providing increased efficiency of their application

Научное издание

АЛЬ-МАШХАДАНИ
Мохаммед Абдулрахман

СИНТЕЗ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ
ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННЫХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Подписано в печать 10.11.2014. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,22. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 60. Заказ 983.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.