

## ОТЗЫВ

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

**Актуальность темы исследований.** Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются одной из самых быстроразвивающихся областей робототехники. За последние несколько лет появилось большое количество разных типов и моделей БПЛА. 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 БПЛА осуществляется либо под непосредственным управлением оператора, который задает 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 оператора. В настоящее время существуют коммерческие программные продукты, которые успешно реализуют нижеуровневое управление, и могут быть установлены на самые разные летательные аппараты. Однако, недостатком таких продуктов является функциональная ограниченность и невозможность вносить корректировки в программную часть из-за коммерческой защищенности. Для решения ряда проблем управления БПЛА требуются адаптивные алгоритмы управления, способные осуществлять стабилизацию летательного аппарата в особых условиях, в том числе, в непосредственной близости от земли. В связи с этим возникает актуальная задача создания более гибких для программирования и открытых адаптивных систем управления.

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. Приведенные в работе Савицкого А.В. исследования, основанные на гибридном нейросетевом алгоритме, решают проблемы адаптивного управления БПЛА.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.** Автор достаточно корректно обосновывает актуальность темы диссертации,

определяет объект и предмет исследования, формулирует цель и определяет задачи исследования.

Автором сформулированы основные допущения и предположения, на основе которых построена на основе формализма Лагранжа математическая модель мультироторного робота, позволяющая исследовать динамику изучаемых объектов и использовать ее для анализа работоспособности создаваемых алгоритмов управления. Мультироторный робот описан как твердое тело, к которому приложены силы и моменты, возникающие из-за подъемной силы и момента сопротивления, связанных с вращением пропеллеров и действия силы тяжести. Обобщенные координаты робота включают в себя три координаты центра масс системы и три угла Крылова. В работе основное внимание уделяется частному случаю движения четырехлопастного мультироторного робота - квадрокоптера ( $n=4$ ) под действием четырех управлений: суммарной подъемной силы и трех моментов (рысканья, крена и тангажа).

Не вызывают сомнений разработанные автором методики и проведенное исследование динамики управляемого движения. Описанное решение прямой и обратной задачи динамики в совокупности с численным моделированием позволяет выполнять проверку получаемых решений и оценивать эффективность предложенного алгоритма управления.

Научные выводы и сформулированные рекомендации по практическому применению предложенного подхода в аппаратах, которых требуется повышенный уровень автономности или возможность программной адаптации к непрогнозируемым событиям, в достаточной мере обоснованы.

**Оценка новизны и достоверности.** В качестве новых научных результатов можно выделить:

- построение математической модели мультироторного летательного аппарата, которая учитывает основные аэродинамические эффекты;
- составление алгоритма управления квадрокоптером на основе нейросетевого регулятора, полученного на основе обучения на эталонных траекториях;
- подтверждение работоспособности созданного алгоритма с помощью численного моделирования.

В целом, результаты, полученные автором, являются новыми научными знаниями технической отрасли. Результаты работы позволяют установить потенциальные возможности применимости новых алгоритмов управления при выполнении практических задач, в которых присутствуют трудно моделируемые внешние факторы и воздействия, дают достаточно полное представление о возможных перспективных направлениях использования созданного нейросетевого контроллера управления и могут найти применение при разработке новых

мультироторных систем с включением в их состав блока адаптивного принятия решения на основе нейронной сети, построенной методом супервизорного обучения.

Достоверность научных положений и полученных результатов гарантируется в работе корректным использованием математических методов, моделей и алгоритмов, а также подтверждается применением проверенных практикой методов исследования динамики движения беспилотных летательных аппаратов; совпадением модельных результатов расчетов, полученных другими авторами; совпадением полученных в ходе работы результатов аналитических исследований с результатами математического моделирования с применением более сложных моделей; проведенными экспериментами с помощью численного моделирования.

Основные результаты диссертации опубликованы в семи печатных работах, в том числе, в четырех статьях журналов из перечня ВАК. Они неоднократно обсуждались на различных конференциях и получили одобрение ведущих специалистов.

#### **Замечания по диссертационной работе в целом.**

1. При решении обратной задачи динамики была выполнена замена переменных, при которой функции управлений были заменены на  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$ ,  $F$ , являющимися вращательными моментами и суммарной силой тяги, деленными на массу робота. Графики всех найденных решений обратной задачи динамики были представлены для новых переменных. При этом не было представлено графиков управления для исходных переменных.
2. Задача о движении мультироторной системы в атмосфере относится к весьма сложным, и для того, чтобы воспользоваться столь изящным и универсальным методом построения математической модели как формализм Лагранжа, автору пришлось ввести значительное количество допущений. Хотелось бы видеть все принятые допущения и их обоснования в одном разделе.
3. В работе отсутствуют какие-либо данные о валидации в явной форме полученных результатов математического моделирования управляемого движения.

Отмеченные недостатки не влияют на мою положительную оценку диссертации в целом.

**Заключение.** Автореферат соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа Савицкого Александра Владимировича содержит решение крупной актуальной научно проблемы связанной с научным обоснованием применения нейросетевого алгоритма управления мультироторным роботом для решения многих практических задач, что отвечает квалификационным требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней,

