

УДК 629.7.01

## ВЛИЯНИЕ ОТКАЗА ДВИГАТЕЛЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛЕТА МУЛЬТИРОТОРНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Н. Д. ЦЫПАЕВ<sup>1</sup>, П. В. СЕЛИНА<sup>2</sup>, А. В. ЗЫРЯНОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>tsypaevnd@yandex.ru, <sup>2</sup>selina.poli@yandex.ru, <sup>3</sup>zyryanov.av@ugatu.su

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

**Аннотация.** В статье анализируется поведение мультироторного летательного аппарата при отказе одного или двух двигателей с целью определения оптимальной конструкции для обеспечения безопасности и надежности полета. В рамках исследования было проведено сравнительное изучение устойчивости схем мультироторного ЛА: гексокоптера, октокоптера и декакоптера, при отказе двигателей. Результаты анализа показали, что декакоптер проявляет более высокую устойчивость по сравнению с гексокоптером и октокоптером при подобных отказах.

**Ключевые слова:** конструкция мультикоптера; электродвигатели; устойчивость полета; система управления; аварийные ситуации; электрические компоненты; безопасность полета; ансис.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся все более популярным средством для осуществления локального мониторинга окружающей среды. Среди различных вариантов БПЛА выделяются мультироторные, которые представляют собой летательные аппараты, основанные на схеме с тремя или более несущими винтами.

В России, к 2017 году применение дронов в агропромышленном секторе ограничивалось всего лишь 1-2% общей площади сельскохозяйственных угодий. Тем не менее, уже в 2020 году мультироторные летательные аппараты начали использоваться для различных задач:

- 1) осуществление дистанционного зондирования лесных массивов;
- 2) проведение мультиспектральной съемки для анализа содержания азота в почве;
- 3) контроль за работой наемного персонала через облет прилегающей территории;
- 4) мониторинг качества обработки посевов;
- 5) отслеживание погодных условий с помощью специализированного оборудования и программного обеспечения, установленного на беспилотнике;
- 6) создание карт сельскохозяйственных угодий и определение направления водной эрозии;
- 7) процесс опыления и орошения сельскохозяйственных культур, таких как кукуруза, виноградники и картофель.

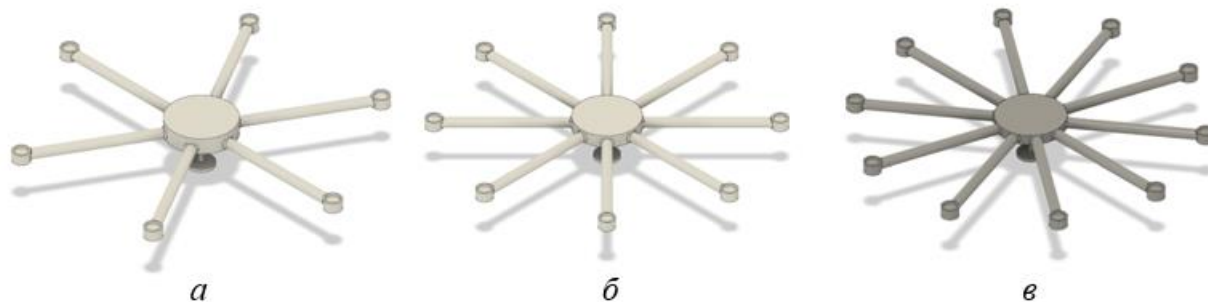
Эти инновационные подходы к сельскому хозяйству позволяют повысить эффективность производства, оптимизировать использование ресурсов и улучшить контроль за сельскохозяйственными процессами.

Определение оптимальных расположений и числа роторов представляет собой основной этап в процессе проектирования мультироторного БПЛА.

Цель данного исследования состоит в анализе устойчивости мультироторного БПЛА при отказе одного и двух двигателей при одинаковой массе выбранных схем. Это позволит про-

вести анализ устойчивости и выбрать оптимальную схему для обеспечения надежности и безопасности полета мультикоптера при отказе роторов.

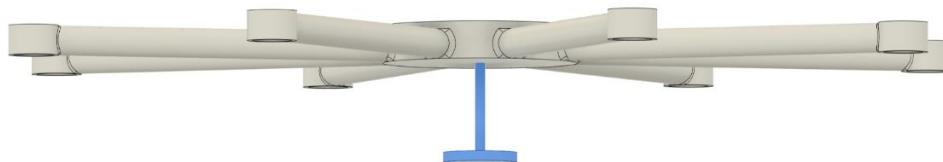
В качестве объекта рассмотрены три популярные схемы летательного аппарата с одинаковым расстоянием по диагонали между моторами, представленные на рисунке 1: гексокоптер (а); октокоптер (б); декакоптер (в).



**Рис. 1.** Роторные схемы летательных аппаратов:  
а – шести роторный; б – восьми роторный; в – десяти роторный.

Для всех тестовых моделей выбран одинаковый материал – ABS пластик. Данный вид пластика обладает высокой прочностью на изгиб и разрыв, химически стоек при воздействии, широкий диапазон эксплуатационных температур.

Моделирование устойчивости мультироторного БПЛА проводилось в программной среде ANSYS. Для этого была создана стойка (рис. 2), состоящая из общего основания и стержня, на которую крепится каждый беспилотный летательный аппарат. Это решение необходимо для визуализации и анализа степени деформации стойки в условиях различных нагрузок, включая отключение одного или двух двигателей.



**Рис. 2.** Стойка

На каждой созданной геометрической модели гексакоптера, октокоптера, декакоптера была построена сетка (табл. 1).

Таблица 1

**Общее количество элементов и узлов**

№	Кол-во элементов	Кол-во узлов
Гексокоптер	1352471	1989747
Октокоптер	1356517	2042037
Декакоптер	1401929	2150873

Условиями нагружения БПЛА являлось обеспечение постоянной массы БПЛА  $m = \text{const}$ , не зависимо от выбора схемы и массы полезной нагрузки  $m_{\text{пн}}$ . Потребная тяга для режима «висения» определялась по формуле (1):

$$T_{\text{сум}} = m \times g \quad (1)$$

где,  $T_{\text{сум}}$  – суммарная тяга от винтов, Н;  
 $m$  – суммарный вес БПЛА, кг;  
 $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Далее определяются подъёмные силы для каждого отдельного винта мультиротора по формуле (2).

$$T_{\text{винт}} = \frac{T_{\text{сум}}}{n} \quad (2)$$

Результаты проведенного расчета напряженно деформированного состояния приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Параметры устойчивости БПЛА при отказе одного электродвигателя**

<i>Роторная схема</i>	<i>Макс. полное перемещение, мм</i>	<i>Макс. эквивалентная упругая деформация, мм</i>
Гексокоптер	18,61	0,016
Октакоптер	9,49	0,008
Декакоптер	5,74	0,005

Для проведения более детального анализа надежности системы расчеты были повторены для различных комбинаций отказов двух двигателей. Эти комбинации были выбраны для моделирования различных сценариев отказов и их влияния на стабильность и устойчивость.

В первом варианте была рассмотрена ситуация, когда отказывают два противоположных двигателя. В данном случае система сохраняет симметричность, что предотвращает возникновение дисбаланса. Это важно, так как при отказе двух противоположных двигателей оставшиеся двигатели могут компенсировать потери тяги с минимальными корректировками управления, результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

**Параметры устойчивости БПЛА при отказе двух противоположных двигателей**

<i>Роторная схема</i>	<i>Макс. полное перемещение, мм</i>	<i>Макс. эквивалентная упругая деформация, мм</i>
Гексокоптер	0,033	0,0004
Октакоптер	0,023	0,0003
Декакоптер	0,017	0,0002

Во втором варианте были выбраны два ближайших двигателя. Такой выбор обусловлен тем, что отказ двух двигателей, расположенных рядом друг с другом, создает значительный дисбаланс. Это приводит к неравномерному распределению тяги и, как следствие, вызывает сильные асимметричные нагрузки, результаты приведены в таблице 4. В таком случае требуется более сложное управление и компенсирующие меры для восстановления устойчивости.

Таблица 4

**Параметры устойчивости БПЛА при отказе двух ближайших двигателей**

<i>Роторная схема</i>	<i>Макс. полное перемещение, мм</i>	<i>Макс. эквивалентная упругая деформация, мм</i>
Гексокоптер	50,35	0,039
Октакоптер	23,87	0,019
Декакоптер	13,82	0,011

На рисунке 3 представлен один из результатов полного перемещения мультиротора при отказе двух двигателей.

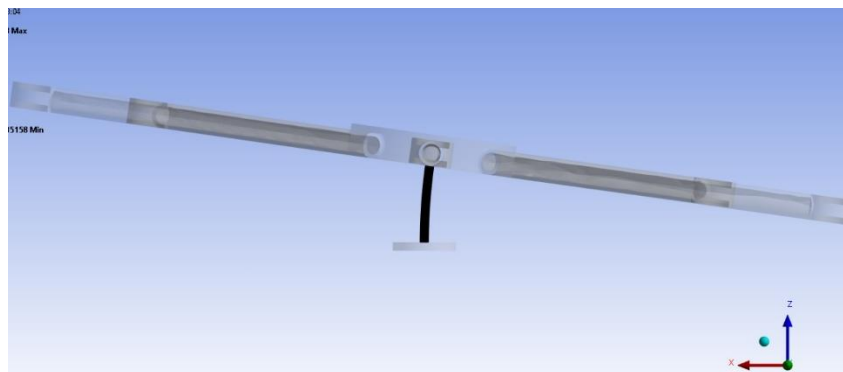


Рис. 3. Деформация гексакоптера при отключении двух двигателей

Для обеспечения устойчивости беспилотного летательного аппарата (БПЛА) при отключении одного из двигателей был проведен расчет требуемых мощностей для остальных двигателей. В ходе исследования были получены следующие результаты:

- два ближайших к отказавшему двигателю увеличивают свою мощность на 80%, относительно нормального режима, чтобы компенсировать потерю тяги;
- следующая пара двигателей сохраняет свою мощность неизменной;
- остальные двигатели в общей сложности снижают свою мощность на 60%, относительно нормального режима, что помогает сбалансировать систему и поддерживать устойчивость полета.

На основании представленных данных можно сделать вывод, что при отказе одного и двух электродвигателей наиболее устойчивым оказывается декакоптер.

В случае отказа одного двигателя декакоптер имеет самые низкие значения максимальной полной деформации и эквивалентной упругой деформации. Это свидетельствует о том, что декакоптер сохраняет более стабильное положение и обладает более высоким запасом прочности по сравнению с гексакоптером и октокоптером.

При отказе двух электродвигателей ситуация остается аналогичной: декакоптер демонстрирует наименьшие значения максимальной полной деформации и эквивалентной упругой деформации. Более того, запас прочности у декакоптера значительно выше, что свидетельствует о его повышенной устойчивости в данной ситуации.

Таким образом, на основе анализа параметров устойчивости, можно сделать вывод о том, что декакоптер является наиболее устойчивым во время полета при отказе одного и двух двигателей. Это обусловлено его конструктивными особенностями, которые обеспечивают более эффективное распределение нагрузок и повышенную прочность в критических ситуациях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басаргин, А. А. Методы искусственного интеллекта : учебное пособие / А. А. Басаргин. – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – 164 с. (дата обращения: 18.02.2024).
2. Беспилотные авиационные системы: международная практика и перспективы - Дэвид Кортесис, Дуглас Маршалл, 2010. (дата обращения: 20.02.2024).
3. Катулев, А. Н. Исследование операций: принципы принятия решений и обеспечение безопасности /Н. А. Северцев, А. Н. Катулев. – Тверь, 1999. – 167 с. (дата обращения: 27.02.2024).
4. Юрков, Н. К. Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 15–21. (дата обращения: 20.03.2024).
5. Введение в беспилотные авиационные системы - Р. К. Сингх, Джон Валасек, С. Н. Балакришнан, 2019.

#### ОБ АВТОРАХ

**ЦЫПАЕВ Никита Денисович**, студент группы ТЭД-207М.  
**СЕЛИНА Полина Валерьевна**, студент группы ТЭД-208М.  
**ЗЫРЯНОВ Алексей Викторович**, к.т.н., доцент каф. АД.

**METADATA**

**Title:** The effect of engine failure on the flight stability of a multirotor aircraft.

**Authors:** N. D. Tsypaev <sup>1</sup>, P. V. Selina <sup>2</sup>, A. V. Zyryanov <sup>3</sup>

**Affiliation:**

<sup>1,2,3</sup> Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>tsypaevnd@yandex.ru, <sup>2</sup>selina.poli@yandex.ru, <sup>3</sup>zyryanov.av@ugatu.su

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (31), pp. 115-119, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The article analyzes the behavior of a multirotor aircraft in case of failure of one or two engines in order to determine the optimal design to ensure flight safety and reliability. As part of the study, a comparative study was conducted of the stability of multirotor aircraft circuits: hexacopter, octocopter and decacopter, in case of engine failure. The results of the analysis showed that the decacopter exhibits higher stability compared to the hexacopter and the octocopter in such failures.

**Key words:** multicopter design; electric motors; flight stability; control system; emergency situations; electrical components; flight safety; ansys.

**About authors:**

**TSYPAEV, Nikita Denisovich**, student of TED-207M group (UUST).

**SELINA, Polina Valeryevna**, student of TED-208M group (UUST).

**ZYRYANOV, Alexey Viktorovich**, candidate of technical sciences of the department of Aircraft Engines, Associate Professor (UUST).