

Ученому секретарю диссертационного  
совета Д 002.024.01  
к.ф.-м.н. М.Г. Широбокову

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
Савицкого Александра Владимировича  
на тему: «Динамика и алгоритмы управления мультироторным роботом»  
по специальности 01.02.01 «Теоретическая механика»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

### **1. Актуальность темы диссертации.**

Робототехника является одной из быстро развивающихся областей машиностроения, а мобильная робототехника завоевывает свое место среди транспортных, технологических, разведывательных и других типов машин. Среди мобильных роботов особое место занимают беспилотные летательные аппараты. Причем можно выделить несколько их типов, различающихся по методу обеспечения подъемной силы: за счет конструкции планера (для самолетов), за счет реактивных сил (для ракет), за счет целенаправленной организации воздушных потоков (для вертолетов) и др.

Автор рассматривает летательный аппарат, управление которым обеспечивается управляемыми потоками воздуха за счёт роторно-винтового двигателя. Задачи управляемого движения таких аппаратов важны и разнообразны. Среди них:

- задача о выборе режима программного движения, соответствующего какому-либо критерию оптимальности, например, минимуму энергозатрат,
- задача обеспечения устойчивости программного движения,
- задача о точности позиционирования аппарата, например, в условиях функционирования в составе группы и др.

Автором ставится задача об адаптивном управлении при возможном изменении внешних условий и помех. С точки зрения теоретической механики эта задача интересна еще и тем, что твердое тело – квадрокоптер имеющий шесть степеней свободы управляет четырьмя двигателями (винтами) которые могут обеспечить четыре независимых внешних воздействий.

Поэтому диссертационное исследование актуально, а его результаты вносят вклад в теорию управляемого движения твердых тел.

### **2. Краткий анализ содержательной части диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (56 наименований) и двух приложений. Общий объем работы составляет 87 стр.

**Во введении** обосновывается актуальность решаемых автором задач, проанализированы некоторые области применения подобных аппаратов и методы управления их движение. Кратко описана структура диссертации, сформулирована цель, состоящая из нескольких взаимосвязанных задач.

**В первой главе** представлена математическая модель мультироторного робота. Предложен критерий оптимальности как среднеквадратичное отклонение силы тяги каждого винта от среднего. Описаны возможные способы маневрирования.

**В второй главе** решается обратная задача динамики квадрокоптера. Рассмотрены некоторые конкретные траектории движения. На основании алфавита стандартных режимов движения и их комбинаций изучается возможность перемещения робота в произвольную точку.

**В третьей главе** рассматривается построение и исследование нейросетевого алгоритма управления. Одно из главных обоснований его разработки состоит в достаточно большом количестве трудно моделируемых помех, а с другой – необходимостью на них реагирования.

**В заключении** приведены основные выводы и результаты работы

### **3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Обоснована постановка задачи, имеющая важное теоретическое значение и большую практическую значимость.

Полученные выводы и рекомендации не противоречат известным результатам и являются основой для дальнейшего решения поставленной проблемы, которая, по мнению оппонента, может углубляться и расширяться.

### **4. Научная новизна.**

Предложена концепция выбора оптимальных условий скоростей роторов квадрокоптера, которая должна учитываться при его управлении.

Установлены закономерности управления программным движением квадрокоптера по базовым траекториям.

Предложен и апробирован на разработанных математических моделях метод учета погрешности датчиков на управление движением квадрокоптера.

### **5. Достоверность.**

Достоверность результатов диссертации обусловлены применением апробированных методов теоретической механики и методов моделирования

### **6. Замечания по работе.**

6.1. Автор определяет свою математическую модель как систему твердых тел с шестью степенями свободы и *n* векторами тяги. Оппонент считает, что автор рассматривает одно твердое тело с шестью степенями свободы, а действие роторов на это тело учитывается введенными

переменными ( $U_i$  – модуль аэродинамической силы и  $M_i$  – момент сопротивления). Тем более, что уравнения динамики для вращательного движения роторов не составляются, а их угловые скорости считаются управляющими воздействиями. Хотя авторская трактовка и не приводит к противоречивости результатов, однако терминология должна быть адекватна задаче.

6.2. Автором предложен на стр. 24 диссертации критерий оптимальности, который требует равенство усилий на каждом из винтов. Но могут быть и другие критерии или даже критерий, учитывающий комплекс показателей, о которых ничего не говорится. Тем более, что равенство усилий может обеспечить лишь поступательное движение квадрокоптера. Условие для суммарной силы тяги винтов, представленное на стр. 24 возможно лишь при поступательном перемещении квадрокоптера с прямолинейным движением центра масс и с небольшой скоростью. Для общего случая движения ранее записанное условие на стр. 24 вызывает сомнение.

6.3. Предложенное на стр. 25 условие выбора угловых скоростей винтов, в дальнейшем не конкретизируется и не ясно, где оно используется в нейросетевом контроллере.

6.4. Условия маневренности автором понимаются как методы управления различными видами движения. Однако эти условия должны были бы характеризоваться и критическими углами крена, тангажа и, вообще, ограничениями на пространственное движение.

6.5. В автографе и диссертации часто отсутствует нумерация формул, что затрудняет анализирование результатов.

6.6. Имеются небрежности во введенных обозначениях. Так на стр. 17 диссертации потенциальная энергия обозначается как  $U$ , а в дальнейшем той же буквой  $U$  (правда, иногда, маленькой) обозначается сила тяги.

6.7. В обосновании применения нейросетевого контроллера автор обращает внимание на его эффективность при движении в недетерминированной среде. Однако в работе учитывались только помехи датчиков.

## 7. Заключение

Отмеченные недостатки не снижают уровень диссертационной работы и значимости основных результатов. Диссертация Савицкого А.В. является самостоятельным исследованием, в котором изложены результаты решения научной задачи о построении алгоритма управления мультироторным роботом как абсолютно твердым телом на основе применения нейросетевого контроллера.

Диссертация соответствует критериям, установленным п.п. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а её автор, Савицкий Александр Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 «Теоретическая механика».

Заведующий кафедрой  
«Теоретическая механика»  
ФГБОУ ВО «Волгоградский  
государственный технический  
университет»,  
д.ф.-м.н., профессор  
01.02.01 – Теоретическая механика

400005, г. Волгоград,  
пр-кт им. В.И. Ленина, д. 28,  
тел. (8442) 24-81-13,  
e-mail: dtm@vstu.ru

Брискин Евгений Самуилович

