

ОТЗЫВ

научного руководителя
на диссертационную работу ЛУХАНИНА Владимира Олеговича
«Методика проектирования электроприводных воздушных винтов беспилотных летательных аппаратов с учётом технологии изготовления и стендовых испытаний»,
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.13. «Проектирование, конструкция, производство, испытания
и эксплуатация летательных аппаратов»

Аспирант кафедры 102 МАИ «Проектирование вертолетов» Луханин Владимир Олегович, 1996 года рождения, в 2019 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по специальности 24.05.07 «Самолето- и вертолетостроение» (специализация «самолетостроение» на базе кафедры 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники»).

В период обучения работал в студенческом конструкторском бюро авиамоделизма (СКБ АМ) МАИ под руководством профессора, д.т.н. В.С.Брусова, где принял участие в создании нескольких вариантов ударных беспилотных летательных аппаратов вертикального взлета и посадки, выполненных по схеме "Tail-sitter". В рамках специальной части дипломного проекта провел исследование на тему "Расчёт и оптимизация воздушного винта самолёта вертикального взлёта и посадки".

В 2019 году В.О.Луханин поступил в аспирантуру МАИ по кафедре 102 «Проектирование вертолетов» с целью выполнения научной работы на тему "Методика проектирования, технологии изготовления и испытаний воздушных винтов дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов с электроприводом". Выбор темы диссертационной работы был обусловлен планами работ СКБ АМ МАИ по созданию конкурентоспособных беспилотных летательных аппаратов различной размерности, предназначенных для решения военных и гражданских задач и разрабатываемых по заданию АО "Алмаз-Антей" на основе отечественных проектно-конструкторских и технологических решений.

Актуальность выбранной темы исследования была обусловлена:

- объективной необходимостью совершенствования лётно-технических характеристик беспилотных летательных аппаратов, соответствующих стратегии и тактике их применения на современном театре военных действий;

- планами создания в Российской Федерации современных беспилотных летательных аппаратов различного назначения и размерности, в том числе с электрической силовой установкой, что позднее было отражено в постановлении Правительства РФ от 9 февраля 2023 года №190.

Целью диссертационной работы аспиранта являлось создание методов и алгоритмов расчета характеристик винтомоторной группы электроприводных беспилотных летательных

аппаратов, направленных на повышение летно-технических характеристик существующих изделий и проектирование новых образцов, превосходящих по своим характеристикам потенциальных конкурентов.

Для достижения этой цели перед аспирантом были поставлены следующие задачи.

1. Анализ существующих теорий воздушного винта на режимах осевого обтекания, определение границ их применимости с точки зрения точности, вычислительной сложности и быстродействия. Выбор алгоритмов расчёта, наиболее подходящих для решения проектно-конструкторских задач.

2. Доработка методов учета концевых потерь в дисковой вихревой теории воздушного винта с целью существенной минимизации вычислительных ресурсов, потребных для расчетов его аэродинамических характеристик.

3. Изучение экспериментальных и расчётных методов исследования аэродинамических характеристик профилей лопастей воздушных винтов в необходимых диапазонах углов атаки, чисел Рейнольдса и Маха. Разработка расчётно-экспериментального метода и создание имитационной модели аэродинамических характеристик профилей на основе ограниченной экспериментальной базы данных.

4. Математическое моделирование работы бесколлекторных электрических двигателей постоянного тока, разработка алгоритма расчёта их внешних характеристик с учётом экспериментальных данных, конструктивных и эксплуатационных ограничений.

5. Программная реализация метода расчета аэродинамических характеристик воздушного винта с малым числом лопастей произвольной геометрической и аэродинамической компоновки на режимах осевого обтекания, обеспечивающая высокое быстродействие расчетов.

6. Проектирование и изготовление стенда для испытания комбинации "винт-электропривод" в режиме работы «на месте», разработка технологии идентификации математической модели электродвигателей по данным эксперимента.

7. Анализ особенностей технологий изготовления воздушных винтов и вытекающих из них требований к имитационной модели расчета аэродинамических характеристик профилей, образующих поверхность лопастей винта.

8. Разработка методики проектирования оптимального по заданному критерию воздушного винта с учётом параметров электропривода, аэродинамических характеристик планера летательного аппарата, потребных ЛТХ, а также отличий фактического контура профиля лопастей от заданного в атласе, обусловленных технологическими особенностями используемого оборудования.

9. Сравнительная оценка результатов стендовых испытаний винтов электрического БПЛА вертикального взлета и посадки, спроектированных по созданной методике.

В процессе решения этих задач автором диссертации:

- разработаны и программно реализованы алгоритмы быстрого вычисления индуктивных скоростей воздушного винта по лопастной и дисковой теории с учетом поправки Гольдштейна;

- предложена имитационная модель расчета аэродинамических характеристик профилей по углам атаки, числам Маха и Рейнольдса на основе имеющихся экспериментальных данных и *CFD*-моделей аэродинамики профилей, достоверность которой подтверждена сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными;

- отработана математическая модель расчёта аэродинамических характеристик воздушного винта с произвольной геометрией лопастей на режимах осевого обтекания на основе уточненной дисковой и быстродействующего варианта лопастной вихревых теорий;

- составлена оригинальная математическая модель винтомоторной группы БПЛА с учётом идентифицированных по экспериментальным данным характеристик электропривода и эксплуатационных ограничений;

- предложена и внедрена в эксплуатацию методика стендовых испытаний электродвигателей с помощью калиброванных загрузочных крыльчаток;

- реализован алгоритм расчёта максимальной скорости горизонтального полёта электроприводного БПЛА самолётного типа на основе аэродинамических характеристик планера и ограничений по силовой установке;

- методом случайного поиска для функций многих переменных проведена оптимизация конструктивных параметров воздушных винтов, работающих на осевых режимах в составе электрической силовой установки БПЛА;

- показана потенциальная возможность улучшения летно-технических характеристик электроприводных БПЛА самолетной схемы за счет использования воздушных винтов с оптимизированными параметрами.

В качестве тестовых примеров рассматривались винтомоторные группы беспилотных летательных аппаратов, разработанных в СКБ АМ МАИ при непосредственном участии соискателя.

Принципиально важным для выполненной диссертационной работы является совместное решение задачи о выборе режима работы воздушного винта и электродвигателя, вращающихся с одинаковыми оборотами, что позволяет корректно учитывать изменение КПД винта и электродвигателя по оборотам. Такой подход ранее применялся научным руководителем применительно к винтомоторным группам летательных аппаратов, выполненных по вертолетной схеме (кевадрокоптеры, гексакоптеры, винтокрылы), и показал возможность его реализации в рамках дисковой вихревой теории воздушного винта и имитационной модели внешней характеристики электродвигателя.

Научная новизна диссертационной работы соискателя заключается в:

- создании общей концепции проектирования, конструирования и технологии изготовления воздушных винтов БПЛА самолетной схемы с учётом особенностей и ограничений, обусловленных использованием электропривода и условиями работы винта на различных режимах полёта аппарата;
- уточнении формул для расчета концевых потерь воздушного винта с лопастными модулями, расположенными под произвольным фазовым углом;
- получении зависимости коэффициента крутящего момента крыльчатки, загружающей электродвигатель, от её геометрических параметров;
- выводе формул для формализации количественных ограничений режимов работы электродвигателей по силе тока.

Практическая значимость разработанного подхода к выбору параметров воздушного винта заключается в следующем.

1. Разработаны и практически реализованы алгоритм и программа расчета аэродинамических характеристик воздушных винтов, лопасти которых имеют отклонения от теоретического контура, заданного в атласе профилей, обусловленные технологией изготовления, что заметно влияет на располагаемые характеристики винтомоторной группы.

2. Спроектирован, изготовлен и испытан воздушный винт с оптимальными геометрическими параметрами лопастей под заданный электропривод БПЛА СКБ АМ МАИ.

3. Создана методика проектирования воздушных винтов БПЛА, позволяющая минимизировать отклонения от требуемых ЛТХ аппарата и возникновения аварийных ситуаций в условиях реальной эксплуатации ЛА, обусловленные отказом винтомоторной группы.

Полученные результаты подтверждены экспериментально, что является основанием для её применения в государственных и частных компаниях, занимающихся разработкой БПЛА.

В 2023 году Луханин В.О. успешно сдал все экзамены кандидатского минимума и прошел государственную итоговую аттестацию, защитив на "отлично" квалификационную работу по теме диссертации.

Основные положения диссертации опубликованы автором трёх изданиях из перечня ВАК, докладывались и обсуждались на 5 отечественных и международных конференциях, форумах и научно-практических семинарах. В мае 2022 года созданная им экспериментальная установка экспонировалась на международной выставке *HeliRussia-2022*, которая проходила в выставочном центре *Крокус-Экспо*.

В период работы над диссертацией Луханин В.О. проявил себя как самостоятельный и квалифицированный исследователь, обладающий отличной математической подго-

товкой, в совершенстве владеющий разноплановым программным обеспечением и успешно сочетающий математическое моделирование в его различных аспектах с экспериментальными исследованиями на специальных стендах, созданных им лично. Исключительное трудолюбие и нацеленность на конечный результат позволили ему завершить работу над диссертацией в установленный срок, наметить пути дальнейшего совершенствования разработанных математических моделей и найти организации, заинтересованные в их применении.

Следует отметить, что в период обучения в аспирантуре принимал участие в учебном процессе кафедры "Проектирование вертолетов": проводил лабораторные работы по курсу "Моделирование инженерных задач" для студентов 3 курса специальности 24.05.07 "Самолето- и вертолетостроение, а также учебную практику для студентов 1 курса по направлению "Компьютерное дело/производство".

Считаю, что Луханин В.О. является сложившимся научно-техническим специалистом, а его диссертационная работа представляет собой законченное решение актуальной и практически значимой научно-технической задачи и отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Луханин Владимир Олегович заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

Научный руководитель,
доцент кафедры "Проектирование вертолетов"
Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

" 20 " сентября 2023 г.

Подпись Артамонова Б.Л. удостоверяю.

Зам. начальника управления по работе с персоналом
Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)


Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
Кафедра "Проектирование вертолетов"


Адрес: 125993, г. Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4

Телефон: (499)158-46-10

Факс: (499)158-29-77

E-Mail: k102@mai.ru


Б.Л.Артамонов


М.А.Иванов

