

Численное моделирование парения квадрокоптера в турбулентной атмосфере



Шелехов Александр Петрович

Институт мониторинга климатических и экологических систем
СО РАН, Томск



1. Repina, I.A. Research in Dynamic Meteorology in Russia in 2019–2022. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 59 (Suppl 3), S266–S293 (2023). <https://doi.org/10.1134/S0001433823150112>.
2. Verfaillie M, Cho E, Dwyre L, Khan I, Wagner C, Jacobs JM and Hunsaker A (2023), UAS remote sensing applications to abrupt cold region hazards. *Front. Remote Sens.* 4:1095275. doi: 10.3389/frsen.2023.1095275.
3. Fang, Z.; Savkin, A.V. Strategies for Optimized UAV Surveillance in Various Tasks and Scenarios: A Review. *Drones* 2024, 8, 193. <https://doi.org/10.3390/drones8050193>.
4. LIAO, Xiaohan; XU, Chenchen; YE, Huping; TAN, Xiang; FANG, Shifeng; HUANG, Yaohuan; and LIN, Jing (2022) "Critical Infrastructures for Developing UAVs' Applications and Low-altitude Public Air-Route Network Planning," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 37: Iss. 7, Article 12. DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20220425003>.
5. R. Balážová, J. Hlinka, A. Belbachir and J. Svoboda, "Hyperlocal Weather Information for Drone Operations," 2024 New Trends in Civil Aviation (NTCA), Prague, Czech Republic, 2024, pp. 67-73, doi: 10.23919/NTCA60572.2024.10517813.

Постановка задачи



Рисунок 1 – Парение квадрокоптера в атмосфере

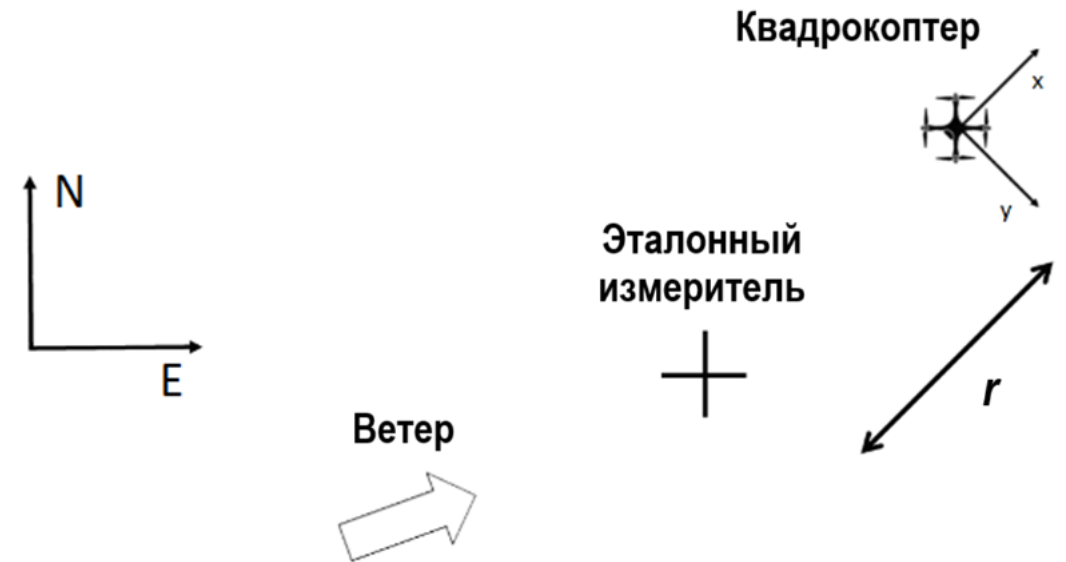


Рисунок 2 – Схема численного эксперимента

Мониторинг турбулентности

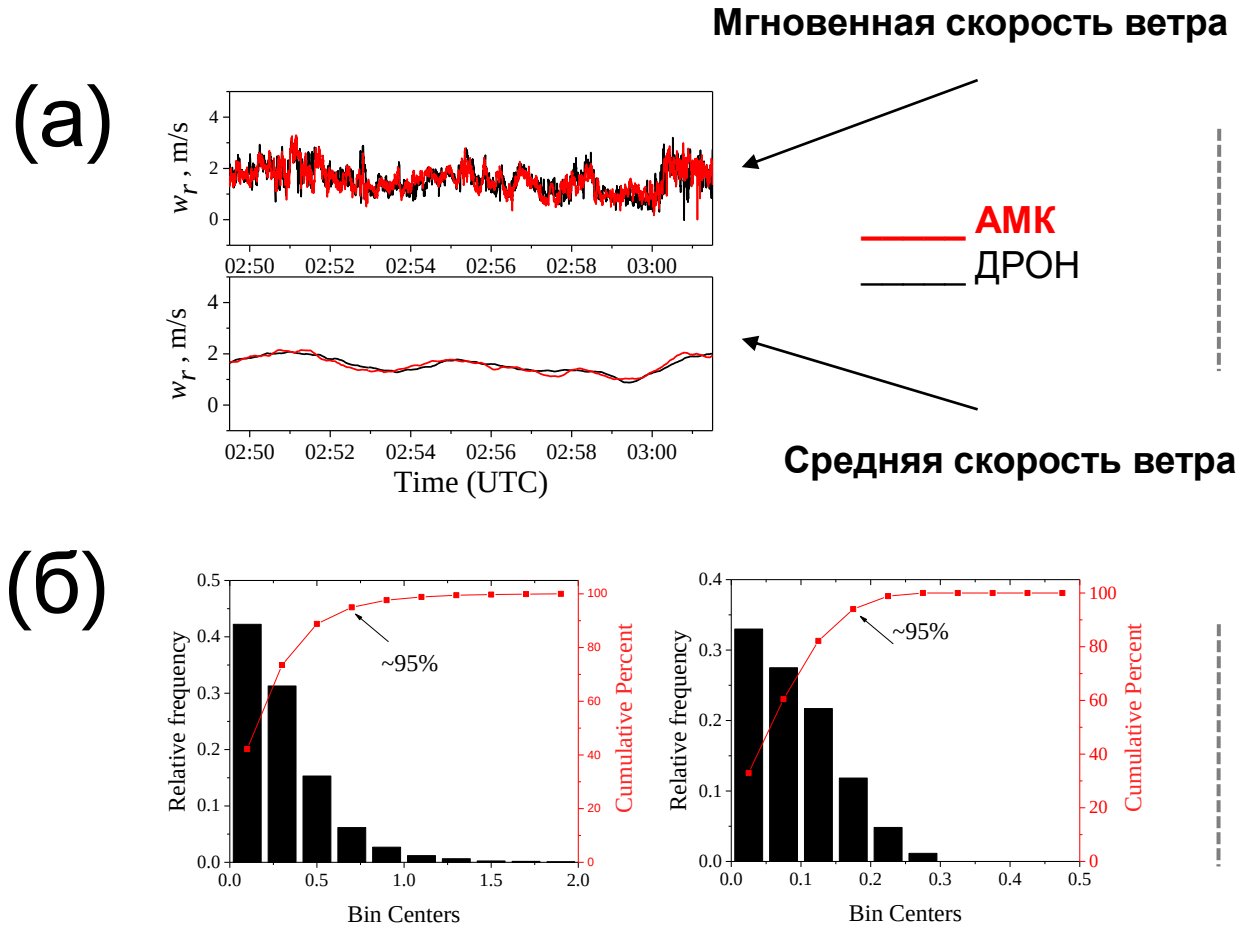
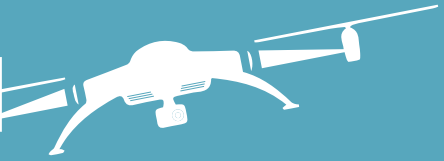


Рисунок 1 – Скорость ветра (а), плотность вероятности и функция распределения ошибки измерения (б).

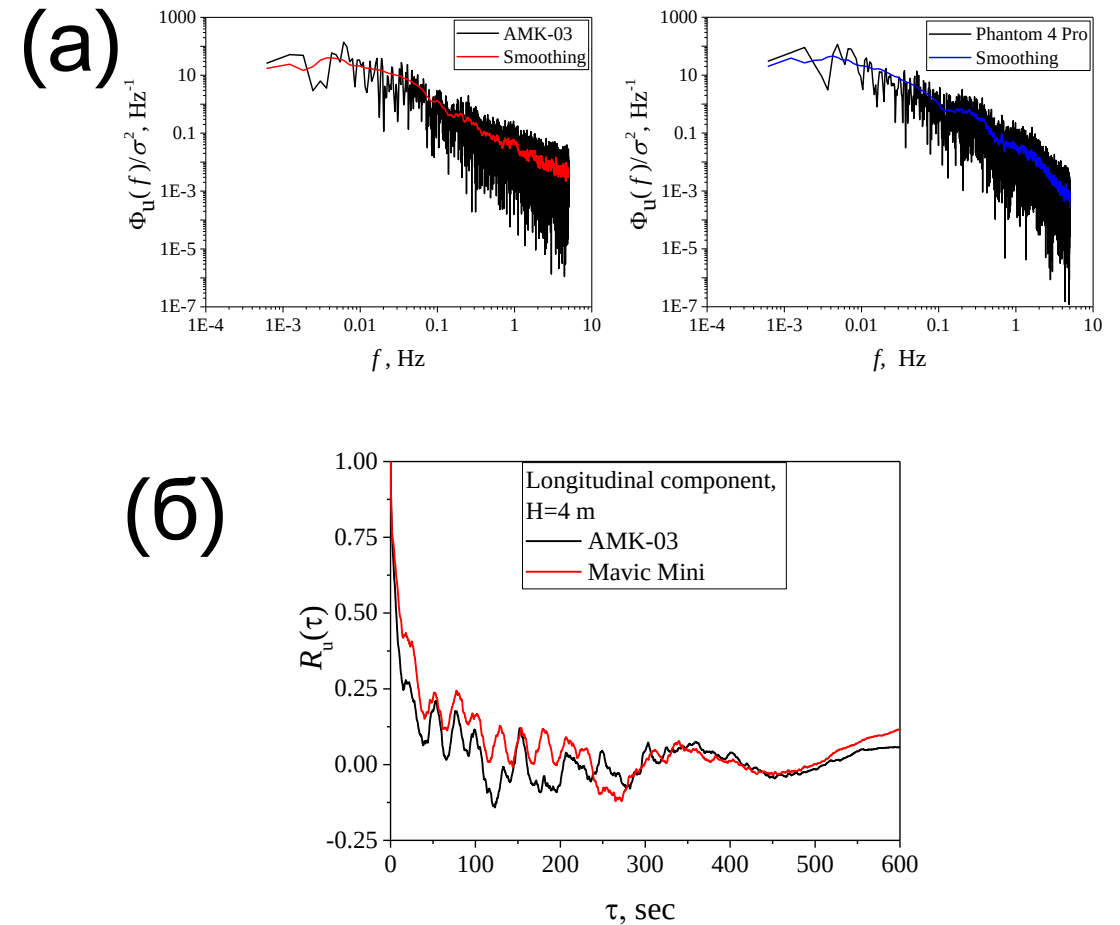


Рисунок 2 – Спектры турбулентных флуктуаций (а), автокорреляционная функция (б).

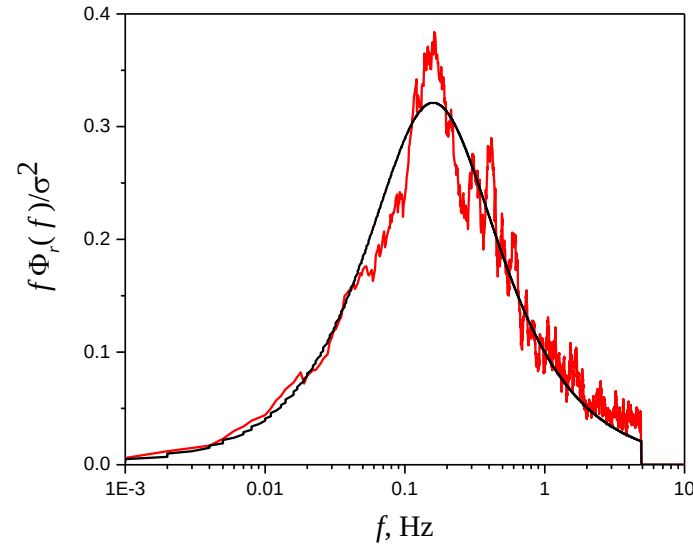
Модель Драйдена



Спектр Драйдена

$$\frac{f\Phi_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{2L_u}{\pi\langle u \rangle} \frac{f}{1 + \left(2\pi \frac{L_u}{\langle u \rangle} f\right)^2}$$

Модель идеального парения



$$\sigma_u^2 = 1 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$\frac{r}{\langle u \rangle} = 1 \text{ c}$$

$$\frac{r}{L_u} = 1 \text{ c}$$

Максимум спектра

Эталонный измеритель

$$u'(t) = \int_0^\infty G(f) e^{-2\pi i f t} df + \text{к. с.}$$

$$G(f) = \sqrt{\Phi_u(f)} g(f)$$

Квадрокоптер

$$u'(t) = \int_0^\infty G(f) e^{-2\pi i f \left(t + \frac{r}{\langle u \rangle}\right)} df + \text{к. с.}$$

$$\langle g(f_1) g^*(f_2) \rangle = \sigma^2 \delta(f_1 - f_2)$$

$$f_{u,max} = 0.159$$

Идеальное парение

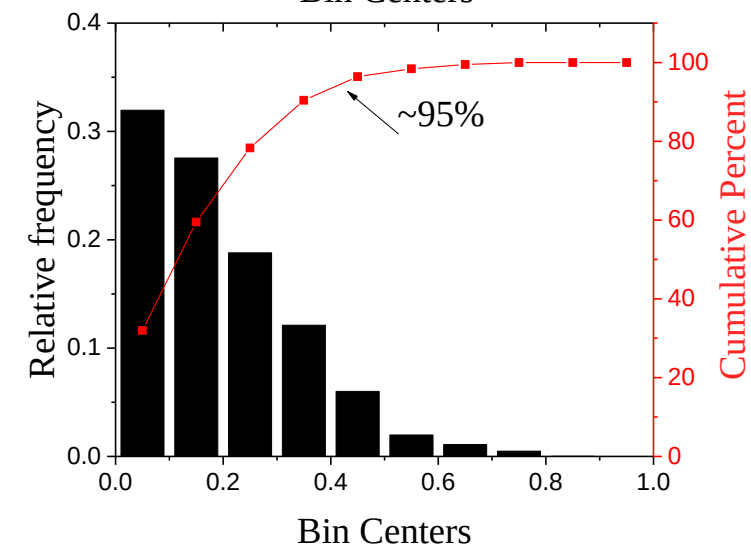
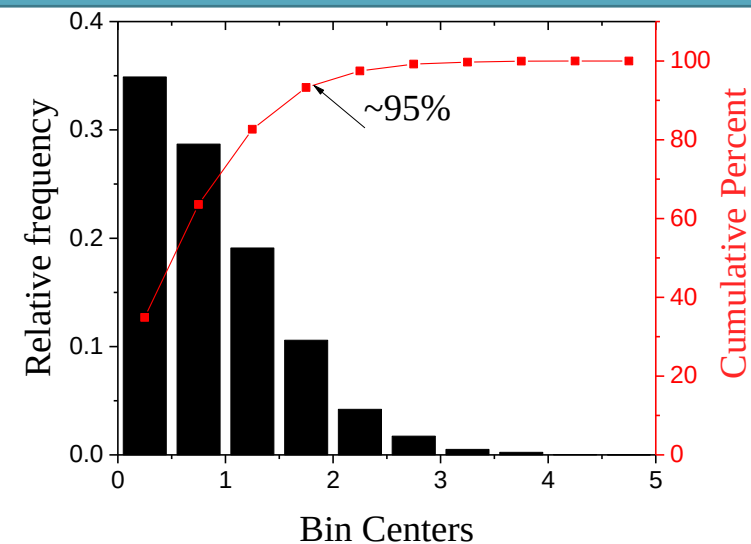
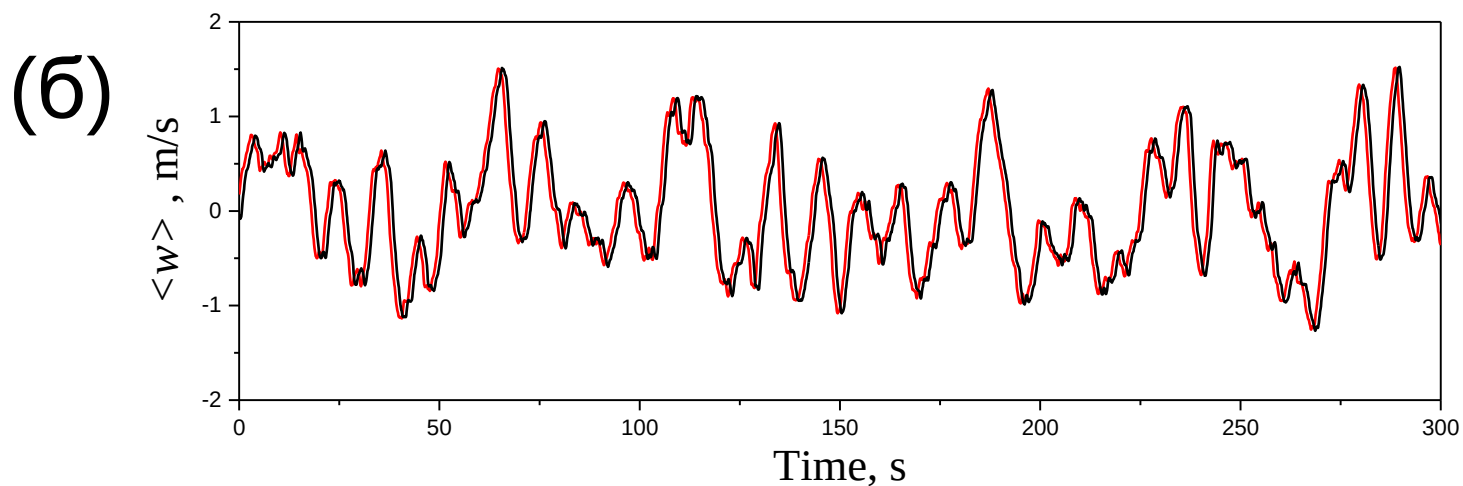
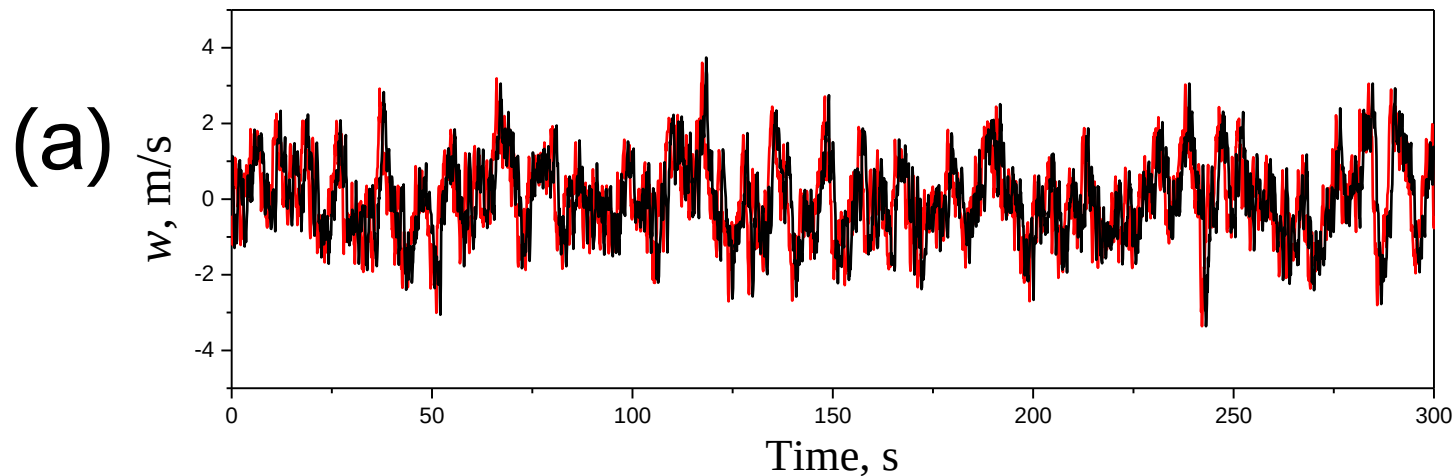


Рис. 1 – Турбулентные флуктуаций скорости ветра.

Результаты численного моделирования (а), сглаженные данные (б)

Рис.2 – «Ошибка» измерений

Идеальное парение

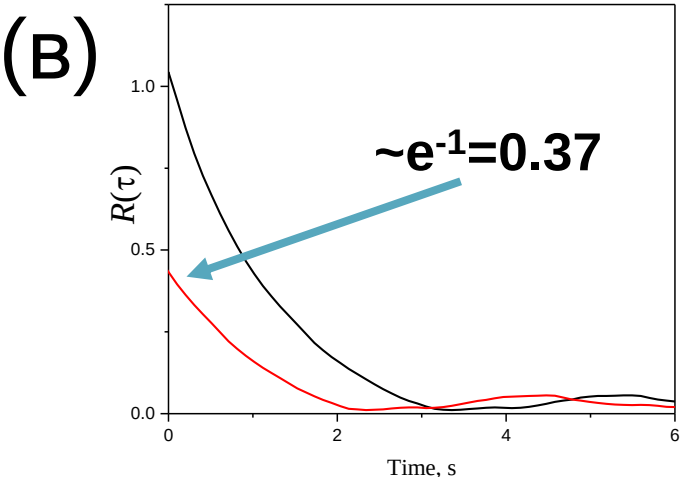
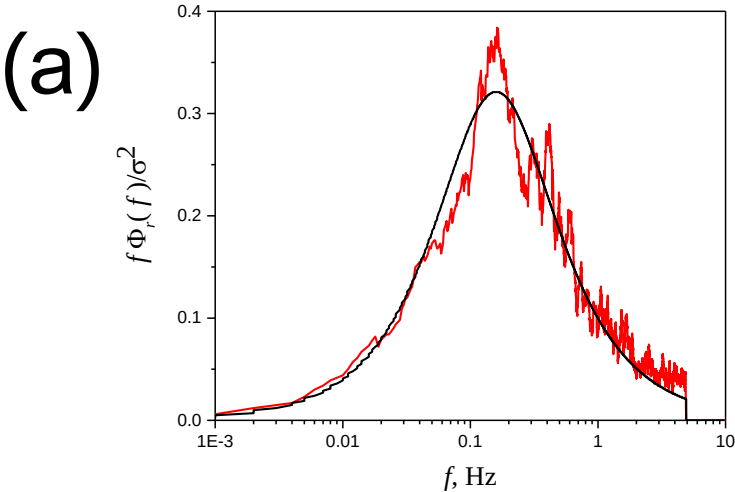


Рис. 1 – Результаты численного моделирования. Коспектр турбулентных флуктуаций (a), фаза (б) и взаимная корреляция (в, красная кривая), корреляция (в, черная кривая)

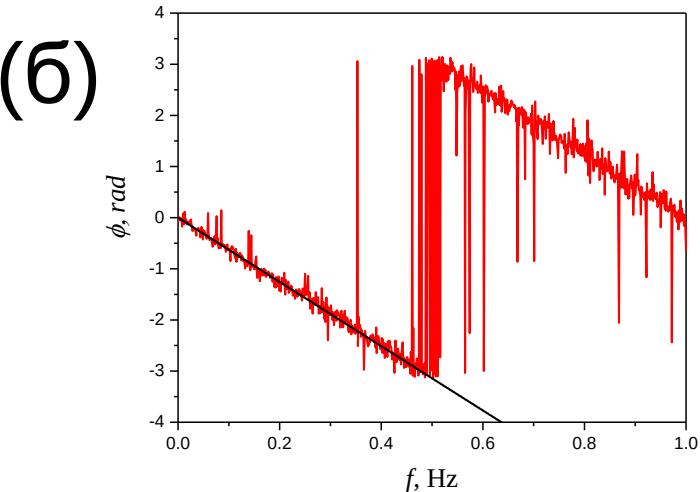


Табл. 1 – Результаты численного моделирования поведения центральной частоты

f_{Dryden}	$f_{Simulation}$	$f_{Simulation} - f_{Dryden}, \%$
0.159	0.162	2%
f_{Dryden}	$\langle f_{Simulation} \rangle$	$\langle f_{Simulation} \rangle - f_{Dryden}, \%$
0.159	0.178	12%

Динамическая модель

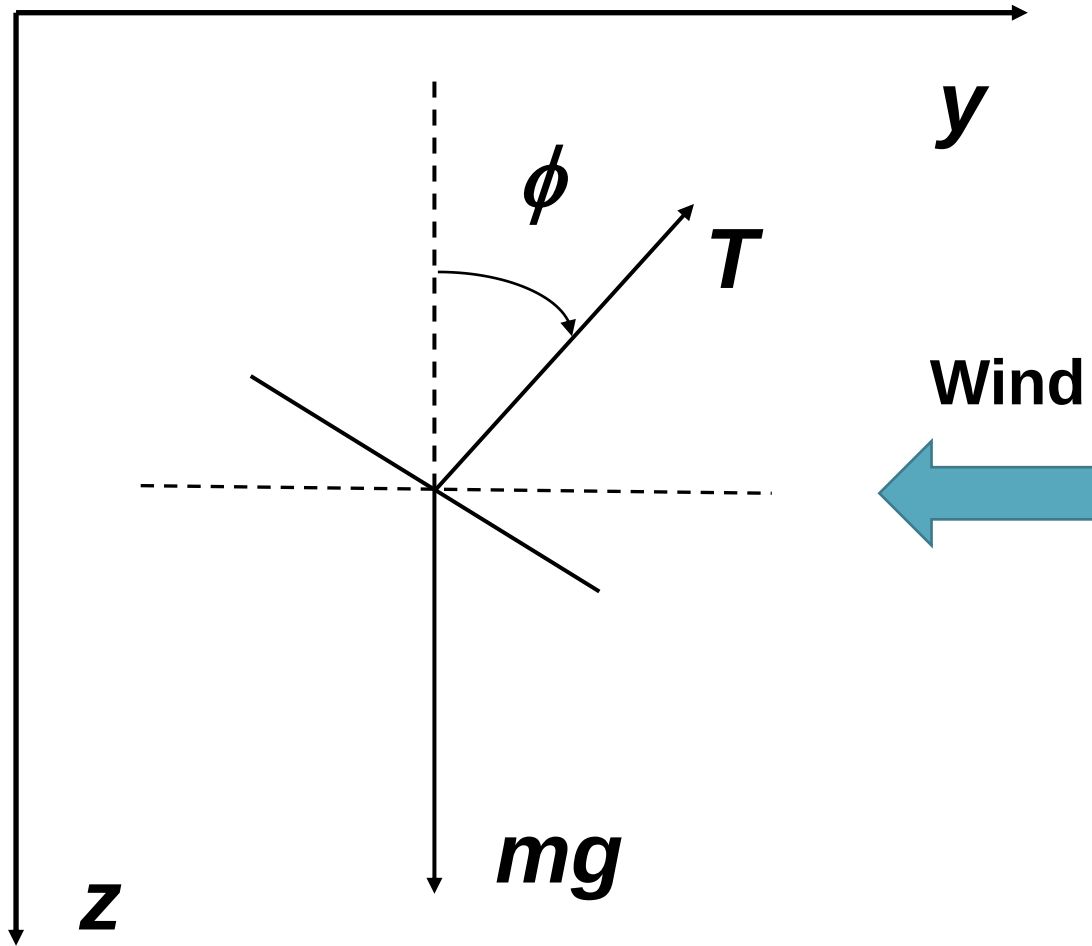


Рис. 1 – Система координат

Динамическая модель квадрокоптера

$$\ddot{z} = g - \frac{T}{m} \cos \phi \rightarrow \ddot{z} = g - \frac{T}{m}$$

$$\ddot{y} = \frac{T}{m} \sin \phi + \frac{F_w}{m} \rightarrow \ddot{y} = \frac{T}{m} \phi + \frac{F_w}{m}$$

$$\ddot{\phi} = \frac{M}{I}$$

Аэродинамическое сопротивление

1. Линейный случай $F_j = -c_j(v_j - w_j)$

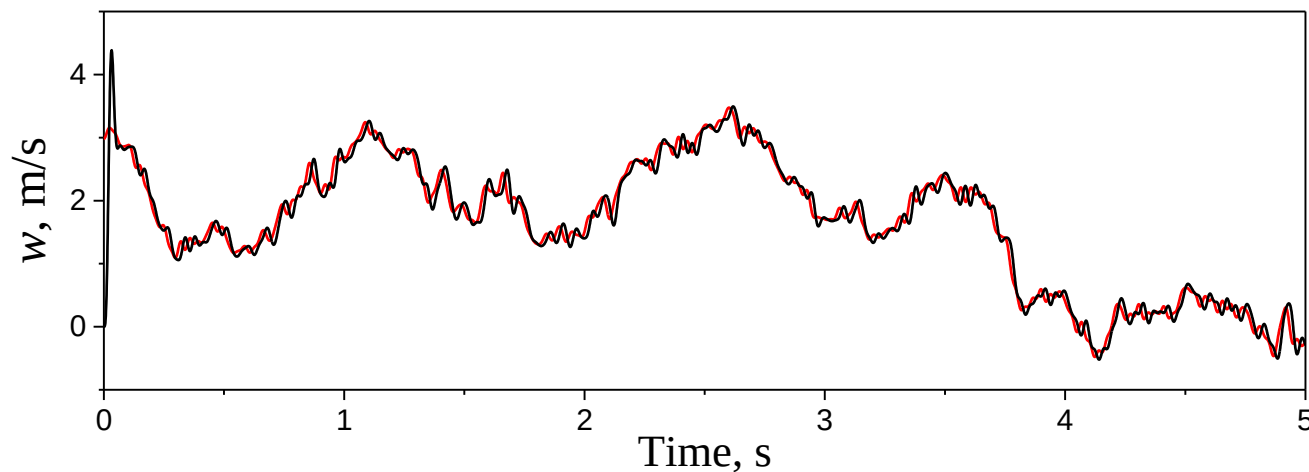
2. Квадратичный случай

$$F_j = -\frac{1}{2} \rho C_j A_j \operatorname{sgn}(v_j - w_j) \times (v_j - w_j)^2$$

Динамическая модель



(a)



(б)

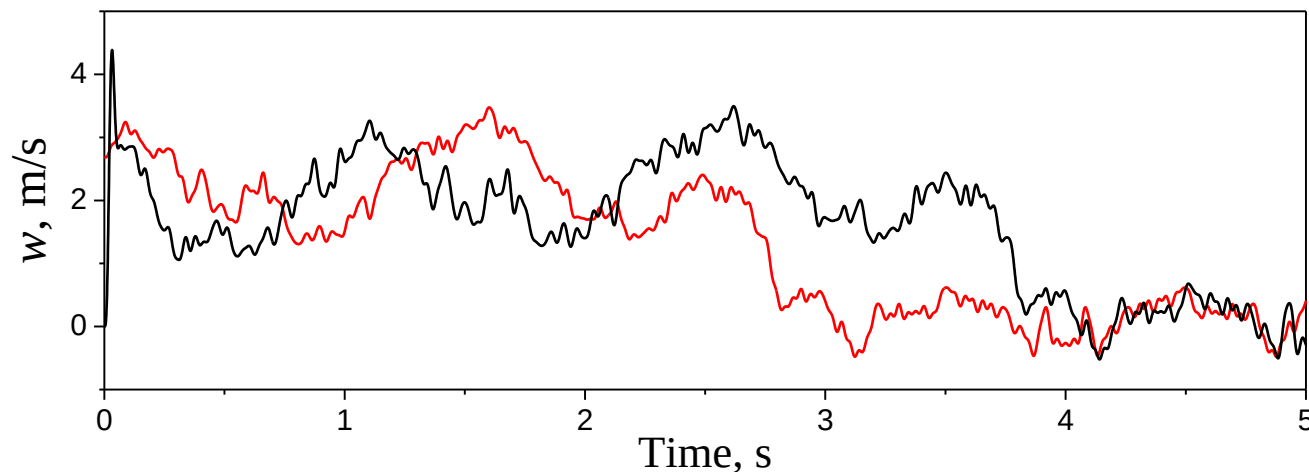


Рис. 1 – Турбулентные флуктуаций скорости ветра.

Результаты численного моделирования при $r = 0$ (а) и $r \neq 0$ (б)

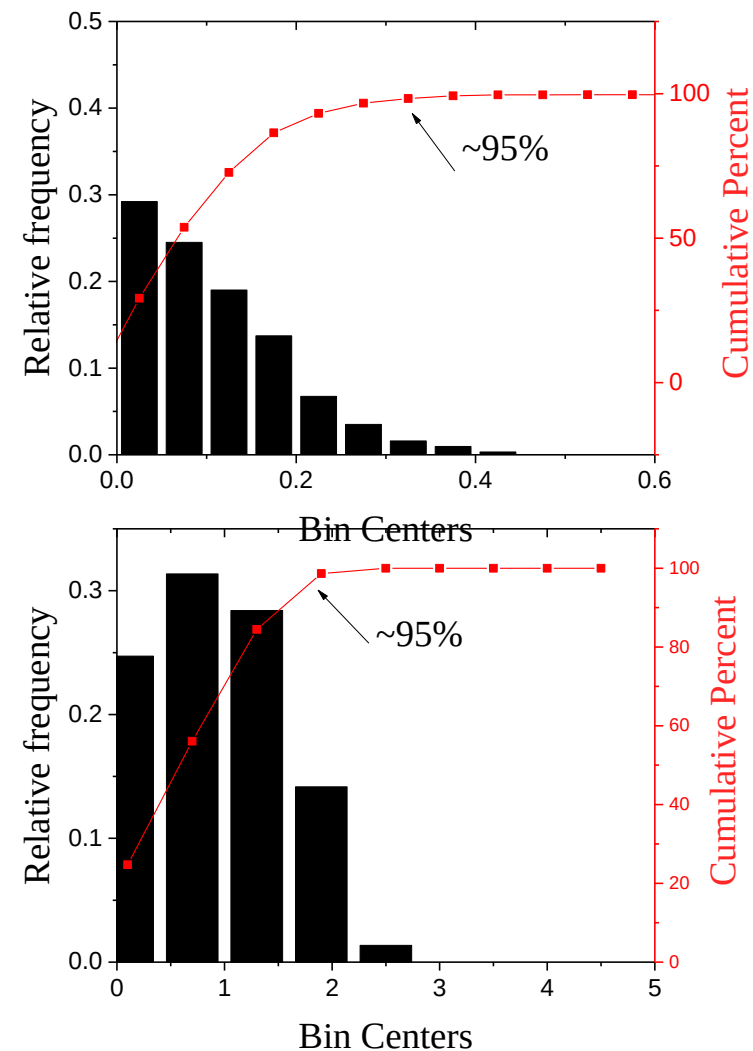


Рис.2 – «Ошибка» измерений

Динамическая модель

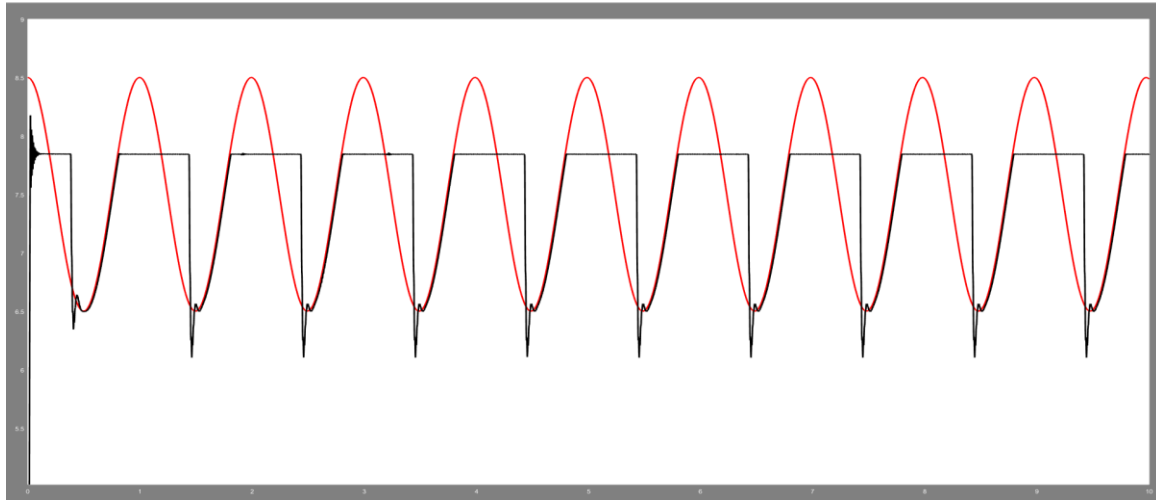


Рис. 1 – Турбулентные флуктуации скорости ветра, красная кривая – элементарный турбулентный вихрь с частотой $\omega = 6.3$ рад/с, черная кривая – результат измерений скорости ветра квадрокоптером.

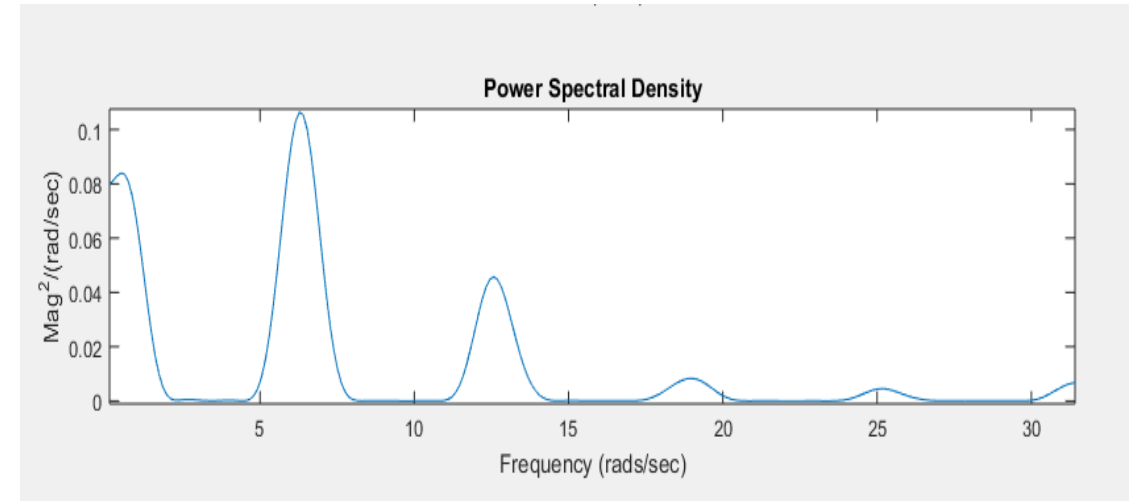


Рис. 4 – Спектр турбулентных флуктуации скорости ветра для элементарного турбулентного вихря $\omega = 6.3$ рад/с, измеренного квадрокоптером

ВЫВОДЫ



- При измерениях скорости ветра в одной и той же точке наблюдается незначительное расхождение между данными эталонного измерителя и квадрокоптера. Данное расхождение обусловлено инерционностью ПИД-регулятора при измерениях скорости ветра.
- При измерениях скорости ветра в разных точках наблюдается значительное расхождение между данными эталонного измерителя и квадрокоптера. Это расхождение обусловлено не столько инерционностью ПИД-регулятора при измерениях скорости ветра, сколько пространственной неоднородностями поля скорости ветра турбулентной среды.
- При достижении критических значений динамика углов повторяет поведение скорости турбулентного потока со значительной ошибкой. Кроме ярко выраженного максимума на частоте элементарного турбулентного вихря наблюдаются появление дополнительных частот как низкочастотной, так и в высокочастотной области спектра.