

УДК 629.7.035.7

Стенд для экспериментального исследования характеристик воздушных винтов

Яшин Дмитрий Николаевич(*)

yadn24ea529@student.bmstu.ru

Прусов Филипп Дмитриевич

filipp.prusov@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Работа посвящена созданию универсального экспериментального стенда для исследования характеристик воздушных винтов авиамоделей в различных комбинациях двигатель – регулятор – батарея и условиях, а также проверке и подтверждению его полной работоспособности. Представлена схема стенда, электрическая схема блока электроники, описаны их основные составляющие и приведена методика проведения эксперимента и сбора данных для последующей обработки. Приведены основные результаты тестовых пусков стенда в различных режимах. Сделан вывод о его полной работоспособности в широком диапазоне режимов работы.

Ключевые слова: воздушные винты, авиамодели, аэродинамическая труба, воздушный винт, мультикоптер

A test stand for the experimental research of propeller characteristics

Yashin Dmitriy Nikolayevich(*)

yadn24ea529@student.bmstu.ru

Prusov Filipp Dmitrievich

filipp.prusov@yandex.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This work is devoted to the development of a universal experimental test bench for investigating the performance characteristics of air model propellers across various motor – speed controller – battery combinations and operating conditions, as well as to the verification and validation of its full operational capability. The paper presents the test bench layout, the electrical schematic of the control unit, describes its key components, and outlines the methodology for conducting experiments and collecting data for subsequent processing. The key results of the bench's test runs under various operating modes are provided. It is concluded that the test bench is fully operational across a wide range of regimes.

Keywords: propellers, model aircraft, wind tunnel, propeller, multicopter

Введение. Квадрокоптеры и авиамодели, активно применяются в аэросъемке, мониторинге инфраструктуры, доставке и сельском хозяйстве. Энергоэффективность воздушных винтов напрямую определяет время полета моделей и квадрокоптеров. На практике выбор винтов часто основывается на эмпирических данных или усредненных характеристиках производителей, а отсут-

ствие достоверной экспериментальной базы тормозит разработку винтов под конкретные задачи [1, 2].

Целью работы является создание экспериментального стенда, который позволяет проводить систематические исследования зависимостей между геометрией винта, режимами работы, его тягой и крутящим моментом.

Материалы и методы. Механическая часть стенда (рис. 1) расположена в выходной зоне аэродинамической трубы. Исполнительный элемент — электродвигатель Tenshock CZII2250 KV2130. Формируемый в трубе воздушный поток создает нагрузку на винт, имитируя режимы полета квадрокоптера.

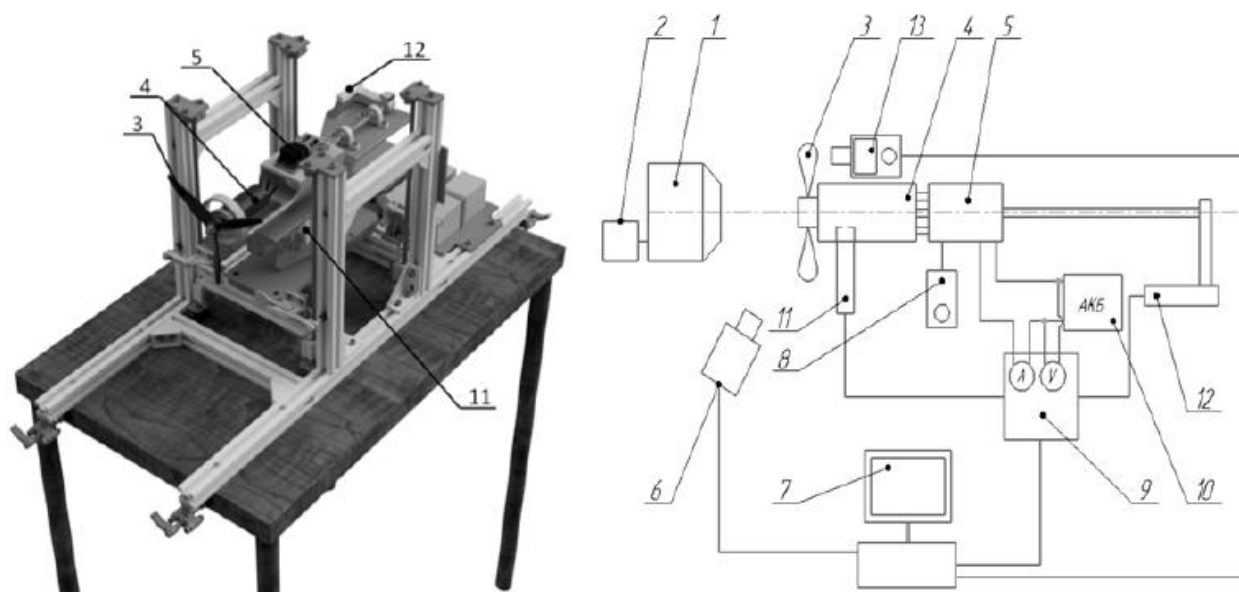


Рис. 1. Фотография и схема испытательного стенда:

1 — аэротруба; 2 — блок управления аэротрубы; 3 — опытный образец; 4 — электродвигатель; 5 — регулятор для электродвигателя; 6 — видеокамера; 7 — персональный компьютер; 8 — сервотестер; 9 — блок электроники; 10 — аккумулятор; 11 — тензометрический датчик тяги; 12 — тензометрический датчик момента; 13 — тахометр

Стенд регулируется по высоте для работы с винтами диаметром 7–10 дюймов и может быть адаптирован под менее мощные воздушные винты. Угол между осью винта и потоком воздуха изменяется от 0 до 90°, что позволяет моделировать движение под углом к потоку. Электродвигатель закреплен на валу с жестким рычагом и тензодатчиком для измерения крутящего момента. Вал размещен на каретке с тензодатчиком тяги. Частота вращения регулируется сервотестером (0–50 000 об/мин), скорость потока — частотным преобразователем вентилятора (0–150 км/ч). Коэффициент скорости двигателя (KV) — 2130. В данной сборке для питания сети установлены два аккумулятора, суммарно создающие напряжение в 50 В. Конструкция также позволяет устанавливать другие комбинации двигатель – регулятор – батарея для испытания различных воздушных винтов.

На рис. 2 приведена электрическая схема блока электроники, где 1 — микроконтроллер Arduino Nano; 2 и 3 — аналогово-цифровой преобразовате-

ли на базе микросхемы HX711; 4 — прецизионный токовый сенсор с гальванической развязкой ACS75; 5 — делитель напряжения.

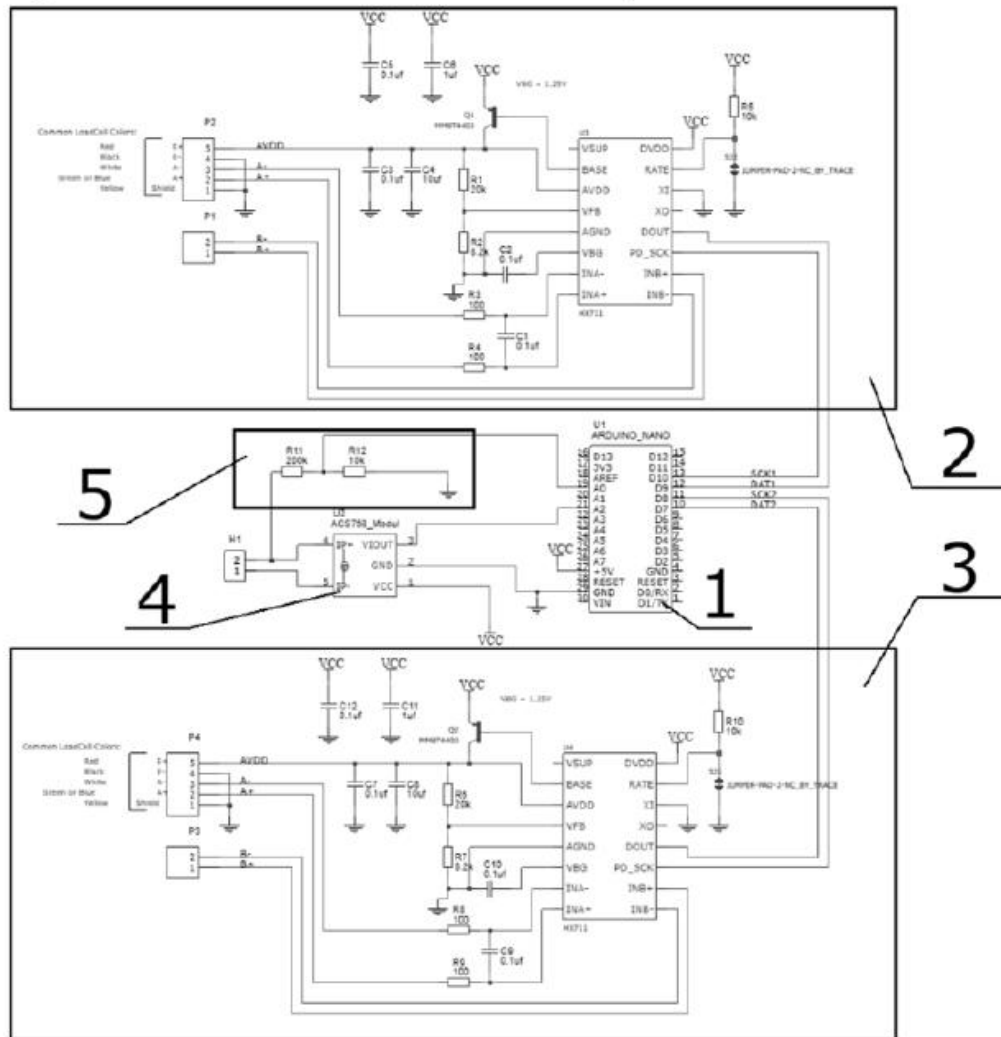


Рис. 2. Электрическая схема блока электроники

Электронная система экспериментального стенда обеспечивает измерение электрических параметров воздушных винтов, сбор и передачу данных для последующей обработки и анализа. Архитектура системы построена на основе микроконтроллера Arduino Nano, который служит центральным узлом, агрегирующим сигналы с датчиков и передающим данные в числовом виде по последовательному интерфейсу на компьютер. Обмен данными с ПК осуществляется через Serial-интерфейс, где происходит их обработка в пользовательской программе, написанной в среде Processing. В данной программе реализована возможность онлайн-мониторинга параметров, а также сохранения данных (время, тяга, ток, напряжение, мощность, крутящий момент) в формате таблицы для последующего анализа.

С целью измерения силы тока в сети от 0 до 100 А с высокой точностью установлен прецизионный токовый сенсор с гальванической развязкой ACS758, который подключен к аналоговому входу Arduino. К другому анало-

говому входу Arduino подключен делитель напряжения, который позволяет безопасно измерять напряжение в сети питания мотора, которое может составлять до 50 В в зависимости от числа подключенных аккумуляторов. Делитель реализован с учетом допустимого диапазона входного напряжения микроконтроллера. Помимо этого, в системе для измерения осевой тяги и крутящего момента используются два тензометрических датчика, подключаемых через усилители HX711. Один из датчиков установлен таким образом, чтобы воспринимать только продольную силу, второй — с соответствующим плечом относительно оси двигателя, что позволяет снимать момент.

Сигналы от тензодатчиков усиливаются и оцифровываются в модулях HX711, которые подключаются к Arduino по цифровому интерфейсу, обеспечивая разрешение 24 бита. Электрические схемы усилителей включают в себя элементы стабилизации и фильтрации питания, что обеспечивает стабильную работу при наличии силовых помех от двигателя. Синхронизация всех измерений обеспечивается прошивкой Arduino, в которой данные с разных сенсоров опрашиваются с заданной частотой, агрегируются и выводятся в виде структурированного пакета данных в порт. Дополнительно в схему измерений включен лазерный тахометр, подключаемый напрямую к компьютеру через usb-интерфейс.

Перед началом испытаний определяется режим полета, в котором будет проводиться испытание. Он задается двумя параметрами: скоростью набегающего потока воздуха в аэродинамической трубе, углом между осью потока и осью воздушного винта. Выбор последовательности включения компонентов зависит от выбранной скорости потока [3]. После стабилизации начальных условий запускается серия измерений. Частота вращения винта изменяется дискретно — с помощью изменения управляющего сигнала PWM, задаваемого через сервотестер. На каждом уровне оборотов производится выдержка в 60 секунд для стабилизации всех параметров, после чего фиксируются значения тяги, крутящего момента, тока и напряжения. Все данные автоматически сохраняются в файл с привязкой ко времени. Испытания проводятся вплоть до достижения предельных значений по оборотам, либо до возникновения признаков выхода винта из строя, по которым принимается решение о завершении текущей серии. После завершения одного режима эксперимента, установка приводится в исходное состояние и испытание повторяется [4].

Результаты. Для демонстрации работоспособности стенда и получения базовых характеристик были проведены испытания трехлопастного винта HQProp 8×6×3. Эксперимент проводился при трех фиксированных значениях скорости воздушного потока: 38, 92 и 148 км/ч по методике, описанной ранее.

Обсуждение полученных результатов. Полученные данные позволили построить зависимости тяги от мощности, тяги от частоты вращения, а также оценить влияние набегающего потока на пропульсивную эффективность [5]. Графическое представление данных оформлено в виде соответствующей диа-

граммы. На рис. 3 приведен график зависимости тяги от электрической мощности при различных скоростях потока.

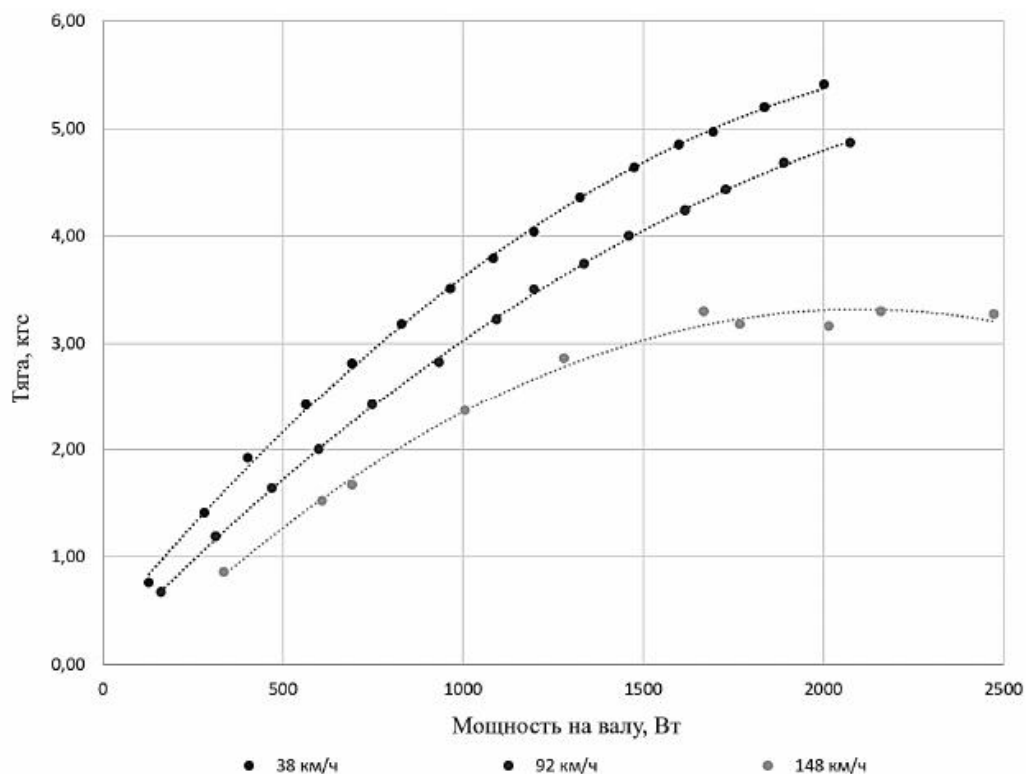


Рис. 3. Характеристика испытательного винта

Закключение. Проведенные тестовые запуски подтвердили полную работоспособность и устойчивость экспериментального стенда во всем диапазоне режимов. Разработанная система обеспечивает измерение ключевых параметров воздушных винтов — тяги, крутящего момента, оборотов, тока и напряжения — с достаточной точностью для дальнейшего анализа [6].

Список источников

- [1] Жуков К.А. *Воздушные винты*. Самара, СГАУ им. С.П. Королева, 1993, 56 с.
- [2] Бураго С.Г., Кишалов А.Н. *Аэродинамический расчет воздушного винта самолета*. Москва, МАИ, 1985, 44 с.
- [3] Шлихтинг Г. *Теория пограничного слоя*. Москва, Наука, 1974, 713 с.
- [4] Харитонов А.М. *Техника и методы аэрофизического эксперимента. Ч. 1. Аэродинамические трубы и газодинамические установки*. Новосибирск, НГТУ, 2005, 220 с.
- [5] Clough R.H., Penzien J. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill, 1975, 643 p.
- [6] Anderson J.D. *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill Education, 2019, 1131 p.

БЗ

**Холодильная техника,
компрессорные,
вакуумные
и гидравлические
машины**

