

Всероссийский конкурс исследовательских и проектных работ
школьников «Высший пилотаж»

Создание исследовательского стенда для оценки и подбора
винтомоторных групп БПЛА

Проект

Направление «Технические и инженерные науки»

Автор: Елисеев Дмитрий Алексеевич,
Учащийся 9 «Б» класса,
ГБОУ ПО «Академический лицей №14» г. Пензы

2026 г.

Оглавление

Введение.....	2
Глава 1. Аналитический обзор винтомоторных групп БПЛА и существующих методов их оценки	4
1.1. Назначение и роль винтомоторной группы в БПЛА	4
1.2. Основные характеристики электродвигателей для БПЛА	4
1.3. Характеристики и параметры воздушных винтов БПЛА.....	5
1.4. Существующие методы подбора и оценки винтомоторных групп БПЛА	6
1.5. Аналоги исследовательских стендов для испытаний винтомоторных групп БПЛА	7
Глава 2. Разработка исследовательского стенда для оценки эффективности винтомоторной группы.....	8
2.1. Конструкция и принцип работы стенда	8
2.2. Выбор измерительных средств и электронных компонентов.....	9
2.3. Программное обеспечение исследовательского стенда	9
2.4. Этапы изготовления и сборки исследовательского стенда	10
2.5. Расчёт себестоимости исследовательского стенда.....	11
Глава 3. Апробация исследовательского стенда и проведение экспериментального исследования	11
3.1. Цель и гипотеза экспериментального исследования	11
3.2. Методика проведения эксперимента	12
3.3 Анализ результатов экспериментального исследования	12
Заключение	13
Список использованной литературы	15
Приложение 1	16
Приложение 2	17
Приложение 3.....	19

Введение

В последние годы беспилотные летательные аппараты (БПЛА) получили широкое распространение в гражданской и военных сферах. Они применяются для мониторинга территорий, аэрофотосъёмки, доставки грузов, экологических и поисково-спасательных задач. Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность БПЛА, является винтомоторная группа, от характеристик которой напрямую зависят тяга, энергопотребление, дальность и продолжительность полёта. Оптимальный подбор винта и электродвигателя позволяет существенно повысить энергоэффективность аппарата и увеличить его эксплуатационные возможности.

Актуальность данного проекта обусловлена отсутствием универсальных и достоверных теоретических и расчётных методов подбора винтомоторной группы для БПЛА. Существующие эмпирические формулы, табличные данные и программные средства носят приближённый характер и часто не учитывают реальные условия работы, такие как особенности конкретного мотора, аэродинамические свойства винта, режимы нагрузки и взаимодействие элементов системы. В результате разработчики и исследователи вынуждены опираться на практические испытания, которые требуют специализированного оборудования. Создание исследовательского стенда для оценки эффективности винтомоторной группы является важной инженерной задачей, направленной на получение объективных экспериментальных данных.

Целью данного проекта является разработка и создание исследовательского стенда, предназначенного для экспериментальной оценки характеристик винтомоторной группы БПЛА, а также проведение на его основе исследовательских испытаний. Разработанный стенд должен обеспечивать измерение основных параметров работы системы, таких как тяга, потребляемая мощность и электрические характеристики двигателя, что позволит анализировать эффективность различных комбинаций винтов и моторов

Для достижения поставленной цели в рамках проекта предполагается решение следующих **задач**:

- анализ существующих подходов и конструкций испытательных стендов;
- разработка конструкции стенда и выбор измерительных средств;
- создание аппаратной и программной части для сбора и обработки данных;

- калибровка измерительной системы и проверка её работоспособности;
- проведение экспериментальных исследований с использованием разработанного стенда.

В качестве **методов** исследования планируется использовать экспериментальный подход с применением тензометрических датчиков, измерителей тока и напряжения, а также средств цифровой обработки данных. Для апробации созданного стенда предполагается проведение отдельного исследования, направленного на изучение зависимости создаваемой тяги и энергетической эффективности винтомоторной группы от шага винта. Полученные результаты позволят оценить возможности стенда и продемонстрировать его практическую ценность для задач проектирования и оптимизации БПЛА.

Глава 1. Аналитический обзор винтомоторных групп БПЛА и существующих методов их оценки

1.1. Назначение и роль винтомоторной группы в БПЛА

Винтомоторная группа является одним из ключевых функциональных узлов беспилотного летательного аппарата и предназначена для создания тяги, необходимой для выполнения полёта. В состав винтомоторной группы входят электродвигатель, воздушный винт и электронный регулятор скорости, работа которых определяется взаимным согласованием характеристик. Эффективность данной группы напрямую влияет на основные лётно-технические параметры БПЛА, включая максимальную тягу, энергоэффективность, дальность и продолжительность полёта.

В процессе эксплуатации винтомоторная группа функционирует в различных режимах, таких как взлёт, набор высоты, крейсерский полёт и маневрирование, что предъявляет противоречивые требования к её параметрам. Например, режим взлёта требует высокой тяги, тогда как крейсерский режим ориентирован на минимальное энергопотребление. Неправильный подбор компонентов винтомоторной группы может привести к снижению КПД системы, перегрузке двигателя, увеличению потребляемой мощности и сокращению ресурса элементов. В связи с этим задача оптимального выбора и оценки характеристик винтомоторной группы является одной из наиболее актуальных при проектировании БПЛА

1.2. Основные характеристики электродвигателей для БПЛА

Электродвигатели, используемые в беспилотных летательных аппаратах, выполняют функцию преобразования электрической энергии аккумуляторной батареи в механическую энергию вращения воздушного винта. От характеристик электродвигателя во многом зависят тяговые возможности БПЛА, его энергоэффективность, надёжность и продолжительность полёта. В современных конструкциях БПЛА преимущественно применяются бесколлекторные электродвигатели постоянного тока, обладающие высоким коэффициентом полезного действия, низким уровнем механического износа и широким диапазоном рабочих режимов.

Одним из основных параметров электродвигателя является коэффициент KV , характеризующий зависимость частоты вращения вала от подводимого напряжения. Данный параметр оказывает существенное влияние на выбор воздушного винта, поскольку определяет диапазон рабочих оборотов двигателя. Двигатели с высоким значением KV , как правило, используются с винтами малого диаметра и шага, тогда как двигатели с низким KV

предназначены для работы с крупными винтами, обеспечивающими высокую тягу при меньших оборотах.

Не менее важными характеристиками являются максимальный допустимый ток, номинальная и максимальная мощность двигателя. Эти параметры ограничивают возможные режимы работы винтомоторной группы и должны учитываться при выборе аккумулятора и электронного регулятора скорости. Работа двигателя за пределами допустимых значений приводит к перегреву, снижению КПД и сокращению срока службы компонентов. Также существенную роль играет масса двигателя, поскольку она напрямую влияет на суммарную массу БПЛА и его аэродинамические характеристики.

Коэффициент полезного действия электродвигателя определяет долю полезной механической мощности по отношению к потребляемой электрической энергии. Повышение КПД двигателя позволяет снизить энергопотребление винтомоторной группы и увеличить продолжительность полёта без изменения ёмкости аккумулятора. Однако реальный КПД двигателя существенно зависит от режима работы и характеристик применяемого винта. В условиях отсутствия универсальных теоретических моделей оптимальный выбор электродвигателя и его согласование с воздушным винтом требуют проведения экспериментальных исследований, что обосновывает необходимость разработки специализированного исследовательского стенда.

1.3. Характеристики и параметры воздушных винтов БПЛА

Воздушный винт является элементом винтомоторной группы, непосредственно формирующим тягу за счёт взаимодействия с воздушной средой. Его геометрические и аэродинамические характеристики в значительной степени определяют эффективность преобразования механической энергии двигателя в полезную тягу. В условиях эксплуатации БПЛА правильный выбор воздушного винта имеет не меньшее значение, чем подбор электродвигателя.

К основным параметрам воздушных винтов относятся диаметр, шаг, число лопастей и профиль лопасти. Диаметр винта влияет на объём вовлекаемого воздушного потока и, как правило, определяет величину создаваемой тяги при заданной частоте вращения. Шаг винта характеризует теоретическое перемещение винта за один оборот и оказывает существенное влияние на режим работы винтомоторной группы, включая потребляемую мощность и нагрузку на двигатель. Увеличение шага винта может приводить к росту тяги на высоких скоростях, но одновременно увеличивает ток и снижает эффективность в других режимах.

Число лопастей и форма их профиля определяют распределение аэродинамических нагрузок и уровень вибраций. Многолопастные винты

позволяют уменьшить диаметр при сохранении тяги, однако зачастую сопровождаются снижением КПД. Дополнительно важную роль играют материалы изготовления винтов, такие как пластик, композитные материалы или углепластик, которые влияют на жёсткость, массу и долговечность изделия.

Отсутствие универсальных теоретических моделей, позволяющих точно описать работу винта в составе конкретной винтомоторной группы, делает экспериментальные исследования ключевым инструментом оценки его характеристик и выбора оптимальных параметров.

1.4. Существующие методы подбора и оценки винтомоторных групп БПЛА

Подбор винтомоторной группы БПЛА традиционно осуществляется с использованием расчётных, эмпирических и экспериментальных методов. Наиболее простым подходом является применение эмпирических зависимостей и рекомендаций производителей, основанных на обобщённых данных испытаний. Такие методы позволяют получить ориентировочные значения тяги и потребляемой мощности, однако не учитывают индивидуальные особенности конкретного двигателя, винта и условий эксплуатации.

Более сложные методы основаны на использовании упрощённых теоретических моделей аэродинамики винта, включая элементы теории несущего винта и импульсной теории. Эти модели позволяют оценить основные параметры работы винта, но требуют введения большого числа допущений и коэффициентов, что снижает точность расчётов. Кроме того, подобные методы слабо применимы к малым БПЛА, где влияние турбулентности, конечных эффектов и особенностей профиля лопастей отлично от большой авиации.

Широкое распространение получили программные средства и онлайн-калькуляторы, предназначенные для подбора винтомоторных групп. Несмотря на удобство использования, их результаты носят приближённый характер и часто основаны на ограниченных базах данных. Фактические параметры работы винтомоторной группы могут существенно отличаться от расчётных значений.

Экспериментальные методы являются наиболее достоверным способом оценки характеристик винтомоторной группы, поскольку позволяют учитывать реальные условия работы системы. Однако проведение таких испытаний требует наличия специализированного оборудования. Недостаточная доступность универсальных исследовательских стендов

обуславливает актуальность разработки собственного стенда для оценки эффективности винтомоторных групп БПЛА.

1.5. Аналоги исследовательских стендов для испытаний винтомоторных групп БПЛА

На рынке представлены готовые испытательные стенды для оценки характеристик винтомоторных групп, предназначенные в первую очередь для промышленных, научно-исследовательских и образовательных организаций. Примером такого оборудования является стенд для испытания винтомоторных групп BRLab, предлагаемый как аппаратно-программный комплекс для измерения тяги, тока, напряжения и оборотов, с возможностью автоматизированного построения зависимостей и экспорта данных (см. рис.1).

СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ВИНТОМОТОРНЫХ ГРУПП BRLAB



Артикул: 88104811

1 470 000 руб ~~1 540 000 руб~~

Цены обновлены 24.10.2025

В КОРЗИНУ

Компания «Партнер» предлагает купить по выгодным ценам Стенд для испытания винтомоторных групп BRLab

рис. 1

Широкий спектр подобных стендов представлен зарубежными решениями. Так, серия стендов Dynotis включает модели разной мощности — от относительно компактных ST-51 (\$959) до профессиональных станций с калибровкой по промышленным стандартам и ценой от \$4 000 до \$10 000 (см. рис.2). Аналогично, стенды от Akash Shastra обеспечивают высокоточную регистрацию тяги, момента, оборотов и других параметров, но реализуются в рамках промышленного оборудования с индивидуальным запросом цены от производителя.



Home / DYNOTIS / ST-501

ST-501

\$9.420,00

Ships within 3-4 weeks

The Dynotis ST-501 SEMAI's latest leap in flight tech. Expect enhanced specs for thrust, torque, and larger propellers, meeting top ASTM standards.

1 ADD TO CART

Category: DYNOTIS

Share: f t in

рис. 2

Функционально перечисленные стенды обеспечивают:

- измерение тяги, момента, тока и напряжения;
- автоматизированный сбор и анализ данных;

- программное обеспечение для визуализации результатов.

Несмотря на широкий набор функций, все перечисленные аналоги имеют существенный недостаток — очень высокую стоимость. Даже относительно недорогие стенды выходят по цене за рамки бюджета индивидуальных конструкторов и авиамоделлистов-энтузиастов. В результате возникает потребность в разработке доступного, универсального и функционального стенда, адаптированного под задачи практического подбора ВМГ в условиях ограниченного бюджета.

Глава 2. Разработка исследовательского стенда для оценки эффективности винтомоторной группы

2.1. Конструкция и принцип работы стенда

Проанализировав существующие аналоги, принцип их работы я разработал основную идею устройства стенда с учетом использования доступных комплектующих.

Я решил, что конструкция стенда будет выполнена на основе алюминиевого профиля, который обеспечивает необходимую жёсткость, малую массу и возможность модульной сборки. Электродвигатель с установленным воздушным винтом можно будет закреплять на вертикальной стойке, которая соединена с основанием, выполненным из фанеры, усиленной алюминиевыми направляющими. Такая компоновка обеспечивает устойчивость конструкции и снижает влияние вибраций при работе винта. Горизонтальные элементы профиля выполняют функцию опор и позволяют равномерно распределить нагрузки, возникающие при работе винтомоторной группы.

Принцип измерения тяги основан на использовании тензометрического датчика, преобразующего механическое усилие, создаваемое винтом, в электрический сигнал. При вращении винта тяговое усилие передаётся через элементы конструкции на датчик, после чего сигнал обрабатывается микроконтроллером Arduino. Результат измерения тяги отображается в граммах, что удобно для анализа характеристик малых и средних БПЛА.

Для оценки электрических параметров винтомоторной группы измеряются напряжение питания и сила тока в цепи двигателя. На основе этих данных программно будет вычисляться потребляемая электрическая мощность. Измерение осуществляется в реальном времени, что позволяет анализировать изменение параметров в зависимости от режима работы двигателя.

Требования к точности измерений определяются характеристиками применяемых датчиков и их паспортной погрешностью. Требования по безопасности включают жёсткое крепление винта и двигателя, устойчивость конструкции и защитную металлическую сетку. Универсальность стенда обеспечивается возможностью установки различных типов моторов и винтов без изменения базовой конструкции.

2.2. Выбор измерительных средств и электронных компонентов

Для реализации измерительной части стенда я использовал доступные и широко распространённые электронные компоненты, которые обеспечивают необходимую точность измерений и при этом имеют невысокую стоимость. В качестве основного управляющего элемента выбран микроконтроллер Arduino Uno, так как он прост в программировании, имеет достаточное количество входов и выходов и поддерживается большим числом готовых библиотек.

Для измерения силы тока, потребляемого электродвигателем, я применил модуль датчика тока ACS712ELCTR-30A, рассчитанный на ток до 30 А. Он позволяет безопасно измерять ток в цепи питания двигателя в реальном времени. Напряжение питания измеряется с помощью датчика напряжения 25V Voltage Sensor Module, который представляет собой простой делитель напряжения и легко подключается к Arduino.

Измерение тяги осуществляется с использованием тензодатчика от электронных весов с максимальной нагрузкой 5 кг. Для повышения точности измерений сигнал с тензодатчика обрабатывается с помощью АЦП HX711, специально предназначенного для работы с тензометрическими датчиками. Выбранный набор компонентов позволяет реализовать полноценный измерительный стенд с минимальными затратами и возможностью дальнейшей модернизации.

2.3. Программное обеспечение исследовательского стенда

Программное обеспечение стенда я написал на языке C++ в среде Arduino IDE. В качестве микроконтроллера используется Arduino Uno, поэтому код построен на стандартной структуре программы Arduino. Для работы с тензодатчиком я подключил библиотеку HX711, которая позволяет считывать значения тяги и выполнять их калибровку. Измерение тока и напряжения реализовано с помощью стандартных функций чтения аналоговых входов.

Программа работает в циклическом режиме. В основном цикле последовательно считываются значения тяги, силы тока и напряжения питания двигателя. Далее по измеренным значениям тока и напряжения я

рассчитываю потребляемую электрическую мощность. Для повышения стабильности показаний данные усредняются по нескольким измерениям.

Полученные значения выводятся в последовательный порт, откуда их можно считывать на компьютере и сохранять для дальнейшего анализа. Структура кода сделана простой и понятной, что позволяет легко изменять алгоритм работы стенда и добавлять новые функции при необходимости (см. Приложение 3).

2.4. Этапы изготовления и сборки исследовательского стенда

Изготовление исследовательского стенда выполнялось поэтапно. На первом этапе я напилил алюминиевый профиль по заранее заданным размерам в соответствии с разработанной схемой конструкции. После этого в профиле были просверлены отверстия для крепёжных элементов, что позволило обеспечить точную сборку и необходимую жёсткость конструкции. Далее я собрал каркас стенда с использованием болтовых соединений, что упростило выравнивание элементов и позволило при необходимости вносить изменения в конструкцию.

На следующем этапе я выполнил сборку электронной части стенда. Электронные компоненты были спаяны в соответствии с разработанной схемой измерительной цепи (см. Приложение 1). После этого к металлическому каркасу были прикреплены винтомоторная группа с регулятором скорости, а также тензодатчик, предназначенный для измерения тяги. Далее я подключил винтомоторную группу к спаянной измерительной цепи и микроконтроллеру. Для безопасности изготовил и установил съёмный металлический чехол (см. рис.3 и 4).



рис. 3

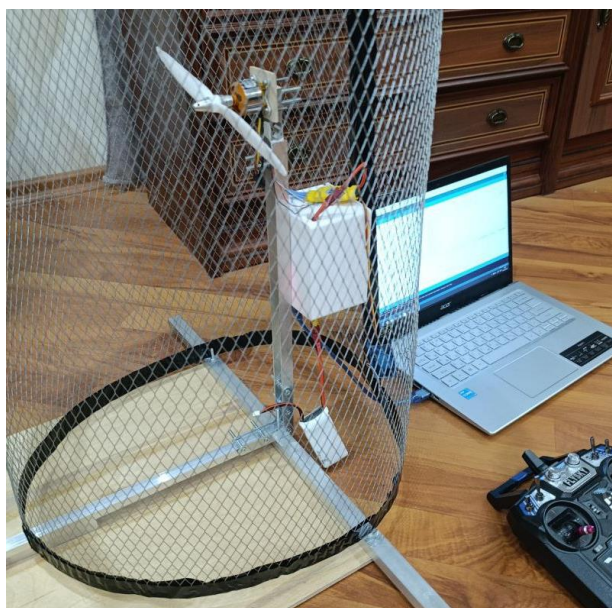


рис. 4

Заключительным этапом стала калибровка измерительных каналов, в том числе тензодатчика и датчиков тока и напряжения. После калибровки были проведены первые пробные испытания, подтвердившие работоспособность стенда и корректность измерений.

2.5. Расчёт себестоимости исследовательского стенда

Себестоимость разработанного стенда определялась на основе стоимости используемых материалов и электронных компонентов, которые покупались в строительном магазине и на маркетплейсах.

Наименование компонента	Стоимость, руб.
Arduino Uno	700
Датчик тока ACS712 30A	200
Тензодатчик 5 кг АЦП НХ711	250
Датчик напряжения 25V	150
Алюминиевый профиль	400
Крепёж (болты и гайки)	100
Провода, пайка	50
Итого	1850

Таким образом, общая себестоимость исследовательского стенда составила около 1850 рублей. Для сравнения, готовые промышленные и учебные стенды для испытаний винтомоторных групп, представленные на рынке, имеют стоимость от сотен до миллиона рублей. Разработанный стенд значительно дешевле аналогов и при этом позволяет измерять основные параметры, необходимые для экспериментального подбора винтомоторных групп, что делает его доступным для любительского авиамоделизма и учебных проектов.

Глава 3. Апробация исследовательского стенда и проведение экспериментального исследования

3.1. Цель и гипотеза экспериментального исследования

Для апробации разработанного исследовательского стенда я решил провести небольшое экспериментальное исследование. Его цель — проверить работоспособность стенда в реальных условиях и оценить возможность получения на нём стабильных и наглядных экспериментальных данных. В

качестве объекта исследования была выбрана зависимость создаваемой тяги и потребляемой мощности от шага воздушного винта.

Для проведения эксперимента я планирую изготовить на 3D-принтере четыре воздушных винта с одинаковым диаметром, но с разным шагом. Все винты будут устанавливаться на один и тот же электродвигатель, что позволит исключить влияние других факторов и сосредоточиться на влиянии шага винта.

В качестве гипотезы выдвигается предположение, что изменение шага винта при неизменном диаметре и двигателе приводит к заметному изменению тяги и энергопотребления винтомоторной группы. Ожидается, что для одного из значений шага будет достигнуто наиболее эффективное соотношение между создаваемой тягой и потребляемой мощностью, что подтвердит практическую ценность разработанного стенда.

3.2. Методика проведения эксперимента

Эксперимент проводился с целью оценки влияния шага воздушного винта на эффективность винтомоторной группы. В качестве электродвигателя я использовал бесколлекторный двигатель 2212 с коэффициентом 1000 KV. Для испытаний были выбраны воздушные винты диаметром 9 дюймов с различным шагом — 2, 4, 6 и 8 дюймов. Все винты были изготовлены на 3D-принтере и устанавливались на один и тот же двигатель, что обеспечивало одинаковые условия эксперимента.

Для каждого винта двигатель работал при постепенном увеличении уровня потребляемой электрической мощности, который задавался с помощью регулятора скорости. В процессе испытаний я измерял создаваемую тягу, напряжение и силу тока с использованием разработанного стенда. На основе измеренных значений тяги и мощности для каждой винтомоторной группы рассчитывался показатель эффективности в виде отношения тяги к потребляемой мощности, выраженный в граммах на ватт. По результатам расчётов проводилось сравнение полученных значений и определялся наиболее эффективный винт.

3.3 Анализ результатов экспериментального исследования

Полученные в результате исследования данные я оформил в виде таблицы для каждого исследуемого воздушного винта. В ней были представлены значения потребляемой мощности и соответствующей ей тяги. Используя программу Excel на основе табличных данных, я построил графики зависимости тяги (веса) от потребляемой мощности отдельно для каждого эксперимента. Такой

способ позволил наглядно оценить характер изменения тяги при увеличении мощности и сравнить работу винтомоторной группы с разным шагом винта. Для каждого графика я выполнил линейную аппроксимацию экспериментальных точек с помощью стандартной функции «линия тренда». В результате для каждого винта было получено уравнение прямой вида «тяга – мощность». Угловым коэффициентом данной прямой соответствует величине тяги, создаваемой на единицу потребляемой мощности, и, таким образом, может быть принят в качестве усреднённого показателя энергетической эффективности винтомоторной группы, выраженного в граммах на ватт. Полученные значения коэффициентов позволили корректно сравнить эффективность различных винтов между собой (см. Приложение 2).

Таким образом, по результатам обработки данных было установлено, что наибольшую эффективность в выбранном диапазоне мощности показал винт 9×4. Он обеспечил наилучшее соотношение создаваемой тяги к потребляемой электрической мощности. Винты с меньшим шагом (9×2) и средним шагом (9×6) показали близкие результаты, но уступили винту 9×4 по показателю г/Вт. Наименее эффективным оказался винт 9×8, который создавал большую тягу, однако требовал значительно большей мощности, что приводило к снижению общей энергоэффективности винтомоторной группы.

Полученные результаты соответствуют ожидаемым физическим представлениям о работе винтомоторных групп, подтверждают выдвинутую гипотезу и целесообразность использования разработанного стенда для экспериментального подбора и сравнения винтов. Таким образом, апробация показала, что стенд может эффективно применяться для практических исследований и оптимизации винтомоторных групп БПЛА.

Заключение

В ходе выполнения данного проекта мной была достигнута основная цель — создан и успешно апробирован исследовательский стенд для оценки эффективности винтомоторной группы беспилотного летательного аппарата. Создание такого стенда было обусловлено отсутствием точных теоретических и расчётных методов подбора оптимального сочетания мотора и воздушного винта, особенно в условиях любительского авиамоделизма. Поэтому основной упор в работе был сделан на экспериментальный подход.

В ходе реализации проекта были последовательно решены все поставленные задачи. Я изучил существующие аналоги испытательных стендов и проанализировал их функциональные возможности, а также основные недостатки, главным из которых является высокая стоимость. На

основе этого была разработана собственная конструкция стенда, отличающаяся простотой, универсальностью и доступной себестоимостью. Было реализовано измерение тяги, напряжения, силы тока и потребляемой мощности с использованием недорогих и распространённых датчиков. Также было написано программное обеспечение для сбора и отображения данных с измерительных модулей.

Для проверки работоспособности стенда я провёл экспериментальное исследование, в рамках которого сравнил эффективность нескольких воздушных винтов с различным шагом. Полученные результаты показали, что разработанный стенд позволяет получать стабильные и наглядные экспериментальные данные.

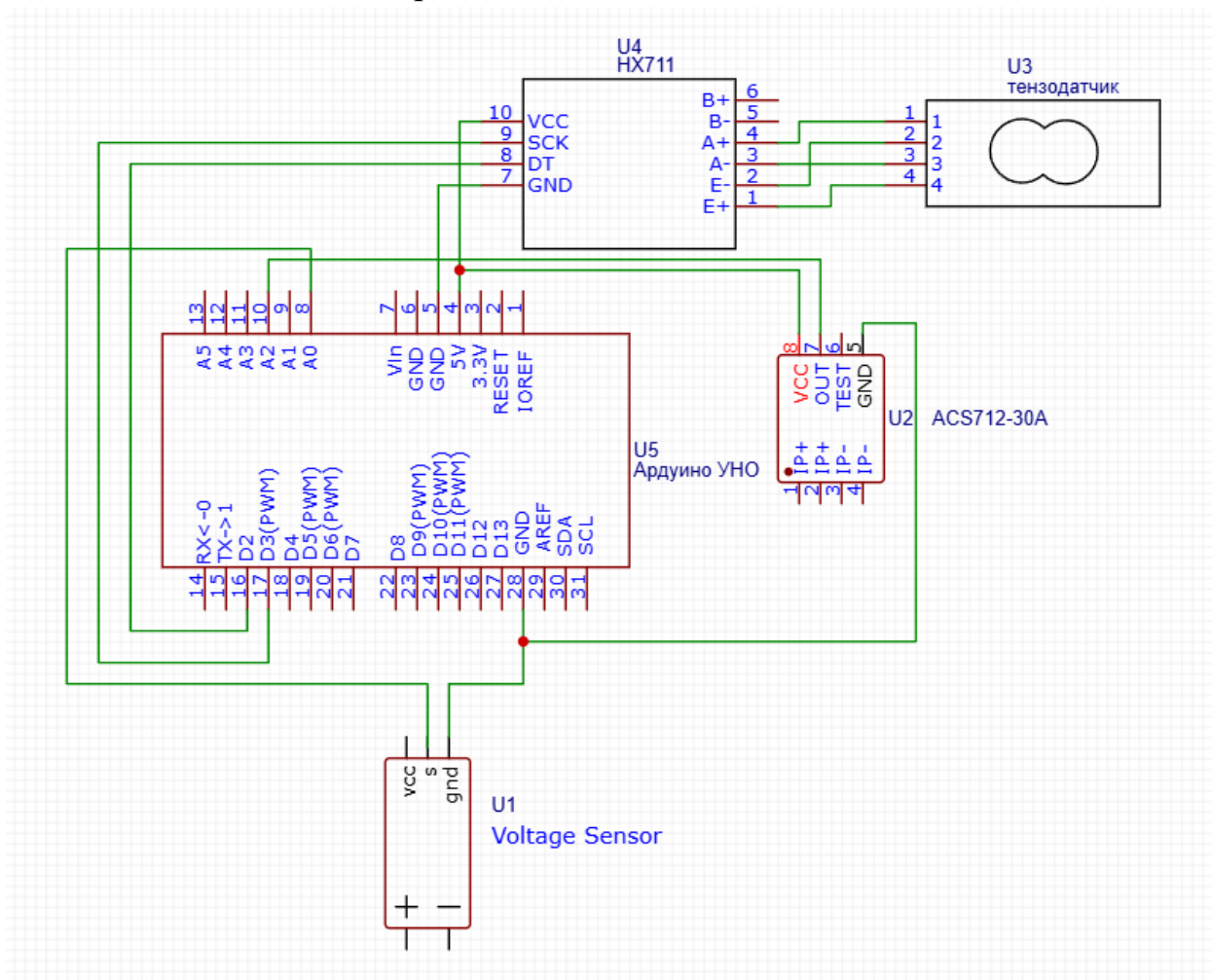
Перспективы дальнейшего развития проекта я вижу в создании программного обеспечения с удобным пользовательским интерфейсом. Такое программное обеспечение позволит автоматизировать процесс измерений, визуализировать результаты в виде графиков и диаграмм, а также выполнять автоматическую оценку эффективности винтомоторных групп. Это сделает стенд ещё более удобным и полезным для учебных и любительских исследований в области беспилотной авиации.

Список использованной литературы

1. Александров В.Л. Воздушные винты. М., Оборон-гиз,1951
2. Верещиков Д.В. Натурный стенд для отработки системы управления винтомоторной силовой установкой конвертируемого летательного аппарата / Д.В. Верещиков, И.К. Макаров, И.С. Моисеева, С.М. Баранцев //Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 1. С. 61–71.
3. Легконогих Д.С. Экспериментальные исследования характеристик электрических силовых установок для легких БЛА // Вестник УГАТУ. - 2022. - №26. - С. 81-91.
4. Солецкий В.В., Киба Д.А., Бородин М.А. Разработка стенда для определения характеристик винтомоторной группы летательных аппаратов в различных средах // Известия ТулГУ. Технические науки. - №2- С. 42-51.
5. Сычёв А.В., Равикович Ю.А., Борисов Д.А. Стендовые испытания электрической винтомоторной группы как первый этап в создании гибридной силовой установки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 3. С. 99-107.

Приложение 1

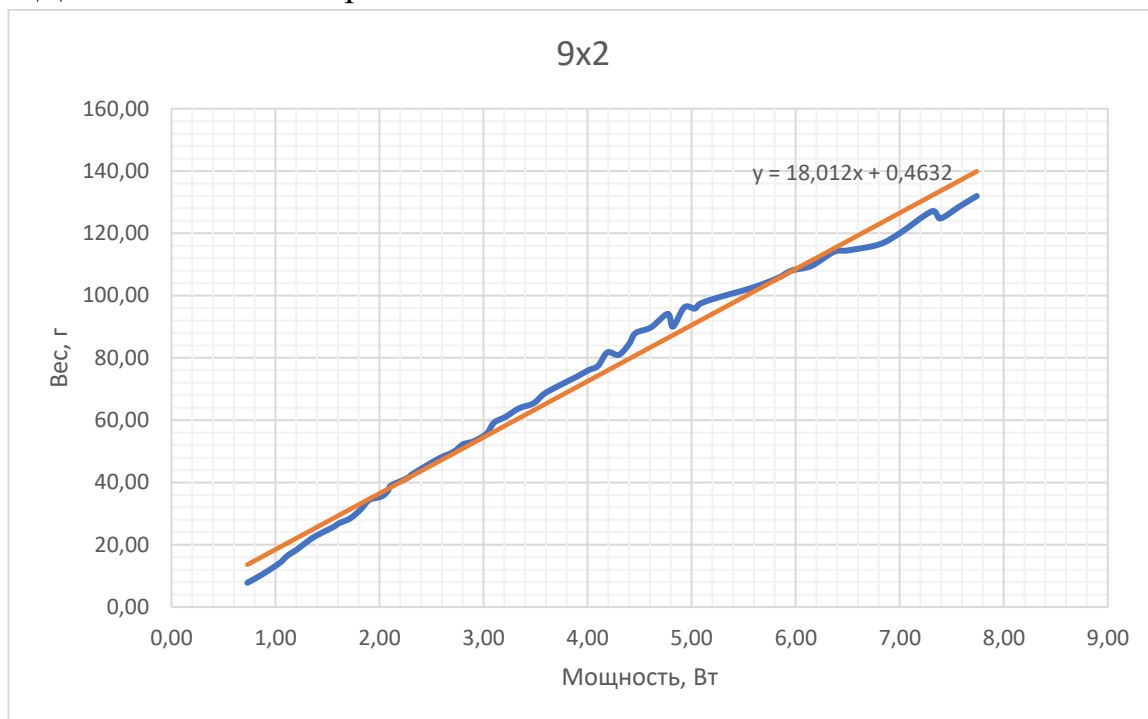
Схема подключения электрических компонентов



Приложение 2

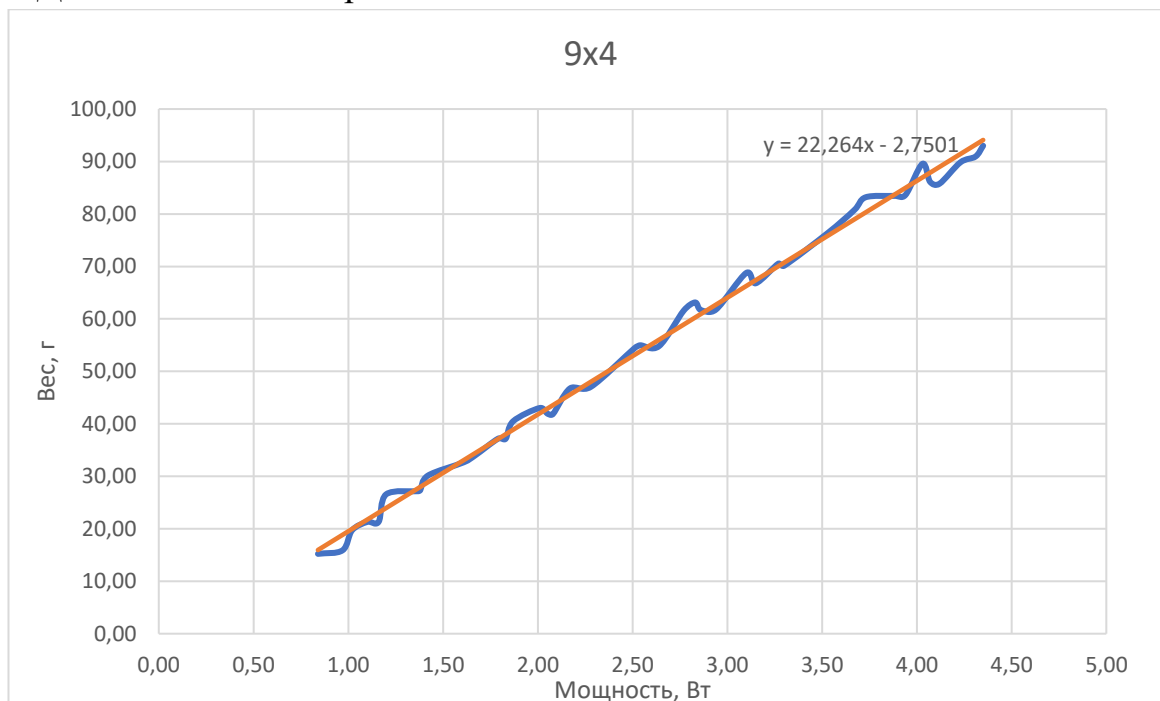
Графики зависимостей тяги от мощности для ВМГ

1. Для винта с диаметром 9 дюймов и шагом 2 дюйма



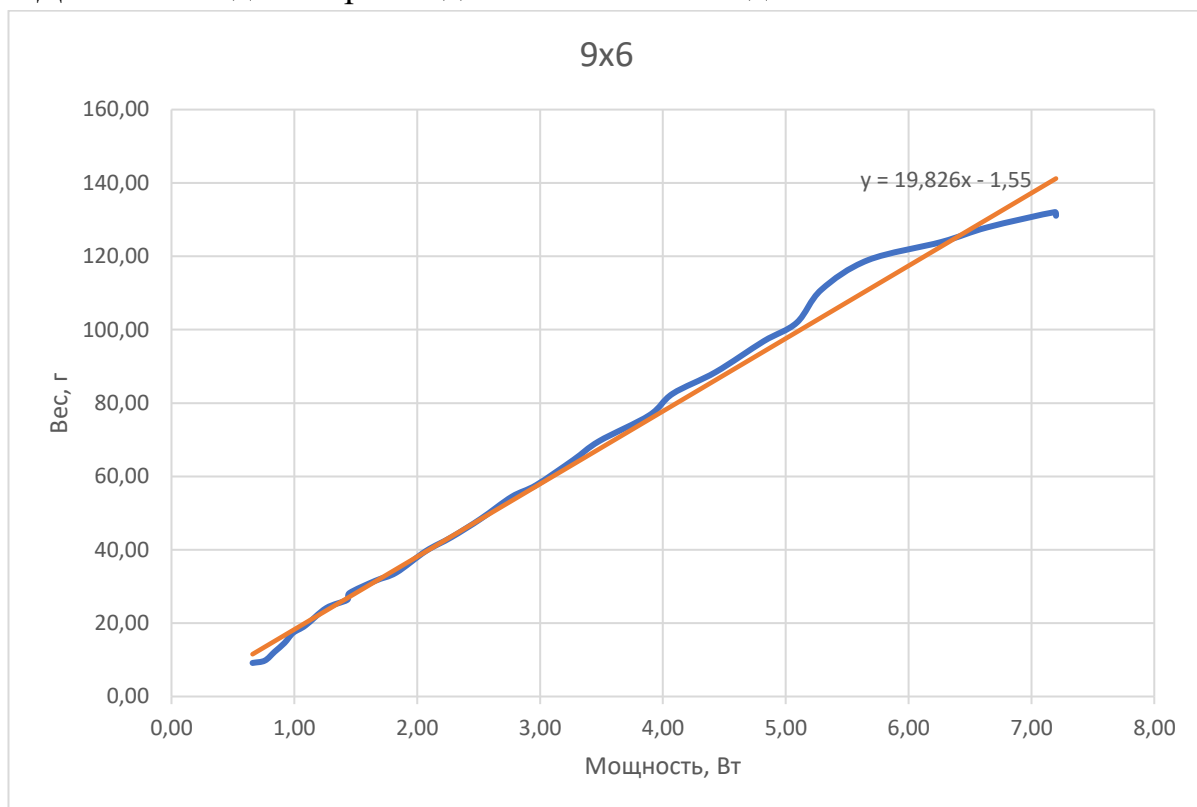
Средняя эффективность -18,01 г/Вт

2. Для винта с диаметром 9 дюймов и шагом 4 дюйма



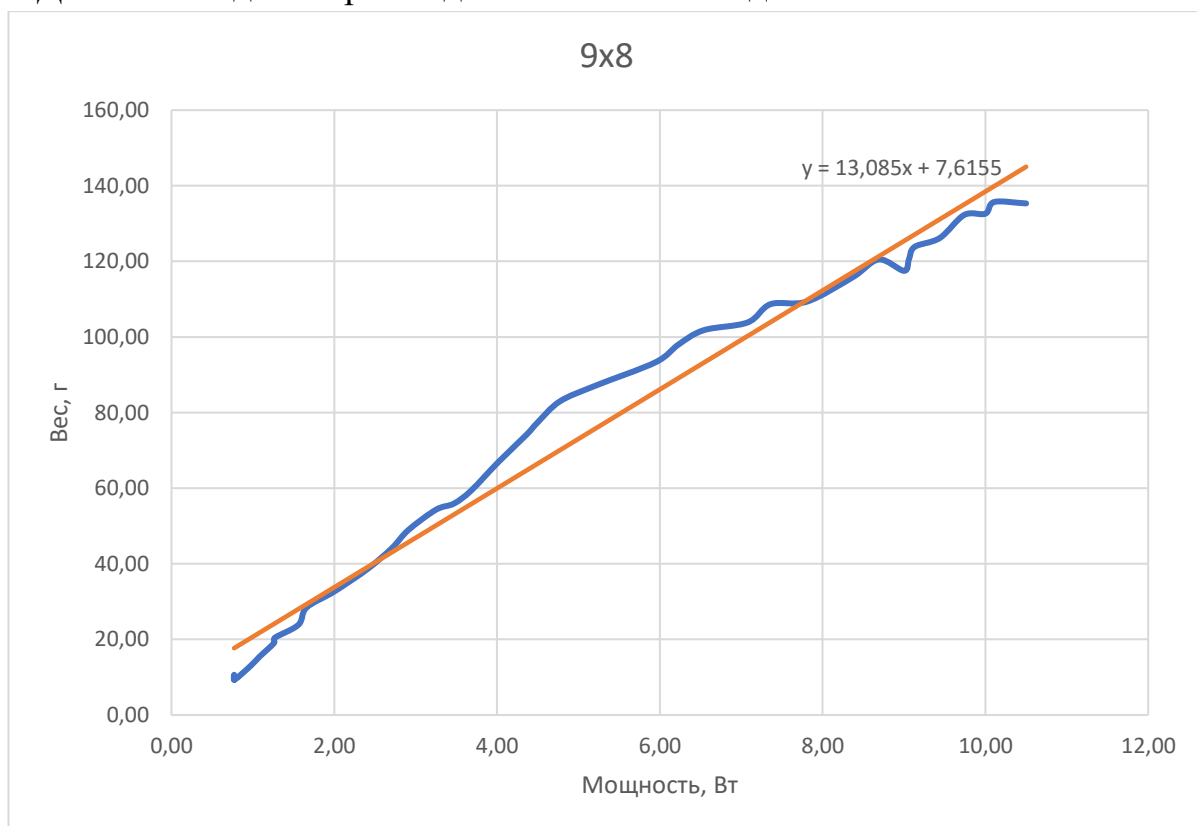
Средняя эффективность -22,26 г/Вт

3. Для винта с диаметром 9 дюймов и шагом 6 дюймов



Средняя эффективность -19,83 г/Вт

4. Для винта с диаметром 9 дюймов и шагом 8 дюймов



Средняя эффективность -13,09 г/Вт

Приложение 3.

Используемый код можно посмотреть по [ссылке](#).

РЕЦЕНЗИЯ

на проект

«Создание исследовательского стенда для оценки и подбора винтомоторных групп БПЛА», обучающегося 9 «Б» класса ГБОУ ПО «Академический лицей № 14» г. Пензы Елисеева Дмитрия

Проект Елисеева Дмитрия посвящен разработке исследовательского стенда для оценки эффективности винтомоторной группы беспилотного летательного аппарата. Автор рассматривает актуальную инженерную задачу подбора оптимального сочетания электродвигателя и воздушного винта, которая не может быть полностью решена только расчетными методами и требует экспериментальной проверки. В работе сделан акцент на создании доступного и универсального стенда, пригодного для учебных и любительских исследований.

Структура работы логично выстроена и соответствует целям проекта. Работа состоит из введения, теоретической части, практической части, раздела, посвященного экспериментальному исследованию и апробации стенда, а также итогового заключения.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, связанная с необходимостью повышения энергоэффективности и дальности полета БПЛА. Елисеев Дмитрий аргументированно указывает на отсутствие универсальных теоретических методов подбора винтомоторных групп и формулирует цель, задачи и методы исследования.

В теоретической части автор рассматривает основные параметры, влияющие на тягу и потребляемую мощность ВМГ, а также проводит обзор существующих испытательных стендов. Особое внимание уделено их функциональным возможностям и основному недостатку — высокой стоимости, что обосновывает необходимость разработки собственного стенда.

Практическая часть работы является наиболее значимой. В ней Дмитрий последовательно описывает этапы изготовления стенда, сборку конструкции, подключение измерительных датчиков и электронных компонентов, калибровку системы. Отдельно приведён расчет себестоимости, показывающий существенное преимущество разработанного стенда по сравнению с промышленными аналогами.

В разделе апробации приведено экспериментальное исследование, проведенное с использованием разработанного стенда. Автор описывает методику эксперимента, обработку полученных данных и построение графиков зависимости тяги от мощности. На основе линейной аппроксимации экспериментальных данных определяется среднее значение энергетической эффективности винтомоторных групп. Результаты исследования являются наглядными и обоснованными.


В заключении подводятся итоги выполненной работы. Автор отмечает достижение поставленных целей и решение всех задач, а также формулирует перспективы дальнейшего развития проекта. В частности, предложено создание программного обеспечения с удобным интерфейсом и автоматической визуализацией результатов измерений.

В целом работа выполнена на хорошем уровне, отличается логичностью изложения, практической направленностью и самостоятельностью. Разработанный стенд и проведенное исследование подтверждают инженерную ценность проекта.

Работу можно рекомендовать к участию в XXX научно-практической конференции школьников г. Пензы «Я исследую мир».

Рецензент

Инженер-конструктор ГБОУ ПО «Старо»
Должность



Подпись

Бобyleв Ф. А.

Фамилия Имя Отчество