

УДК 681.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИЛУЧШЕГО ВИДА МУЛЬТИКОПТЕРА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕТА

¹Филатенков П.А., ¹Сергун Т.А., ¹Винокуров А.А., ^{1,2}Морозова Е.В.

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
 им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург;

²Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного
 технического университета, Камышин, e-mail: konvvert@yandex.ru

В настоящее время для выполнения различных задач, связанных с наблюдением окружающей обстановки, все чаще используют беспилотные летательные устройства. Исследования показывают, что все большее число заводов начинают выпускать беспилотные летательные аппараты, это связано с малой ценой на комплектующие, и возможностью управления без участия человека. Самыми популярными и востребованными является мультикоптерные беспилотные летательные аппараты. Они широко применяются в аэросъемке и сфере транспортировок. И это лишь часть возможных сфер их применения. Мультикоптер представляет собой беспилотный летательный аппарат вертолетного типа, имеющий три и более электродвигателей с воздушными винтами. На данном этапе развития, мультикоптеры обладают рядом технических проблем, как из-за сложной многокомпонентной конструкции, так и из-за специфики эксплуатации. Важными характеристиками мультикоптеров являются основные характеристики полета. Они напрямую связаны с полезной нагрузкой и сложностью расположения оборудования, соответственно и с видом мультикоптера. Вид мультикоптера также влияет на увеличение площади основной конструкции и приводит к повышению всей массы дрона. Эту проблему можно решить путем определения наилучшего вида беспилотного летательного аппарата на базе мультикоптера. В данной работе произведен анализ основных существующих видов мультикоптеров. В работе построена имитационная модель октокоптера и определены ее основные характеристики.

Ключевые слова: мультикоптер, октокоптер, моделирование

DETERMINATION OF THE BEST MULTICOPTER TYPE ON THE BASIS OF MODELING THE MAIN FLIGHT CHARACTERISTICS

¹Filatentkov P.A., ¹Sergun T.A., ¹Vinokurov A.A., ^{1,2}Morozova E.V.

¹Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg;

²Kamyshin Technological Institut (branch) of Volgograd State Technical University,
 Kamyshin, e-mail: konvvert@yandex

Currently, unmanned aerial devices used in many areas, for example observation of the environment. Research show that more and more factories are starting to produce unmanned aerial vehicles, this is due to the low price of components, and the ability to manage without human intervention. The most popular and demanded is multicopter unmanned aerial vehicles. They are widely used in aerial photography and transportation. This is only part of the possible areas of their application. Multicopter is a helicopter-type unmanned aerial vehicle. At this stage of development, multicopters have some technical problems, both because of the complex multi-component design, and because of the specifics of operation. The main characteristics of the flight are the most important characteristics of multicopter. They directly connect with payload and location of the equipment, that is why type of the multicopter is very important. The type of multicopter influence on the area of the main structure and leads to an increase in the entire mass of the drone. This problem can be solve by determining the best type of multirotor unmanned aircraft. In this paper, we analyzed the main existing types of multicopter. In this work, an octocopter simulation model was built and its main characteristics were determined.

Keywords: multicopter, octocopter, modeling

Стремительный рост микроэлектроники привел к появлению новых видов устройств. Примером нового вида устройств являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Сейчас почти каждый из нас при желании может приобрести такое устройство. Существуют различные виды БПЛА: мультикоптеры, дроны и т.д. Но среди всех вариантов, самыми популярными являются БПЛА на базе мультикоптера, они имеют малый размер, легки, очень маневренные, относительно дешево и просты в использовании. Относительно небольшие затраты на работы, широкий спектр аппаратных возможностей

малых беспилотных аппаратов на базе мультикоптеров и многие другие качества служат предпосылками для использования этих летательных аппаратов в спасательных службах, исследовательских работах, доставке мелкогогабаритных грузов и так далее. Однако, на данном этапе развития они все же имеют различные проблемы [1].

Целью работы является определение наилучшего вида БПЛА вертолетного типа на основе анализа основных существующих моделей мультикоптеров и математического моделирования основных характеристик полета.

Материалы и методы исследования

Мультикоптер представляет собой беспилотный летательный аппарат вертолетного типа, имеющий три и более электродвигателей с воздушными винтами [2].

В настоящий момент в продаже имеется широкий выбор моделей, которые возможно разделить на три типа: игрушечные дроны, БПЛА общего пользования и профессиональные БПЛА. В данном исследовании рассмотрены мультикоптеры общего назначения, потому что они, в основном строятся по модульному принципу [3]. И соответственно обладают свойством взаимозаменяемости компонентов, что позволяет создать свою собственную модель и упрощает замену поврежденных деталей.

Важными характеристиками мультикоптеров являются основные характеристики полета: время, темп, дальность полета и т.д. Данные характеристики улучшаются благодаря повышению аэродинамических свойств, что напрямую связано с полезной нагрузкой и сложностью расположения оборудования, соответственно и с видом мультикоптера. Вид мультикоптера также влияет на увеличение площади основной конструкции и приводит к повышению всей массы дрона. Эту проблему можно решить путем определения наилучшего вида беспилотного летательного аппарата на базе мультикоптера.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе математического моделирования основных характеристик полета определим наилучший вид БПЛА вертолетного типа.

Рассмотрим четыре основных схемы расположения винтов для мультикоптеров:

$$T = (n \cdot T_v) - \left((M_{up} + (M_v \cdot n)) + \frac{N_{av} \cdot M_b \cdot n}{5} \right) \cdot M_b \cdot \exp(t_p \cdot n \cdot I), \quad (1)$$

где n – количество винтомоторных пар, шт.; T_v – тяга винтомоторной пары – это масса, которую способна поднять одна винтомоторная пара на максимальных оборотах, кг; N_{av} – токопотребление одной винтомотор-

трикоптер (рис. 1, а); квадрокоптер (рис. 1, б); гексакоптер (рис. 1, в); октокоптер (рис. 1, г).

Основные характеристики (количество винтомоторных пар и масса БПЛА) рассматриваемых мультикоптеров, которые будем использовать в дальнейших расчетах, приведены в табл. 1. Винтомоторная пара – винт и мотор мультикоптера, скрепленные вместе и создающие несущую тягу мультикоптера.

Таблица 1

Основные характеристики мультикоптеров

Вид мультикоптера	Количество винтомоторных пар, шт	масса БПЛА, кг
Трикоптер	3	3,48
Квадрокоптер	4	3,6
Гексакоптер	6	3,9
Октокоптер	8	4,2

Основные характеристики винтомоторной пары, влияющие на тягу, приведены в табл. 2. Для моделирования для всех видов мультикоптеров возьмем мотор Tarot 4008/380 KV, аккумулятор LiPo 16000mAh массой 0,378 кг, пропеллер DJI.

Таблица 2

Основные характеристики винтомоторной пары

Тяга винтовой пары, кг	1,62
Масса винтомоторной пары, кг	0,144
Токопотребление винтомоторной пары, А/ч	10
Максимальный потребляемый ток, А	0,5

При моделировании использовали формулу для расчета зависимости тяги (полезной нагрузки) от времени полета:

ной пары, А/ч.; M_v – масса винтомоторной пары, кг; I – максимальный потребляемый ток, А; M_b – масса батареи, кг; M_{up} – снаряженная масса – масса БПЛА, кг; t_p – время полета, с.

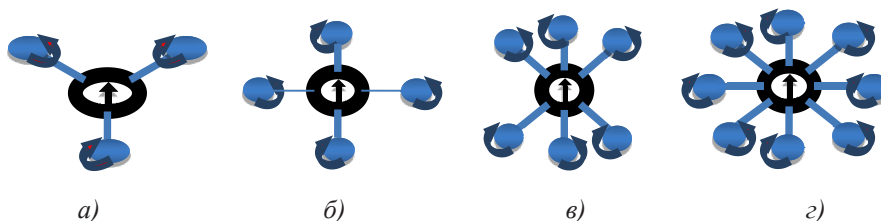


Рис. 1. Схемы построения мультикоптера: а) Y-схема построения трикоптера; X-схема построения: б) квадрокоптер; в) гексакоптер; г) октокоптер

Из рис. 2 видно, что конструкция винтомоторной группы октокоптера предоставляет большую грузоподъемность при одних и тех же характеристиках других мультикоптеров.

Для выяснения главных особенностей перемещения октокоптера, особенностей комплекса контроля, необходимо составить математическую модель, которая демонстрирует перемещение дрона.

Рассмотрим основные координатные системы, используемые для описания полета октокоптера (рис. 3). Пусть расположение центра масс октокоптера (C) совпадает с началом подвижной системы координат $CX_1Y_1Z_1$. В неподвижной декартовой системе координат расположение центра массы октокоптера описывается положением координат X, Y, Z .

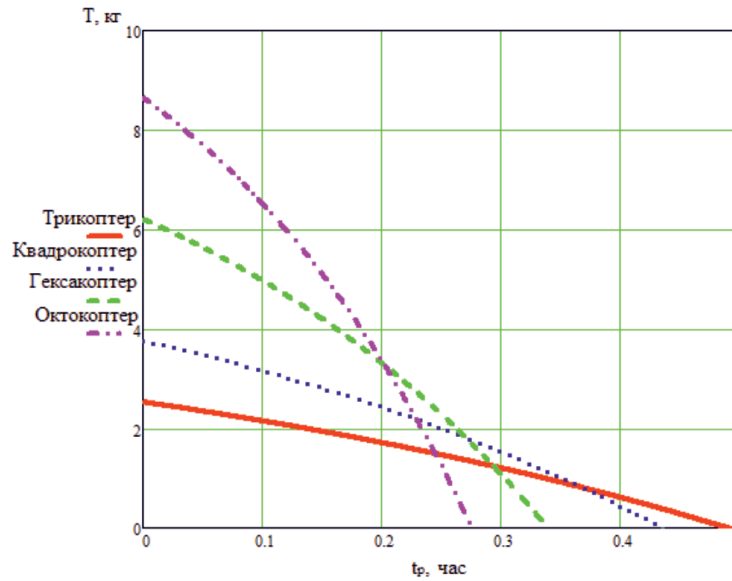


Рис. 2. Зависимость полезной нагрузки от времени полета

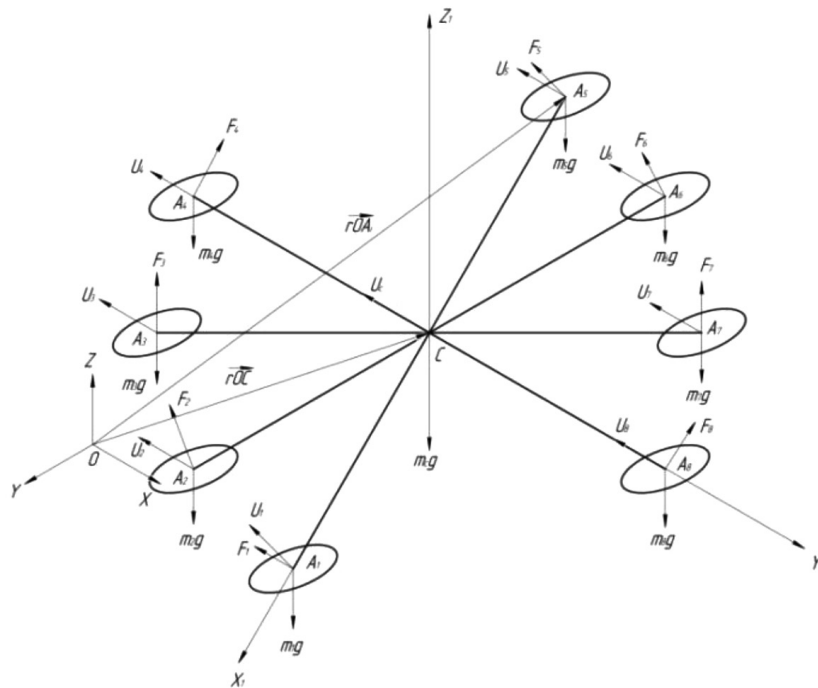


Рис. 3. Графическая схема октокоптера

Исходя из общих теорем динамики, по методике, описанной в работах [4, 5], и с учетом рис. 3 получена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих изменение обобщенных координат октокоптера под действием внешних сил:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{v}_c^x &= \frac{(\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi \sin \theta) \cdot (\sum F_i + R_x)}{m} \\ \dot{v}_c^y &= \frac{(\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \cos \psi \sin \varphi) \cdot (\sum F_i + R_y)}{m} \\ \dot{v}_c^z &= \frac{\cos \varphi \cos \theta \cdot (\sum F_i + R_z)}{m} - g \\ \dot{\omega}_{X_1} &= \frac{[(F_1 + F_3) \cdot l_0 \cdot \sin 60^\circ] - \omega_{Y_1} \omega_{Z_1} (J_i^{Z_1} - J_i^{Y_1}) - \omega_{Y_1} \sum J_i^Z \omega_i + M_{X_1}^C}{J^{X_1}} \\ \dot{\omega}_{Y_1} &= \frac{[-(F_1 + F_3) \cdot l_0 \cdot \sin 30^\circ + F_{2z} \cdot l_0] - \omega_{X_1} \omega_{Z_1} (J_i^{X_1} - J_i^{Z_1}) - \omega_{X_1} \sum J_i^Z \omega_i + M_{Y_1}^C}{J^{Y_1}} \\ \dot{\omega}_{Z_1} &= \frac{[-(F_1 + F_3) \cdot d] - J_i^z \dot{\omega}_i - \omega_{X_1} \omega_{Y_1} (J_i^{Y_1} - J_i^{X_1}) + M_{Z_1}^C}{J^{Z_1}} \\ \dot{\varphi} &= \omega_{X_1} - (\omega_{Z_1} \cos \varphi + \omega_{Y_1} \sin \varphi) \operatorname{tg} \theta \\ \dot{\theta} &= \omega_{Y_1} \cos \varphi - \omega_{Z_1} \sin \varphi \\ \psi &= \frac{1}{\cos \theta} (\omega_{Z_1} \cos \varphi + \omega_{Y_1} \sin \varphi) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где m – вес объекта; v_c^x, v_c^y, v_c^z – проекции скоростей центра масс октокоптера на оси OX, OY, OZ ; J_{TP} – сумма моментов инерции вращения вокруг оси винта; J_x, J_y, J_z – осевые моменты инерции; d – аэродинамическая постоянная; l_0 – расстояние между центрами октокоптера и пропеллера; ψ, θ, φ – углы, задающие положение аппарата в пространстве; X_1, Y_1, Z_1 – проекции угловой скорости тела на оси подвижной системы координат.

На основе описанной выше математической модели (2) октокоптера проведем компьютерное моделирование на конкретной модели октокоптера DJI S1000 Premium + A2. Его основные характеристики: 8 винтов; вес модели – 4,2 кг; размер рамы – 723 мм; аккумулятор LiPo 16000mAh, вес аккумулятора – 0,378 кг.

Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5.

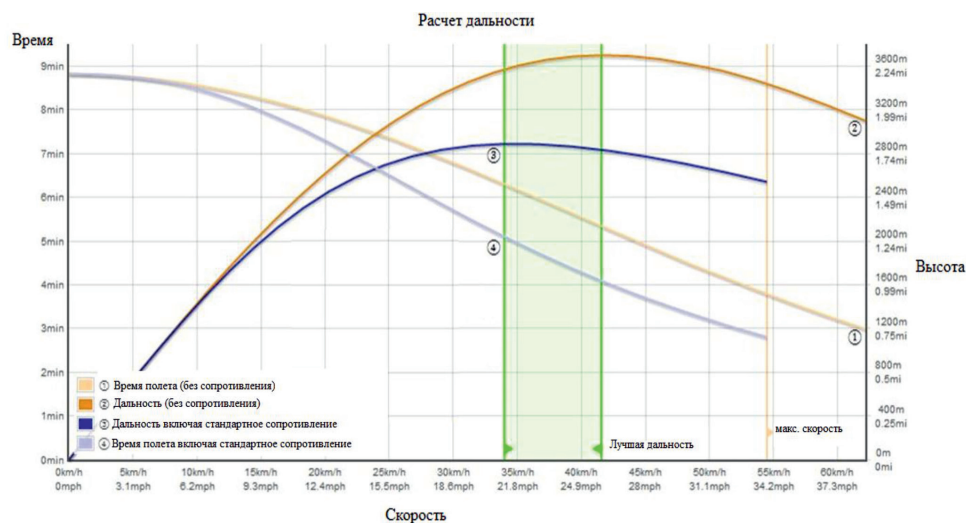


Рис. 4. Модель полета октокоптера

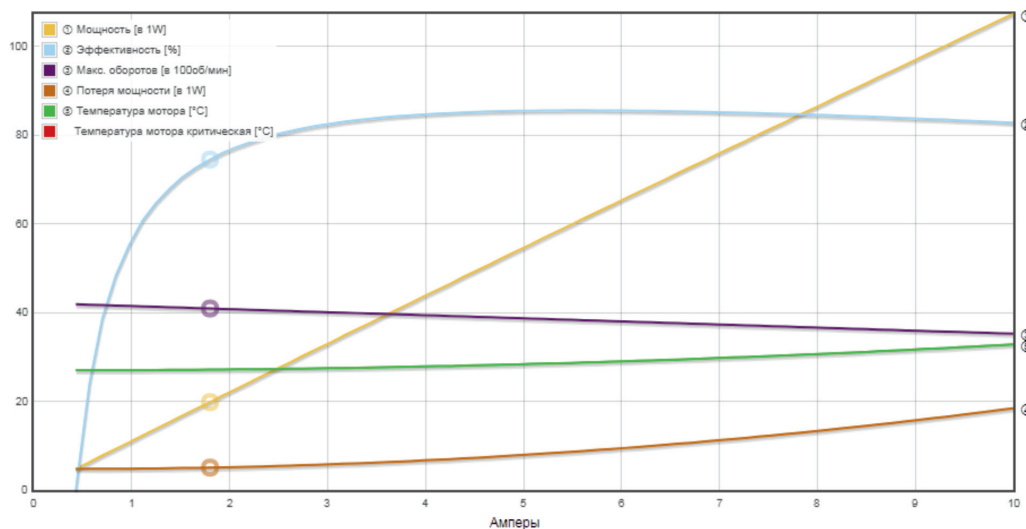


Рис. 5. Характеристики мотора

Моделирование показало, что оптимальный диапазон скорости полета октокоптера составляет 35-40 км/ч, а критическая скорость 55 км/ч. Максимальная высота полета 3600 м. Наилучшие показатели грузоподъемности октокоптер достигает при скорости 35-40 км/ч.

Заклучение

Несмотря на все растущую популярность мультикоптеров, существуют нерешенные проблемы, связанные, как с конструкцией, так и с особенностями эксплуатации. Однако, на данном этапе развития мультикоптеров уже существуют различные методы и знания, позволяющие решить большинство данных проблем. Использование октокопторной схемы построения мультикоптеров создаст условие для расширения сферы их применения.

Список литературы

1. Мавлютов М.М., Мардамшина А.А. Современное понятие беспилотного летательного аппарата и его проблемы в разработке радиоэлектронного оборудования // Студенческий электрон. научн. журн. 2018. № 21 (41). <https://sibac.info/journal/student/41/120544> (дата обращения: 21.12.2018).
2. Корнилов В.А., Молодяков Д.С., Синявская Ю.А. Система управления мультикоптером // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 62 <https://mai.ru/upload/iblock/2f3/sistema-upravleniya-multikopterom.pdf> (Дата обращения 21.12.2018).
3. В Гавриков, Летать! – дрон на компонентах STMicroelectronics // Новости электроники. №2, 2017. <https://www.compel.ru/lib/ne/2017/2/3-letat-dron-na-komponentah-stmicroelectronics>. (Дата обращения 21.12.2018).
4. Попов Н.И., Емельянова О.В., Яцун С.Ф. Моделирование динамики полета квадрокоптера. // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. Вып. 4 (13), 2014. С. 69-75. <https://cyberleninka.ru/article/v/modelirovanie-dinamiki-poleta-kvadrokoptera>. (Дата обращения 12.01.2019).
5. Павловский В.Е., Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Стуканёва С.П. Математическое моделирование робота с переменным вектором тяги. Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)» (9 октября 2015г., г. Санкт-Петербург, Россия): Труды семинара. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. С.99-106.