

На правах рукописи

Савицкий Александр Владимирович

**Динамика и алгоритмы управления мультироторным
роботом**

Специальность 01.02.01 – теоретическая механика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019 год

Работа выполнена на кафедре теоретической механики и мехатроники механико-математического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
ИПМ им. М.В.Келдыша РАН
Павловский Владимир Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической механики
Волгоградского государственного технического
университета, г. Волгоград
Брискин Евгений Самуилович

доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой теоретической механики
Самарского национального исследовательского
университета имени академика С.П. Королева,
г. Самара
Асланов Владимир Степанович

Ведущая организация: Балтийский государственный
технический университет "Военмех"
им.Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург

Защита состоится _____ 2019 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.01, созданного на базе ФГУ „ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН“, по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, <http://keldysh.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., 4, ученому секретарю диссертационного совета Д002.024.01.

Автореферат разослан _____ 2019 года.
Телефон для справок: +7 (499) 250-78-66.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.024.01 к.ф.-м.н.

_____ М.Г.Широбоков

Общая характеристика работы

В работе проводится аналитическое и численное исследование динамики и алгоритмов управления движением роторных беспилотных летательных аппаратов. Описаны основные аэродинамические эффекты. Построена мехатронная модель робота с n роторами. На примере квадрокоптера описано решение обратной задачи динамики для нахождения управляющих воздействий. Изучены такие фигуры высшего пилотажа, как полет по вертикальной окружности, горка, полет по винтовой линии и другие. Составлен алфавит базовых траекторий, включающий в себя поворот в плоскости робота (изменение угла рысканья), полет по прямой, взлет-парение-посадка.

Предложен нейросетевой алгоритм синтеза управляющих воздействий. Описаны основные блоки нейросетевого контроллера. На основании построенных решений обратной задачи динамики составлена обучающая выборка. Рассмотрена эффективность работы нейросетевого контроллера на некоторых базовых траекториях. Представлены результаты его работы, в том числе для случая наличия погрешности позиционного датчика.

Актуальность темы

Беспилотные летательные аппараты являются одной из самых быстроразвивающихся областей робототехники. За последние несколько лет появилось большое количество самых разных моделей. Уже сейчас их активно применяют для изучения состояния магистральных трубопроводов, линий электропередач, хранилищ нефтепродуктов, сельскохозяйственных угодий, для транспортировки грузов, внесения средств химической защиты растений и многих других сферах. В большинстве случаев полет осуществляется либо под непосредственным управлением пилота, либо оператором задается набор координат опорных точек и аппарат автоматически реализует траекторию, проходящую через отмеченные точки. При этом более эффективное выполнение некоторых задач возможно при повышении уровня автономности беспилотных летательных аппаратов и минимизации роли пилота.

В настоящее время существуют коммерческие программно-аппаратные продукты, которые успешно реализуют нижеуровневое управление, и могут быть установлены на самые разные летательные аппараты. Например, полетный контроллер $N3$ китайской фирмы DJI имеет встроенную систему стабилизации, которая позволяет оказывать сопротивляемость ветру силой до 10 м/с. Однако недостатком этого продукта является огра-

ниченность его функционала и невозможность вносить корректировки в программную часть из-за коммерческой защищенности. В связи с этим возникает актуальная задача создания более гибких для программирования и открытых адаптивных систем управления.

В зависимости от выполняемой задачи в процессе полета могут возникать различные внешние возмущения или преграды, которые зачастую заранее сложно смоделировать или обнаружить. Поэтому одной из целей данной работы являлось создание алгоритма управления способного быстро реагировать на непрогнозируемые факторы. Особенно актуально создание подобных систем для совершения полетов в непосредственной близости от людей или промышленных объектов, чтобы в экстренном случае летательный аппарат мог совершить безопасную аварийную посадку. Одним из примеров таких внешних факторов может быть поломка пропеллера для мультироторного робота или крыла для аппарата самолетного типа. Уже сейчас ряд компаний и научных групп ведут разработки адаптивных систем быстрой идентификации поломки и экстренной посадки, в том числе с использованием нейронных сетей.

Практически во всех приложениях беспилотные летательные аппараты имеют различное навесное оборудование и зачастую это такие высокоточные приборы как мультиспектральные камеры, тепловизоры, фотокамеры высокого разрешения, камеры ночного видения и другие. Эта аппаратура имеет определенные допуски к перегрузкам, которые зачастую возникают при совершении посадки. Жесткая посадка у мультироторных роботов возникает отчасти из-за того, что на небольшой высоте на летательный аппарат начинает действовать переменная направленная сила, вызванная экранированием воздушных потоков винтов от поверхности, на которую совершается посадка. Для решения данной проблемы требуются адаптивные алгоритмы управления, способные осуществлять стабилизацию летательного аппарата в непосредственной близости от земли. Примером такого решения является нейросетевой контроллер, разработанный командой ученых из Корнельского Университета.

Таким образом, задачи исследования динамики движения и синтеза управляющих воздействий мультироторного робота актуальны в связи с возрастающими требованиями к их маневренности в условиях необходимости проведения быстрых вычислений, адаптации к непрогнозируемым внешним воздействиям, наличию погрешности измерительных систем. В настоящее

время летательные роботы используются в лабораториях научных институтов и университетов, разрабатываются и модернизируются на различных предприятиях для решения специальных задач, включаются в образовательные программы и участвуют в соревнованиях, входят в повседневную жизнь человека в виде игровых устройств.

Однако несмотря на большое количество проводимых исследований в области изучения управления мультироторными летательными аппаратами, актуальными в настоящее время остаются задачи, связанные с созданием адаптивных алгоритмов управления. Это связано с тем, что мультироторные роботы являются системами с дефицитом управляющих воздействий. Также в практических задачах могут возникать различные внешние условия, которые необходимо анализировать в процессе полета и при необходимости корректировать управления с высоким быстродействием. Приведенные в работе новые методы, основанные на гибридном нейросетевом алгоритме управления, решают эти проблемы.

Цель работы заключается в исследовании динамики и построении нового алгоритма управления мультироторным роботом, основанного на нейросетевом контроллере.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- составить теоретико-механическую модель мультироторного робота с учетом основных аэродинамических эффектов, позволяющую исследовать различные алгоритмы управления;
- решить обратную задачу динамики для синтеза управляющих воздействий для квадрокоптера, описать некоторые плоские и пространственные траектории;
- составить алфавит базовых траекторий, на основании которого получить данные для обучающей выборки для нейронной сети;
- разработать нейросетевой контроллер для синтеза управляющих воздействий на винты пропеллера, изучить его работу для случая отсутствия внешних факторов;
- исследовать влияние погрешности измерений и шумов датчиков на работу нейросетевого регулятора, определить границы работоспособности предложенного алгоритма.

Научная новизна:

1. Впервые составлена теоретико-механическая модель n -роторного (где $n > 3$) летательного аппарата в общем виде, с учетом основных аэродинамических эффектов. Для общего случая (для недоопределенной задачи при $n > 4$) предложены условия распределения силы тяги несущих винтов для повышения маневренности и более эффективного распределения нагрузки управляющих воздействий.
2. Описана последовательность решения обратной задачи динамики для квадрокоптера, описаны частные решения для некоторых траекторий, составлен алфавит базовых траекторий, последовательная реализация которых позволит переместить центр масс робота из одной точки в другую.
3. Предложен алгоритм гибридного нейросетевого контроллера, в основе которого лежит нейронная сеть, обучение которой проходило на семействе базовых траекторий, полученных из решения обратной задачи. Описан новый подход к решению таких проблем управления, как наличие погрешности датчиков.

Практическая значимость. Одним из наиболее перспективных направлений развития беспилотных летательных аппаратов является повышение уровня их автономности и безопасности. Это достигается за счет усложнения алгоритмов управления и создания новых подходов к преодолению трудно моделируемых внешних факторов.

Предложенный алгоритм носит теоретический и практический характер. Построенным методом можно составлять обучающую выборку и синтезировать управляющие воздействия реальных беспилотных летательных аппаратов, например, для осуществления плавной посадки. Кроме того, разработанный нейросетевой контроллер может быть практически применим в задачах с относительно высоко погрешностью датчиков, вызванной, например, сложными погодными условиями или задымлением.

Ценностью предложенного метода является быстрое действие предложенных алгоритмов за счет использования нейронной сети. Это может быть актуально для повышения маневренности и сохранения устойчивости в воздействии внешних факторов, например, появления порыва ветра.

Также найденные в общем виде решения обратной задачи динамики для алфавита базовых траекторий могут стать основой для составления эталонных траекторий для робота и траектории его движения с требуемыми

параметрами.

Методы решения задачи

Поставленные задачи решаются с применением аналитических расчетов и методов теоретической механики; для вспомогательных вычислений и моделирования используется математический пакет «Matlab».

Обоснованность результатов определяется полнотой и корректностью выбранной теоретико-механической модели мультироторного робота, строгими методами аналитического исследования движения механических систем, применением для математических расчетов известных и отработанных пакетов интегрирования и построения нейронных сетей «Matlab».

Апробация работы: Основные результаты докладывались на:

1. Конференции «The 2014 International Conference On Continuum Mechanics», Санторини, (2014 г.);
2. Конференции «Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием», Казань, (2014 г.);
3. Конференции «НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2015», Москва, (2015 г.);
4. Конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», Коломна, (2015 г.);
5. Семинарах механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва (2015, 2016, 2017 гг.).

Личный вклад. Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема теоретических исследований, численного моделирования и анализа полученных результатов, изложенных в диссертационной работе, включая разработку теоретико-механической модели, методик и разработку и реализацию алгоритмов, анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов.

В опубликованных работах В.Е.Павловскому принадлежит постановка задачи и обсуждение результатов ее решения.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в семи печатных изданиях [1-7], четыре из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, два — в тезисах докладов.

Содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, списка литературы и приложений.

Во **введении** описаны основные типы мультироторных летательных аппаратов, сферы их практического применения. Кроме того, описаны основные подходы к управлению данными летательными аппаратами. Приведен обзор научных и инженерных трудов, относящихся к теме диссертационной работы. Обосновывается актуальность темы исследований, формулируются цели и задачи работы. Сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** представлена теоретико-механическая модель мультироторного робота как системы твердых тел с шестью степенями свободы $q = (x, y, z, \varphi, \psi, \theta)$ и n векторами тяги u_i . Введены основные предположения касательно характера движений, твердых тел, из которых состоит робот, характера аэродинамических эффектов. Введена модель подъемной силы и момента сопротивления воздуха как функции от скорости вращений винтов $\dot{\gamma}_i$. Выписан Лагранжиан для общего случая с n роторами:

$$L(q, \dot{q}) = T_{trans} + T_{rot} - U = \frac{M}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2}A(\dot{\theta}^2 + \dot{\varphi}^2 \sin^2 \psi - 2\dot{\varphi}\dot{\theta} \sin \psi + \dot{\psi}^2 \cos^2 \theta + \dot{\varphi}^2 \cos^2 \psi \sin^2 \theta + 2\dot{\varphi}\dot{\psi} \cos \theta \sin \theta \cos \psi) + \frac{1}{2}D(\dot{\varphi}^2 \cos^2 \psi \cos^2 \theta + \dot{\psi}^2 \sin^2 \theta - 2\dot{\varphi}\dot{\psi} \cos \theta \sin \theta \cos \psi) + \frac{1}{2}I_3^c \sum_{i=1}^n \dot{\gamma}_i^2 + I_3^c \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \dot{\gamma}_i (\dot{\varphi} \cos \psi \cos \theta - \dot{\psi} \sin \theta) - Mgz$$

где A, D, I_3^c - константы тензоров инерции, M - масса робота.

Были составлены модели внешних сил и моментов, выписаны уравнения движения мультироторного робота. Показано, что управляющими воздействиями являются четыре внешних воздействия: суммарная сила тяги винтов и три момента (крена, тангажа и рысканья).

С другой стороны построенная система имеет n управляющих воздействий. Таким образом, в случае, когда решена обратная задача динамики и найдены четыре управляющих воздействия для случая $n > 4$ необходимо ввести дополнительные предположения для однозначного нахождения угловых скоростей $\dot{\gamma}_i$.

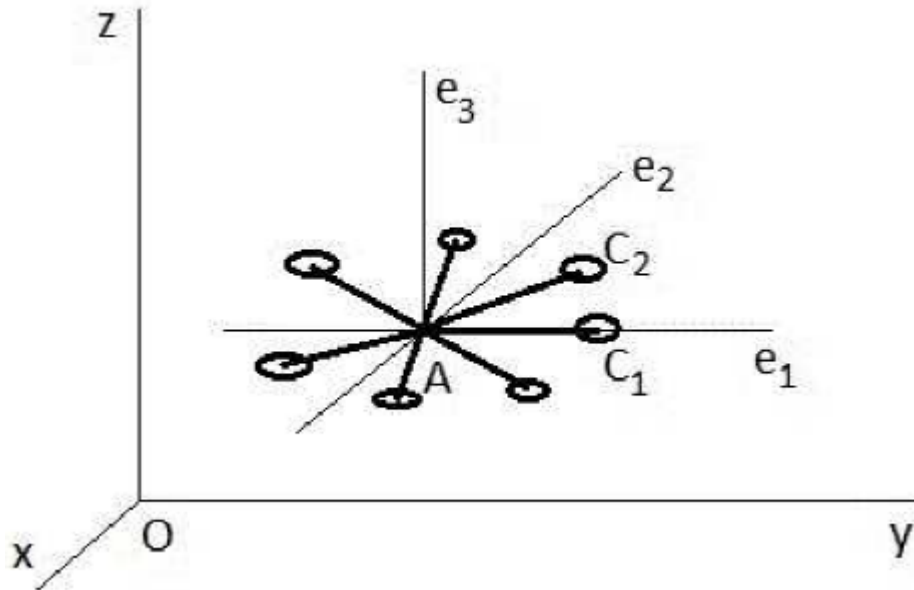


Рис. 1: Модель мультироторного робота.

В качестве одного из них предлагается рассмотреть требование, связанное с минимизацией следующего функционала:

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_0}{n} - k_1 \dot{\gamma}_i \right)^2} \rightarrow \min,$$

где $\frac{U_0}{n}$ - силы тяги винта, которое соответствует равномерному распределению сил тяги всех винтов при стационарном положении (зависание или парение). Таким образом, данная вариационная задача должна рассматриваться при условии выполнения четырех соотношений на найденные четыре функции управляющих воздействий, найденных из решения обратной задачи.

Вместо минимизации отклонений сил тяги винтов от некоторого усредненного значения рассмотрено еще одно условие, связанное с повышением маневренности за счет более эффективного распределения сил. В основу этого критерия положен тот факт, что наибольший вращательный момент создается силой, наиболее удаленной от оси вращения.

Объектом исследований и численных экспериментов данной работы выбран квадрокоптер, так как простота конструкции и симметричный корпус наиболее хорошо подходят для качественного анализа динамики и методов управления. Кроме того, для случая $n > 3$ в уравнения движения мультироторного робота управляющие воздействия входят в виде четырех независимых функций.

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений осуществлялось с помощью программы MATLAB. Приведенная к виду Коши система уравнений первого порядка состоит из двенадцати уравнений и двенадцати неизвестных. Был рассмотрен квадрокоптер, массой 1.4 кг, с длиной «луча» $l = 0.4$ м, длиной лопасти — 0.05 м, шириной лопасти — 0.01 м. Таким образом может быть решена прямая задача динамики: зная начальные условия и закон управления $u_i(t)$, вычисляется траектория движения.

Вторая глава посвящена решению обратной задачи динамики квадрокоптера. Из-за дефицита управляющих воздействий в конфигурационном пространстве достижима не любая траектория. Имея шесть уравнений и десять неизвестных (четыре управляющих воздействия и шесть координат), в общем случае необходимо минимум четыре соотношения для разрешения системы.

Для упрощения дальнейших рассуждений произведена линейная замена функций управления $(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, F)$, вместо $(\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2, \dot{\gamma}_3, \dot{\gamma}_4)$. Также введем дополнительное обозначение для суммарного момента сопротивления:

$$S = k_2(-\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2 - \dot{\gamma}_3^2 + \dot{\gamma}_4^2).$$

В результате получаем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned}
& \ddot{x} = F(\cos \varphi \sin \psi \cos \theta + \sin \varphi \sin \theta), \\
& \ddot{y} = F(\sin \varphi \sin \psi \cos \theta - \cos \varphi \sin \theta), \\
& \ddot{z} = -g + F \cos \psi \cos \theta \\
& \ddot{\varphi}(A \sin^2 \psi + A \cos^2 \psi \sin^2 \theta + D \cos^2 \psi \cos^2 \theta) + \ddot{\psi} \cos \theta \sin \theta (A - D) - \\
& - A \ddot{\theta} \sin \psi + \dot{\varphi} \dot{\psi} \sin 2\psi \cos^2 \theta (A - D) + \dot{\varphi} \dot{\theta} \sin 2\theta \cos^2 \psi (A - D) + \\
& + \dot{\psi}^2 \sin \psi \cos \theta \sin \theta (D - A) + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \psi (-2A \sin^2 \theta - D \cos 2\theta) = \\
& = -\dot{\Gamma}_3 \cos \psi \cos \theta + \Gamma_3 (\dot{\psi} \sin \psi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \psi \sin \theta) + \frac{\sin \theta}{\cos \psi} \Gamma_1 + \frac{\cos \theta}{\cos \psi} S, \\
& \ddot{\varphi} \cos \psi \sin \theta \cos \theta (A - D) + \ddot{\psi} (A \cos^2 \theta + D \sin^2 \theta) + \\
& + \dot{\varphi} \dot{\theta} \cos \psi (2A \cos^2 \theta - D \cos 2\theta) + \dot{\varphi}^2 \sin \psi \cos \psi \cos^2 \theta (D - A) + \\
& + \dot{\psi} \dot{\theta} \sin 2\theta (D - A) = \dot{\Gamma}_3 \sin \theta + \Gamma_3 \cos \theta (\dot{\theta} - \dot{\varphi} \sin \psi) + \cos \theta \Gamma_1 - \\
& - S \sin \theta, \\
& -A \ddot{\varphi} \sin \psi + A \ddot{\theta} + \dot{\varphi} \dot{\psi} \cos \psi (D \cos 2\theta - 2A \cos^2 \theta) + \\
& + \dot{\varphi}^2 \cos^2 \psi \sin \theta \cos \theta (D - A) + \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta (A - D) = \\
& = \Gamma_3 (-\dot{\varphi} \cos \psi \sin \theta - \dot{\psi} \cos \theta) + \Gamma_2 + tg\psi [\Gamma_1 \sin \theta + S \cos \theta],
\end{aligned} \right.$$

Показано, что допустимы только те законы движения, для которых выполнено следующее соотношение:

$$F^2 = \dot{f}_1^2(t) + \dot{f}_2^2(t) + (\dot{f}_3(t) + g)^2,$$

где $f_i(t)$ - заданный закон движения. Таким образом, результирующее ускорение центра масс квадрокоптера ограничено суммарной силой тяги четырех винтов.

Отдельно рассмотрено движение в вертикальной плоскости, в горизонтальной, численно найдены управляющие воздействия для полета по окружности, маневра «горка», полета по винтовой линии, построены соответствующие графики управления.

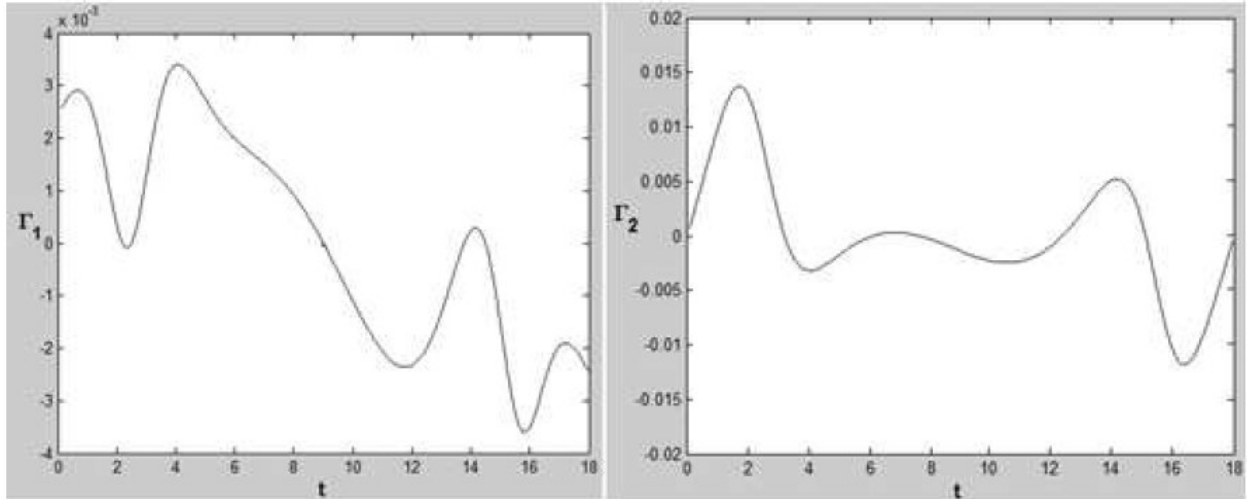


Рис. 2: Функции управления Γ_1 и Γ_2 для полета по винтовой линии.

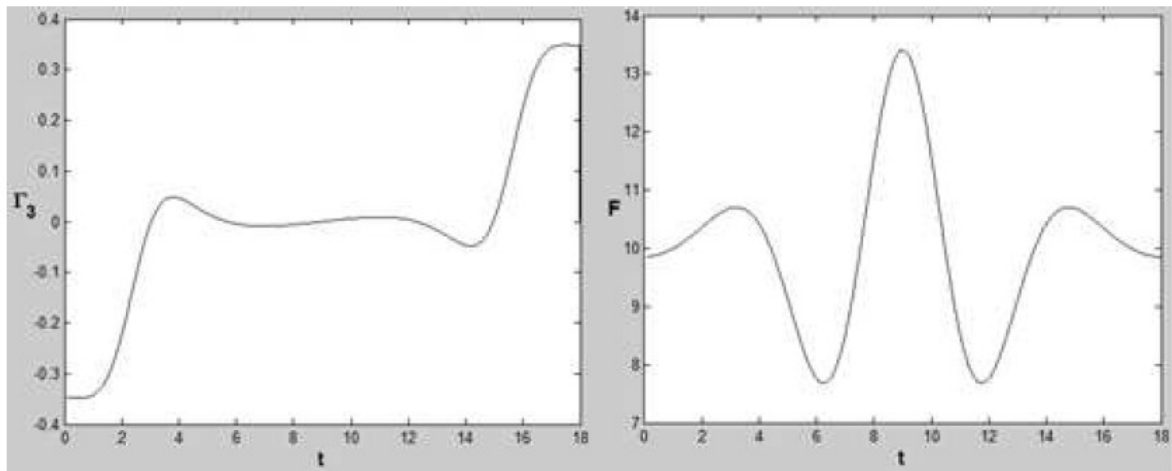


Рис. 3: Функции управления Γ_3 и F для полета по винтовой линии.

Также рассмотрены базовые траектории движения: взлет-парение-посадка, полет по прямой, приведен анализ плоских траекторий. Результаты, полученные в этой главе, используются для построения обучающей выборки для нейросетевого контроллера, который описан в следующем разделе.

Третья глава посвящена построению и исследованию нейросетевого алгоритма управления квадрокоптером. Выбор нейросетевого метода связан в первую очередь с тем, что при реальном полете мультироторного робота появляется большое количество эффектов и воздействий, которые трудно

математически смоделировать. В данной главе решается задача оптимизации вычислительной схемы для повышения ее быстродействия в связи с тем, что между обнаружением отклонения и корректировкой полета, как правило, имеется задержка по времени.

Суть нейросетевого подхода к управлению летательными аппаратами заключается в создании многоуровневого алгоритма, способного автономно адаптироваться к непрогнозируемым внешним возмущениям и погрешностям измерительных устройств. В самом верхнем контуре происходит формирование целей и ключевых параметров полета.

В следующем контуре происходит интерпретация заданных параметров в функциональные ограничения. Также на нем осуществляется планирование общей траектории полета. Оно состоит из разделения маршрута на отрезки таким образом, что на каждом из них траектория полета в требуемой степени близка к некоторому шаблонному значению. Причем это шаблонное значение задано и описано наперед и реализуется с высокой скоростью. Данный контур можно назвать выделением типовых решений или кластеризацией задачи.

Внутренний контур состоит из нескольких отдельных блоков. Во-первых, это ряд нейросетевых регуляторов, отвечающих за движение по базовым траекториям (шаблонам). Во-вторых, необходим блок, который будет отвечать за коррекцию алгоритма путем обновления обучающей выборки натурными испытаниями. Также предлагаемый подход позволяет добавить блок, отвечающий за создание новых шаблонов на основании многократных повторений подобных маневров.

Нейросетевой контроллер состоит из четырех основных блоков: блока, моделирующего датчики, нейронной сети, интегратора, также имеется задающий блок, в котором описаны параметры задачи. В последний входит шаг интегрирования, шаг обращения к датчикам и другие параметры задачи. Задачей блока нейронной сети является вычисление управляющих воздействий с помощью нейронной сети в зависимости от текущих параметров системы и требуемой точности. В его основе лежит трехслойная нейронная сеть прямого распространения с сигмоидальной функцией в скрытом слое, состоящем из десяти нейронов. Вычисление весовой матрицы и смещений осуществляется путем супервизорного обучения. На основе численного моделирования следующим образом формируется обучающая выборка для нейронной сети.

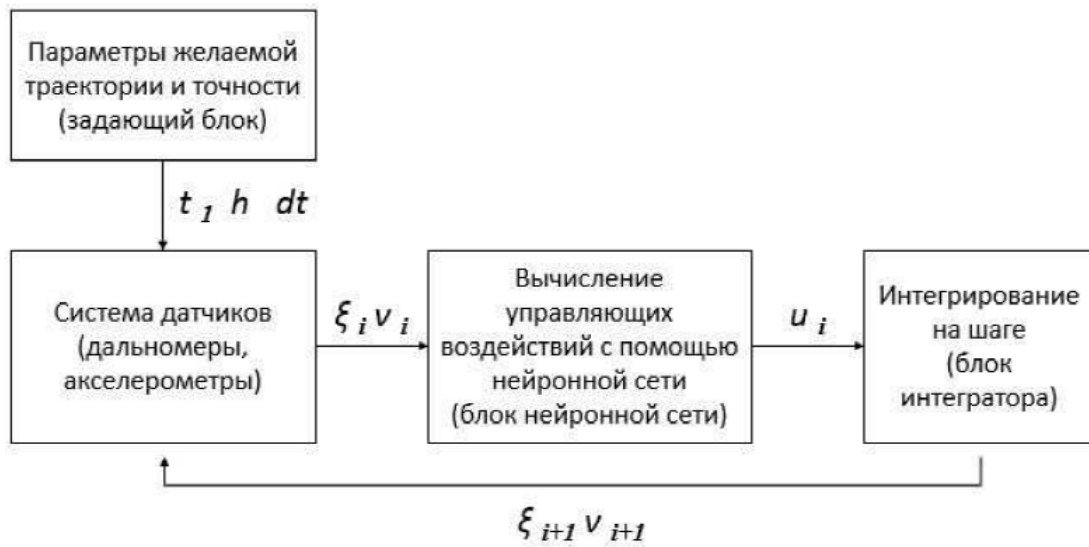


Рис. 4: Схема нейросетевого контроллера.

Для случая вертикального взлета с датчиком высоты обучающей выборкой является множество строк вида:

$$(T, h, z, u_1, u_2, u_3, u_4),$$

где T — время взлета на целевую высоту h , z — текущая высота и u_i — управляющие воздействия (силы вертикальной тяги). Первые три являются входными параметрами сети, а последние — выходами.

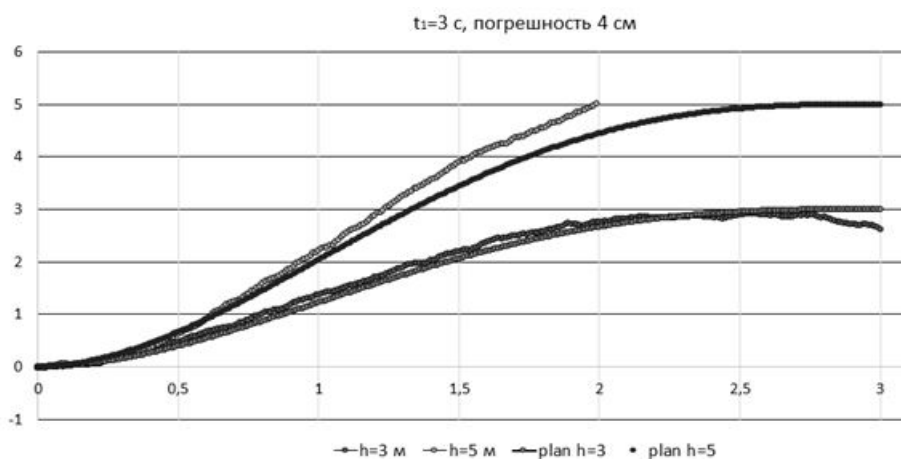


Рис. 5: Взлет за 3 с на высоту 3 м и 5 м с погрешностью высотомера 4 см.

Изучена работа нейросетевого регулятора для некоторых базовых траекторий. Предложен критерий определения работоспособности алгоритма управления. Показано, что построенный контроллер удовлетворительно работает для случая идеальных датчиков высоты для вертикального взлета. Также была проведена серия экспериментов для разных значений погреш-

ности датчика высоты и вычислен усредненный квадрат отклонений от шаблонной траектории.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. В работе построена теоретико-механическая модель мультироторного робота, учитывающая основные аэродинамические эффекты. Составлены уравнения, описывающие его динамику. Для общего случая предложены условия распределения силы тяги несущих винтов для случая недоопределенной задачи, для повышения маневренности и более эффективного распределения нагрузки управляющих воздействий. Построенная модель описывает динамику мультироторного робота в случае умеренных маневров и позволяет исследовать разные алгоритмы управления. На ее основе могут быть построены как наиболее распространенные модели управления, так и изучена эффективность новых алгоритмов, один из которых представлен в работе.
2. Описано решение обратной задачи динамики и представлен алгоритм вычисления управляющих воздействий в общем случае для четырехвинтового робота - квадрокоптера. Отдельно было рассмотрено движение в горизонтальной и вертикальных плоскостях. Численно найдены функции управляющих воздействий для ряда траекторий. Построены графики управлений для полета по таким траекториям, как полет по вертикальной окружности, «горка», винтовая линия и другим траекториям. Проведена валидация найденных решений и показано, что вычислительная погрешность численного интегрирования существенно меньше масштабов целевой траектории. Отдельно описан алфавит базовых траекторий движения квадрокоптера. Показано, что, комбинируя отдельные траектории алфавита, возможно перемещение из одного положения равновесия в произвольное другое за конечное время. Для некоторых базовых траекторий управляющие воздействия найдены в явном виде.
3. Составлен новый алгоритм управления квадрокоптером, основанный на нейросетевом регуляторе с использованием трехслойного персептрона, описана схема построения обучающей выборки. Описана методика его создания для общего случая, схематически изображена его архитектура. Для некоторых базовых траекторий рассмотрена эффективность его работы. На основании результатов численного моделирования показано, что предложенный метод удовлетворительно работает для отдельных базовых траекторий, то есть отклонение от целевой траектории на про-

тяжении всего полета заключено в некоторых фиксированных заранее границах.

4. Описаны результаты работы нейроконтроллера при наличии случайного шума и погрешности датчика. Был проведен ряд экспериментов с разной погрешностью высотомера. Показано, что для рассмотренного конкретного варианта квадрокоптера (характерный размер порядка 1 м) нейрорегулятор не позволяет отклониться от целевой траектории больше, чем некоторое относительное значение при точности датчиков высоты в заданных пределах, то есть подтверждена работоспособность созданного алгоритма. Таким образом построенный алгоритм управления не только работает в условиях воздействия внешних факторов, но может являться инструментом для оценки границ применимости тех или иных устройств обратной связи.

Список публикаций по теме диссертации

1. Павловский В.Е., Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Савицкий А.В., Моделирование и исследование процессов управления квадрокоптером // Робототехника и техническая кибернетика: научно-техн. журнал, Санкт-Петербург. №4(5)/2014. С. 49-57.
2. Павловский В.Е., Савицкий А.В. Модель, базовые траектории, нейроконтроллер для мультироторного робота // Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24-27 сентября 2014 г., Казань, Россия): Труды конференции. Т.3. Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. - 420 с. С. 315-323.
3. Павловский В.Е., Савицкий А.В., Нейросетевой контроллер для управления квадрокоптером // Труды XVII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2015». Часть 2. Москва. 2015. С. 177-188.
4. Павловский В.Е., Савицкий А.В., Нейросетевой алгоритм управления квадрокоптером на типовых траекториях // журнал «Нелинейный мир» , изд. «Радиотехника», Москва, 2015. №6, С. 47-51.
5. Павловский В.Е., Савицкий А.В., Решение обратной задачи для вычисления управляющих воздействий квадрокоптером // журнал «Нелинейный мир» , изд. «Радиотехника», Москва, 2016. №7, С. 19-30.
6. Павловский В.Е., Савицкий А.В., Исследование обратной задачи для вычисления управляющих воздействий для квадрокоптера // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2017. №17, С. 1-20.
7. Павловский В.Е., Савицкий А.В., Модель квадрокоптера и нейросетевой алгоритм управления // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2017. №77, С. 1-20.

Подписано в печать 02.08.2019. Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 70 экз. Заказ А8
ИПМ им.М.В.Келдыша РАН. 125047, Москва, Миусская пл., 4