

ОБЗОР ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ, КОНСТРУКЦИЙ И ПРОБЛЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БПЛА ТИПА МУЛЬТИКОПТЕР

STAGES OF DEVELOPMENT, CONSTRUCTION AND DESIGN PROBLEMS UAV TYPE OF MULTICOPTER

**R. Nabiyev
A. Abdullayev**

Summary. This article provides an analysis of the stage of development of the UAV type multicopter, technologies of their development, the requirements for the design and construction, a mathematical model of movement, the scope of their use and the factors affecting the development of this sector in Azerbaijan. The article also pointed out that in recent years, equipped with photo and video camera compact multirotor UAV began to develop and produce more pace.

Designing multicopter fully automated control with the use of high technology has led to the expansion of its use in the performance of power and civil structures.

Keywords: Multicopter, kvadrokoptyery, unmanned aerial vehicle (UAV), rotation, payload, multirotation, tactical and technical specifications.

Набиев Расим Насиб оглу

*Д.т.н., профессор, Институт Транспорта
и Авиакосмических Проблем Национальной Авиационной
Академии Азербайджана
nabiyevrasim@gmail.com*

Абдуллаев Анар Ариф оглу

*К.ф.-м.н, Институт Транспорта и Авиакосмических
Проблем Национальной Авиационной Академии
Азербайджана
anarcafarov09@mail.ru*

Аннотация. В этой статье приведен обзор результатов анализа стадий развития БПЛА типа мультикоптер, технологий их развития, требований предъявляемых для проектирования и конструкции, математическая модель передвижения, сфера их использования и факторы влияющие на развитие этой сферы в Азербайджане. В статье так же указано, что в последние годы оснащенные фото и видео камерой малогабаритные мультироторные БПЛА стали развиваться и производиться большими темпами.

Проектирование мультикоптера с полностью автоматизированным управлением, с применением высоких технологий привело к расширению их использования в служебной деятельности силовых и гражданских структур.

Ключевые слова: Мультикоптер, квадрокоптер, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), вращаться, полезная нагрузка, мультироторный, тактические и технические свойства.

Мультикоптерами называют автономные или дистанционно управляемые БПЛА, снабженные вращающимися по диагоналям на мультироторной основе тремя (трикоптер), четырьмя (квадрокоптер), шестью (гексакоптер), восемью (октакоптер) винтами или закрепленными подале и с большим радиусом двенадцатью винтами бесколлекторными электродвигателями (вращающимися попарно в противоположных направлениях). Вообще говоря, такие аппараты, имеющие произвольное количество роторов (каждый электродвигатель, присоединенный к одному винту или коаксиально к двум винтам, создает подъемную силу) именуется обобщенным названием мультикоптер [1–4]. Общая особенность, объединяющая приборы такого типа, состоит в схожести их конструкций и летно-технических характеристик.

Первый вариант мультикоптера-четырёхмоторный летательный аппарат (четыре пропеллера, двигатель весом 1600 кг и мощностью 170 л.с.) был создан в начале двадцатого века американскими авиаконструкторами Г. А. Ботезатом и П. Э. Эмишеном [2–3]. В течение двух лет Военно-Воздушные Силы (ВВС) США осуществляли учебные и заказные полеты с помощью поднимающегося

на высоту нескольких метров и управляемого инерциально «геликоптера». Однако, растущий интерес и спрос к автожирам перевел на второй план финансирование работ по созданию «геликоптеров».

Из-за сложной конструкции и трудно управляемой системы, дальнейшее развитие квадрокоптеров не было приоритетным до создания микропроцессоров. Начиная с 1970-х годов были начаты работы по созданию беспилотных радиоуправляемых квадрокоптеров, и за последние десятилетия работы по реализации этой идеи получили массовый характер. Создаваемые в прошлом на любительском уровне квадро-, пенто-, гексо- и т.д. коптеры в последнее время начали составлять основу инженерных изысканий.

Особенность, отличающая мультикоптеры от конструкции и принципа работы БПЛА геликоптерного типа состоит в различии ведущих и направляющих винтов, устройств на основе одноосных схем, коэффициента полезного действия, надежности конструкции, простоты, качества, устойчивости, способности маневрирования, размера, веса и взятия полезного груза [3].

В структуру мультикоптера входят устройства управления, центральная часть, где размещается полезный груз и аккумуляторы, а расположенные по радиусу на боковых концах несущие-винтовые микроэлектрические двигатели придают прибору звездообразный вид. За счет вращения винтов обеспечивается движение системы, остановка на воздухе в горизонтальном положении и ее перемещение.

С установкой в систему дополнительных устройств, становится возможным выполнение полета в полуавтономном или полностью автономном режиме. В литературе [1–5] дана подробная информация о вращательном движении квадрокоптера и об управлении его полетом.

При составлении математической модели в трехосевой системе необходимо обратить внимание на два случая: в неподвижной O_{xyz} и подвижной $C_{x_1y_1z_1}$ системе координат (рис. 1).

Движение летательного аппарата в пространстве можно рассчитать с помощью нелинейного дифференциального уравнения первого порядка, построенного по координатам центров тяжести по осям x, y, z и на основе значений проекций скоростей по оси V_x, V_y, V_z [5].

$$\begin{cases} \dot{x} = V_x; \\ \dot{y} = V_y; \\ \dot{z} = V_z; \end{cases} \begin{cases} \dot{V}_x = R_x/m; \\ \dot{V}_y = R_y/m - g; \\ \dot{V}_z = R_z/m; \end{cases}$$

Также в трехосевой (x, y, z) системе координат можно записать углы поворота по тангажу — ν , крену — γ , направлению (курсу) — ψ и зависимости возникающих $\psi_{x1}, \psi_{y1}, \psi_{z1}$ угловых скоростей:

$$\begin{cases} \dot{\nu} = \omega_{y1} \sin \gamma + \omega_{z1} \cos \gamma, \\ \dot{\psi} = \frac{1}{\cos \nu} (\omega_{y1} \cos \gamma - \omega_{z1} \sin \gamma), \\ \dot{\gamma} = V_{x1} - \tan \nu (\omega_{y1} \cos \gamma - \omega_{z1} \sin \gamma); \end{cases}$$

$$\begin{cases} J_{x1} \dot{\omega}_{x1} = (J_{y1} - J_{z1}) \omega_{y1} \omega_{z1} + M_{x1}, \\ J_{y1} \dot{\omega}_{y1} = (J_{z1} - J_{x1}) \omega_{x1} \omega_{z1} + M_{y1}, \\ J_{z1} \dot{\omega}_{z1} = (J_{x1} - J_{y1}) \omega_{x1} \omega_{y1} + M_{z1}; \end{cases}$$

где параметры R_x, R_y, R_z представляют собой проекции равномерно распределенных тяговых сил двигателей $\bar{R} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_3 + \bar{F}_4$ (в данном случае 4) (Рис. 1). Если учесть, что тяговая сила двигателей $F_j (j = 1..4)$ изменяется в зависимости от задачи, то M_{x1}, M_{y1}, M_{z1} — проекции основных силовых моментов

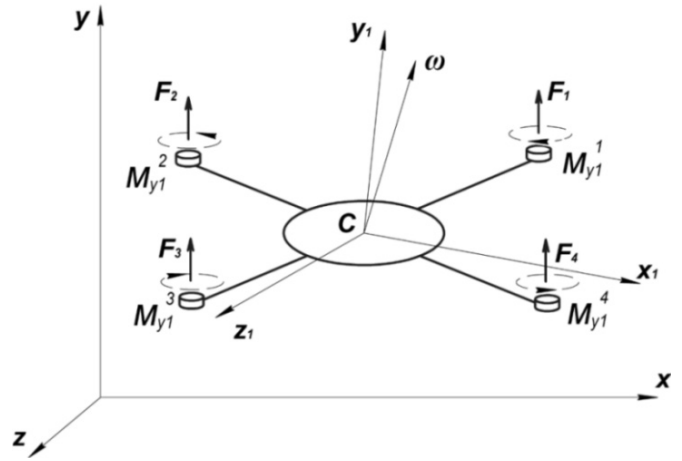


Рис. 1. Координаты и математическая модель неподвижной и движущейся системы

$$\begin{cases} M_{x1} = (F_1 + F_2 - F_3 - F_4) a * \cos 45^\circ, \\ M_{y1} = (M_{y1}^1 - M_{y1}^2 + M_{y1}^3 - M_{y1}^4), \\ M_{z1} = (F_1 - F_2 - F_3 + F_4) a * \sin 45^\circ; \end{cases}$$

где a — оставшееся расстояние между осями двигателей квадрокоптера и центрами тяжести; $M_{y1}^i = k_M * F_i$ — реактивные силовые моменты двигателя ($i = 1..4$) и равны пропорционально силе тяги двигателей [5–7]. В литературе [5] детально описана математическая модель движения квадрокоптера.

Управляющая микросхема мультикоптера работая по специальному программному обеспечению индивидуально (с учетом внешних факторов) определяет скорость вращения каждого винта. Управление осуществляется с помощью радиоволн. Дополнительно могут быть установлены мини инерциальная навигация, GPS-приемник, компас и др. изделия [3].

Наряду с положительными сторонами у них есть и недостатки. Более стабильные и безопасные полеты можно осуществлять многовинтовыми (например, гексакоптерами) и сравнительно тяжелыми БПЛА. Они устойчивы против ветра и способны брать больше груза. Для увеличения грузоподъемности лучше использовать октокоптеры, обладающие большим размером и весом.

Отличие летательных аппаратов, относящихся к группе с коаксиальным винтовым двигателем от аппаратов, изготовленных по обычной схеме (когда один двигатель вращает один винт) состоит в полном использовании энергии двигателями. При этом основной недостаток состоит в краткости времени полета из-за быстрого истощения запаса электрической энергии аккумуляторной батареи [1].

Можно отметить производителей из Германии компании HiSistems GmbH (модель Mikrokopter.De) и Microdrones GmbH. Так, малость форм и размеров мультикоптеров этого типа дали толчок к разработке новых моделей. Более продвинутые моделями Mikrokopter.De являются модели Heksakopter (МК-Гекса) и Oktokopterdir (МК-Окто) [8].

С помощью встроенных в конструкцию приборов и программного обеспечения спроектированы мультикоптеры Heksakopter (МК-Гекса) и Oktokopter (МК-Окто) с мультиротационными двигателями в количестве от 4 до 12. В этих мультикоптерах дополнительно могут быть установлены такие компоненты, как GPS навигатор, компас, телеметрия, высотомер, аккумулятор и т.д. Так, в зависимости от комплектации (4÷12 двигателя) они обладают подъемной массой 0,65÷0,25 кг и полезной грузоподъемностью до 0,25÷1 кг. Время и высота полета составляют, соответственно, 15÷40 минут и 350 м. Аппарат оснащен предусмотренной для легкой камеры стабилизированной карданной подвеской. Для передачи телеметрических данных и изображений на землю используется радиоканал. Пилот во время полета следит за мультикоптером, используя специальные видеоочки.

Компания Microdrones GmbH была основана в 2005 году и является одним из ведущих мировых производителей мультикоптеров. Изготовленные компанией из композитного материала мультикоптеры имеют меньший вес, устойчивы к электромагнитным шумам, оснащены акселерометром, гироскопом, магнитометром, датчиками давления, температуры и влажности воздуха. Более широкое распространение нашли модели MD4200 и MD41000 [9,16].

С использованием GPS (глобальная система определения позиции) можно осуществлять независимый полет [10,13]. С целью анализа после полета информация записывается на устройство бортовой — памяти (log-fayl). На монитор пилота передаются данные о состоянии батареи, высоте, местоположении и времени полета. Во время полета при возникновении препятствия перед прибором включается встроенная система звуковой сигнализации. При снижении мощности аккумулятора и прерывании связи автоматически переходит в режим безопасной посадки в точку начального подъема. Прибор весом 1 кг в течение 20 минут полета способен летать с полезным грузом 200 граммов (видео, фото или ИК-камера) на расстояние 500 м на высоте 150 м.

Аппарат MD41000 является более тяжелым автономным мультикоптером и используется для решения задач по мониторингу, координации, разведке, геодезии, связи в назначенной территории. Летные характеристики устройства аналогичны летным характеристикам малой

модели MD4200. Единственное отличие заключается в том, оно летит быстрее, выше и дальше (продолжительность полета 70 минут, вес 5,5 кг, возможность поднимать груз весом 0,8 кг и больше).

Следующим мультикоптером из этого класса является квадрокоптер AR100 AirRobot. Снабженный системой видеонаблюдения и тепловизором аппарат (практически бесшумный) при проектировании предназначался для целей военной разведки. Однако, позже правоохранительные органы начали использовать этот прибор для контролирования общественных мероприятий и спортивных игр [17]. Имеется возможность передавать снятые изображения в центр управления в режиме живой трансляции. Прибор имеет небольшой размер и вес, что дает возможность обслуживать его одному человеку.

Модель AR100B компании предназначена скорее для целей военного назначения. Данная система широко используется в военных операциях в различных частях мира. Квадрокоптер весом 0,5 кг способен летать в течение 20 минут в радиусе 600 метров и нести полезный груз в 200 граммов.

Компания Air Robot в последние годы спроектировала и запустила в производство модели AR70 и AR150. Сравнительно большая модель AR1508, способная вести разведку при ветре 8 м/сек, может оставаться на воздухе в течение 20 минут и нести «груз» в 1 кг. Связь между обоими БПЛА и оператором осуществляется радиосвязью на назначенных частотах.

Одной из моделей, производимых компанией «Draganfly Innovations Inc», является модель Draganflyer X4 [18–20]. Эта модель с квадро-платформенной основой, имеющая меньшее энергопотребление, оборудована инерциальной навигационной системой. Это устройство, предназначенное для фото и видеосъемки, способно поднимать груз в 250 граммов.

Для целей обучения, практики и научно-исследовательских проектов более надежным является модель Draganflyer E4, который обладает одинаковой конструкцией и грузоподъемностью (рис. 2а). Управление устройством пользователем и контроль за телеметрическими параметрами является более простым.

Другой 6-винтовой коаксиальный трикоптер Draganflyer X6 относится к классу разведочных БПЛА. Его грузоподъемность более чем в 2 раза превышает грузоподъемность моделей X4 и E4. Изготовленный из композитных материалов устройство и оснащенный GPS приемной антенной, позволяет производить профессиональные аэрофото и видео съемки, а так же складываться (рис. 2б).



а)



б)

Рис. 2. Мультикоптеры Draganflyer X4 (а), Draganflyer E4 (б)

Устройство Draganflyer X8, которое является самым крупным БПЛА в своем классе, разработано на основе схемы квадрокоптера. Имеет 8-винтовую конструкцию (состоит из 4-х коаксиальных пар). Способен поднять 1 кг груза. В управлении устройством используется 11 датчиков (3-гироскопа, 3- акселерометра, 3-магнитометра, барометра и приемника GPS). Низкий уровень акустического шума и визуального обнаружения во время полета позволяет использовать его в военной разведке, полицейских операциях и мониторинге окружающей среды [19].

Австралийской компанией Cyber Technology Pty Ltd был произведен квадрокоптер «Cyber Quad» для мониторинга морских нефтяных и газовых платформ. Система оборудована видео (ИК) камерой и газоанализатором. Аппарат произведен серийно в двух размерах — «Cyber Quad MINI» и «Cyber Quad MAXI». В соответствии с размерами, продолжительности полета составляет 25 и 35 мин, вес полезного груза 0,5 и 0,8 кг, скорость полета 50 и 60 км/ч, радиус и высота полета — 1 км [20].

Спроектированный компанией, производящей боевые роботы, БПЛА Quadrotor после броска в воздух рукой остается в воздухе в висячем состоянии, проходит через кольцо, брошенное в воздух и сохраняет устойчивость при спускании вниз с висячего состояния на вертикальной стене.

Французская компания Maximus-Racing производит мультиротационные (с количеством роторов от 3 до 6) летательные аппараты X650 Haircraft и V4-Fayler X650 [21]. Мультикоптер Haircraft весом 1,5 кг оснащен 13 различными датчиками: высоты, GPS, температуры, мощности, запаса потребляемой электроэнергии и т.д.

В зависимости от выбранного типа двигателя, устройство X4-Fayler, имеющий 1 м в диаметре и способный поднимать груз в 300 граммов и летать со скоростью 10 м/сек, весит чуть больше 1 кг. В соответствии с требованием и желанием пользователя универсальная

платформа выполняется с необходимыми параметрами и комплектацией. Во время полета командой, переданной оператором, можно изменить программу полета.

Из мультикоптеров, которые пользуются наибольшим спросом среди пользователей, следует особо отметить квадрокоптеры китайского производства «DJI Inspire 1» и «DJI Phantom 4». Летно-технические характеристики этих устройств, снабженных инерциальными навигационными приборами и полезными грузами высоки, и при их изготовлении были использованы новейшие инновационные технологии. Устройства обладают, соответственно, максимальным весом в 3400 и 1380 граммов, продолжительность полета 24 и 28 минут, высотой полета 6000 м, радиусом полета 2000 м, максимальной скоростью полета 22 и 20 м/с и снабжены постоянной памятью 64 Гб. Эти квадрокоптеры в основном предназначены для поддержки гражданских и военных объектов под постоянным наблюдением, ведения военной разведки и для получения высококачественных изображений с разрешением «4К» и «Full HD» (рис. 3а и 3б) [11–15].

Представляет интерес управление мультикоптером AR Drone с помощью связи Wi-Fi (уклонение устройств IPAD, iPod Touch или iPhone в стороны). Подъем, спуск и поворот выполняется виртуальным джойстиком на экране. Квадрокоптер оснащен двумя камерами. Корпус изготовлен из композитного материала. Устройство в соответствии с комплектацией предлагается пользователям в двух различных корпусах: предназначенные для полета в закрытых местах (с круговой защитой винтов) и в полевых условиях (корпус с открытым винтом). Продолжительность работы аккумуляторов составляет примерно 12 минут [21–22].

Мультиротационные БПЛА разделяют на две группы: коммерческого и некоммерческого назначения [1, 12].

На фоне производства в Европе, Америке и других странах количество моделей квадрокоптеров произ-



Рис. 3. Мультикоптеры DJI Inspire 1 (а) и DJI Phantom 4 (б)

водства России очень мало. Производимый российской компанией «HELK» 6-ти роторный мультикоптер «Колibri» изготовлен на основе БПЛА [23]. Аппарат управляется одним оператором из НСУ (мобильный компьютер, ГЛОНАСС/GPS и передаточно-приемная сигнальная антенна). На экран мобильного компьютера передается цифровая карта территории (местности), координаты местоположения оператора и БПЛА, маршрут движения и видеоизображение. Во время транспортировки мультикоптер может уменьшаться в размере за счет складывания рукавов. В дополнение к устройству в качестве полезной нагрузки можно установить устройства и датчики для сбора радиотехнической информации и введение биологического и химического мониторинга окружающей среды. Этот комплекс может применяться в военных, полицейских, пограничных и противопожарных службах. Устройство может выполнять полет в течение 30 минут на высоте 300 м со скоростью 50 км/ч. Его вес в зависимости от модификации меняется от 1,5 кг до 2 кг, а грузоподъемность составляет 800 г [23].

В 2010 году компания «ZALA AERO» представила пользователям 6-роторный БПЛА Zala 421–21 на базе модели Mikrokopter.DE. Устройство способно летать на высоте до 10÷1000 м, на расстояние 5 км в течение 30 минут, брать 0,5 кг полезной нагрузки и совершать полет с помощью НСУ. Устройством можно управлять в закрытых местах без GPS-сигнала в полуавтоматическом режиме.

БПЛА может совершить посадку в заранее определенное место и наблюдать за целью в режиме экономии энергии, а так же при чрезвычайных ситуациях предназначен для ведения фото и видео записи, контроля за сельским хозяйством и оперативного картографирования [24].

Ранее в нашей стране возникали трудности в получении разрешения от Управления Гражданской Авиации для проведения видеонаблюдений с помощью беспилотных летательных аппаратов. Но в последние годы устранены барьеры на пути получения этих разрешений, создана законодательная база и сформирован профессиональный персонал.

В нашей стране исследовательские работы в этом направлении начаты в Национальной Авиационной Академии и успешно продолжается по сей день [2]. В настоящее время действующие в нашей стране крупные компании и правоохранительные органы начали использовать эффективность мультикоптеров, а так же стараются применять в своей повседневной деятельности.

ВЫВОД

БПЛА типа мультикоптера будучи очень удобными по летным, тактико-техническим и эксплуатационным характеристикам, универсальности и простоты, наряду с замещением БПЛА по традиционной вертолетной схеме, стали неотъемлемым инструментом служебной деятельности правоохранительных органов, соединений специального назначения, средств массовой информации, фото и киноиндустрии. Так, принимая во внимание растущий интерес к этому типу летательных аппаратов, требования, предъявляемые к проектированию и разработке новых мультироторных беспилотных летательных аппаратов должны включать в себе следующее:

1. Использование легких диэлектрических композитных материалов.
2. Обеспечение максимальной высоты и скорости полета.
3. Обеспечение устойчивого и надежного сопротивления против ветра
4. Использование, насколько это возможно, легких аккумуляторов с большой емкостью с целью увеличения длительности полета.
5. Полная автоматизация процесса полета путем создания специального программного обеспечения.
6. С целью расширения использования мультикоптеров в областях военной разведки и гражданского назначения, расширение возможностей снабжения в качестве полезной нагрузки дневными и ночными (ИК) тепловизионными камерами с высоким разрешением, газоанализаторами, миноискателями, метеорологическими приборами, средствами условного носителя «груза» и радиоразведки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мультикоптеры: Новый Вид. www.uav.ru
2. Набиев Р.Н., Газарханов А. Т., Гараев Г. И., Широных У. Т., Гамидли Ф. Ф. Методы использования мультикоптера в военных целях // № 1, Статьи Национальной Авиационной Академии, 2015. Ст. 21–28.
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki>
4. Контроллеры бесколлекторных двигателей. www.multicopter.ru
5. Ситников Д.В., Бурьян Ю. А., Русских Г. С. Система управления движением мультикоптера. — Омск.: Омский государственный технический университет. Монография, 2012, 5с.
6. Селиванова Л.М., Шевцова Е. В. Инерциальные навигационные системы, Часть 1. Одноканальные инерциальные навигационные системы. — М.:2012, 49с.
7. Соловьев В.И., Шабалов П. Г. Инерциальные навигационные системы.-Самара.: 2011,74с.
8. <http://wiki.mikrokoetter.de/en/HexaKoetter>.
9. <https://www.linkedin.com/company/microdrones-gmbh>.
10. Тумуров Э.Г., Шелехов В. И. Требования к системе управления квадрокоптером, Институт систем информатики СО РАН: System Informatics (Системная информатика), No. 5–2015/39–54с.
11. «Хозяин, напиши для нас приложение». Требуется разработчик софта и железа для дронов DJI. //Блог «Хакспейс Neuron» на сайте habrahabr.ru. URL: <http://habrahabr.ru/company/neuronspace/blog/259527/> (дата обращения: 20.08.2015).
12. Универсальный многоцелевой беспилотный летательный аппарат на базе летающей платформы «Октокоптер Devorer D130 X8/A2». Авиаклуб Диар-Флай.: www.diarfly.ru
13. Шилов К. Е. Разработка системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом мультироторного типа. Труды МФТИ. — 2014. — Том 6, № 4. с. 139–152.
14. http://quadrocopter.ua/quadrocopters_copters/DJI-Phantom-4.
15. <http://coptertime.ru/copters/dji-inspire-1/inspire-1/>
16. <https://www.microdrones.com/en/products/md4-200/>
17. https://de.wikipedia.org/wiki/AirRobot_AR_100-B
18. <http://www.draganfly.com/>
19. <https://walterfarah.wordpress.com/tag/draganflyer-x4e4/>
20. <http://dronelife.com/cms/product/cyberQuad>
21. <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1326529>
22. https://ru.wikipedia.org/wiki/Parrot_AR.Drone
23. <http://airspot.ru/news/raznoje/multikoetter-quot-kolibri-6-quot-uspeshno-demons-trirovalsya-na-ucheniyah-mchs-rf-v-sochi>
24. <http://zala.aero/zala-421-21/>

© Набиев Расим Насиб оглу (nabiyevrasim@gmail.com), Абдуллаев Анар Ариф оглу (anarcafarov09@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

