

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу Луханина
Владимира Олеговича на тему «Методика проектирования
электроприводных воздушных винтов беспилотных
летательных аппаратов с учетом технологии изготовления и
стендовых испытаний», представленную на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13.
Проектирование, конструкция, производство, испытания и
эксплуатация летательных аппаратов**

Тема диссертационной работы Луханина Владимира Олеговича является, несомненно, **актуальной**. Она направлена на разработку методики проектирования электроприводных воздушных винтов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые находят все возрастающее распространение в различных областях.

Существуют методы проектирования отдельно взятого винта для ЛА с поршневыми и газотурбинными двигателями, а также методы проектирования и конструирования таких винтов. Недостаточно рассмотрены вопросы изготовления отдельно взятого электрического ЛА. Методы расчета и испытания воздушных винтов, учитывающие все факторы, а также возможность вертикального взлета БПЛА «на винте», рассматривались весьма ограниченно. В общем, отсутствует целостная методика проектирования воздушных винтов БПЛА с электроприводом

В оппонируемой диссертации решена важная прикладная **научно-техническая задача**, посвященная разработке методики проектирования воздушных винтов электроприводных беспилотных летательных аппаратов с учетом технологии изготовления и стендовых испытаний, ограничений, обусловленных условиями эксплуатации, позволяющей улучшить ЛТХ существующих БПЛА.

Для указанной задачи В.О. Луханиным решены следующие частные **задачи**:

1. Разработан метод расчета внешних характеристик бесколлекторных электрических двигателей постоянного тока на основе экспериментальных данных с учётом эксплуатационных ограничений.

2. Созданы быстродействующие методы и алгоритмы расчета аэродинамических характеристик изолированного воздушного винта с произвольной геометрической и аэродинамической компоновкой лопастей

Сектор документационного
обеспечения МАИ

«4» 12 2023.

на режимах осевого обтекания, работающих совместно с электродвигателем.

3. Разработана методика проектирования оптимального воздушного винта под заданный критерий с учетом параметров электропривода и аэродинамических характеристик планера летательного аппарата, а также отличий фактического контура профиля лопастей от заданного в атласе, обусловленных технологией изготовления лопастей.

4. Обоснована достоверность разработанных методик расчета результатами стендовых испытаний винтомоторных групп и летных испытаний БПЛА в целом.

Разработка методики оптимального проектирования воздушных винтов электроприводных БПЛА с учетом особенностей технологии изготовления лопастей и ограничений, обусловленных условиями работы электрической силовой установки на различных режимах полёта БПЛА, составляет **научную новизну** диссертационного исследования.

Диссертационная работа В.О. Луханина состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 122 наименований, списка сокращений и условных обозначений, трех приложений.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и основные методы выполненного исследования, научная и практическая значимость работы, приведено описание ее структуры и содержания. Перечислены положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, отмечен личный вклад автора.

В первой главе приведен обзор математических моделей аэродинамики воздушного винта на режимах осевого обтекания. Предложена модификация отдельных составляющих этих моделей. Разработана уточненная методика аэродинамического расчета, представляющая собой комбинированный подход, в котором за основу берутся экспериментальные данные, корректируемые с помощью универсальной поправки, вычисленной по CFD-моделям. Проведено сравнение результатов расчета воздушного винта с экспериментальными данными, в том числе с данными специально поставленного эксперимента.

Вторая глава посвящена математической модели электродвигателя, рассмотрены вопросы его совместной работы с воздушным винтом с учетом ограничений. Известная математическая модель была дополнена двумя уравнениями, позволяющими рассчитать ток, потребляемый контроллером

при заданном напряжении аккумуляторной батареи, и максимально допустимый ток на обмотках при различных напряжениях. Дополненная математическая модель позволяет учитывать ограничения на всех элементах силовой установки при напряжениях, отличных от номинального.

В третьей главе представлен алгоритм разработки воздушного винта БПЛА с электрической силовой установкой. Алгоритм разработан с учетом возможности его интеграции с процедурой общего проектирования БПЛА на всех его этапах. Приведен также алгоритм оптимизации параметров воздушного винта под заданный двигатель. Изложены результаты применения разработанной методики на примере оптимизации воздушных винтов двухрежимного электрического БПЛА по критериям максимальной дальности полета и максимальной скорости при заданных взлетно-посадочных ограничениях.

В четвертой главе В.О. Луханиным рассмотрены различные технологии изготовления воздушных винтов. Показаны связанные с этими технологиями требования к формированию имитационной модели аэродинамических характеристик профилей лопастей воздушного винта. Автором отмечено, что утолщение задней кромки лопасти часто применяется на воздушных винтах БПЛА для упрощения и удешевления технологии изготовления. Показана необходимость учета указанного утолщения при расчете аэродинамических характеристик воздушного винта.

Пятая глава посвящена методике испытаний электрической силовой установки БПЛА в целом, а также методике испытаний воздушного винта и электропривода в отдельности. Установлено, что в алгоритме разработки воздушного винта предусмотрена коррекция по результатам испытаний заявленных характеристик электродвигателей. Кроме того, данные испытаний ряда электродвигателей были использованы для обоснования достоверности разработанных в диссертации методик расчета аэродинамических характеристик винтов на режимах осевого обтекания и выбора оптимальных параметров их лопастей.

В общих выводах и заключении сформулированы основные результаты работы и даны рекомендации по использованию разработанной методики в государственных и частных компаниях, занимающихся разработкой БПЛА различного класса

Достоверность научных положений и полученных результатов обосновывается корректным использованием математических методов, моделей и алгоритмов при проведении расчетов, а также путем

сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными стендовых испытаний, полученными лично автором, и с данными летных испытаний, опубликованными в отечественных и зарубежных источниках.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в разработке и практически реализованном алгоритме и программе расчета аэродинамических характеристик воздушных винтов, лопасти которых имеют отклонения от теоретического контура, заданного в атласе профилей, обусловленные технологией изготовления. По разработанной методике спроектирован, изготовлен и испытан воздушный винт с оптимальными геометрическими параметрами лопастей под заданный электропривод, используемый на БПЛА.

Анализ содержания оппонируемой работы и выводов по ней говорит о высокой научной подготовке В.О. Луханина и глубине прорабатываемых вопросов, а также о способности автора решать задачи, имеющие практическую направленность.

К тексту диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. Недостаточно исследовано влияние технологических отклонений задней кромки профиля лопасти на аэродинамические характеристики винта.

2. Не исследованы оптимальные формы лопастей винта по критериям наибольшей дальности и продолжительности полета ЛА.

3. В диссертации используются профессионализмы и техницизмы, в частности, «обороты» винта вместо «частоты вращения».

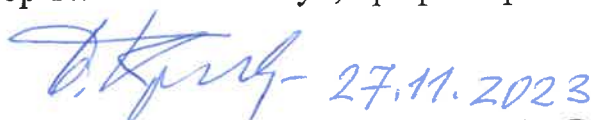
Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. В соответствии с п. 9 Постановления Правительства России от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения учёных степеней», диссертант **решил важную и новую научную задачу**: разработал методику проектирования воздушных винтов электроприводных беспилотных летательных аппаратов с учетом технологии изготовления и стендовых испытаний, ограничений, обусловленных условиями эксплуатации, позволяющей проектировать новые и улучшить ЛТХ существующих БПЛА.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8-ми печатных трудах, в том числе в 3-х статьях в журналах перечня изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и раскрывает ее основные положения.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Луханин Владимир Олегович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов.

Главный научный сотрудник ЦАГИ
доктор технических наук, профессор

 27.11.2023

Крицкий Борис Сергеевич

Адрес электронной почты: boris.kritsky@tsagi.ru

Телефон: 8495556-43-11; 8903248-63-53.

Полное наименование организации:

Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»)

Почтовый адрес организации: 140180 Россия, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1

Адрес официального сайта организации в сети «Интернет»: www.tsagi.ru

Адрес электронной почты организации: info@tsagi.ru

Телефон: 8495556-42-05; Факс: 8495777-63-32

Подпись Крицкого Бориса Сергеевича заверяю

Ученый секретарь диссертационного совета

на базе ЦАГИ 31.1.006.01

доктор физико-математических наук, доцент



М.А. Брутян

С отзывом ознакомлен

5.12.2023

