



Методика калибровки оборудования БВС, используемого для измерения параметров атмосферной турбулентности

Беркон Глеб Александрович, Поливанов П.А., Маркин В.В.
Институт Теоретической и Прикладной Механики СО РАН

Актуальность



Мультироторный ЛА с зондом*



Метеодрон швейцарской
компании *Meteomatics***

В настоящее время используется два подхода для определения скорости ветра с использованием беспилотных воздушных судов (БВС):

- На БВС устанавливаются измерительные зонды (трубка Пито и т. п.)
- БВС сам является «датчиком». Анализируется динамика полета. Например, ученые из Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН используют квадрокоптеры фирмы DJI для исследования физики атмосферного турбулентного пограничного слоя***.

Для проведения корректных и достоверных измерений ветровых атмосферных параметров необходимо выполнять калибровку используемых измерительных систем.

- Необходимо учитывать влияние обтекания конструкции ЛА на системы измерения ветровых условий

Особенные трудности возникают при анализе атмосферной турбулентности:

- Порывы ветра приводят к возникновению колебанию ЛА в пространстве, что будет приводит к погрешности измерения, которую требуется учитывать.
- Необходимо оптимизировать параметры PID регуляторов

**Multirotor UAV-Based Platform for the Measurement of Atmospheric Turbulence: Validation and Signature Detection of Tip Vortices of Wind Turbine Blades (Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology, 2019)*

** <https://www.meteomatics.com/>

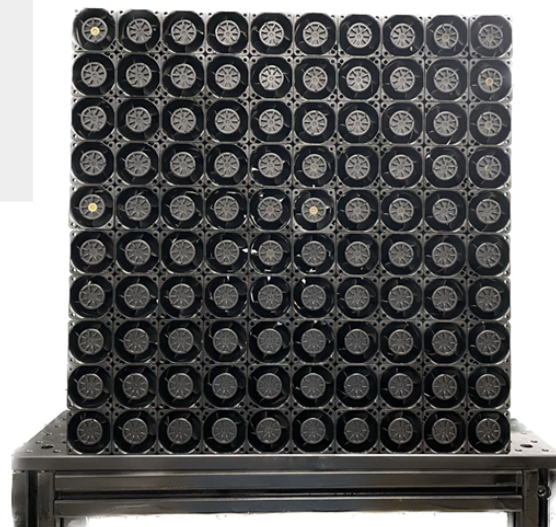
***А. П. Шелехова, А. Л. Афанасьев и др. Использование малоразмерных БПЛА для измерения турбулентности. Известия ран. Физика атмосферы и океан, 2021, том 57, № 5, с. 611–624

Аэродинамические стенды

Для калибровки оборудования БВС, используемого для измерения параметров атмосферной турбулентности необходимы стенды позволяющие моделировать пространственную и временную неоднородность течения.



*Аэродинамический стенд швейцарской компании «WindShape Ltd»**



*Мультивентиляторный стенд разработанный в технологическом университете Шэньчжэня, Китай***

**<https://windshape.com/>*

***Songqi Li, Yutong Liu etc. Aerodynamic Characterization of a Fan Array Wind Generator. 2023*

Конструкция мультивентиляторного стенда

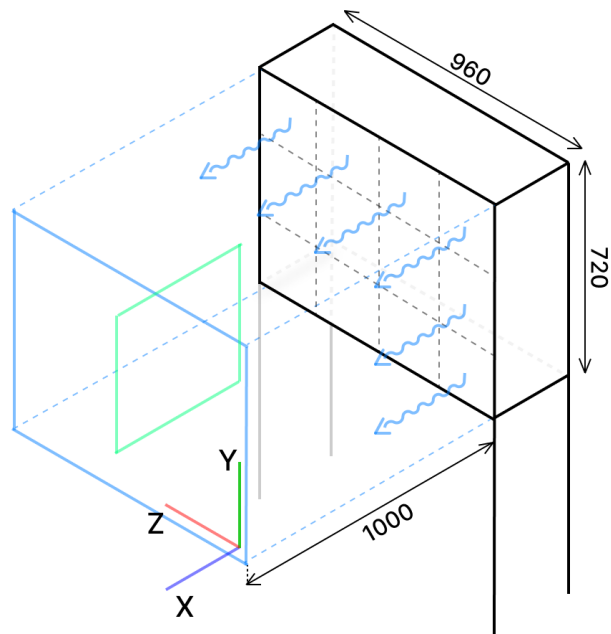
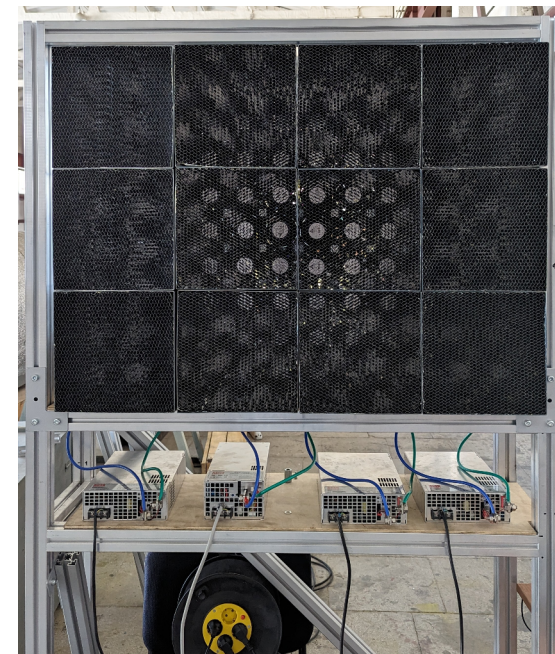


Схема мультивентиляторного стенда

Характеристики стенда:

- серверный вентилятор 80x80 мм
- используется хонейкомб
- модульная конструкция
- одна ячейка состоит из 9 вентиляторов
- вес одной ячейки около 7.6 кг
- максимальная скорость потока — 11 м/с
- площадь сечения рабочей части — 0,7 м²
- уровень турбулентности при $V_{\max}$ — 6.8%
- время разгона от 0 до $V_{\max}$ — 5 секунд



Фотография стенда

Программирование стенда



Двухступенчатый вентилятор

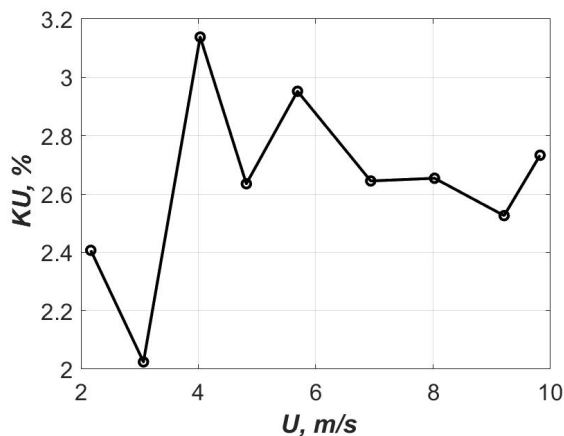
Возможности по управлению стендом

- I. Обороты каждого вентилятора управляются независимо
- II. Существует возможность назначить стационарный или нестационарный режим работы для каждого вентилятора
- III. Для нестационарный режима возможно задание различных амплитуд, частот и скважности изменения оборотов вентилятора
- IV. Управление осуществляется беспроводным способом

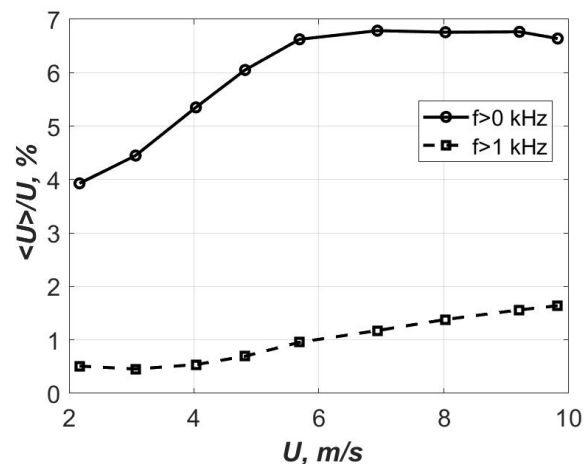


Скриншот интерфейса приложения для управления стендом

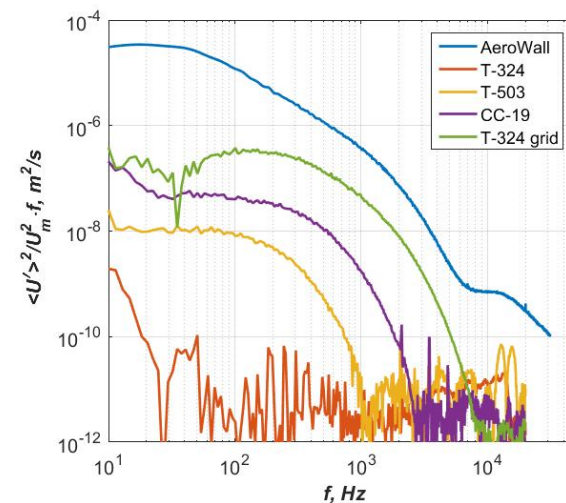
Параметры потока мультивентиляторного стенда



Степень неравномерности течения в зависимости от скорости потока

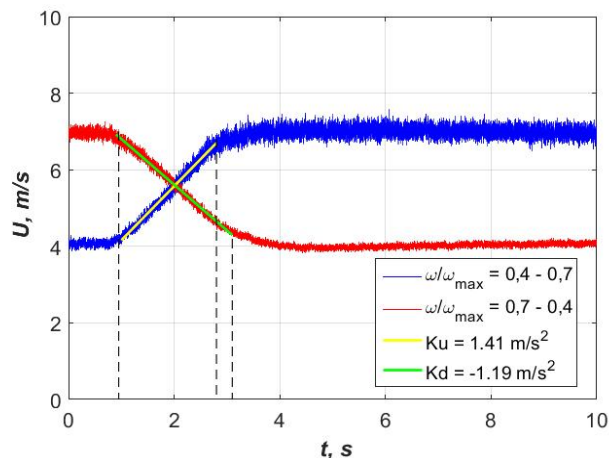


Уровень турбулентности течения в зависимости от скорости потока и частотного диапазона

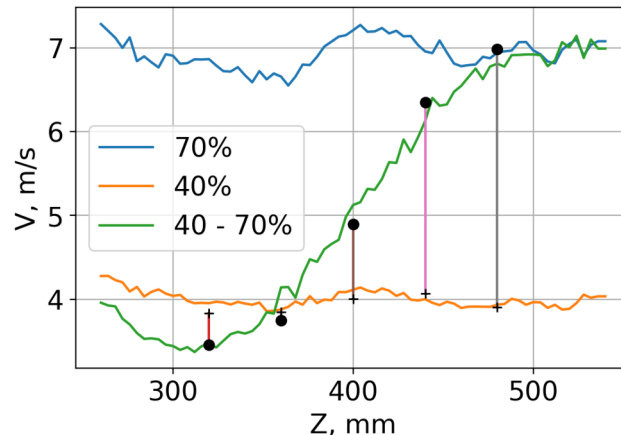


Спектр мощности пульсаций скорости мультивентиляторного стенда в сравнении с дозвуковыми аэродинамическими трубами при скорости потока 10 м/с

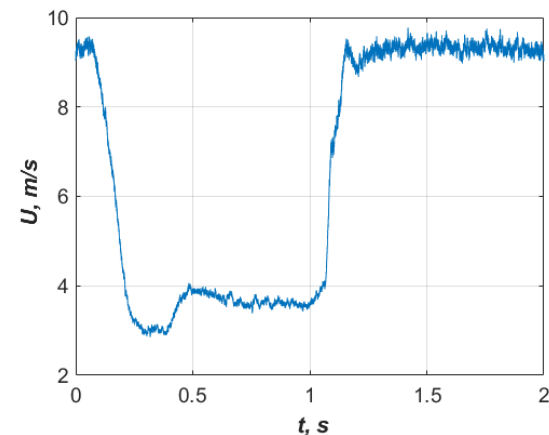
Моделирование нестационарного потока (порыв ветра)



Быстрота изменения скорости при разгоне и торможении потока от времени



Диапазон пульсаций скорости

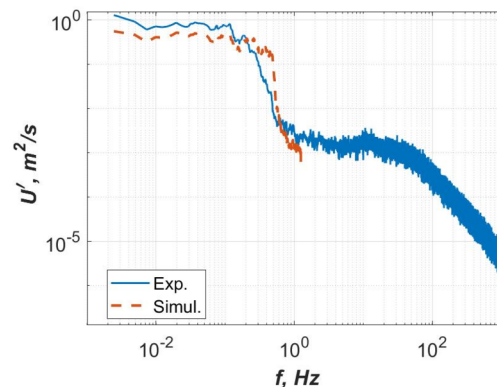
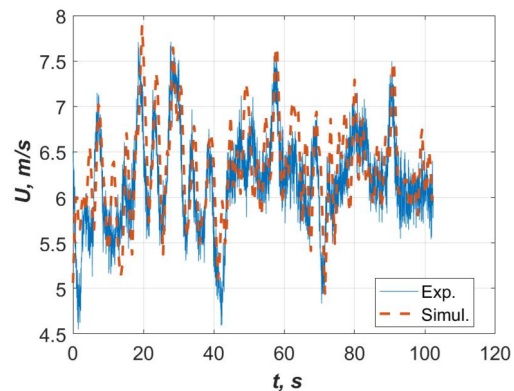
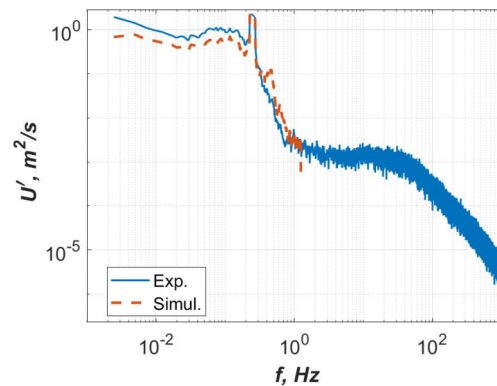
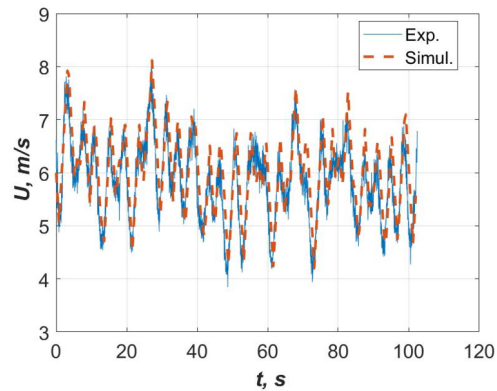


Изменение скорости потока от времени при закрывании и открывании шторки

Диапазон пульсаций скорости хорошо согласуется с данными, полученными для стационарных режимов. Полученные данные показывают возможность использования информации о распределении стационарных дефектов течения для определения нестационарных распределений пульсаций течений по пространству.

Для рабочих диапазонов скоростей (3-10 м/с) существует возможность генерирования возмущений с частотой до 0.5 Гц.

Моделирование атмосферной турбулентности

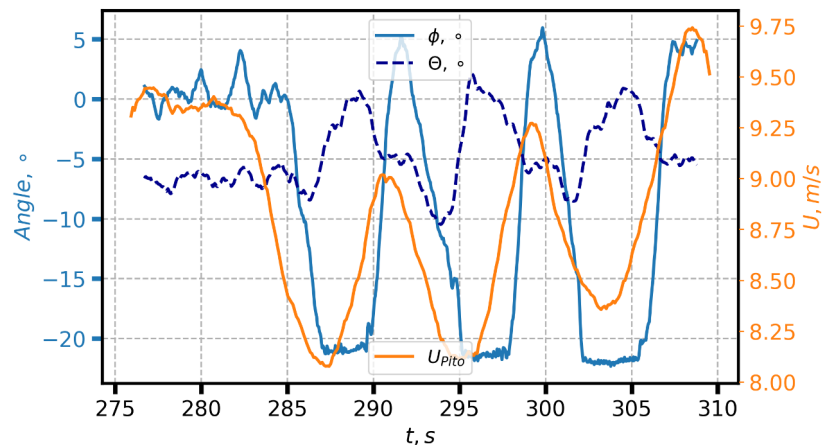


Осциллограмма локальной скорости
потока

Спектры мощности пульсаций
скорости

- Разработана программа генерирующая различные осциллограммы пульсаций скорости, учитывающая ограничения стенда. Длина управляющего сигнала 300-3000 сек. В тестовых экспериментах использовалась выборка длиной около 400 сек.
- Тестирование возможностей стенда было осуществлено на примерах периодического, хаотического и совмещенных сигналов.
- Измерения были выполнены термоанемометром постоянного сопротивления.
- Получены хорошие совпадения задаваемого и измеренного спектра пульсаций скорости потока.
- Максимальная частота контролируемых возмущений до 0,5-1 Гц.

Пример исследования влияния атмосферной турбулентности на динамику полета БПЛА



Зависимость угла крена, тангажа и показаний трубки Пито от времени

Возникновение существенного угла крена объясняется неспособностью элеронов обеспечить стабилизацию самолета в горизонте при существенной разнице скорости между левой (6,5 м/с) и правой (10 м/с) консолью крыла.

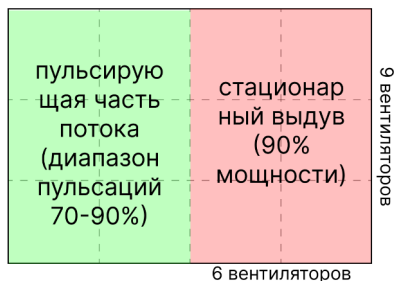


Схема работы стенда



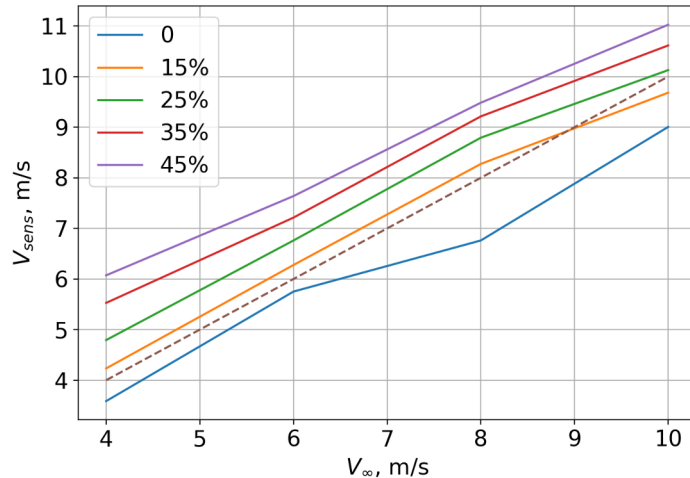
Фотография БПЛА самолетного типа в струе мультивентиляторного стенда

В результате проведения экспериментов было продемонстрировано возможность исследования динамических характеристик реального БПЛА в контролируемых лабораторных условиях, без риска потери ЛА.

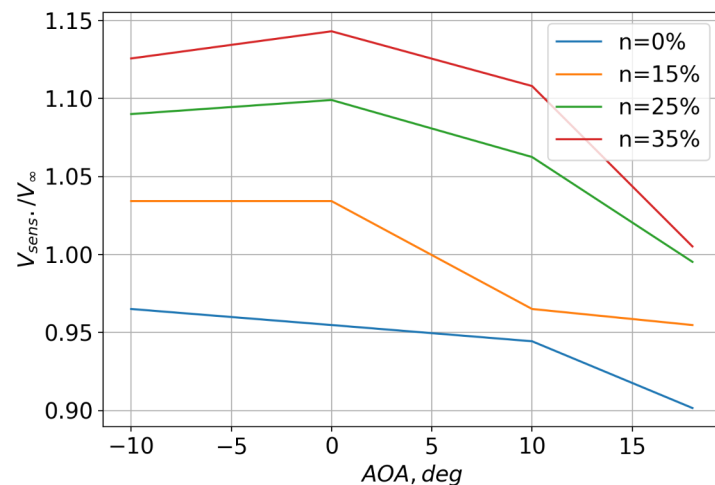
Статическая калибровка системы измерения параметров ветра на базе трубки Пито



Фотография квадрокоптера с трубкой Пито



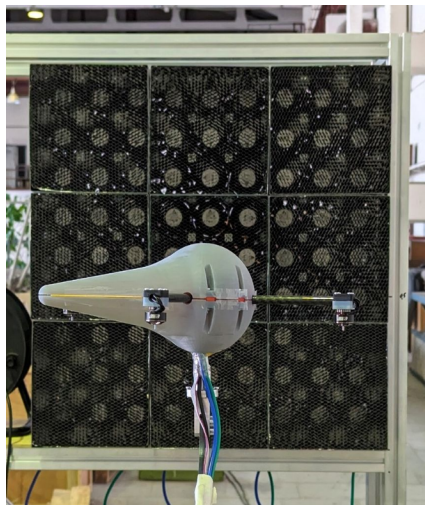
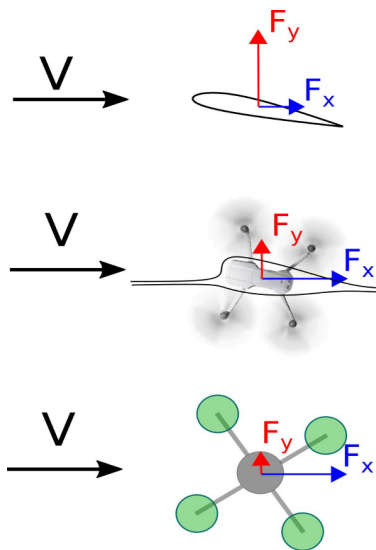
Влияние скорости вращения винтомоторной группы на показания трубки Пито при нулевом угле атаки



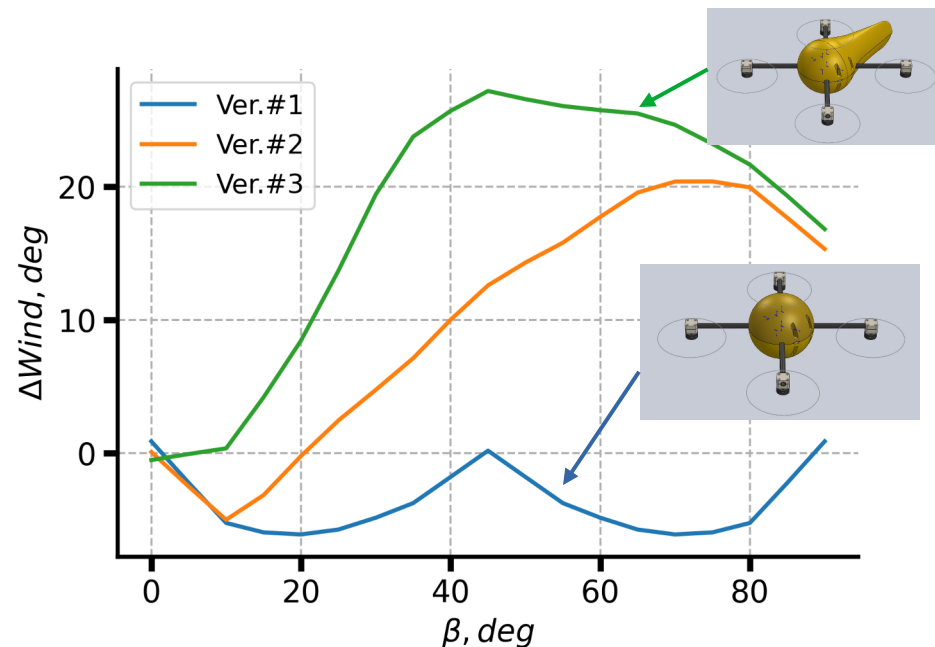
Влияние угла атаки квадрокоптера на показания трубки Пито при различных скоростях вращения винтомоторной группы

Для корректной интерпретации данных с зондов размещенных на малом удалении от мультироторного летательного аппарата необходимо обязательно учитывать влияние скорости вращения винтомоторных групп

Статическая калибровка ЛА



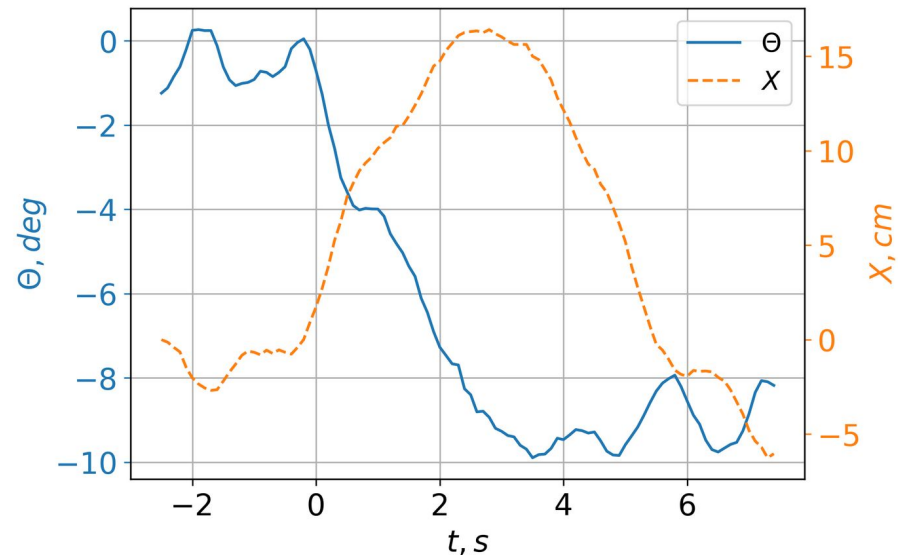
Разница между направлением ветра и наклоном квадрокоптера в зависимости от угла скольжения для различных вариантов обтекателя



Вытянутая форма большинства квадрокоптеров будет приводить к возникновению боковой силы, направленной перпендикулярно скорости ветра, в случае если ось квадрокоптера не совпадает с направлением ветра. Причиной этого аналогичная возникновению подъемной силы у крыла.

Использование неспециализированных квадрокоптеров (с вытянутыми фюзеляжами/корпусами) для определения направления ветра может приводить к существенным погрешностям в определении направления ветра.

Настройка и динамическая калибровка свободнолетающего ЛА

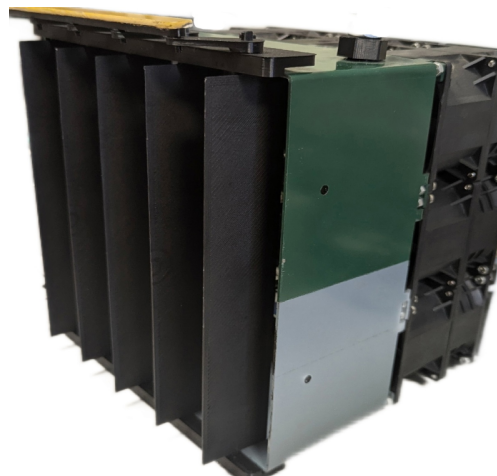


В ходе тестовых полетов были настроены PID регуляторы для обеспечения устойчивого полета при существенных порывах ветра.

Эксперименты позволили получить функцию отклика ЛА к порывам ветра, в дальнейшем эти данные были использованы для уточнения частотных характеристики измеряемой атмосферной турбулентности.

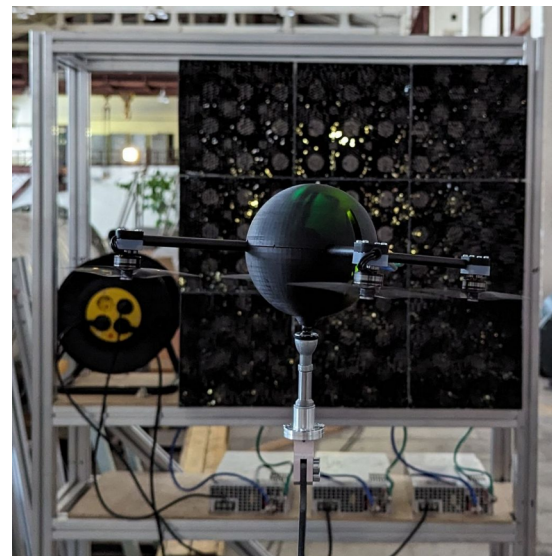
На рисунке демонстрируется зависимости угла тангажа и перемещения квадрокоптера вдоль потока от времени. Сплошной голубой линией изображена зависимость угла тангажа от времени. Оранжевой пунктирной линией изображена зависимость перемещения вдоль потока, генерируемого мультивентиляторным стендом.

Планы на будущее



Создание конструкций стенда позволяющих увеличить частотный диапазон контролируемых возмущений.

- 1) Создание управляемых шторок (рост частотного диапазона до 5-10 Гц)*
- 2) Проектирование и создание специализированных винтомоторных групп (рост частотного диапазона до 10-20 Гц)*



Создание безопасной методики динамической калибровки ЛА в лабораторных условиях.

Дрон будет закреплен на шарнирном подвесе, снабженном весовым элементом, необходимым для реализации квази-GPS системы.

На основе весовых данных будут определяться виртуальное «перемещение дрона», которое будет использоваться полетным контроллером ЛА.

Выводы

- Разработан и создан аэродинамический стенд, позволяющий генерировать пространственную и временную неоднородность течения
- Создано и протестировано программное обеспечение, позволяющее реализовывать требуемую неравномерность потока по времени и пространству
- Получены данные о качестве потока и динамических характеристиках течения генерируемого стендом
- Протестированы возможности стенда для осуществления статических и динамических калибровок систем измерения атмосферной турбулентности для различных ЛА
- В ходе летных экспериментов получено хорошее согласование данных о среднеквадратичных пульсациях ветра найденных различными типами ЛА



berkon.gleb@mail.ru