

Учебное пособие
по курсу «Управление БПЛА»

Оглавление

1. Обозначения и сокращения.....	5
2. Введение	7
3. История автономных полетов.....	8
3.1. Появление микросхем.....	10
3.2. Краткий историко-технический очерк развития самолетов.	12
4. Аэродинамика летательных аппаратов, динамика полета моторных аппаратов	25
4.1. Основные понятия.....	27
4.2. Строение атмосферы.....	29
4.3. Положение ЛА в воздухе и системы координат	31
4.4. Узлы летательного аппарата	36
4.5. Геометрические характеристики крыла.....	40
4.6. Аэродинамические силы	44
4.7. Четыре основные силы, действующие на ЛА в полете	48
4.7.1. Тяга	48
4.7.2. Лобовое сопротивление	49
4.7.3. Подъемная сила	49
4.7.4. Вес или гравитация.....	50
4.8. Основные понятия и показатели надежности, безопасности и живучести самолета	51
4.9. Количественные показатели надежности, безопасности и живучести самолета ..	54
4.10. Понятие центра давления	57
4.11. Понятие центра масс	58
4.12. Перегрузка	59
4.13. Понятие аэродинамического качества.	59
5. БПЛА.....	61
5.1. Беспилотный летательный аппарат, основные определения	61
5.2. Способы запуска и управления БПЛА.....	62
5.2.1. Способы запуска БПЛА	62
5.2.2. Способы управления БПЛА	64
5.3. Классификация БПЛА по назначению.....	66
5.4. Классификация БПЛА по принципу полёта	75
5.4.1. БПЛА самолётного типа	76
5.4.2. БПЛА с гибким крылом	79

5.4.3. БПЛА вертолётного типа	80
5.4.4. БПЛА с машущим крылом	88
5.4.5. БПЛА аэростатического типа	88
5.5. Классификация БПЛА по лётным характеристикам	89
5.5.1. Классификация UVS International	89
5.5.2. Российская универсальная классификация	90
5.6. Монокоптер	91
5.7. Мультикоптеры. Различные схемы построения мультикоптеров	91
5.8. Обязательный состав компонентов квадрокоптера	94
5.8.1. Электродвигатели	95
5.8.2. Плата распределения питания (PDB)	102
5.8.3. Пропеллер	103
5.8.4. Приёмник радиосигнала	112
5.8.5. Рама	112
5.8.6. Регуляторы оборотов электродвигателей	119
5.8.7. Аккумулятор	121
5.8.8. Полётный контроллер	124
5.9. Настройка БПЛА	130
5.10. Формула для расчета мощности, выдаваемой аккумуляторной батареей	147
6. Правовое использование беспилотных летательных аппаратов	150
7. Список литературы	156

1. Обозначения и сокращения

Таблица 1. Перечень сокращений.

Сокращение	Расшифровка
АСУ	Авиационная силовая установка
БАС	Беспилотная авиационная система
БВС	Беспилотное воздушное судно
БПЛА	Беспилотный летательный аппарат
БК	Бесколлекторный
ВВС	Военно-воздушные силы
ВФШ	Винт фиксированного шага
ВО	Вертикальное оперение
ВПП	Взлетно-посадочная полоса
ВПХ	Взлётно-посадочные характеристики
ГЛОНАСС	Глобальная навигационная спутниковая система
ГО	Горизонтальное оперение
ДОСААФ	Добровольное общество содействия армии, авиации и флоту России
ДВС	Двигатель внутреннего сгорания
ЖРД	Жидкостный ракетный двигатель
ИС	Интегральная схема
КБ	Конструкторское бюро
КПД	Коэффициент полезного действия
КПН	Конструктивно-производственный недостаток
ЛА	Летательный аппарат
ЛТХ	Лётно-технические характеристики
ЛЭП	Линия электропередачи
ПГО	Переднее горизонтальное оперение
ПК	Полетный контроллер
ПО	Программное обеспечение
РЭБ	Радиоэлектронная борьба
САХ	Средняя аэродинамическая хорда
СВВП	Самолет вертикального взлета и посадки
ТРД	Турбореактивный двигатель
ТРДД	Турбореактивный двухконтурный двигатель
ТТТ	Тактико-технические требования
ЦПГО	Цельноповоротное горизонтальное оперение
ЧС	Чрезвычайная ситуация
ШИМ	Широтно-импульсная модуляция (от англ. pulse-width modulation (PWM))
ЭТХ	Эксплуатационно-технические характеристики
AUVSI	От англ. Association for Unmanned Vehicle Systems International – Международная ассоциация беспилотных транспортных систем
БЕС	От англ. Battery Eliminator Circuit – схема отключения батареи
ССW	От англ. Counterclockwise – против часовой стрелки
CR	От англ. Close Range – класс тактических БПЛА ближнего радиуса действия
CW	От англ. Clockwise – по часовой стрелке
DEC	От англ. Decoys – класс БПЛА «ложные цели»
ESC	от англ. Electronic Speed Controller – электронный контроллер скорости

Продолжение таблицы 1.

Сокращение	Расшифровка
EURO UVS	От англ. European Association for Unmanned Systems – Европейская ассоциация по беспилотным системам
EXO	От англ. Exo-stratospheric – класс экзостратосферных БПЛА
FPV	От англ. First Person View – вид от первого лица
FC	От англ. Flight Controller – полетный контроллер
GPS	От англ. Global Positioning System – система глобального позиционирования
HALE	От англ. High Altitude Long Endurance – класс стратегических высотных БПЛА с большой продолжительностью полета
IMU	От англ. Inertial Measuring Unit – инерциальный измерительный блок
LADP	От англ. Low Altitude Deep Penetration – класс маловысотных БПЛА для проникновения в глубину обороны противника
LALE	От англ. Low Altitude Long Endurance – класс маловысотных БПЛА с большой продолжительностью полета
LBEC	От англ. Linear Battery Eliminator Circuit – линейная схема отключения батареи
LET	От англ. Lethal – класс БПЛА летального действия
LiPo	От англ. lithium-ion polymer battery – литий-полимерные батареи
MALE	От англ. Medium Altitude Long Endurance – класс средневысотных БПЛА с большой продолжительностью полёта
MR	От англ. Medium Range – класс тактических БПЛА среднего радиуса действия
MRE	От англ. Medium Range Endurance – класс тактических БПЛА среднего радиуса действия с большой продолжительностью полета
OSD	От англ. On Screen Display – отображение на экране
PDB	От англ. Power Distribution Board – плата распределения питания
PID	От англ. Proportional-integral-derivative – пропорционально-интегрально-дифференцирующий
RX	От англ. Receiver – приемник
SBEC	От англ. Switching Battery Eliminator Circuit – импульсная схема отключения батареи
SR	От англ. Short Range – класс тактических БПЛА малого радиуса действия
STRA	От англ. Stratospheric – класс стратосферных БПЛА
TX	От англ. Transmitter – передатчик
UART	От англ. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter – универсальный асинхронный приёмопередатчик
UBEC	От англ. Universal Battery Eliminator Circuit – универсальная схема отключения батареи
UCAV	От англ. Unmanned Combat Aerial Vehicles – беспилотный боевой летательный аппарат
USB	От англ. Universal Serial Bus – универсальная последовательная шина
VTOL UAV	От англ. Vertical Take-off and Landing UAV – БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой

2. Введение

Данное методическое пособие составлено с использованием открытых информационных ресурсов и литературы.

Задача методического пособия состоит в систематизации информации для изучения истории развития авиации и беспилотных летательных аппаратов, основ аэродинамики и динамики полёта, управлению беспилотными летальными аппаратами, а также правового использования БПЛА. Предназначено для обучающихся 10-11 кадетских классов по профилю Воздушно-космические силы. Пособие состоит из четырёх разделов.

В первом разделе представлена краткая историческая справка о развитии авиации, в том числе и беспилотной.

Второй раздел посвящён аэродинамике и динамике полёта: даётся представление об основных понятиях, строении атмосферы, рассмотрена геометрия летательного аппарата, его положение в пространстве, определены геометрические характеристики крыла, разобраны вопросы, связанные с аэродинамическими силами, а также понятиями центра давления и центра масс, описаны основные показатели надёжности, безопасности, живучести, а также даётся определение перегрузки.

В третьем разделе описываются беспилотные летательные аппараты, способы их управления и запуска. Приведены различные классификации: по назначению, по принципу полёта, по лётным характеристикам. Определены основные типы БПЛА: монокоптер и мультикоптер. Рассмотрены основные компоненты, которые входят в состав БПЛА. Описаны способы настройки БПЛА.

Четвёртый раздел посвящён правовому использованию беспилотных летательных аппаратов.

В конце пособия представлен список литературы.

3. История автономных полетов

С началом XXI века летающие БПЛА и наземные роботы стремительно ворвались в гражданскую жизнь и даже в быт человека. Однако история БПЛА начиналась как сугубо военная практика.

Мирное начало

История БПЛА начинается в 1783 году, когда 5 июня братья Этьен и Жозеф Монгольфье подняли в воздух шар, наполненный дымом (рис. 1). Диаметр несущей оболочки был 3,5 метра, а вес всего аппарата – 154 килограмма. Шар продержался в воздухе около 10 минут, при этом он поднялся на высоту почти 300 метров и пролетел около километра. Начало было положено, братья задумались над развитием проекта. Второй запуск в сентябре того же года стал более зрелищным: к шару была прикреплена корзина, в которой поместились первые пассажиры беспилотного летательного аппарата: баран, утка и петух. Полет длился 8 минут на дистанции около 4-х километров. Воздушные шары, впоследствии названные дирижаблями, сыграли большую роль в истории авиации, но именно беспилотные летательные аппараты стали настоящей находкой в военном деле.

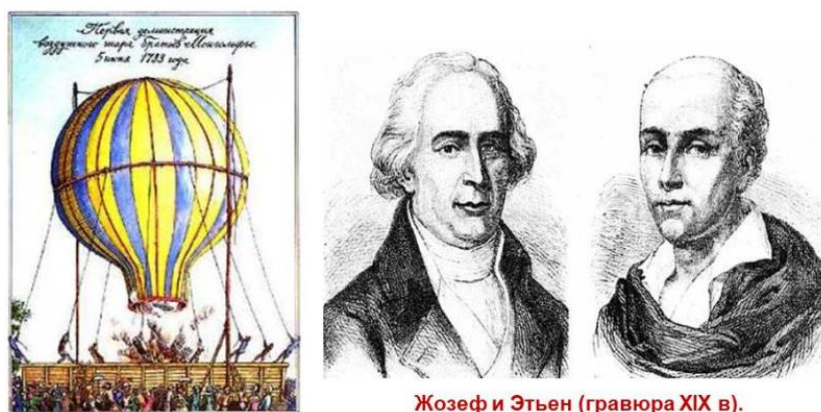


Рис. 1. Братья Монгольфье и их воздушный беспилотный шар

Первый боевой беспилотный летательный аппарат: бомбардировка Венеции в 1849 году

Началом военной истории БПЛА можно считать Итальянскую революцию 1848 – 1849 годов. Поскольку местные условия рельефа не давали возможности для эффективной работы артиллерии, командование армии запустило над восставшим городом два аэростата, начиненных бомбами. Воздушные шары были оснащены механизмами для автоматического сбрасывания боеприпасов. И хоть бомбардировка особого успеха не принесла, венецианцы были в панике, а день 12 июля 1849 года вошел в историю, как день боевых БПЛА.

Никола Тесла и первая лодка на радиоуправлении

Конец XIX века пришелся на открытия в ОБПЛАсти электричества и радиочастот. Известный физик, инженер и изобретатель Никола Тесла (рис. 2) в 1898 году на выставке в Мэдисон-сквер гардене (Нью-Йорк, США) демонстрирует первую лодку на радиоуправлении.

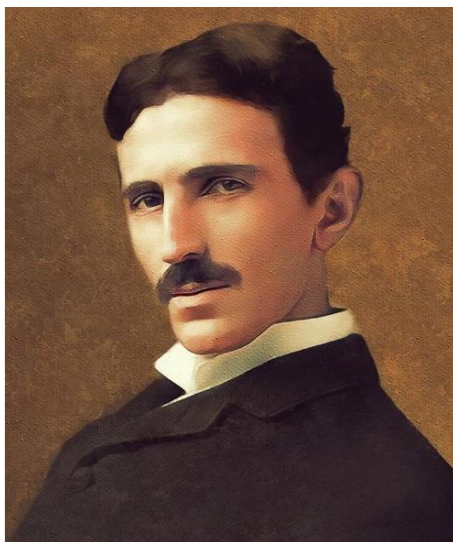


Рис. 2. Никола Тесла

Несмотря на удачные опыты, вторым боевым радиоуправляемым беспилотным аппаратом становится не судно, а военный самолет. Американец Чарльз Кеттеринг в 1917 году создает «летающую бомбу». По замыслу изобретателя, самолет, начиненный взрывчаткой, управляется не пилотом, а часовым механизмом. В заранее определённый момент времени он сбрасывает крылья и камнем падает на голову врага. Идея нашла поддержку в правительстве США. Проект получил финансирование, но несколько неудачных «бомбардировок» привели к тому, что производство «беспилотных бомб» было приостановлено еще до начала Первой Мировой войны.

Queen Bee: родоначальник всех БПЛА

Прорывом для радиоуправляемых беспилотников стал 1933 год, который официально считается родоначальником всех дальнейших разработок. Именно в этот год силами инженеров Великобритании был разработан первый БПЛА многократного использования. Проект получил название DH.82B Queen Bee (разработчик Джеффри де Хэвилленд (27.07.1882 – 21.05.1965)) и представлял собой отреставрированные модели бипланов Fairly Queen, которыми дистанционно управляли с корабля по радиосигналу. И именно этому беспилотнику было суждено стать самолетом-мишенью для будущих асов и зенитчиков. DH.82B Queen Bee (рис. 3) служил ВВС ее Величества с 1934 года по 1943.



Рис. 3. Беспилотный радиоуправляемый самолёт DH.82B «Queen Bee»

С началом Второй Мировой беспилотные летательные аппараты для нужд армии стали выпускаться массово. Одни из основных воюющих сторон (СССР, США и Германия) не раз обращались к услугам беспилотной авиации, ощущая ее явное преимущество над пилотируемыми аппаратами:

- США в 1939 году массово выпускают (более 14 тыс. экземпляров) радиоплан типа Target – модель QQ-2, который применялся в качестве мишени при обучении пилотов;
- Германия проектирует и использует ракеты Фау-1 и Фау-2 (первая в мире баллистическая ракета), радиоуправляемые бомбы Henschel Hs 293 и Fritz X;
- СССР в 1941 году использует тяжелый беспилотный бомбардировщик ТБ-3 (более 750 экземпляров).

После Второй Мировой войны бесспорным лидером в разработке и применении БПЛА считаются США. Так, беспилотные летательные аппараты уже много лет стоят на вооружении американской армии наравне с пилотируемыми аппаратами.

Гражданские БПЛА

История развития гражданских беспилотных летательных аппаратов берёт отсчёт с начала XXI века, когда получили широкое применение FPV-системы и видеосъёмка с квадрокоптеров. Популярность этого вида БПЛА заставила правительства многих стран задуматься о законодательном регулировании их применения. Уже сейчас практикуется доставка БПЛА грузов, сбор различной информации на больших территориях, аэро- и фотосъёмка. Возможности беспилотных летательных аппаратов все еще изучаются, а сами аппараты – совершенствуются.

3.1. Появление микросхем

История создания интегральных схем (ИС) берёт своё начало со второй половины уходящего столетия. Их появление было обусловлено острой необходимостью повышения надёжности аппаратуры и автоматизации процессов изготовления и сборки

электронных схем. Сборка аппаратуры в то время была преимущественно ручной – весьма трудоёмкой, длительной и очень плохо поддающейся автоматизации. Многократно увеличилось число переключающих приборов в цифровом оборудовании, особенно в компьютерах. При этом резко снизилась надёжность и время наработки на отказ. Так, компьютер типа CD1604, выпущенный в 1960 г. американской фирмой Control Data Corp., содержал около 100 тыс. диодов и 25 тыс. транзисторов и мог безотказно работать не более 2–3 часов.

Другой причиной создания ИС стала технологическая возможность размещения и соединения между собой множества электронных компонентов: диодов, транзисторов и прочих на одной пластине полупроводника.

Концепция ИС была предложена задолго до появления групповых методов изготовления полупроводниковых приборов. В 1952 году на конференции по электронным компонентам, проходившей в Вашингтоне, сотрудник Британского королевского радиолокационного управления в Малверне Джеффри Даммер представил доклад о надёжности элементов радиолокационной аппаратуры, содержащей пророческое утверждение: "С появлением транзистора и работ в ОБПЛАсти полупроводниковой техники вообще можно себе представить электронное оборудование в виде твёрдого блока, которое не содержит соединительных проводов. Он может состоять из слоёв изолирующих, проводящих, выпрямляющих и усиливающих материалов, в которых определённые участки вырезаны таким образом, чтобы они могли непосредственно выполнять электрические функции".

Первые в мире ИС были разработаны и изготовлены в 1959 году американцами Джеком С.-К. Килби (фирма Texas Instruments) и Робертом Н. Нойсом (Fairchild Semiconductor) независимо друг от друга.

В мае 1958 г. Джек Килби перешёл в фирму Texas Instruments (TI) из фирмы Centralab – в ней он возглавлял программу по разработке слуховых аппаратов, для которых фирма создала небольшое предприятие по созданию германиевых транзисторов. Уже в июле 1958 г. Килби пришла в голову идея создания ИС. Из полупроводниковых материалов уже умели изготавливать резисторы, конденсаторы и транзисторы. Оставалось только научиться создавать такие переходы в монолите кремния. В настоящее время германиевые транзисторы практически полностью вытеснены кремниевыми, имеющими лучшие характеристики и температурную стабильность.

Килби разработал и проверил функционирование интегральной схемы, далее он поставил перед собой задачу разработать триггер, используя предыдущие наработки. В начале октября 1958 г. он начал создавать конструкцию триггера на одном кусочке монолитного германия. Для его изготовления был применён метод фотогравировки, которым владела фирма TI. В начале 1959 г. такая "твёрдая схема" была изготовлена, а в марте 1960 г. представлена на выставке американского Института радиоинженеров. Килби подал заявку на выдачу патента. Марк Шеферд, тогда вице-президент фирмы TI,

отметил данную работу Килби "как наиболее значительную разработку фирмы Texas Instruments со времён выпуска кремниевого транзистора".

Однако, несмотря на широкое освещение прессой, это достижение было встречено весьма скептически, хотя большинство критических замечаний были верными:

- ограничения, связанные с интеграцией (параметры индивидуальных компонентов ИС нельзя оптимизировать);
- выход годных ИС был менее 10%;
- дороговизна готовой матрицы-образца ИС;
- невозможность в последующем видоизменять и дорабатывать схему.

Многие недостатки "твёрдых схем" были устранены позднее Робертом Нойсом. С января 1959 года, занимаясь в фирме Fairchild Semiconductor (FS) исследованием возможностей планарного транзистора, он вплотную занялся выдвинутой им идеей создания интегральных диффузионных или напылённых резисторов. Вскоре была подана соответствующая заявка на патент, и разработчики элементов в тесном контакте со специалистами по фотолитографии начали работать над вопросами соединения диффузионных резисторов и транзисторов на кремниевых пластинах.

Разработки ИС стали продвигаться быстрыми темпами. Фирма FS пригласила в качестве разработчика схем Роберта Нормана из фирмы Sperry. Роберт Норман был знаком с резисторно-транзисторной логикой, выбранной в качестве основы для будущей серии ИС – Micrologic. Это было начало новой эры.

3.2. Краткий историко-технический очерк развития самолетов.

Процесс развития самолетов обусловлен взаимодействием между непрерывно развивающимися наукой, производством и эксплуатацией, их взаимным влиянием. Постоянно увеличиваются скорость и дальность полётов, повышается значение целевой нагрузки, улучшаются характеристики двигателей, возрастает число функций бортового оборудования.

Каждое из свойств самолета пропорционально массе вещества, затраченного на формирование данного свойства, а коэффициент пропорциональности отражает уровень развития науки и техники. Это позволяет в качестве критериев для историко-технического анализа развития самолетов выбирать значения относительных масс агрегатов и частей самолета, так как они непосредственно связывают все его свойства с уровнем развития науки и техники.

Развитие отечественной авиации можно условно разделить на шесть периодов.

Период 1 (до 1904 г.) характеризуется попытками многих исследователей построить аппарат тяжелее воздуха и на нем подняться в воздух. Истоки этой идеи уходят вглубь веков. Известно, что эту идею разрабатывал в средние века Леонардо да

Винчи, затем уже в 18 столетии М.В. Ломоносов, построивший и испытавший модель прообраза вертолета. Однако только в 1881 г. наш соотечественник Александр Федорович Можайский получил патент, а затем построил и испытал летательный аппарат, имевший практически все элементы современного самолета (рис. 4). Дату испытания этого самолета с человеком на борту принято считать началом развития авиации. Это был первый в мире самолет, в котором были практически удовлетворены условия существования самолета.



Рис. 4. Самолёт А.Ф. Можайского

Период 2 (1904 – 1914 гг.) характеризуется господством эмпирического подхода к созданию самолета на базе методов прямой и косвенной аналогий, что отразилось в видовом многообразии самолетов, отсутствии устойчивых значений относительных масс. Падение значения «относительной массы планера» с 0,6 до 0,4 связано с накоплением опыта постройки самолетов и широким использованием методов, материалов и конструктивных решений из других ОБПЛАстей техники (кораблестроение, автомобилестроение, мотостроение и т.д.). Уменьшение «относительной массы силовой установки» с 0,31 до 0,25 связано с применением двигателей воздушного охлаждения, совершенствованием способов водяного охлаждения, повышению числа оборотов двигателей, созданием специализированных авиационных моторов на базе автомобильных.

Потребность совершения более продолжительных полетов, а также использования двигателей с воздушным охлаждением, снижающих из-за большего сопротивления аэродинамическое качество самолета (раздел 4.13), отразилось на увеличении «относительной массы топлива».

Период 2 характеризуется увеличением полезной отдачи «относительной массы целевой нагрузки» в связи с требованием иметь на борту второго члена экипажа (пилота-наблюдателя), установки оружия на борту и боеприпасов для ведения воздушного боя. Среди компоновочных схем этого периода – монопланы с тянущим винтом нормальной схемы, бипланы с толкающим винтом, расположенным позади крыльев, бипланы с

тянущим винтом и хвостовым оперением, связанным с крыльями при помощи стержневых ферм.

Планер самолета представлял собой деревянный ферменный каркас, обтянутый полотняной обшивкой с широким использованием расчалок. Детали каркаса либо склеивались между собой, либо скреплялись металлическими накладками.

Период 2 – это период становления экспериментальной базы аэродинамической науки, период накопления материалов о способах и методах конструирования и проектирования самолетов. Этот период связан с плодотворной деятельностью таких ученых, как Николай Егорович Жуковский (17.01.1847–17.03.1921, рис. 5) и его ученики: Сергей Алексеевич Чаплыгин (05.04.1869–08.10.1942), Владимир Петрович Ветчинкин (29.06.1888–06.03.1950), Борис Николаевич Юрьев (29.10.1889–14.03.1957), Андрей Николаевич Туполев (10.11.1888–23.12.1972) и др., утвердивших приоритет русских ученых в разработке многих вопросов авиационной науки и техники. Постройкой самолетов занималось тогда много энтузиастов. Заслуживают внимание работы Дмитрия Павловича Григоровича (25.01.1883–26.07.1938), Василия Андриановича Слесарева (05.08.1884–23.07.1921), Якова Модестовича Гаккеля (30.04.1874–12.12.1945), Игоря Ивановича Сикорского (25.05.1889–26.10.1972), особенно четырехмоторные бомбардировщики «Русский витязь» и «Илья Муромец». Из иностранных самолетов в серийном производстве в России тогда были самолеты «Фарман», «Вуазен», «Ньюпор», «Моран», «Блерио» и др., которые выпускались на различных предприятиях таких, как «АО Дукс», «Анатра», «Лебедев» и т.д.

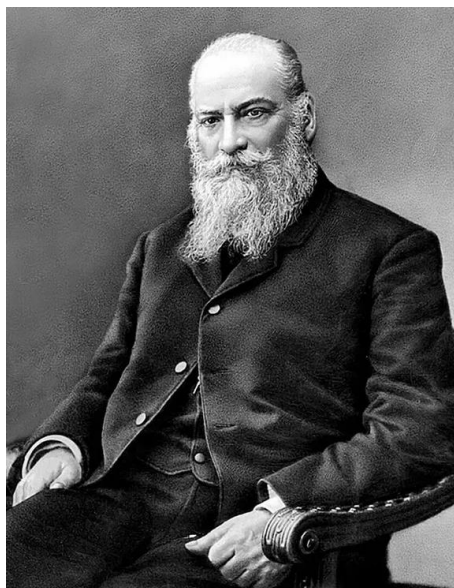


Рис. 5. Н.Е. Жуковский

Период 3 (1914 – 1935 гг.) определяет начало практического использования авиации в интересах удовлетворения потребностей общества. Первая мировая война выявила возможности её успешного использования в военных целях. Определились и начали быстро совершенствоваться такие типы самолетов военного назначения, как

разведчики, истребители, бомбардировщики, транспортные. Это период дальнейшего развития экспериментальной аэродинамики, совершенствования двигателей, конструкции, разработки методов проектирования на базе пересчета коэффициентов или методов прототипирования. Увеличение использования авиации связано с переходом от деревянных конструкций к смешанным, а затем и к цельнометаллическим. В деревянных конструкциях преобладали ферменно-расчалочные фюзеляжи и крылья с обшивкой носовых частей листами фанеры. Для смешанных конструкций характерны ферменные сварные каркасы (стальные трубы оказались дешевле и практичнее деревянных брусков и планок, особенно при многочисленных узлах) и фанерные обшивки по каркасу из металлических и дюралевых труб.

В первой половине 1930-х гг. появились цельнометаллические самолеты с жесткой металлической гофрированной обшивкой. Шасси, в основном, неубирающееся с системой обтекателей, шнуровой резиновой и пластинчатой амортизацией. Возрастание было обусловлено удовлетворением требований, летать быстрее и выше. Характерен переход на высокооборотные моторы — от 1400...1700 об/мин во второй половине 1920-х гг. и до 2400 об/мин в первой половине 1930-х гг.



Рис. 6. Цельнометаллический самолет АНТ-2

В это время начинают использовать воздушные винты с деревянными лопастями, а затем с дюралевыми с фиксированным шагом (ВФШ). Для указанного периода характерна некоторая стабильность значений, что определяется, с одной стороны, возрастанием требований к обеспечению более продолжительного полета, а с другой — снижением характеристик удельного расхода топлива двигателей. Ввиду того, что увеличивающиеся значения лётно-технических характеристик (ЛТХ) самолета уже сами по себе повышают его эффективность, были несколько снижены темпы оснащения самолетов специальным авиационным вооружением. Все это отразилось в колебаниях величин. Целесообразными для развития авиации в России в начале 20-х годов стали решения о создании в стране мощного воздушного флота, заключающиеся в объединении мелких авиапредприятий и организации первых конструкторских бюро А.Н. Туполева и Н.Н. Поликарпова, в создании Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ) и ряда учебных вузов и академий для подготовки специалистов Воздушного флота и проведения научных исследований. Для этого периода характерны

бипланы классической балансировочной схемы и свободнонесущие монопланы, а также появление и широкое использование гидросамолетов. Самолеты А.Н. Туполева АНТ-1, первый цельнометаллический самолет АНТ-2 (рис. 6), первый в мире тяжелый двухмоторный бомбардировщик ТБ-1 свободнонесущей монопланной схемы, самолеты-истребители Н.Н. Поликарпова, учебный самолет У-2 (По-2) и разведчик Р-5 (рис. 7), сменивший самолет Р-1, истребители и гидросамолеты Д.П. Григоровича — все это самолеты того периода, когда наша авиационная промышленность делала свои первые шаги. Из зарубежных самолетов, использовавшихся в России в эти годы, — «ньюпоры», «юнкерсы», «фоккеры» и др.

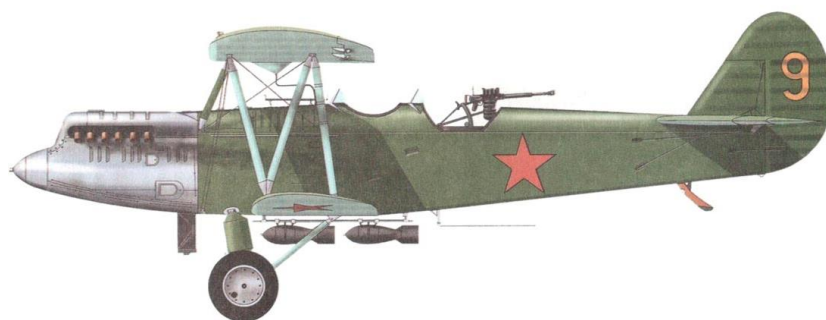


Рис. 7. Самолёт-разведчик Р-5

Период 4 (1935 – 1950 гг.) характеризуется борьбой за аэродинамическое совершенство самолета, за увеличение мощностей моторов для роста скорости и высоты полета; созданием самолетов с заранее заданными свойствами, приданием им свойств боевой живучести и надежности; совершенствованием схем самолетов при переходе с поршневых на газотурбинные двигатели. Уборка шасси позволила повысить скорость полета более чем на 50 км/ч. С ростом удельной нагрузки на крыло наметились тенденции к резкому ухудшению взлетно-посадочных характеристик (ВПХ), основными параметрами которых являются скорость отрыва, скорость посадки, скорость захода на посадку, длина разбега, длина пробега, взлетная дистанция и другие. Для компенсации надо было увеличивать несущую способность крыла — коэффициенты подъемной силы на взлете и посадке. Это достигалось механизацией задней кромки крыла (подробнее о механизации крыла повествуется в разделе 4.4, рис. 29). Появляются щитки, простые закрылки, щелевые, закрылки Фаулера. Происходит переход от обшивки типа гофр к смешанной (гофр, сверху покрытый полотняной либо фанерной обшивкой), а затем и к целиком гладкой металлической обшивке, обеспечивающей гладкость обводов. Широко используются заклепки с потайными головками, ликвидация уступов, вмятин и т. д. В конструкции фюзеляжей стремятся избежать больших вырезов, броня боевых самолетов включается в общую силовую схему, ликвидируются различные конструктивные надстройки, появляются фонари кабин каплеобразной формы, развивается капотирование двигателей (капотирование двигателей выполняется с целью уменьшения лобового сопротивления и создания необходимой конфигурации воздухозаборников и выхлопных устройств). Увеличение мощности двигателей было обусловлено увеличением числа цилиндров, использованием центробежных

нагнетателей рабочей смеси, турбокомпрессоров. Например, советские истребители И-15 и И-16, производившиеся во второй половине 30-х годов, серийно оснащались модификациями американского двигателя Райт "Циклон" R-1820F-3 мощностью 625 л.с. Первые отечественные моторы являлись копиями описанных образцов и имели обозначение М-25. В дальнейшем, после доработок и неоднократного форсирования удалось существенно улучшить характеристики двигателя, и в вариантах М-62 и М-63 довести его взлетную мощность до 1000 и 1100 л.с. соответственно. Для повышения КПД винта начинают применять винты изменяемого шага (ВИШ). На самолетах с поршневыми двигателями используют реактивный выхлоп, туннельные радиаторы. Однако возможности по уменьшению удельной массы поршневых двигателей были исчерпаны, дальнейшего роста скоростей за счет увеличения мощности поршневых авиадвигателей уже нельзя было получить, это привело к необходимости перехода на турбореактивные двигатели. Значение увеличивалось сначала из-за опережающего роста мощностей поршневых двигателей по отношению к снижению удельных расходов топлива, а затем стало резко возрастать с переходом на турбореактивные двигатели (ТРД).

Первые используемые на самолетах ТРД имели очень высокие значения удельного расхода топлива, поэтому даже при уменьшении полетного времени потребный запас топлива резко возрастал. С одной стороны, рост значений, и не мог не привести к снижению доли целевой нагрузки. С другой стороны, заметно возросла эффективность вооружения, и можно было уменьшить его массу на самолете.

Схемы самолетов 4-го периода — монопланы классической схемы — почти полностью вытеснили самолеты бипланных схем. компоновка первых ТРД (двигатели помещали в нижней части фюзеляжа) приводила к изменению общей компоновки самолета. Крыло располагалось над воздухозаборником (двигателем), длина стоек шасси из-за отсутствия винта сокращалась, наметилась тенденция к применению трехопорной схемы с носовым колесом вместо господствующей до этого трехопорной схемы с хвостовым колесом. Принятые перед началом Великой Отечественной войны меры по улучшению качества и увеличению численности парка самолетов привели к созданию новых конструкторских бюро под руководством А.С. Яковлева, А.И. Микояна, С.А. Лавочкина, П.О. Сухого и др. Ученые в те годы успешно решали вопросы, связанные с обеспечением прочности авиационных конструкций (разработка методов расчета свободносущего крыла с жесткой обшивкой), улучшением аэродинамических характеристик самолета, борьбой с флаттером, созданием и улучшением характеристик ТРД, позволявших повысить ЛТХ самолета.



Рис. 8. Биплан И-153

Среди самолетов этого периода: предвоенные истребители И-15, И-16 и И-153 (рис. 8); бомбардировщики ТБ-3 — первые в мире четырехмоторные свободнонесущие монопланы, определившие рациональную схему такого типа самолета, ТБ-4 и ТБ-5; самолеты АНТ-25, на которых экипажи В.П. Чкалова и М.М. Громова совершили рекордные по дальности перелеты в Северную Америку; самолеты военных лет: Як-1, Як-3, Як-7 (рис. 9) и Як-9; МиГ-1 и МиГ-3; знаменитый бронированный штурмовик Ил-2, Ил-10; Ла-5 и Ла-7; Пе-2 и Ту-2. Большинство из этих самолетов превосходило по своим качествам самолеты противника.



Рис. 9. Самолёт военных лет Як-7

В 1942 г. был впервые осуществлен полет на реактивном истребителе БИ с ЖРД. К самолетам этого периода относятся также послевоенные первые реактивные самолеты Як-15, МиГ-9, Ла-15 (рис. 10), Ил-28 и др.



Рис. 10. Реактивный самолёт Ла-15

Период 5 (1950 – 1965 гг.) характеризуется развитием скоростных самолетов с ТРД; борьбой за уменьшение аэродинамического сопротивления и обеспечение устойчивости и управляемости при полете на больших околозвуковых скоростях; переходом к крыльям малых удлинений, треугольным и стреловидным с малой относительной толщиной, к фюзеляжам с увеличенным удлинением, к цельноповоротным стабилизаторам. Уменьшение значений вызвано увеличением удельной нагрузки на крыло, выбором материалов с лучшими характеристиками удельной прочности, отсутствием излишних запасов прочности в связи с уточнением расчетов на прочность, применением треугольных крыльев, ОБПЛАдающих при прочих равных условиях, в том числе и по прочности и жесткости, меньшей массой, выбором более рациональных конструктивно-силовых схем агрегатов планера и т.д. В этом периоде идёт активное применение герметичных кабин с высоким избыточным давлением, тонких стреловидных крыльев, развитой системы механизации задней кромки крыла. Также происходит накопление опыта разработки, создания и эксплуатации ТРД, снижения их удельной массы вследствие улучшения схемы, материалов и конструкции, повышения значений параметров рабочего процесса, применения более совершенных регулируемых входных и выходных устройств, снижающих потери тяги. В этот период успешно продолжают работать созданные конструкторские бюро. Их продукция — первый реактивный пассажирский самолет Ту-104 (рис. 11), турбовинтовые пассажирские самолеты Ил-18, Ту-114 для межконтинентальных полетов, Ан-8 и Ан-10, всепогодный истребитель Як-25, бомбардировщик Ту-16, истребители МиГ-15 и МиГ-17, сверхзвуковые МиГ-19 и МиГ-21 и другие самолеты.



Рис. 11. Реактивный пассажирский самолёт Ту-104

Период 6 (с 1965-х гг. до настоящего времени) характеризуется попытками аналитического решения задач оптимального проектирования, развитием систем автоматизированного проектирования и конструирования с широким использованием электронно-вычислительной техники при разработке и создании самолетов. Это период дальнейшего повышения весовой отдачи самолетов. Достижения науки и техники позволяют использовать: интегральные формы планера с несущим фюзеляжем и меньшей площадью крыла; активные системы управления для уменьшения запасов устойчивости и уменьшения, вследствие этого, потерь на балансировочное сопротивление, повышение аэродинамического качества и уменьшение площади оперения. Эти же системы применяются для снижения болтаночных перегрузок. Использование переднего оперения (схема «утка», рис. 51) или триплана позволило снизить площадь крыла. Выполнение «правила площадей» обеспечивает самолету минимальное волновое сопротивление, более высокое качество. Выбор более рациональных значений параметров конструкции крыла и оперения, их конструктивно-силовой схемы позволяет снизить аэродинамическое значение. Использование систем управления циркуляцией может сделать практически ненужной механизацию крыла. Снизить можно и БПЛА благодаря применению адаптивного крыла для перераспределения нагрузок на него и уменьшения вследствие этого изгибающих моментов. Использование в конструкции алюминиево-литиевых сплавов, а также композиционных материалов — новых конструкционных материалов с повышенными характеристиками удельной прочности и удельной жесткости. Повышение степени двухконтурности турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД) позволяет улучшить характеристики их удельной массы и удельного расхода. Переход на винтовентиляторные двигатели дает возможность еще больше снизить удельный расход из-за более высокой экономичности этих двигателей. Использование двигателей с изменяемым рабочим процессом способствует улучшению их характеристик. Непосредственное управление подъемной и боковыми силами расширяет возможности маневренных самолетов и повышает эффективность их использования для гражданских самолетов, и приводит к повышению их топливной эффективности — работы, производимой самолетом на единицу массы затраченного топлива, являющегося одним из важнейших показателей, определяющих целесообразность (с точки зрения

эффективности и материальных затрат) принимаемых конструктивных решений при разработке самолетов гражданской авиации. Большой ущерб развитию военной авиации в начале 60-х годов нанесло неправильное определение приоритетов в развитии различных видов боевой техники. Однако вскоре после исправления допущенных ошибок наступил период, с которым связаны наибольшие достижения в развитии в стране почти всех видов военной и гражданской авиации, — появление и совершенствование самолетов сверхзвуковой всепогодной истребительной, истребительно-бомбардировочной и бомбардировочной авиации (самолеты МиГ-21, Су-7, МиГ-23 и их многочисленные модификации, МиГ-25, МиГ-27, Су-15, Су-17, Ту-22 и Ту-160; самолеты МиГ-29 и МиГ-31, самолет Су-27 (рис. 12) и его модификации, по своим маневренным и функциональным возможностям во многом превосходящие зарубежные аналоги F-15 и F-16).



Рис. 12. Истребитель Су-27

К этому периоду относится создание палубных самолетов вертикального взлета и посадки (СВВП) Як-36, Як-38 и др., а также самолетов военно-транспортной авиации Ил-76, Ан-124 и самого большого самолета в мире Ан-225 «Мрия» (рис. 13). Эти самолеты по своим транспортным характеристикам превосходят зарубежные аналоги.



Рис. 13. Самый большой самолёт в мире Ан-225 «Мрия»

Среди пассажирских самолетов — хорошо зарекомендовавшие себя самолеты Ту-154, Ту-134, Як-42, Ил-86 и пришедшие им на смену самолеты Ту-204, Ил-96 (рис. 14) и модификации Як-42.

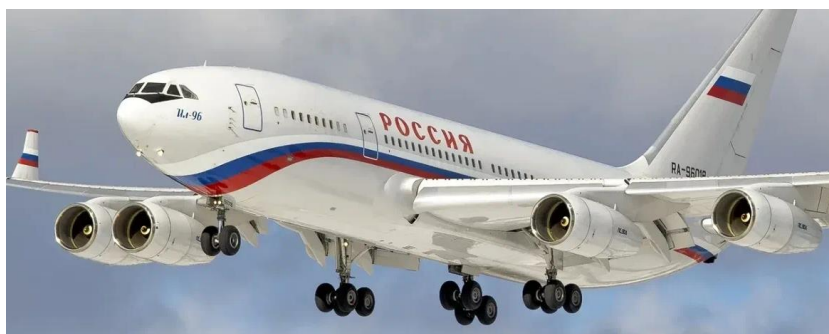


Рис. 14. Самолёт Ил-96

Оставил свой след в истории и сверхзвуковой пассажирский самолет Ту-144 (рис. 15).



Рис. 15. Сверхзвуковой пассажирский самолет Ту-144

Достигнутый в стране высокий научно-технический уровень был использован также и при создании высоко конкурентоспособных спортивных самолетов (Як-50, Як-52 (рис. 16), Як-55, Су-26 и др.).



Рис. 16. Спортивный самолёт Як-52

19 мая 2008 г. совершил свой первый полет ближнемагистральный пассажирский самолет Суперджет-100 (рис. 17). В конструкции реализованы достигнутые к этому времени новации науки и техники.



Рис. 17. Ближнемагистральный пассажирский самолёт Суперджет-100

28 мая 2017 г. совершил свой первый полет среднемагистральный пассажирский российский самолет МС-21 (рис. 18) корпорации «Иркут», особенностью конструкции которого является использование до 40% изделий из композитных материалов и новейших достижений науки и техники последних лет. Дальнейшие перспективы — в исследованиях и использовании композитных материалов в самолетостроении и возможный выход МС-21 в лидеры мирового уровня пассажирской авиации.



Рис. 18. Среднемагистральный пассажирский самолёт MS-21

Работы студенческих конструкторских бюро авиационных институтов внесли определенный вклад в развитие отечественного самолетостроения. Так, в начале 1930-х гг. в Харьковском авиационном институте был построен пассажирский семиместный самолет ХАИ-1. В октябре 1932 г. состоялся первый полет этого самолета, созданного студентами ХАИ под руководством профессора, главного конструктора самолета И.Г. Немана. Это был первый в СССР самолет с убирающимся шасси — один из немногих в мире в начале 1930-х гг. Самолет имел максимальную скорость 324 км/ч, которая превышала скорость многих военных самолетов тех лет. Самолет строился серийно и эксплуатировался на линиях гражданского воздушного флота до 1940 г.

В конструкторском бюро спортивной авиации Казанского авиационного института в 1960-х гг. были построены планеры КАИ-11 и КАИ-12, которые выпускались серийно и несколько десятилетий эксплуатировались в аэроклубах ДОСААФ. Рекордные планеры КАИ-14 и КАИ-19 имели отличные ЛТХ и превосходили зарубежные аналоги данного класса, они выпускались малой серией. Руководил КБ спортивной авиации М.П. Симонов. Учебно-тренировочный самолет «Лидер» с отличными летно-техническими характеристиками был построен в 1985 г. под руководством главного конструктора П. Альмурзина в студенческом КБ Куйбышевского авиационного института. Там же был построен ряд сверхлегких самолетов, отвечающих современным требованиям к летательным аппаратам этого класса и выполненных на уровне лучших зарубежных образцов.

В 1977 г. совершил первый вылет спроектированный и построенный в студенческом КБ Московского авиационного института экспериментальный спортивно-пилотажный самолет «Квант». На самолете была применена система непосредственного управления подъемной силой крыла, расширившая маневренные характеристики самолета (научный руководитель темы С.М. Егер, главный конструктор самолета К.М. Жидовецкий, работа выполнена студентами-дипломниками и выпускниками МАИ). Самолет «Квант» (рис. 19) установил пять мировых рекордов. В студенческом КБ МАИ под руководством К.М. Жидовецкого были построены экспериментальные

дистанционно пилотируемые ЛА «Эльф-Д» и «Эльф», ультралегкий самолет «Юниор», конструкция которого позволяла использовать материалы и технологии обычного самолетостроения. Здесь же был создан одноместный самолет МАИ-89, который в структуре АО «Авиатика» БПЛА благодаря своим высоким технологическим, пилотажным и эксплуатационным характеристикам стал выпускаться крупной серией и имел большой спрос за пределами страны. Широкое распространение получают и многочисленные модификации самолета МАИ-89. Конечно, это далеко не полный перечень достижений студенческих КБ авиационных вузов.



Рис. 19. Самолёт «Квант»

4. Аэродинамика летательных аппаратов, динамика полета моторных аппаратов

Аэродинамика – это наука, изучающая движения потоков воздуха и их воздействия на твердые тела. Является подразделом гидро- и газодинамики. Исследования в этой ОБПЛАсти восходят к глубокой древности, ко времени изобретения стрел и планирующих копий, позволявших дальше и точнее посылать снаряд в цель. Однако потенциал аэродинамики полностью был раскрыт с изобретением аппаратов тяжелее воздуха, способных летать либо планировать на значительные расстояния.

Открытие законов аэродинамики в 20 веке способствовало фантастическому скачку во многих ОБПЛАстях науки и техники, особенно в транспортной сфере. На ее достижениях созданы современные летательные аппараты, позволившие сделать общедоступным фактически любой уголок планеты Земля.

Основатель гидродинамики Даниил Бернулли описал в 1738 году фундаментальную взаимосвязь между давлением, плотностью и скоростью для несжимаемого потока, известную сегодня как принцип Бернулли, который также применителен к расчетам силы аэродинамического подъема. В 1799 году сэр Джордж Кейли стал первым человеком, который идентифицировал четыре аэродинамических

силы полета (вес, подъемную силу, сопротивление и тягу), а также отношения между ними.

В 1871 году Фрэнсис Герберт Уэнам создал первую аэродинамическую трубу, позволяющую точно измерять аэродинамические силы. Неоценимые научные теории разработаны Жаном Ле Рондом Даламбером, Густавом Кирхгофом, лордом Рэлеем. В 1889 году Чарльз Ренард, французский инженер по авиации, стал первым человеком, который научно рассчитал мощность, необходимую для устойчивого полета.

В 19 веке изобретатели взглянули на крыло с научной точки зрения, и БПЛА благодаря исследованиям механизма полета птиц была изучена аэродинамика в действии, которую позже применили к разрабатываемым летательным аппаратам.

Особо в исследованиях механики крыла преуспел Отто Лилиенталь. Немецким авиаконструктором создано и испытано 11 типов планеров, в том числе биплан. Им же совершен первый полет на аппарате тяжелее воздуха. За относительно недолгую жизнь (46 лет) он совершил порядка 2000 полетов, постоянно совершенствуя конструкцию, которая скорее напоминала дельтаплан, чем самолет. Он погиб во время очередного полета 10 августа 1896 года, став и первопроходцем авиации, и первой жертвой авиакатастрофы. Кстати, один из планеров немецкий изобретатель лично передал пионеру в изучении аэродинамики самолетов Николаю Егоровичу Жуковскому.

Н.Е. Жуковский не просто экспериментировал с конструкциями самолётов, в отличие от многих энтузиастов того времени, прежде всего он рассматривал поведение воздушных потоков с научной точки зрения. В 1904 году он основал первый в мире аэродинамический институт в Качино под Москвой. С 1918 года до самой смерти 17 марта 1921 года возглавлял ЦАГИ (Центральный аэрогидродинамический институт).

БПЛА благодаря аэродинамике человек смог покорить небо. Без ее изучения было бы невозможно строить летательные аппараты, стабильно перемещающиеся в воздушных потоках. Первый самолет, в привычном нам понимании, изготовили и подняли в воздух 7 декабря 1903 года братья Райт, Уилбер и Орвилл (рис. 20). Однако этому событию предшествовала тщательная теоретическая работа. Американцы много времени посвятили отладке конструкции планера в аэродинамической трубе собственной разработки.



Рис. 20. Самолёт братьев Райт

4.1. Основные понятия

Аэродинамика БПЛА (прикладная аэродинамика) – раздел прикладной механики, служащий научным фундаментом для аэродинамического проектирования БПЛА. Аэродинамика БПЛА опирается на законы теоретической аэродинамики – механики сплошных сред, описывающих течение жидкостей и газов (преимущественно воздуха), а также механическое и тепловое взаимодействие между жидкостью или газом и движущимися в них телами.

Чтобы рассчитать самолет на прочность, исследовать его устойчивость, определить летные свойства, необходимо знать аэродинамические силы и моменты, которые возникают при полете самолета. Только с появлением аэродинамики стало возможным рациональное конструирование самолетов.

В зависимости от метода изучения аэродинамику делят на теоретическую и экспериментальную. В теоретической аэродинамике для изучения явлений используют средства математики. Сложные явления схематизируются и упрощаются. Экспериментальная аэродинамика изучает те же явления на основе наблюдений, натуральных экспериментов или моделирования явлений в аэродинамических лабораториях. Оба направления обогащают и дополняют друг друга, и служат основой для расчета самолета.

Итальянскому ученому и художнику Леонардо да Винчи принадлежат первые труды о сопротивлении жидкости. Он же впервые задумался о создании подъемной силы, уравнивающей вес птицы. Возможность полета летательного аппарата тяжелее воздуха отверг Исаак Ньютон, который при определении подъемной силы применил корпускулярную «ударную» теорию сопротивления среды, справедливую только при движении тел в сильно разреженной атмосфере. Впервые доказал возможность полета машины тяжелее воздуха М.В. Ломоносов. Он проводил опыты по

конструированию первого в мире вертолета (геликоптера), предназначенного для научных целей.

Основоположниками аэродинамики считают членов Российской академии наук Леонарда Эйлера и Даниила Бернулли. В своем труде «Общие принципы движения жидкостей» Л. Эйлер вывел основные дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости. Д. Бернулли вывел одно из важнейших уравнений гидроаэродинамики, дающее простое объяснение образования подъемной силы. Большую работу над проблемами аэродинамики проделал Д.И. Менделеев. По его инициативе в 1880 году в Русском техническом обществе был создан специальный воздухоплавательный отдел. До конца XIX века аэродинамика развивалась крайне медленно, т.к. не находила практического применения.

С развитием авиации возникла проблема подъемной силы. Ее решил Н.Е. Жуковский, которого В.И. Ленин назвал «отцом русской авиации». Он сумел раскрыть природу образования подъемной силы и создать метод ее определения. В дальнейшем решение этой задачи было продолжено его учеником, впоследствии академиком, С.А. Чаплыгиным. Николай Егорович Жуковский — талантливый ученый, пропагандист авиационной науки, замечательный учитель и наставник молодежи. Он создал вихревую теорию крыла и винта, работой «О парении птиц» заложил основы динамики полета, занимался проблемами устойчивости и управляемости самолета, развивал основы экспериментальной аэродинамики. В 1904 г. под руководством Н.Е. Жуковского в Кучино был создан первый в России Аэродинамический исследовательский институт. В последующие годы в ряде стран были организованы государственные исследовательские институты. В 1918 г. по инициативе Н.Е. Жуковского создается Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ). С.А. Чаплыгин опубликовал большое количество работ по теоретической аэродинамике. Задолго до появления скоростных реактивных самолетов С.А. Чаплыгин исследовал движение воздуха при больших дозвуковых и сверхзвуковых скоростях и заложил основы новой науки — газовой динамики. Б.Н. Юрьев еще в 1922 году опубликовал работы о методах определения скаса потока за крылом и расчета продольной статической устойчивости самолета. Еще в 1912 году Юрьев построил первый в мире геликоптер. За труды по теории воздушного винта (1943 г) и по теории и конструированию вертолетов (1946 г) удостоен Государственной премии СССР.

С именем Константина Эдуардовича Циолковского связана история развития ракетной техники. Он обосновал возможность использования ракет для межпланетных сообщений, вывел законы их движения, предложил идею многоступенчатых ракет. Интересы Циолковского очень разнообразны. Он занимался теорией и конструированием дирижаблей, проводил расчёты параметром самолета — моноплана, построил первую в России аэродинамическую трубу. Большой вклад в развитие аэродинамики был сделан зарубежными исследователями Отто Лилиенталем, Людвигом Прандтлем, Осборном Рейнольдсом и др. История развития аэродинамики насчитывает чуть более ста лет, но за эти годы наука накопила так много знаний, что

современная аэродинамика подразделяется на несколько самостоятельных частей в зависимости от теоретической схемы воздуха:

1. *Гидроаэродинамика* – это наука, изучающая законы движения газов на небольших дозвуковых скоростях, на которых воздух ведет себя как жидкость.
2. *Газовая динамика* — это наука, изучающая законы движения воздуха на околозвуковых скоростях, на которых проявляется сжимаемость воздуха.
3. *Супераэродинамика* – это наука, изучающая движение воздуха на больших высотах, где воздух очень разрежен.
4. *Гипераэродинамика* – это наука, изучающая движение воздуха на скоростях, превышающих в 5 и более раз скорость звука.
5. *Магнитоаэродинамика* – это наука, изучающая движение воздуха на очень больших гиперзвуковых скоростях, на которых происходит ионизация и диссоциация молекул воздуха и воздух становится плазмой.

4.2. Строение атмосферы

Полеты летательных аппаратов гражданской авиации происходят в атмосфере Земли, поэтому при их создании и эксплуатации необходимо учитывать строение и параметры атмосферы (давление, плотность, температуру).

Атмосфера – это газообразная оболочка, окружающая Землю и вращающаяся вместе с ней. Исследование состояния атмосферы представляет большой интерес для авиации, т.к. от состояния атмосферы зависят летно-технические характеристики самолетов. До высоты 100 км состав атмосферы не меняется, так как разделению газов препятствует непрерывное турбулентное движение воздуха. Этот слой называется гомосферой (однородный). Непостоянным является только содержание углекислого газа, водяного пара и пыли. Содержание углекислого газа в нижних слоях атмосферы постоянно увеличивается за счет сжигания топлива и жизнедеятельности фауны. Пыль поступает в атмосферу и с поверхности земли (заводы, степи, пустыни, вулканы) и из космоса. Космическая пыль образуется главным образом при сгорании метеоров. Ежедневно на Земле выпадает 1000 т космической пыли. Выше 100 км расположена гетеросфера (неоднородный слой). Здесь под действием ультрафиолетовой радиации Солнца молекулы газа расщепляются на атомы. Состав воздуха по высоте значительно изменяется. Давление и плотность воздуха с высотой быстро уменьшаются.

Атмосфера имеет слоистое строение (рис. 21). По решению Международного геодезического и географического союза, принятого в 1951 году, атмосфера по характеру изменения температуры с высотой и другим физическим свойствам подразделяется на 5 слоев:

1. Тропосфера;

Тропосфера (от греч. tropos – поворот, изменение) – слой атмосферы, непосредственно прилегающий к Земле. Ее высота колеблется в пределах от 7 км над полюсами до 16–18 км над экватором. Средняя высота этого слоя составляет 11 км. В тропосфере сосредоточено около 80% всей массы воздуха

атмосферы. В этом слое температура понижается на 6.5°C на каждые 1000 м. Её называют "фабрикой погоды", т.к. только в этом слое наблюдаются метеорологические явления. Серьезную опасность для полетов самолета представляют такие атмосферные явления, как обПЛАчность, осадки, грозы, обледенение, порывистые ветры, пыльные бури. Они могут вызвать «болтанку», опасные вибрации самолета, нарушить его устойчивость и управляемость.

2. Стратосфера;

Стратосфера (от лат. *stratum* — слой) простирается до высоты 50–55 км. В стратосфере сосредоточено около 20% массы воздуха атмосферы. До $H = 20\text{--}25$ км температура остаётся постоянной – $t = -56.5^{\circ}\text{C}$, а затем повышается на $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ на каждый км. Повышение температуры объясняется активным образованием озона под влиянием ультрафиолетовой радиации Солнца. В стратосфере нет обПЛАчности, осадков и отсутствует опасность обледенения. Струйные течения шириной в сотни километров, имеющие скорость 150–500 км/ч, наблюдаются только в нижних слоях. В верхних слоях иногда образуются перламутровые обПЛАка.

3. Мезосфера;

Мезосфера (от греч. *Mesos* – средний, промежуточный) расположена над стратосферой и простирается до высоты 80 км. Температура в этом слое уменьшается в среднем на 3°C через каждый километр. На верхней границе она становится равной -75°C . В мезосфере наблюдаются красивые серебристые обПЛАка, состоящие из ледяных кристаллов.

4. Термосфера;

Термосфера (от греч. *terme* – теплота, жар) – слой атмосферы от 80 до 800 км. Температура здесь повышается с высотой примерно на 10°C на каждый километр: на высоте 200 км $t > 500^{\circ}\text{C}$. Но так как плотность воздуха на этих высотах очень мала, то высокие температуры не вызывают нагревания находящегося там тела. Излучение Солнца вызывает ионизацию и диссоциацию молекул воздуха в верхнем слое термосферы, поэтому этот слой называют ионосферой. В ионосфере происходят полярные сияния.

5. Экзосфера.

Экзосфера (от греч. *exo* – вне, наружу) – сфера рассеивания, переходящая в межпланетное пространство. Она мало изучена, верхняя ее граница точно не установлена. Условно за верхнюю границу приняты высоты 2000–3000 км, где плотность воздуха в $16 \cdot 10^{17}$ раз меньше, чем у Земли. Температура здесь возрастает до 20000°C .

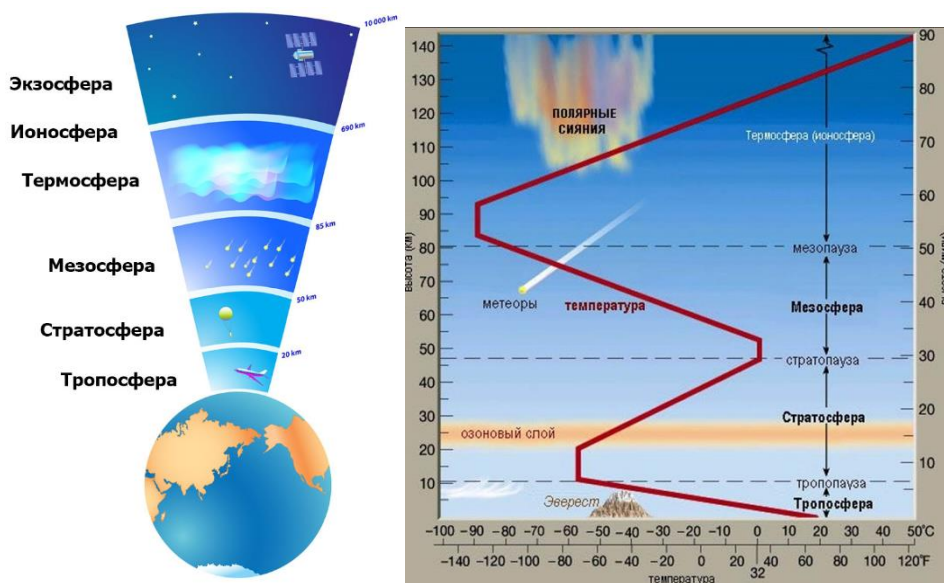


Рис. 21. Строение атмосферы и график изменения температуры от высоты

Атмосфера плавно переходит в космическое пространство. Между слоями в атмосфере существуют переходные слои в 2–3 км, называемые паузами (тропопауза, стратопауза и так далее). Наибольший интерес для авиации представляют *тропосфера* и *стратосфера*.

4.3. Положение ЛА в воздухе и системы координат

Положение летательного аппарата в потоке воздуха определяется двумя углами: α – угол атаки, β – угол скольжения (рис. 23).

Углом атаки α называется угол между продольной осью самолёта и проекцией вектора скорости потока на плоскость симметрии летательного аппарата.

Углом скольжения β называется угол между направлением потока и плоскостью симметрии летательного аппарата.

Положение летательного аппарата в пространстве характеризуется углами тангажа, крена, рысканья (рис. 22).



Рис. 22. Тангаж, крен, рысканье.

Углом тангажа ϑ называется угол между продольной осью летательного аппарата и горизонтом.

Углом крена γ называется угол между вертикальной плоскостью, проходящей через продольную ось летательного аппарата, и нормальной плоскостью.

Углом рысканья ψ называется угол между проекцией траектории и проекцией продольной оси летательного аппарата на горизонтальную плоскость.

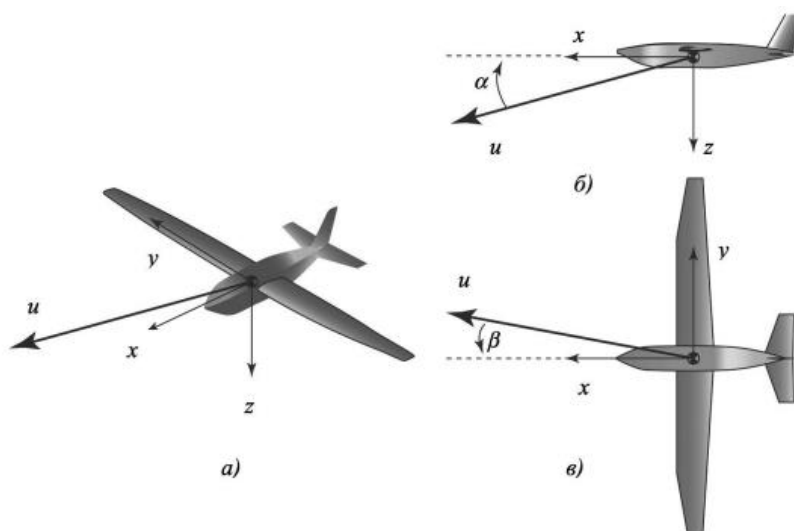


Рис. 23. Международная система координат ЛА (а), где u – скорость, α – угол атаки (б), β – угол скольжения (в)

Международная система координат (рис. 23): x – координата, направленная вдоль хорды, крыла, y – координата, направленная вдоль размаха, крыла, z – координата, перпендикулярная поверхности крыла.

В СССР и России принято вдоль крыла располагать ось z , а перпендикулярно его поверхности ось y . Соответственно, отличаются и обозначения сил и моментов, действующих на БПЛА. Международные обозначения: L – подъемная сила (lift), D – сила сопротивления (drag). Отечественные обозначения: F_y или Y – подъемная сила, F_x или X – сила сопротивления движению.

Системы координат

При аэродинамических расчетах и изучении динамики полета самолетов используются различные системы координат. Чаще всего используются связанная, скоростная, нормальная и траекторная системы координат.

Связанная система координат $0XYZ$ жестко связана с самолётом (отсюда ее название). Начало этой системы совпадает с центром масс самолёта (рис. 24).

Ось OX лежит в базовой плоскости самолета, она направлена в сторону носовой части. Эта ось называется продольной осью. Ось OY тоже лежит в базовой плоскости самолета, при этом она перпендикулярна оси OX и направлена к верхней части самолета. Она называется нормальной осью. Ось OZ перпендикулярна базовой плоскости самолета и направлена в сторону правого полукрыла. Эта ось называется поперечной осью.

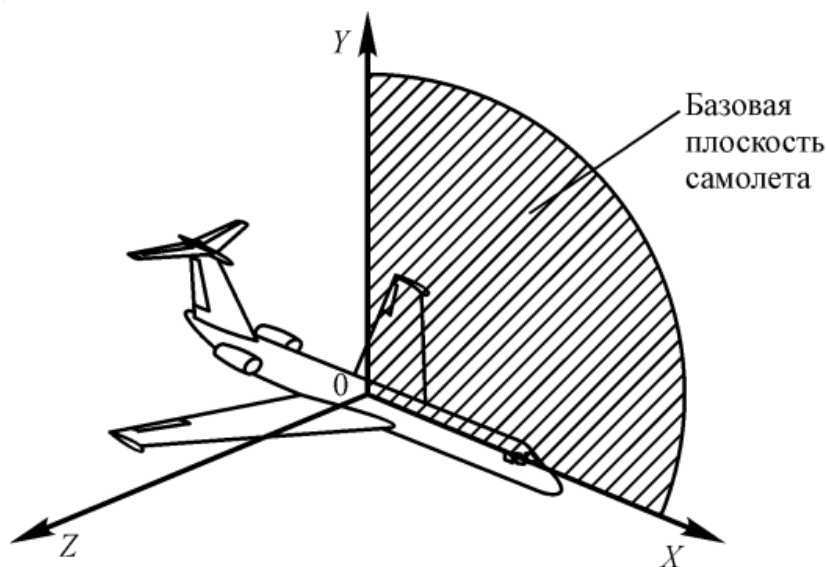


Рис. 24. Связанная система координат

Скоростная система координат $Ox_a y_a z_a$ связана с вектором скорости движения центра масс самолета относительно воздушной среды \vec{V} (рис. 25), ее начало также помещают в центре масс самолета. Ось Ox_a в скоростной системе координат всегда совпадает с вектором скорости и называется скоростной осью. Ось Oy_a перпендикулярна вектору скорости, лежит в базовой плоскости самолета и направлена к верхней части самолета. Она называется осью подъемной силы. Ось Oz_a проводят так, чтобы она дополняла оси Ox_a и Oy_a до правой системы координат. Эта ось называется боковой осью.

Для описания взаимного положения осей связанной и скоростной систем координат используются угол атаки и угол скольжения. Углом атаки α называется угол между осью Ox связанной системы координат и проекцией вектора скорости \vec{V} на базовую плоскость самолета – \vec{V}_{xOy} . Углом скольжения β называется угол между вектором скорости \vec{V} и базовой плоскостью самолета. Легко заметить, что если скольжение отсутствует ($\beta = 0$), то определение угла атаки упрощается: угол α будет равен углу между продольной осью вектора Ox и вектором скорости \vec{V} .

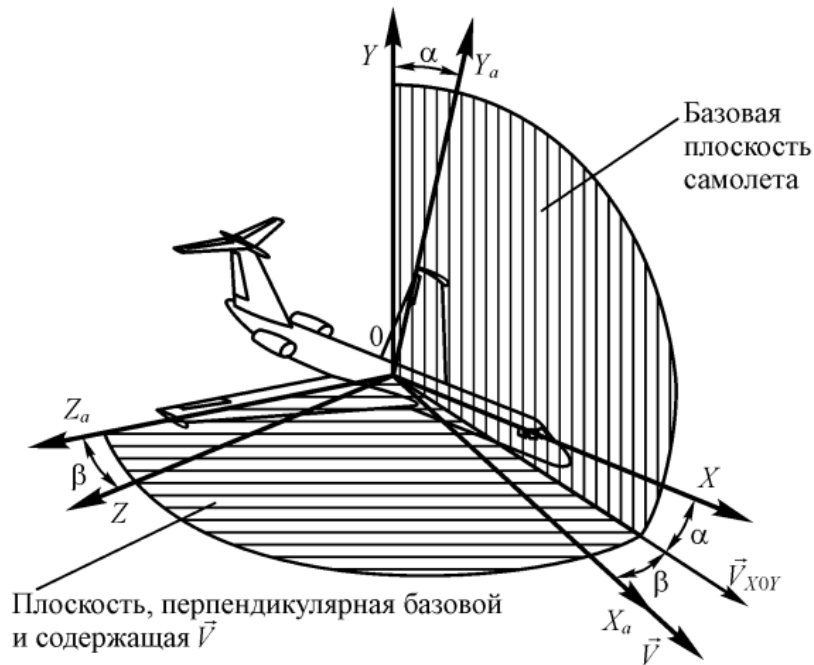


Рис. 25. Скоростная система координат

Нормальная система координат $0X_gY_gZ_g$ используется для описания пространственного положения самолета относительно поверхности Земли. Начало координат этой системы совпадает с центром масс самолета, т. е. с началом связанной системы координат (рис. 26). Ось $0Y_g$ всегда направлена вверх по местной вертикали, а направление осей $0X_g$ и $0Z_g$ выбирается в соответствии с решаемой задачей, при этом плоскость X_g0Z_g всегда расположена горизонтально. Угол между осью $0X_g$ и проекцией оси $0X$ на горизонтальную плоскость $X_{X_g}0Z_g$ называется углом рыскания и обозначается ψ . Угол между продольной осью $0X$ и горизонтальной плоскостью X_g0Z_g называется углом тангажа и обозначается ϑ . Угол между поперечной осью $0Z$ и горизонтальной плоскостью X_g0Z_g называется углом крена и обозначается γ .

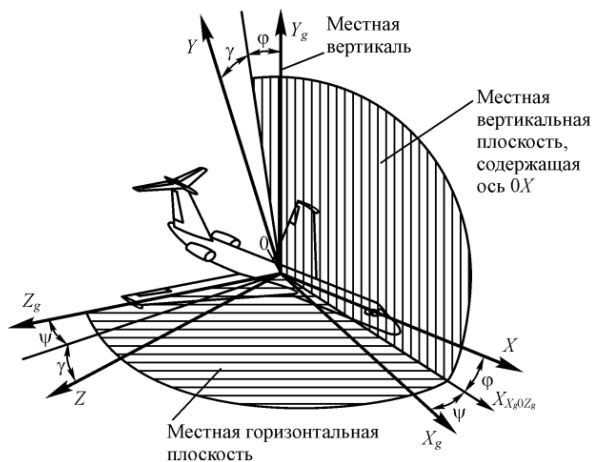


Рис. 26. Нормальная система координат

Траекторная система координат $0X_k Y_k Z_k$ используется главным образом в динамике полета для описания движения самолета относительно поверхности Земли. В общем случае скорость полета относительно воздушной среды может не совпадать со скоростью полета относительно Земли, т.к. в реальной атмосфере почти всегда имеется движение воздушных масс, то есть движение ветра. Ветер оказывает воздействие на самолёт, поэтому суммарная скорость его движения относительно поверхности Земли V_k (земная скорость) будет равна:

$$\vec{V}_k = \vec{V} + \vec{W},$$

где: \vec{V} – скорость самолёта относительно воздушной среды;

\vec{W} – скорость ветра относительно Земли.

Траекторная система координат связана с вектором земной скорости \vec{V}_k . Начало координат этой системы совпадает с началом связанной системы координат (см. рис. 27). Ось $0X_k$ совпадает с направлением вектора земной скорости \vec{V}_k . Ось $0Y_k$ размещается в вертикальной плоскости, проходящей через ось $0X_k$ и направлена вверх от Земли. Ось $0Z_k$ образует правую систему координат. Траекторная система координат может быть получена из нормальной путём поворота последней на угол пути ξ и угол наклона траектории θ .

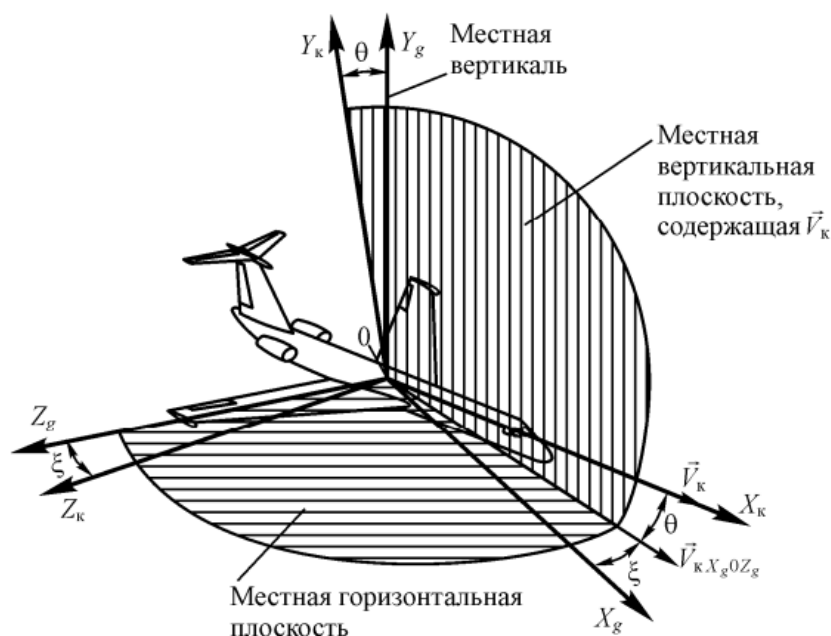


Рис. 27. Траекторная система координат

Угол пути ξ – угол между проекцией вектора \vec{V}_k на горизонтальную плоскость $X_g 0Z_g$ и осью $0X_g$.

Угол наклона траектории θ – это угол между вектором земной скорости \vec{V}_k и местной горизонтальной плоскостью $X_g O Z_g$.

4.4. Узлы летательного аппарата

Узлы летательного аппарата – это перечень необходимых элементов, входящих в состав работы и эксплуатации самолета. В основную базу агрегатов самолета относятся крыло, фюзеляж, горизонтальное и вертикальное оперения, шасси, а также органы управления (рис. 28). В реализацию летательного аппарата самолётного типа входят фюзеляж, а также двигательные установки с органами управления.

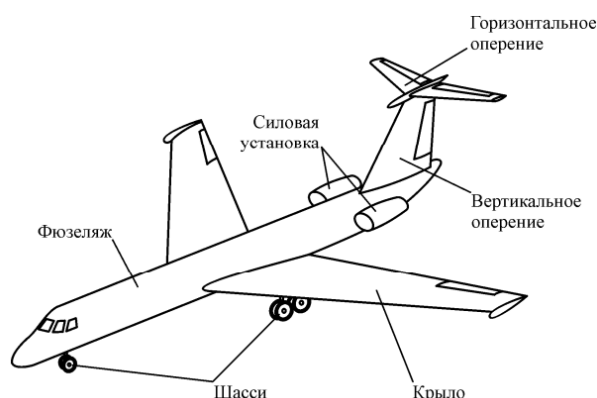


Рис. 28. Общий вид пилотируемого летательного аппарата самолётного типа

Фюзеляж – корпус летательного аппарата, служащий для размещения кабины экипажа, пассажиров, грузов и оборудования, а также двигателей и топливных баков; связывает между собой крыло, оперение, иногда шасси и силовую установку.

Крыло – несущая поверхность, имеющая в сечении по направлению потока профилированную форму и предназначенная для создания аэродинамической подъемной силы. Крыло самолета может иметь различную форму в плане, а по размаху – различную форму сечений в плоскостях, параллельных плоскости симметрии самолета, а также различные углы крутки сечений в указанных плоскостях.

Горизонтальное оперение обеспечивает продольную устойчивость, управляемость и балансировку. Горизонтальное оперение состоит из неподвижной поверхности (также существует цельноповоротное горизонтальное оперение – ЦПГО) – стабилизатора и шарнирно подвешенного к нему руля высоты. У самолётов, разработанных по «нормальной» схеме, горизонтальное оперение устанавливается в хвостовой части — на фюзеляже или на вершине киля (Т-образная схема).

В схеме «утка» (рис. 51) оперение располагается в носовой части самолета перед крылом. Возможна комбинированная схема, когда у самолета с хвостовым оперением ставится дополнительное переднее оперение – схема с ПГО (переднее горизонтальное оперение), позволяющая использовать преимущества обеих указанных схем. Схемы «бесхвостка», «летающее крыло» горизонтального оперения не имеют. Неподвижный

стабилизатор обычно имеет фиксированный угол установки относительно продольной оси самолета. Иногда предусматривается регулировка этого угла на земле. Такой стабилизатор называется переставным. На тяжёлых самолётах для повышения эффективности продольного управления угол установки стабилизатора с помощью дополнительного привода может изменяться в полете, обычно на взлёте и посадке, а также для балансировки самолета на заданном режиме полета. Такой стабилизатор называется подвижным. На сверхзвуковых скоростях полёта эффективность руля высоты резко падает. Поэтому у сверхзвуковых самолётов вместо классической схемы ГО с рулем высоты применяется управляемый стабилизатор (ЦПГО), угол установки которого регулируется летчиком с помощью командного рычага продольного управления или бортовым компьютером самолёта. Руль высоты в этом случае отсутствует.

Вертикальное оперение (ВО) обеспечивает самолету путевую устойчивость, управляемость и балансировку относительно вертикальной оси. Оно состоит из неподвижной поверхности – киля и шарнирно подвешенного к нему руля направления. Цельноповоротное ВО применяется весьма редко (например, на Ту-160). Эффективность ВО можно повысить путем установки форкиля – переднего наплыва в корневой части киля, или дополнительным подфюзеляжным гребнем. Другой способ — применение нескольких (обычно не более двух одинаковых) килей. Непропорционально большой киль, или два киля – часто признак сверхзвукового самолета, для обеспечения путевой устойчивости на больших скоростях.

Авиационная силовая установка – энергетический компонент воздушного или воздушно-космического летательного аппарата, предназначенный для реализации располагаемой силы тяги и обеспечения надежной работы двигателей на всех режимах полета. АСУ объединяет собой:

- все установленные на данном ЛА авиационные двигатели (маршевые, подъёмные, комбинированные, вспомогательные);
- системы крепления двигателей к конструкции ЛА;
- системы и устройства реализации силы тяги и регулирования её величины;
- системы обеспечения безотказной и безаварийной работы двигателей на всех режимах полета.

Шасси летательного аппарата – система опор летательного аппарата, обеспечивающая его стоянку, передвижение по аэродрому или воде при взлёте, посадке и рулении. Различают три вида шасси по расположению. С хвостовым колесом (двухстоечное шасси). Главные опоры или опора расположены впереди центра тяжести самолёта, а вспомогательная (хвостовая) – позади (Douglas DC-3, Ан-2). В качестве хвостовой опоры ранее часто применяли «костыль» — конструкцию без колеса, работающую на скольжение по грунту (аэродромы были грунтовые). Позже в конструкцию костыля ввели маленькое цельнометаллическое колёсико (для эксплуатации на аэродромах с твердым покрытием), затем стали использоваться хвостовые опоры с небольшим пневматическим колесом — «дутиком». С передним колесом (трёхстоечное шасси). Переднее (носовое) колесо расположено впереди центра

тяжести, а главные опоры позади центра тяжести. На стойку в носовой части фюзеляжа обычно приходится 10–15 % массы. Получили распространение в период Второй мировой войны и в послевоенные годы, например, Boeing 747, Ту-154. Иногда на некоторых ЛА (Ил-62, Ту-114) дополняется выдвижной дополнительной стойкой в хвосте для предотвращения опрокидывания ЛА на хвост на аэродроме при неправильном перемещении пассажиров по салону (смещении центровки). Многие тяжёлые ЛА с трёхстоечным шасси в хвостовой части фюзеляжа имеют убираемую в полёте конструкцию для предотвращения касания фюзеляжем покрытия ВПП при взлёте и посадке, так называемая предохранительная хвостовая пята (например, Ту-144).
 Велосипедный тип: две главные опоры расположены в фюзеляже, впереди и позади центра тяжести аппарата. Две боковые поддерживающие опоры крепятся по бокам (обычно на законцовках крыла). Применяется для удаления гондол для шасси и двигателей на крыле, то есть создания «аэродинамически чистого» крыла (например, М-4 и Мясищев ЗМ, Boeing B-47 Stratojet, Boeing B-52 Stratofortress, Lockheed U-2, Як-25, -27, -28). Следствием такого расположения является усложненная техника посадки самолёта и затруднение модернизации бомбоотсеков, а также использования внешней подвески вооружения.

К органам управления ЛА относят *рули, элероны, предкрылки, закрылки и т.д.* (см. рис. 29).

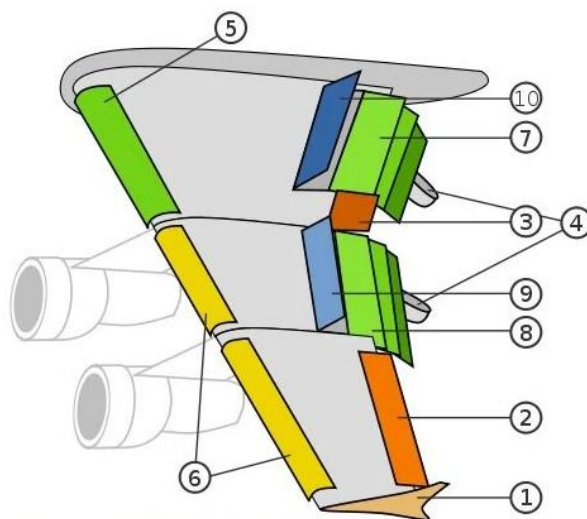


Рис. 29. Механизация крыла

Рассмотрим подробнее элементы, из которых состоит механизация крыла.

1. *Законцовка (винглет)* – небольшой дополнительный элемент на концах крыльев самолёта в виде крылышек или плоских шайб. Служат для увеличения эффективного размаха крыла, снижая индуктивное сопротивление и, как следствие, увеличивая подъёмную силу.
2. *Элерон* – аэродинамический орган управления, симметрично расположенные на задней кромке консолей крыла у самолётов нормальной схемы и самолётов схемы «утка» (рис. 51). Предназначены для управления углом крена.
3. *Высокоскоростной элерон*.
4. *Балки закрылок*.

Закрылки – это отклоняемые поверхности, симметрично расположенные на задней кромке, крыла. Используются для улучшения несущей способности крыла во время взлёта, набора высоты, снижения и посадки, а также при полёте на малых скоростях.

5. *Предкрылок Крюгера* – элемент механизации передней части крыла самолёта. Увеличивает подъёмную силу крыла на больших углах атаки.
6. *Предкрылки* – отклоняемые поверхности, установленные на передней кромке, крыла. Основная роль предкрылков заключается в увеличении допустимого угла атаки, то есть срыв потока с верхней поверхности крыла происходит при большем угле атаки.
7. Внутренние трёхщелевые закрылки.
8. Внешние трёхщелевые закрылки.
9. *Интерцепторы (спойлеры)* – отклоняемые или выпускаемые в поток тормозные консоли на верхней поверхности крыла, которые увеличивают аэродинамическое сопротивление и уменьшают подъёмную силу.
10. *Элерон-интерцепторы* – дополнение к элеронам. Используются в основном для управления по крену.

Основная нагрузка рулей – воздушная аэродинамическая, возникающая при балансировке, маневрировании самолета или при полете в неспокойном воздухе.

Восприятие крутящего момента руля обеспечивается замкнутым контуром обшивки, который в местах выреза под кронштейны крепления замыкается стенкой лонжерона. Максимальный крутящий момент действует в сечении кабанчика управления, к которому подходит тяга управления. Местом расположения кабанчика (тяги управления) по размаху руля можно существенно влиять на деформации руля при кручении.

К *фюзеляжу БПЛА* относят верхнюю и нижнюю деки, лучи, а также системы крепления моторов и управления их положением.

Верхняя и нижняя деки (см. рис. 77) – корпусные детали воспринимающие вертикальные и горизонтальные нагрузки, а также крутящие моменты от работы двигателей. Являются связующими элементами конструкции для размещения силовой части мультикоптера, моторной группы, а также системы управления и датчиков. Встречаются в основном в виде плоских изделий, вырезанных из цельного листа карбона или стекловолокна, однако существуют и варианты сложных форм, применяющихся в специальных изделиях.

Луч – часть фюзеляжа, являющиеся основным местом крепления винтомоторной группы, а также узлов поворотных механизмов, необходимых для реализации изменения угла атаки в бикоптерах (рис. 52), трикоптерах (рис. 53), а также конвертопланах. Чаще всего производится из цельного листа карбона, что дает выигрыш в толщине рамы, весе и прочности, по сравнению с изготовлением изделия из пластиковых элементов. В промышленных беспилотных летательных аппаратах используются карбоновые трубки,

которые также защищают от попадания влаги силовые провода и регуляторы оборотов БПЛА.

4.5. Геометрические характеристики крыла

С геометрической точки зрения крыло характеризуется:

1. Формой профиля;
2. Формой крыла в плане;
3. Видом крыла спереди.

Профиль крыла

Профиль – это сечение крыла плоскостью, перпендикулярной линии хорд. Профили бывают:

1. Дозвуковые: плоско-выпуклые, S-образные, симметричные и несимметричные дзвуквыпуклые;
2. Сверхзвуковые: клиновидные, чечевицеобразные, ромбовидные.

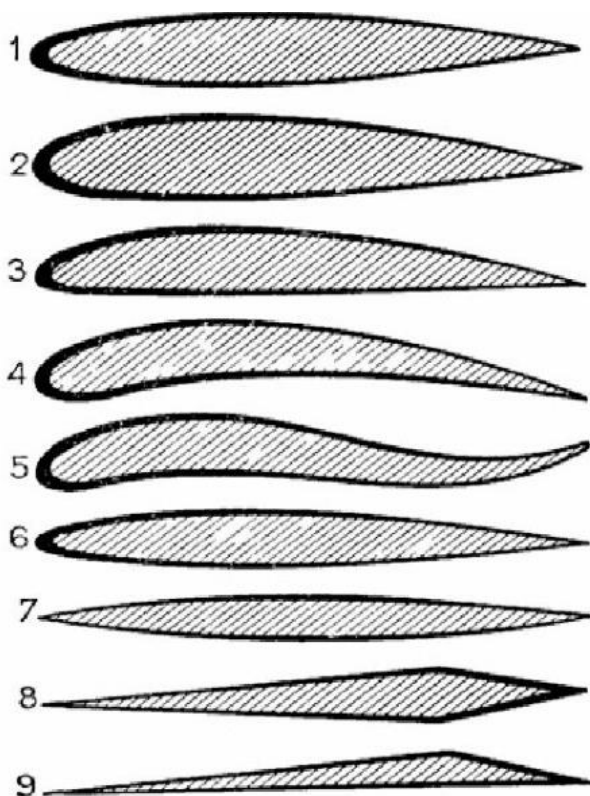


Рис. 30. Профили крыла

Рассмотрим рисунок 30. От формы профиля зависят его аэродинамические характеристики. *Симметричные профили (1)* с малой относительной толщиной применяются на крыльях сверхзвуковых самолетов. *Несимметричный профиль (2)*. *Выпукло-вогнутые* на современных самолетах не применяются, но на взлете и посадке такая форма обеспечивается отклонением закрылков. *Плосковыпуклые профили (3)* просты в производстве и могут применяться на нескоростных самолетах.

Двоковыпуклые профили (4) наиболее широко применяются на современных самолетах. S-образные (5) профили применяются на самолетах схемы «бесхвостка» (рис. 51). Они самоустойчивы. Ламинизированные (6) профили применяются на скоростных дозвуковых самолетах. У таких профилей максимальная толщина смещена к середине профиля, за счет чего удлиняется ламинарная часть пограничного слоя. Чечевицеобразные (7), ромбовидные (8) и дельтавидные (9) профили с острой передней кромкой применяются на сверхзвуковых самолетах.

Основные геометрические элементы профиля крыла показаны на рисунке 31.

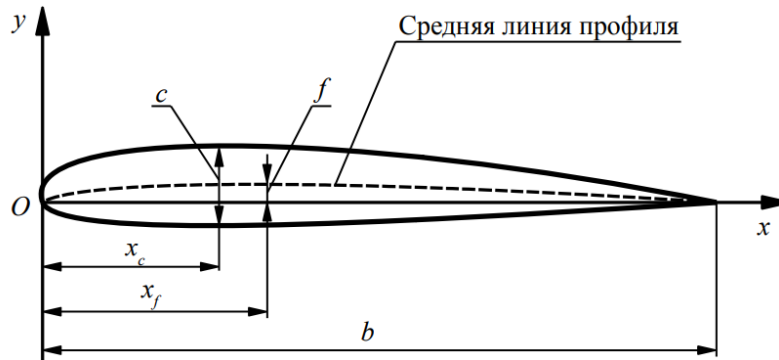


Рис. 31. Параметры профиля крыла

Хорда профиля (b) – отрезок прямой, соединяющий две наиболее удалённые точки профиля. Хорда делит профиль на верхнюю и нижнюю части.

Максимальная толщина профиля (C) – расстояние между касательными к верхнему и нижнему контуру профиля.

Относительная толщина профиля ($C_{отн}$) – отношение максимальной толщины C к хорде, выраженное в процентах. Относительная толщина современных профилей изменяется от 3–4% до 20–25%. $C_{отн} < 8\%$ — тонкий профиль; $C_{отн} = 8-12\%$ — средний, $C_{отн} > 12\%$ — толстый профиль.

Средняя линия профиля – линия, проходящая через середины ординат профиля.

Кривизна или вогнутость профиля f – максимальное расстояние между хордой и средней линией. Отношение кривизны профиля f к хорде, выраженное в процентах, называется относительной кривизной профиля.

Угол между хордой крыла и набегающим на него потоком называется углом атаки α (рис. 32). Угол атаки считается положительным, если поток набегающий на нижнюю поверхность крыла.



Рис. 32. Угол атаки профиля

Крыло в плане

Крылом в плане называется проекция крыла на горизонтальную поверхность, включая подфюзеляжную часть.

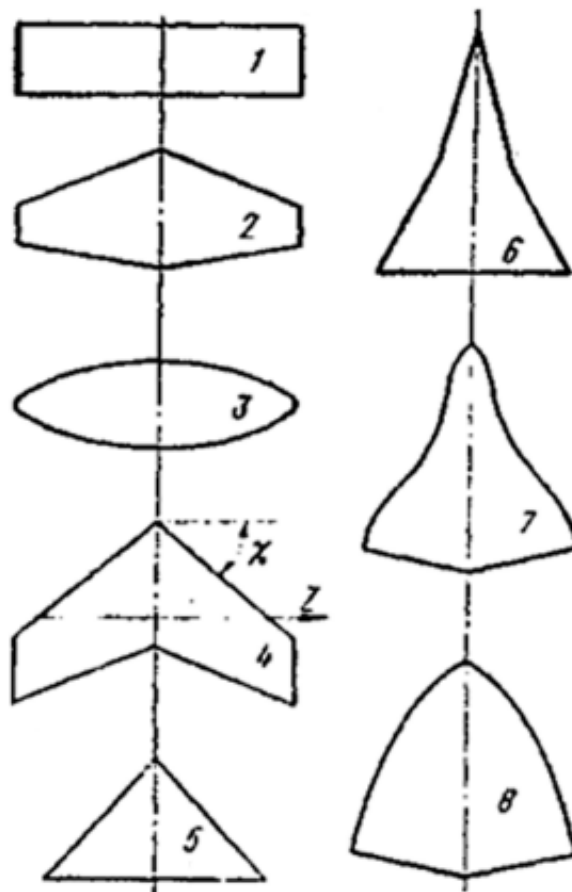


Рис. 33. Формы крыла в плане

Крыло в плане может иметь разную форму (рис. 33):

1. Прямоугольные крылья (1) создают большую подъёмную силу, но и большое лобовое сопротивление. На современных самолётах они применяются крайне редко.
2. Трапециевидное крыло (2) применяется широко на нескоростных самолётах.
3. Эллипсовидное крыло (3) считается наиболее аэродинамически совершенной формой крыла для нескоростных самолетов, но из-за сложности производства оно почти не применяется.
4. Стреловидные крылья (4) широко используются на скоростных и сверхзвуковых самолётах.
5. Треугольное крыло (5), треугольное с наплывом (6), готическое (7) и оживальное (8) применяются на сверхзвуковых самолётах.

К основным параметрам, определяющим размеры крыла в плане, относятся:

1. Площадь крыла S .
Площадь крыла – проекция поверхности крыла на горизонтальную плоскость, включая подфюзеляжную часть.
2. Размах l .
Размах – расстояние между двумя плоскостями, параллельными базовой плоскости самолета и проходящими через концы крыла.
3. Центральная (корневая) b_0 и концевая $b_{\text{конц}}$ хорды крыла.
Центральная хорда крыла – хорда крыла в базовой плоскости летательного аппарата.
Концевая хорда крыла – хорда крыла в его концевом сечении.

Форма крыла в плане характеризуется также удлинением и сужением, углом стреловидности (рис. 34).

Удлинение λ характеризует степень вытянутости крыла вдоль размаха и определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{l^2}{S}$$

Для крыльев дозвуковых самолетов $\lambda = 6-12$, сверхзвуковых $\lambda = 2-3$.

Угол стреловидности χ – угол между линией фокусов (0.25b) и перпендикуляром к плоскости симметрии самолета.

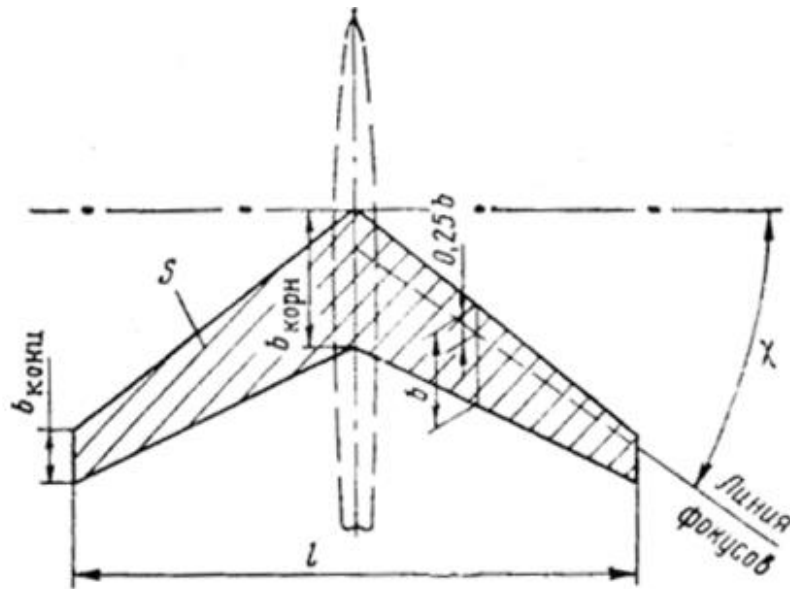


Рис. 34. Форма крыла в плане

Сужение крыла η – отношение центральной (корневой) хорды к концевой:

$$\eta = \frac{b_{\text{корн}}}{b_{\text{конц}}}$$

Величина сужения изменяется от 1 до ∞ . Для прямоугольного крыла сужение равно единице, а для треугольного – бесконечности.

4.6. Аэродинамические силы

Полная аэродинамическая сила \vec{R}_a – это сумма всех сил (сил давления и сил трения), возникающих при обтекании тела (рис. 35).

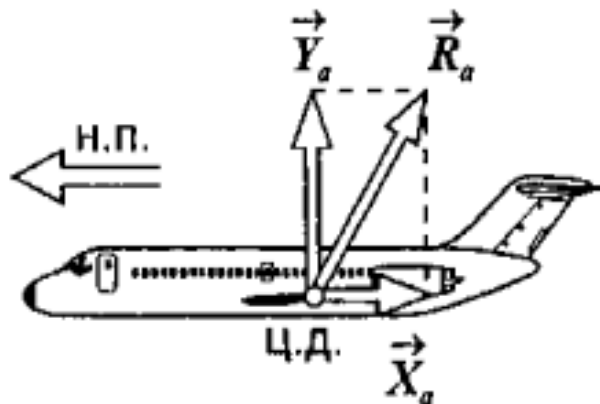


Рис. 35. Полная аэродинамическая сила по профилю крыла

Центр давления (ц.д.) – точка приложения полной аэродинамической силы R_a , другими словами, точка пересечения линии действия полной аэродинамической силы с хордой. Часть полной аэродинамической силы, перпендикулярная к направлению

полёта, точнее, к вектору скорости набегающего потока, является подъёмной силой \vec{Y}_a . Часть полной аэродинамической силы \vec{X}_a , параллельная вектору скорости набегающего потока, является силой лобового сопротивления.

Механическое воздействие набегающего потока на самолёт сводится к нагрузкам, непрерывно распределённым по его поверхности. Эти распределённые нагрузки приводят к результирующей силе, приложенной в центре масс самолёта, – аэродинамической силе, а также моменту вокруг центра масс, который называется аэродинамическим моментом и обозначается \vec{M} (рис. 36).

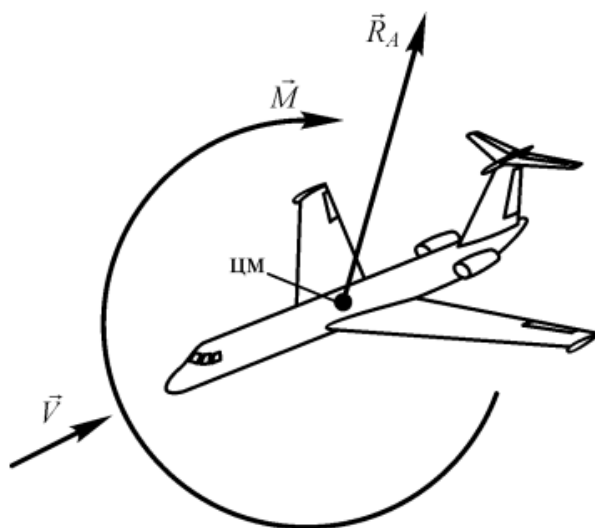


Рис. 36. Аэродинамическая сила и аэродинамический момент, действующие на самолёт при его обтекании набегающим потоком

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что величина аэродинамической силы прямо пропорциональна скоростному напору набегающего потока $\frac{\rho V^2}{2}$ и характерной площади обтекаемого тела S :

$$\vec{R}_a = c_R \frac{\rho \vec{V}^2}{2} S,$$

где c_R – коэффициент аэродинамической силы.

Аэродинамический момент также прямопропорционален скоростному напору $\frac{\rho V^2}{2}$, характерной площади S и характерному линейному размеру обтекаемого тела l :

$$\vec{M} = m \frac{\rho \vec{V}^2}{2} S l,$$

где m – коэффициент аэродинамического момента.

За характерную площадь и характерный размер берутся площади и размеры тех частей летательного аппарата, которые вносят основную долю в создание рассчитываемой силы или момента.

Разложим аэродинамическую силу \vec{R}_a на составляющие по осям связанной и скоростной систем координат. В связанной системе координат эти проекции обозначаются и называются следующим образом:

\vec{X} – аэродинамическая продольная сила;

\vec{Y} – аэродинамическая нормальная сила;

\vec{Z} – аэродинамическая поперечная сила.

В скоростной системе координат:

\vec{X}_a – сила лобового сопротивления;

\vec{Y}_a – аэродинамическая подъёмная сила;

\vec{Z}_a – аэродинамическая боковая сила.

На рисунке 37 показаны проекции аэродинамической силы \vec{R}_a на оси связанной и скоростной систем координат при отсутствии скольжения.

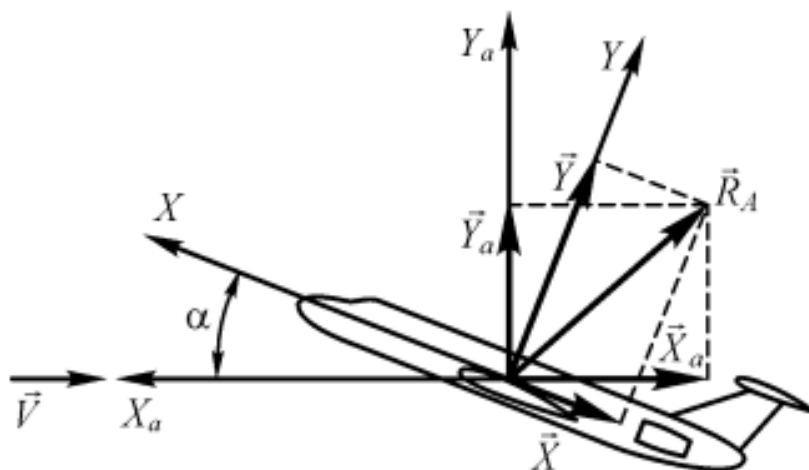


Рис. 37. Разложение аэродинамической силы по осям связанной и скоростной систем координат при $\beta = 0$ (скольжение отсутствует)

Сила лобового сопротивления летательного аппарата складывается из сил лобового сопротивления фюзеляжа, крыла, оперения и других частей летательного аппарата. За характерную площадь чаще всего принимают площадь крыла $S_{кр}$:

$$\vec{X}_a = c_{xa} \frac{\rho \vec{V}^2}{2} S_{кр},$$

где c_{xa} – коэффициент лобового сопротивления.

В создании подъёмной силы летательного аппарата основную роль играет крыло, поэтому в качестве характерной берётся площадь крыла $S_{кр}$:

$$\vec{Y}_a = c_{ya} \frac{\rho \vec{V}^2}{2} S_{кр},$$

где c_{ya} – коэффициент подъёмной силы.

Аэродинамическая боковая сила в основном определяется вертикальным оперением и фюзеляжем, значительно меньший вклад в создание этой силы вносят крыло, горизонтальное оперение и другие части самолёта. Поскольку вертикальное оперение является основным элементом при создании боковой силы (оно для этого предназначено), то его площадь $S_{В0}$ и принимают за характерную:

$$\vec{Z}_a = c_{za} \frac{\rho \vec{V}^2}{2} S_{В0},$$

где c_{za} – коэффициент боковой силы.

Так как аэродинамические моменты, действующие на летательный аппарат, рассчитываются в основном относительно связанных осей координат, найдём проекции момента \vec{M} на оси связанной системы координат (рис. 38).

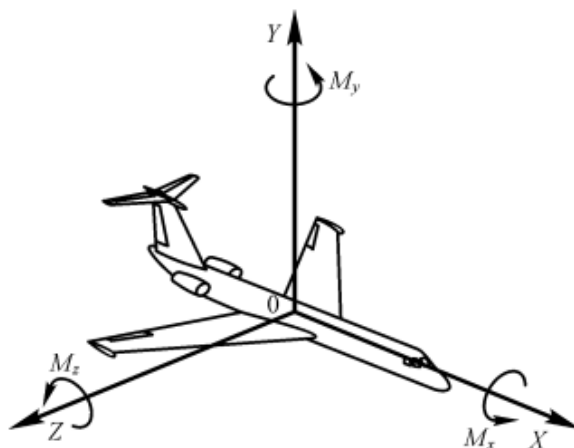


Рис. 38. Составляющие аэродинамического момента в связанной системе координат

Момент крена – аэродинамический момент вокруг оси OX . Он определяется силами, действующими на крыло самолёта и на вертикальное и горизонтальное оперения:

$$M_x = m_x \frac{\rho V^2}{2} S_{кр} l_{кр},$$

где m_x – коэффициент момента крена.

Момент рыскания – аэродинамический момент вокруг оси OY . Он создаётся силами, действующими на вертикальное оперение и фюзеляж. Этот момент вычисляется по следующей формуле:

$$M_y = m_y \frac{\rho V^2}{2} S_{\text{ВО}} L_{\text{ВО}},$$

где m_y – коэффициент момента рыскания,

$S_{\text{ВО}}$ – площадь вертикального оперения

$L_{\text{ВО}}$ – плечо вертикального оперения (расстояние от точки приложения аэродинамической силы, возникающей на вертикальном оперении, до центра масс летательного аппарата).

Момент тангажа – аэродинамический момент вокруг оси OZ . Он создаётся силами, действующими на крыло, горизонтальное оперение и фюзеляж. Вертикальное оперение практически не участвует в создании момента тангажа. Момент тангажа вычисляется по следующей формуле:

$$M_z = m_z \frac{\rho V^2}{2} S_{\text{кр}} b_a,$$

где m_z – коэффициент момента тангажа,

$S_{\text{кр}}$ – площадь проекции крыла на базовую плоскость крыла,

b_a – хорда условного прямоугольного крыла, равного по площади рассматриваемому и имеющего такие же аэродинамические характеристики.

4.7. Четыре основные силы, действующие на ЛА в полете

Есть несколько основных сил, возникающих в полете:

- тяга;
- лобовое сопротивление;
- подъёмная сила;
- вес.

Когда речь идёт о понятии силы, мы подразумеваем простейшее толкающее или тянущее воздействие. Если эти воздействия сбалансированы – сила, действующая в одном направлении равна силе, действующей в противоположном направлении – объект неподвижен. Если силы не сбалансированы, объект ускоряется в направлении большей силы.

4.7.1. Тяга

Сила тяги силовой установки (или просто тяга) P — это сила, действующая на самолет со стороны силовой установки в результате ее функционирования. Тяга – это механическая сила, которая перемещает летательный аппарат в воздухе. Движение может быть следствием работы двигателей, пропеллеров, ракетных ускорителей,

мускульной силы (в случае птиц) либо некой иной двигательной установки. Если тяга больше, чем лобовое сопротивление, скорость самолета увеличивается.

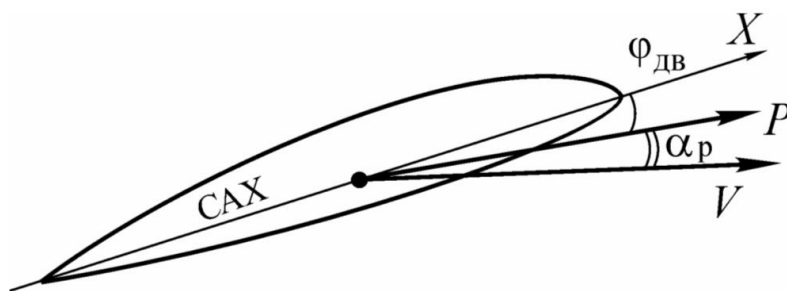


Рис. 39. Задание силы тяги в связанной системе координат

Вектор тяги силовой установки (в нормальном полете) находится в вертикальной плоскости симметрии самолета, и направление P задается углом установки двигателя в этой плоскости $\varphi_{дв}$, т.е. углом между продольной осью OX (или $САХ$ крыла) и осью двигателя (рис. 39). α_p – угол атаки реактивной силы. V – направление воздушной скорости. Тем самым тяга силовой установки задается в связанной системе координат.

4.7.2. Лобовое сопротивление

Любой объект, движущийся с произвольной скоростью, будет испытывать некоторое лобовое сопротивление, увеличивающееся с ростом скорости. Вот почему самолеты, спортивные машины, локомотивы имеют обтекаемую форму – это позволяет воздуху свободнее обтекать движущийся объект, уменьшая лобовое сопротивление и повышая эффективность.

Сила лобового сопротивления складывается из сил, действующих на все части самолета, обтекаемые потоком. Рассмотрим силу лобового сопротивления, возникающую на крыле самолета. В качестве характерной площади будем использовать площадь крыла. Сила лобового сопротивления крыла складывается из сил различной природы. В общем случае силу лобового сопротивления можно представить в виде следующей суммы:

$$X_a = X_{a\text{тр}} + X_{a\text{д}} + X_{a\text{i}} + X_{a\text{вл}}$$

где: $X_{a\text{тр}}$ – сила сопротивления трения (возникает из-за вязкости воздуха);

$X_{a\text{д}}$ – сила сопротивления давления (возникает из-за разности давлений, действующих на носовую и хвостовую части обтекаемого тела);

$X_{a\text{i}}$ – сила индуктивного сопротивления (появляется тогда, когда на крыле самолёта возникает подъёмная сила);

$X_{a\text{вл}}$ – сила волнового сопротивления (возникает при полётах на околозвуковых и сверхзвуковых скоростях).

4.7.3. Подъёмная сила

Подъемная сила, противодействующая весу, – это аэродинамическая сила, которая удерживает летательный аппарат в воздухе. В случае с крылатыми аппаратами, подъемная сила возникает при обтекании воздухом объемного профиля крыла. Воздух, обтекающий верхнюю часть, крыла, движется быстрее (более разрежен), отчего над крылом образуется зона низкого давления. Под крылом воздух движется медленнее, образуя зону высокого давления. Благодаря разнице давлений возникает подъемная сила, направленная снизу вверх и удерживающая самолет в воздухе. Для зависания в воздухе или горизонтального полета подъемная сила должна быть равна весу; для набора высоты подъемная сила должна превышать вес.

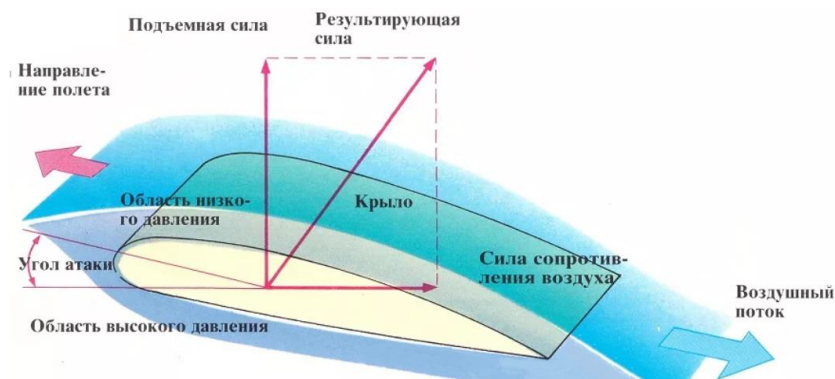


Рис. 40. Подъемная сила крыла

Подъемная сила (рис. 40) – это составляющая полной аэродинамической силы, перпендикулярная вектору скорости движения тела в потоке жидкости или газа, возникающая в результате несимметричности обтекания тела потоком:

$$Y = C_y \frac{\rho V^2}{2} S,$$

где C_y – коэффициент подъемной силы;

ρ – плотность воздуха;

V – потока воздуха;

S – характерная площадь.

4.7.4. Вес или гравитация

Вес – это сила, действующая на объект по причине наличия *гравитации*. Объект, который летает или зависает в воздухе, находится в состоянии непрерывного баланса сил, преодолевая гравитацию. Гравитация неумолима – даже краткосрочная потеря подъемной силы приводит к моментальному падению летательного аппарата.

Сила тяжести G является равнодействующей сил ньютоновского притяжения (гравитационной силы) и внешней центробежной силы, обусловленной вращением Земли. Она численно равна весу самолета $G = mg$.

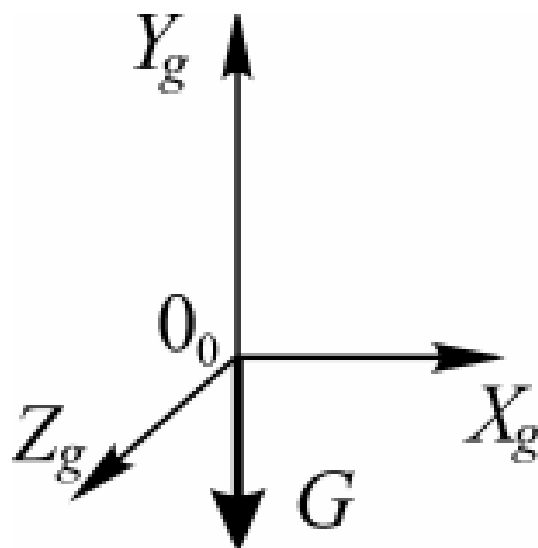


Рис. 41. Задание силы тяжести в земной системе координат

Сила тяжести обычно задается в земной системе координат (рис. 41) и ее проекции на оси этой системы координат определяются по следующим формулам:

$$G_{x_g} = 0;$$

$$G_{y_g} = -G;$$

$$G_{z_g} = 0.$$

4.8. Основные понятия и показатели надежности, безопасности и живучести самолета

В числе важнейших эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ), определяющих эффективность самолета, особое место занимают показатели надежности, безопасности и живучести. В тактико-технических требованиях (ТТТ) на проектируемые самолеты значения показателей надежности, безопасности и живучести задаются так же, как и летно-технические характеристики (ЛТХ): грузоподъемность, крейсерская скорость, длина ВПП, максимальная дальность, точность навигации и др. В соответствии с ГОСТ 27.002 - 83 «Надежность в технике. Термины и определения» приведём следующие определения:

Надежность – свойство самолета сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять полетные задания в расчетных режимах и условиях эксплуатации, технического

обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Таким образом, надежность является сложным свойством самолета и состоит из сочетаний свойств: безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости.

Безотказность – свойство самолета непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение времени выполнения полетного задания.

Ремонтпригодность – свойство самолета, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию, восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов. Ремонтпригодность входит в более общее свойство самолета – эксплуатационную технологичность. Эксплуатационная технологичность характеризует приспособленность самолета к выполнению всех видов работ по техническому обслуживанию и ремонтам, включая заправку, снаряжение, погрузку и выгрузку, т.е. оперативное обслуживание, не связанное с отказами и повреждениями.

Долговечность – свойство самолета сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Долговечность характеризует экономическую целесообразность эксплуатации самолета до предельного налета календарного срока

Сохраняемость – свойство самолета сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортировки.

Надежность самолета является одним из свойств совокупности, определяющей его качества (эффективность). В эту совокупность свойств входят также безопасность и живучесть.

Безопасность – свойство самолета непрерывно в течение времени полета сохранять работоспособность тех систем и агрегатов, которые обеспечивают завершение полета без летного происшествия. Под безопасностью самолетов понимается свойство комплекса (экипаж – самолет, наземное обеспечение и управление воздушным движением) выполнять полеты без летных происшествий.

Живучесть – свойство самолета сохранять работоспособное состояние при воздействии поражающих средств и нерасчетных нагрузок, а также при наличии накопившихся повреждений. Перечисленные свойства самолета проявляются в процессе эксплуатации при определенном воздействии внешней среды, зависящем от режимов полета, климатических условий, интенсивности воздействия нерасчетных условий и при конкретных способах технического обслуживания. Поэтому они называются эксплуатационными и определяют значения эксплуатационных характеристик (ЭТХ) самолета. Точные оценки ЭТХ можно получить только после длительной эксплуатации большого числа самолетов данного типа.

Свойство самолета выполнять полетные задания без учета эксплуатационных свойств назовем *исходной эффективностью*. Она определяет пригодность самолета для использования по назначению в зависимости от его лётно-технических характеристик. В процессе длительной эксплуатации самолет, его системы и агрегаты могут переходить из одного состояния в другое. ГОСТ 27.002 - 83 предусматривает пять возможных состояний объекта:

1. Исправное состояние, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации;
2. Неисправное состояние, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и конструкторской документации;
3. Работоспособное состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять полетные задания, соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации;
4. Неработоспособное состояние, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять полетные задания, не соответствуют требованиям нормативно-технической или конструкторской документации;
5. Предельное состояние, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Переход самолета и его частей из одного состояния в другое происходит вследствие событий, различающихся по их последствиям.

Повреждение или неисправность – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния системы самолета при сохранении работоспособного состояния.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния системы самолета.

Авиационное происшествие – событие, связанное с эксплуатацией самолета и произошедшее в период нахождения на его борту экипажа или пассажиров с целью выполнения полета, при котором произошло полное разрушение или повреждение самолета, которое невозможно устранить в эксплуатационной организации, с гибелью или без гибели кого-либо из указанных лиц. Авиационные происшествия делятся на летные и наземные. К летным относятся происшествия, происходящие в полете, а к наземным происшествия до и после полета.

В зависимости от тяжести происшествий летные происшествия подразделяются на три вида: поломки, аварии и катастрофы (ГОСТ 18340 - 73).

Поломка — это не приводящее к гибели членов экипажа или пассажиров летное происшествие, после которого восстановление самолета производится ремонтным предприятием, и он может быть допущен к эксплуатации.

Авария — это не приводящее к гибели членов экипажа или пассажиров летное происшествие, после которого самолет не подлежит восстановлению.

Катастрофа — это летное происшествие, которое приводит к гибели хотя бы одного лица из состава экипажа или пассажиров при полном или частичном разрушении самолета. Летное происшествие классифицируется как катастрофа, если смерть людей от ранений, полученных в полете, наступает в течение 10 суток после него. К катастрофам также относятся случаи пропажи самолетов без вести во время полета.

Чрезвычайное происшествие – событие, связанное с эксплуатацией самолета, но не относящееся к авиационным происшествиям, при котором наступает одно из следующих последствий: разрушение или повреждение с нарушением прочности или изменением летно-технических характеристик; ранение или гибель людей; гибель находившихся на борту людей после вынужденной посадки самолета от голода, жажды, холода и других причин. К летным происшествиям относят вынужденную посадку самолета на такой площадке, откуда он не может быть эвакуирован, независимо от степени его повреждения. Пропажа самолета без вести также классифицируется как летное происшествие.

4.9. Количественные показатели надежности, безопасности и живучести самолета

Безотказность самолета наиболее просто может быть количественно оценена таким показателем как налет на отказ системы, вызвавшей невыполнение полетного задания T_n [час], который определяется по формуле:

$$T_n = \frac{t_s}{n_n},$$

где t_s – суммарный налет парка самолетов данного типа за рассматриваемый календарный период эксплуатации (например, год);

n_n – суммарное количество отказов систем этих самолетов за тот же календарный период эксплуатации, вызвавших невыполнение полетного задания.

При расчетах безопасности систем и самолета в целом широко пользуются таким показателем, как параметр потока отказов w_n [1/час], который является величиной, обратной T_n . Он представляет количество отказов, приходящихся на час налета самолетов.

В качестве показателя безотказности применяется также вероятность безотказной работы за время выполнения задания – $P(J)$ и вероятность отказа системы самолета за время выполнения полетного задания – $Q(J)$, вызвавшего его срыв.

Ремонтопригодность самолета может быть количественно оценена таким комплексным показателем, как вероятность готовности к выполнению полетного

задания. Для установившегося режима эксплуатации этот показатель называют коэффициентом готовности:

$$K_r = \frac{t}{r},$$

где $\frac{t}{r}$ – относительное время пребывания самолетов в состоянии готовности к полету и в полете.

На значение коэффициента готовности самолетов данного типа большое влияние оказывает организация снабжения запасными деталями, использование технического состава на вспомогательных работах, а также другие факторы, не связанные непосредственно с особенностями конструкции данного самолета. Поэтому на этапе проектирования и в процессе начальной эксплуатации большое распространение получил показатель эксплуатационной технологичности – удельная суммарная трудоемкость технического обслуживания самолета – K_T , определяемая как трудоемкость всех видов технического обслуживания и ремонта в пределах ресурса до первого ремонта, приходящаяся на час налета.

Показателями долговечности самолета являются значения ресурсов и сроков служб. Различают три вида назначенных ресурсов:

1. *Полный ресурс* – это наработка, при достижении которой самолет не подлежит дальнейшей эксплуатации и ремонту;
2. *Ресурс до первого ремонта* – это наработка, при достижении которой самолет подлежит направлению в первый ремонт;
3. *Межремонтный ресурс* – это наработка на период эксплуатации самолета между двумя последовательными ремонтами. Например, Ту-154 имеет межремонтный ресурс 6000 лётных часов, Ил-86 – 3500, Як-24 – 5000.

При обслуживании самолетов по техническому состоянию используются только два показателя достигаемой фактической долговечности – полный ресурс и полный срок службы каждого экземпляра самолета. Вместо ресурса до первого ремонта устанавливается назначенный ремонтный цикл – предельная наработка, до которой совершаются все необходимые для каждого экземпляра самолета ремонтные работы по частям.

Ресурсы агрегатов и самолета выражаются в часах налета, количеством полетов или посадок и обозначаются соответственно t_n , t_j , t_{mp} . Наряду с ресурсами долговечность самолета измеряется соответствующими сроками службы – календарной продолжительностью эксплуатации в годах. Например, срок службы до первого ремонта – это календарная продолжительность эксплуатации самолета, при достижении которой он подлежит направлению в первый ремонт. Обозначаются сроки службы, соответственно, T_n , T_j , T_{mp} . Самолет направляется в первый ремонт или в результате выработки ресурса до первого ремонта или по прошествии срока службы до первого ремонта.

Показателем сохраняемости самолета служит срок сохраняемости – $T_{\text{сох}}$ в годах. При количественной оценке безопасности следует различать безопасность полетов самолета и безопасность самолета. Безопасность самолета зависит только от особенностей его конструкций. Безопасность полетов зависит как от безопасности самолета, так и от профессиональной подготовки экипажа и руководителей полетами, а также от технического оснащения и организационной структуры системы управления воздушным движением. При оценке безопасности полетов самолета данного типа учитывается общее число летных происшествий по всем причинам за определенный календарный период эксплуатации.

При оценке безопасности самолета учитывается число только тех летных происшествий, которые произошли из-за конструктивно-производственного недостатка (КПН). В качестве показателя безопасности самолета наибольшее распространение получил налет на летные происшествия – $T_{\text{лп}}$, который определяется как:

$$T_{\text{лп}} = \frac{t_s}{n_{\text{лп}}},$$

где $n_{\text{лп}}$ – суммарное число летных происшествий по КПН на всем парке самолетов данного типа за рассматриваемый календарный период эксплуатации.

Как уже отмечалось, летные происшествия делятся на поломки, аварии и катастрофы. Показателем безопасности самолета, учитывающим наиболее тяжелые летные происшествия, является налет на катастрофу – $T_{\text{кат}}$ [час]:

$$T_{\text{кат}} = \frac{t_s}{n_{\text{кат}}},$$

где $n_{\text{кат}}$ – суммарное число катастроф по КПН на всем парке самолетов данного типа за рассматриваемый календарный период эксплуатации;

t_s – суммарный налет парка самолетов данного типа за рассматриваемый календарный период эксплуатации (например, год).

Обычно используются обратные значения указанных выше показателей безопасности: $K_{\text{лп}}$ – число летных происшествий на 100 тысяч часов налета или на 100 тысяч посадок. Для пассажирских самолетов самостоятельное значение приобрел показатель безопасности, учитывающий вместимость самолета и тяжесть катастроф. Таким показателем является объем пассажирских перевозок, приходящийся на одного погибшего пассажира $A_{\text{п}}$ [пасс.км]:

$$A_{\text{п}} = \frac{1}{n_{\text{п}}} \sum_{i=1}^N n_{i\text{пасс}} 1_{i\text{рейс}},$$

где $n_{i\text{пасс}}$ – число пассажиров в i -том рейсе;

$l_{i\text{рейс}}$ – налет в километрах в i -том рейсе;

n_n – суммарное число погибших пассажиров за рассматриваемый период в результате катастроф самолетов данного типа по КПП.

N – число рейсов всех самолетов данного типа за рассматриваемый период эксплуатации;

Количественные показатели живучести отражают различную степень уязвимости самолета:

1. Вероятность сохранения работоспособности после воздействия поражающих средств – $P_{\text{жив}}$ характеризует способность самолета выполнить полетное задание и нормально возвратиться на аэродром;
2. Вероятность воздействия на свою территорию после воздействия поражающих средств – $P_{\text{воз}}$ оценивает возможность возвращения самолета даже с аварийными повреждениями и вынужденной посадкой;
3. Вероятность выживания экипажа и пассажиров после воздействия поражающих средств – $P_{\text{выж}}$ оценивает эффективность средств защиты и аварийного покидания. Оценка показателей живучести проектируемого самолета может быть выполнена на основе моделирования условий поражения и особенностей конструкции самолета.

4.10. Понятие центра давления

Центр давления (ЦД) – точка, в которой линия действия равнодействующей приложенных к покоящемуся или движущемуся телу сил давления окружающей среды (жидкости, газа), пересекается с некоторой проведенной в теле плоскостью. Например, для крыла самолёта (рис. 42) центр давления определяют как точку пересечения линии действия аэродинамической силы с плоскостью хорд крыла; для тела вращения (корпус ракеты, дирижабля, мины и др.) — как точку пересечения аэродинамической силы с плоскостью симметрии тела, перпендикулярной к плоскости, проходящей через ось симметрии и вектор скорости центра тяжести тела.

Положение центра давления зависит от формы тела, а у движущегося тела может ещё зависеть от направления движения и от свойств окружающей среды (её сжимаемости). Так, у крыла самолёта, в зависимости от форм его профиля, положение центра давления может изменяться с изменением угла атаки α , а может оставаться неизменным («профиль с постоянным ЦД»); в последнем случае $x_{\text{цд}} \approx 0,25b$. При движении со сверхзвуковой скоростью центр давления значительно смещается к хвосту из-за влияния сжимаемости воздуха.

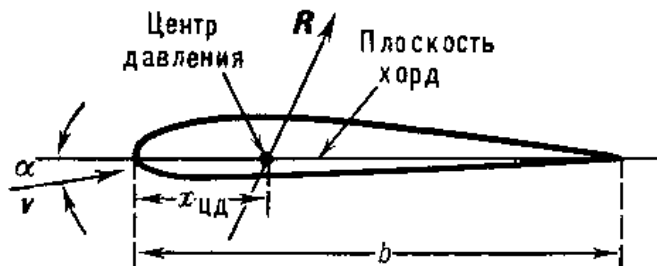


Рис. 42. Положение центра давления потока на крыло: b — хорда; α — угол атаки; v — вектор скорости потока; $x_{цд}$ — расстояние центра давления от носика тела

Изменение положения центра давления у движущихся объектов (самолёт, ракета, мина и др.) существенно влияет на устойчивость их движения. Чтобы их движение было устойчивым при случайном изменении угла атаки α , центр давления должен сместиться так, чтобы момент аэродинамической силы относительно центра тяжести вызвал возвращение объекта в исходное положение (например, при увеличении α центр давления должен сместиться к хвосту). Для обеспечения устойчивости объект часто снабжают соответствующим хвостовым оперением.

4.11. Понятие центра масс

Центр масс летательного аппарата – точка приложения равнодействующей сил веса всех частей самолета, его систем, оборудования, пассажиров, грузов.

Аэродинамический фокус – точка (на САХ крыла) приложения приращения полной аэродинамической силы летательного аппарата.

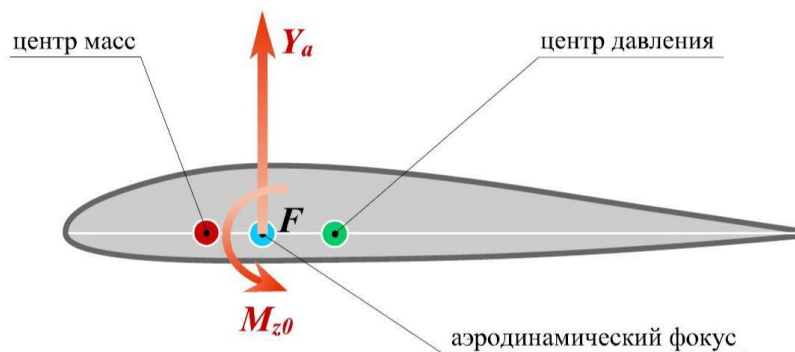


Рис. 43. Точки приложения центра масс, центра давления и аэродинамического фокуса

Проектное положение центра масс самолёта должно обеспечивать необходимую устойчивость и управляемость на всех режимах полёта.

Продольная устойчивость самолёта определяется взаимным расположением центра масс и фокуса летательного аппарата (рис. 43).

Возможны три случая расположения центра масс и фокуса:

1. Центр масс расположен впереди фокуса.
2. Центр масс совмещён с фокусом.
3. Центр масс расположен позади фокуса.

Центровка – расстояние от носка средней аэродинамической хорды (САХ) до центра масс самолёта, выраженное в процентах от величины САХ:

$$\bar{X}_T = \frac{X_T}{b_a} \cdot 100 \%$$

Положение центра масс самолёта, а значит, его центровки зависит от:

1. загрузки самолёта и изменения этой нагрузки в полёте;
2. размещения пассажиров и выработки топлива.

При уменьшении центровки увеличивается устойчивость, но уменьшается управляемость. При увеличении центровки уменьшается устойчивость, но увеличивается управляемость.

4.12. Перегрузка

Перегрузкой называется сумма векторов всех сил, действующих на самолет, кроме силы тяжести, деленная на величину силы тяжести. В полете перегрузка равна:

$$n = \frac{P + R_a}{mg},$$

где P – сила тяги силовой установки;

R_a – полная аэродинамическая сила;

mg – сила тяжести.

Как видно из формулы перегрузка – величина безразмерная. Перегрузка – величина векторная. Её направление совпадает с направлением равнодействующей поверхностных сил. На практике обычно пользуются не полной перегрузкой, а её проекциями на оси системы координат.

4.13. Понятие аэродинамического качества.

Аэродинамическим качеством крыла называется отношение подъемной силы крыла к силе лобового сопротивления или отношение соответствующих коэффициентов на данном угле атаки:

$$K = \frac{Y_a}{X_a} = \frac{c_{ya}}{c_{xa}}$$

Аэродинамическое качество является одной из важнейших характеристик, отражающих техническое совершенство самолета. Например, от аэродинамического

качества в значительной степени зависит дальность полета. Поэтому при создании самолета, задаваясь величиной подъемной силы, стремятся уменьшить лобовое сопротивление, чтобы увеличить качество.

Определяющими факторами, влияющими на аэродинамическое качество, крыла, являются:

- угол атаки;
- форма профиля;
- относительная толщина и кривизна профиля;
- форма крыла в плане;
- состояние поверхности крыла.

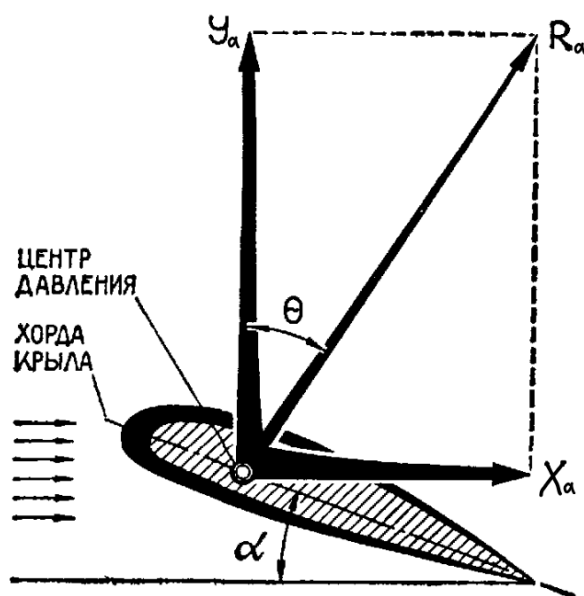


Рис. 44. Составляющие полной аэродинамической силы крыла

На рисунке 44:

- α – угол атаки;
- θ – угол качества;
- Y_a – подъёмная сила;
- X_a – сила лобового сопротивления;
- R_a – полная аэродинамическая сила.

По рисунку 44 видно, что отношение подъемной силы к силе лобового сопротивления равно $ctg(\theta)$. Поэтому угол θ называют углом качества:

$$K = ctg(\theta) = \frac{Y_a}{X_a}.$$

Из выражения следует, что чем больше угол качества, тем меньше качество крыла. Величина аэродинамического качества во многом зависит от геометрических характеристик крыла. С увеличением относительной толщины и кривизны профиля

качество его уменьшается, так как коэффициент лобового сопротивления растет быстрее коэффициента подъемной силы. Форма крыла в плане влияет на величину индуктивного сопротивления. С увеличением удлинения крыла индуктивное сопротивление его уменьшается, что приводит к повышению аэродинамического качества крыла.

5. БПЛА

Диапазон существующих и разрабатываемых беспилотных аппаратов очень широк: от микро- и мини-БПЛА до тяжелых многотонных аппаратов, а также БПЛА, способных выполнять сверхдальние и сверхвысотные полеты длительностью в несколько месяцев. Назначение современных БПЛА не ограничивается только военной ОБПЛАстью. Стремительно расширяется и сфера их гражданского применения (в таких отраслях, как нефтегазовая промышленность, транспорт, строительство, сельское хозяйство, связь и др.), что придает дополнительные импульсы развитию беспилотной авиационной техники.

5.1. Беспилотный летательный аппарат, основные определения

Беспилотное мобильное средство – это искусственный мобильный объект многоразового или условно-многоразового использования, не имеющий на борту экипажа (человека-пилота) и способный самостоятельно целенаправленно перемещаться в пространстве для выполнения различных функций в автономном режиме (с помощью собственной управляющей программы) или посредством дистанционного управления (осуществляемого человеком-оператором или диспетчерским центром).

Нельзя считать беспилотными мобильными средствами те объекты, которые не имеют собственной энергетической подсистемы и движителя. Например, буксируемый за кораблем на тросе исследовательский зонд нельзя считать беспилотным мобильным средством. По этой же причине не является беспилотным мобильным средством метеорологический зонд, свободно дрейфующий в атмосфере. Не являются таковыми и различные устройства, прикрепляемые к мобильным объектам и служащие для слежения за ними (пример – GPS-трекеры), т.к. в этом случае отсутствует возможность самостоятельного перемещения и управления движением.

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) – это летательный аппарат многоразового или условно-многоразового использования, не имеющий на борту экипажа (человека-пилота) и способный самостоятельно целенаправленно перемещаться в воздухе для выполнения различных функций в автономном режиме (с помощью собственной управляющей программы) или посредством дистанционного управления (осуществляемого человеком-оператором со стационарного или мобильного пульта управления).

Заметим, что к БПЛА не относятся все ракеты, снаряды, бомбы (независимо от того, управляемые они или нет), аэростаты без двигателей и другие безмоторные летательные аппараты: планеры, дельтапланы, парaplаны. Но беспилотные дирижабли, моторные дельтапланы и парaplаны в соответствии с данным определением вполне можно отнести к БПЛА.

5.2. Способы запуска и управления БПЛА

5.2.1. Способы запуска БПЛА

Взлет является наиболее ответственным этапом полета любого летательного аппарата. На сегодняшний день широко применяют следующие способы взлета/запуска БПЛА:

1. Запуск с рук (рис. 45).

В основном данный метод применяется для летательных аппаратов, чья масса не превышает 5 кг. Основное достоинство заключается в отсутствии каких-либо механизмов, что приводит к повышению надёжности и простоте запуска, но, при этом, существенный недостаток заключается в низком уровне безопасности, так как при запуске двигатель работает на максимальных оборотах, и удержать такой аппарат может быть сложной задачей, не говоря о рисках для здоровья.



Рис. 45. Запуск БПЛА с рук

2. Запуск с помощью взлетной полосы.

Данный метод запуска характерен для крупных летательных аппаратов, обладающих внушительными, масса-габаритными характеристиками. В качестве примеров беспилотников, которым для запуска необходим такой способ, можно привести: Российский БПЛА «Орион» (рис. 46), Китайский «СН-4», Американский «MQ-1 Predator».



Рис. 46. БПЛА «Орион»

3. Запуск с помощью катапульты (рис. 47).

Для взлета мало- и среднеразмерных беспилотных летательных аппаратов широко используются пусковые устройства типа катапульты, позволяющие обеспечить быстрый и эффективный взлет с силовой установки сравнительно небольшой мощности. Взлёт с катапульты — это самая популярная система запуска БПЛА в связи с тем, что его работа происходит, в основном, в местах необорудованных взлетно-посадочной полосой. Запуск модели БПЛА осуществляется с помощью катапульти различных систем и методов получения пусковой энергии. Выбор типа катапульты зависит от массы планера, требований к взлетной площадке и времени подготовки к взлету.

Катапульты бывают трех основных видов – пневматические, механические и эластичные.



Рис. 47. БПЛА, установленный на катапульте

Для осуществления пуска моделей БПЛА массой от 15 до 50 килограмм, чаще всего, используют пневматические или механические катапульты. Пневматические катапульты обладают относительно небольшими габаритными размерами и весом. Такой тип катапульти разгоняет летательный аппарат с помощью сжатого воздуха. Механические катапульты могут использовать энергию падающего груза, лебедочный привод либо другие устройства.

Самыми распространенными системами запуска являются эластичные способы катапультирования. Принцип их работы заключается в силе, полученной в результате амортизации эластичного, чаще всего резинового, шнура. Конструкция катапульты выполняется модульной, что позволяет снизить габаритные размеры в транспортировочном состоянии и обеспечить быструю сборку на месте проведения запуска.

Основные предъявляемые к катапультам требования заключаются в надежности, которая зависит от работоспособности механизма при различных климатических условиях; исключении повреждения дорогостоящего летательного аппарата; эргономичности, связанной с минимизацией массогабаритных характеристик, простотой использования; минимальном времени разворачивания и свертывания; высоких эксплуатационных качествах.

5.2.2. Способы управления БПЛА

В настоящий момент различают три способа управления БПЛА:

1. Автоматический;
2. Ручной;
3. Смешанный.

При *автоматическом управлении* БПЛА принимает решения о траектории движения и операциях, производимых полезной нагрузкой, самостоятельно, согласно заложенной в него программе и показателям окружающей среды. Данный принцип регулирования сложен в реализации из-за быстроменяющихся обстоятельств движения БПЛА в пространстве. Также немаловажной является модель мира, заложенная в БПЛА. К примеру: БПЛА для мониторинга помещений не обязан иметь систему глобального позиционирования, поскольку перекрытия сооружения не позволяют проходить сигналу спутников, однако система компьютерного зрения должна присутствовать для безопасного перемещения в пространстве. С иной стороны может выглядеть решение позиционирования БПЛА в задачах дальних морских перевозок, где нет достаточного количества ориентиров – вследствие этого, лишь наличие на борту приемников GPS/ГЛОНАСС может позволить с достаточной точностью совершать передвижения.

Ручной способ управления реализует контроль поведения БПЛА оператором. Данный принцип позволяет организовывать работу в заранее неизвестных условиях. Однако данный метод не позволяет в полной мере развить потенциал системного обеспечения БПЛА, поскольку невозможно отказаться от ошибок пилота или ограниченной дальности сигнала управления. БПЛА с ручным принципом управления часто применяются в кино съемке, обследовании неизвестных мест и т.д.

Объединением первого и второго принципов является *смешанный метод управления*. При его реализации пилот имеет управление над БПЛА, однако бортовая система осуществляет помощь в принятии решений оператором и реализует их. К

примеру: данной системой оборудованы большинство современных квадрокоптеров – она помогает реализовать удержание горизонта в полете, а также организует возврат в точку взлета при потере сигнала.

Принцип полета и управления БПЛА

Выделим два вида квадрокоптеров: классический и FPV. Различаются они управлением и способом визуального контроля.

Для управления стандартным БПЛА используется специальный пульт (рис. 48), через который контролируется полёт, а также смартфон или планшет, куда выводится изображение с камеры и данные о полёте.



Рис. 48. Пульт управления БПЛА

FPV (от англ. First Person View – вид от первого лица) – это система управления полётами от «первого лица». Так же, как и в классическом БПЛА, для управления используется пульт, но картинка с камеры квадрокоптера приходит уже не на смартфон или планшет, а на специальные очки.

Режимы полёта БПЛА

Классический квадрокоптер имеет два режима полета:

1. Стандартный режим.

Выделяют следующие виды стандартных режимов:

- Режим позиционирования (P-режим).

Основная его суть — лететь стабильно, плавно, обходя препятствия, что позволяет GPS.

P-режим лучше всего работает при сильном сигнале GPS. БПЛА использует модуль GPS, системы переднего и нижнего обзора для определения своего местоположения, автоматической стабилизации и навигации между препятствиями.

- Спортивный режим (S-режим).

Предназначен для предельных скоростей полета. GPS продолжает помогать в позиционировании БПЛА, но оптические датчики в этом режиме уже не работают.

- Режим ориентации (A-режим).

В этом режиме GPS отключен. Для удержания высоты БПЛА использует внутренний барометр. Зависнуть в одной точке самостоятельно в таком режиме коптер уже не может. При наличии ветра беспилотник не сможет удерживать своё положение и переместится в сторону его направления.

2. Интеллектуальный режим.

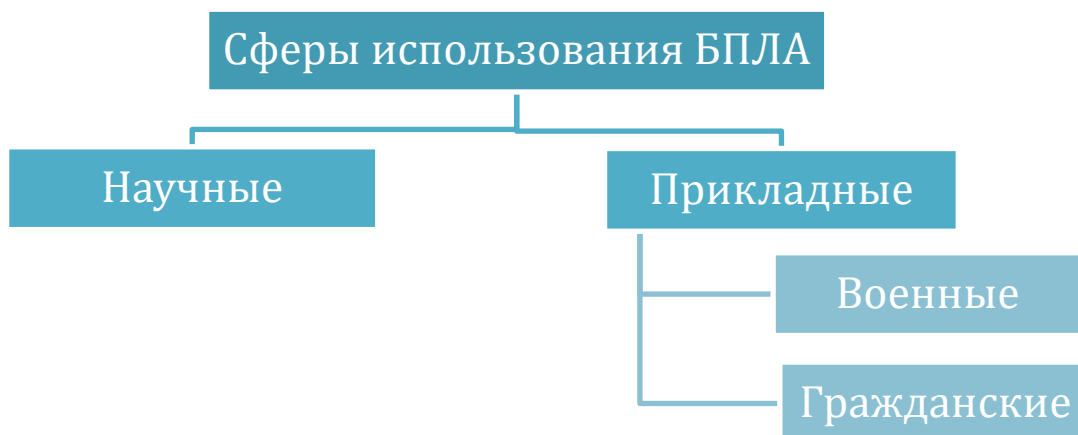
В классические БПЛА встроены программы управления с готовыми сценариями съемки. Это и есть интеллектуальные режимы. Например, преследование движущегося объекта, облёт по орбите, следование по заранее заданному маршруту и даже полностью автоматическая съёмка объекта, который выделяется в приложении на смартфоне.

Режимы полетов квадрокоптеров FPV:

1. Режим Angle (режим стабилизации). БПЛА автоматически возвращается в горизонтальное положение — определенный угол, ограниченный настройками.
2. Режим Horizon (режим стабилизации). Доступен автоматический возврат БПЛА в горизонтальное положение. Угловое движение ограничено не полностью, поэтому мультикоптер может сделать переворот.
3. Режим Acro (режим без стабилизации). При таком режиме требуется ручной возврат БПЛА в горизонтальное положение. Угол наклона мультикоптера при движении определяется скоростью вращения БПЛА вокруг оси.

5.3. Классификация БПЛА по назначению

Во многих классификациях по назначению БПЛА разделяют на военные и гражданские. Однако более логичным является классификация, в которой БПЛА подразделяются вначале по укрупненным сферам использования, а именно — для научных целей и для прикладных целей; последние же подразделяются на БПЛА для военного и гражданского применения.



В *научной сфере* БПЛА используются для получения новых знаний, причем не имеет значения то, из какой оБПЛАсти эти знания и где они потом будут применены. Это могут быть испытания новой техники (в т.ч. новых принципов полета) или наблюдения за природными явлениями.

Прикладная оБПЛАсть использования БПЛА представляет собой два основных направления – военное и гражданское.

Военные БПЛА по функциональному назначению можно классифицировать следующим образом:

- наблюдательные (могут использоваться, в частности, для корректировки огня на поле боя);
- разведывательные;
- ударные (для ударов по наземным целям посредством ракетного вооружения);
- разведывательно-ударные;
- бомбардировочные;
- истребительные (для уничтожения воздушных целей);
- радиотрансляционные;
- БПЛА РЭБ (для целей радиоэлектронной борьбы);
- транспортные;
- БПЛА-мишени;
- БПЛА-имитаторы цели;
- многоцелевые БПЛА.

Гражданская оБПЛАсть применения БПЛА весьма обширна. Отрасли и потребители услуг, предоставляемых с помощью БПЛА, также самые разные: от сельского хозяйства и строительства до нефтегазового сектора и сектора безопасности, а также рекламные компании, средства массовой информации и отдельные граждане. Рассмотрим следующие оБПЛАсти применения БПЛА в гражданских целях:

1. Аэрофотосъёмка;
2. Геодезия и картография;
3. Нефтегазовая отрасль;

4. Сельское хозяйство;
5. Экология и природопользование;
6. Безопасность;
7. Электроэнергетика;
8. Строительство и архитектура;
9. Горное дело;
10. Транспорт;
11. Связь;
12. здравоохранение;
13. Культура и досуг;
14. Логистика.

Аэрофотосъёмка

Основным направлением работ БПЛА на данный момент можно считать аэрофотосъемку. Аэрофотосъемку можно по праву считать одним из старейших типов работ, связанных с покорением воздушного пространства. Уже в 1858 г. французский фотограф Ф.Турнашон первым в мире выполнил фотосъемку местности с воздушного шара. В России первую фотосъемку с воздушного шара произвели 18 мая 1886 г., и в этом же году создали первый в России фотоаппарат, предназначенный для воздушной фотосъемки.

До недавнего времени все подобные аппараты были достаточно массивны, и их вряд ли получилось бы установить на достаточно компактные системы, и до начала двадцать первого века вся съемка производилась при помощи самолетов.

Но кроме самих устройств, которые производят съёмку, имелись ограничения и со стороны обработки полученных материалов. Так как БПЛА из-за малого веса и размеров не очень устойчивы в воздухе, а для создания карт необходим «эффект 3D», то есть соседние снимки должны иметь перекрытие (это части смежных снимков, на которых отображена одна и та же местность), составляющее в классическом методе 60-70%. И из-за особенностей БПЛА и малой высоты полета эти 60% превращаются в 90%, что приводит к огромному количеству снимков. На объект площадью 1 км². Получается около 2000 снимков, обработать такое количество снимков вручную и в разумное время является трудоемким процессом. И здесь на помощь пришли автоматизированные алгоритмы обработки фотоснимков и нейронные сети, которые позволили практически полностью автоматизировать процесс обработки.

Геодезия и картография

В настоящее время для геодезических изысканий и картографической деятельности требуются современные методы сбора информации о земной поверхности. Традиционные методы топографической съемки с использованием электронных тахеометров и ГЛОНАСС-приемников занимают большое количество времени и не

езде могут быть применимы ввиду сложного рельефа местности, отсутствия дорог, опасности встречи с дикими животными.

БПЛА – эффективный инструмент проведения аэрофотосъемки для создания высокоточных картографических материалов за короткий промежуток времени. Достоинства выполнения топографической аэрофотосъемки с помощью БВС:

1. Низкие финансовые затраты;
2. Высокая производительность – до 100 км² площадной съемки за 1 полёт;
3. Возможность получения снимков с плановой точностью до 5 см и детализацией до 2 см/пиксель;
4. Возможность съемки труднодоступных и удаленных участков местности;
5. Оперативность получения материалов.

Основное преимущество использования БПЛА для топографической съемки перед наземной инструментальной съемкой – экономия времени и денег, а перед космической съемкой – в разы лучшая точность и детализация.

По данным аэрофотосъемки с помощью фотограмметрической обработки снимков создаются материалы, которые служат основой для создания и обновления топографических карт и планов масштабного ряда от 1:500 и мельче.

Нефтегазовая отрасль

Транспортировка нефти и газа по магистральным трубопроводам вызывает необходимость в обеспечении надежной работы трубопроводных систем. Внештатные ситуации на линейных объектах нефтегазовой отрасли могут нанести не только большой экономический ущерб из-за потерь продукта и нарушения непрерывного процесса производства в смежных отраслях, но могут сопровождаться загрязнением окружающей среды, возникновением пожаров и даже быть угрозой жизни людей. При транспортировке больших объемов нефти и газа высокого давления необходимо обеспечивать надежность магистральных трубопроводов.

Естественное старение трубопроводов и значительное повышение требований к их экологической безопасности – характерные особенности условий работы трубопроводного транспорта. Эти моменты и определяют основные направления совершенствования системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в отрасли. К одному из таких направлений относят внедрение систем мониторинга технического состояния магистральных трубопроводов и их объектов. Процессы взаимодействия газопроводов и нефтепроводов с окружающей средой идут на больших территориях. Оперативно оценить их масштабы и состояние можно лишь на основе применения дистанционных, в первую очередь, аэрокосмических методов, позволяющих получать принципиально новую по качеству и полноте информацию не только в контрольных точках, но, что особенно важно, по всей трассе в целом.

Применение беспилотных авиационных средств позволяет оперативно осуществлять мониторинг интересующих объектов, с целью получения актуальной

информации и, как следствие, эффективного планирования работ, рационального использования ресурсов и обнаружения противоправной и несанкционированной деятельности на подконтрольных территориях.

Сельское хозяйство

Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве позволяет:

1. Создавать планово-картографическую основу;
2. Осуществлять мониторинг состояния растений по вегетации;
3. Обеспечивать контроль выполнения технологических операций, в том числе в целях пресечения неправомерной деятельности.

Для создания планово-картографической основы и мониторинга выполнения ряда технологических операций применяются БПЛА с фотоаппаратом и точным геодезическим приемником, с помощью которого производится облет с/х угодий и аэрофотосъемка. В результате съемки получаются: ортофотоплан с точной геодезической привязкой и цифровая модель местности.

Для мониторинга развития растений по вегетации и выполнения ряда технологических операций применяются БПЛА с мультиспектральной (гиперспектральной) камерой, с помощью которого производится облет с/х угодий и спектральная съемка. Мультиспектральные (гиперспектральные) камеры для мониторинга состояния растительности используют преимущественно диапазон от 400 до 1100 нм. При мультиспектральной съемке изображение получается в дискретных каналах, которые могут быть как широко, так и узкополосными, при этом, «спектр» объекта не воспроизводится. При съемке гиперспектральной камерой, изображение формируется в узких спектральных полосах, одновременно по всему диапазону, фиксируемому камерой, таким образом формируется спектральная характеристика объекта во всем диапазоне.

Экология и природопользование

Актуальность применения беспилотных авиационных комплексов в рамках оперативного и ежедневного мониторинга за состоянием природных ресурсов связана с использованием контрольно-измерительного оборудования для наблюдения за показателями компонентов окружающей природной среды. Эффективность беспилотной авиации с дистанционным управлением определяется такими параметрами как мобильность авиационных средств, минимальный промежуток времени, необходимый для подготовки и запуска воздушного судна, а также возможность использования БВС в сложных метеоусловиях. Подобные особенности позволяют своевременно обеспечить решение задачи по выполнению контрольных функций в сфере рационального природопользования и охраны природных ресурсов, а именно:

1. Изучение радиационной обстановки и контроль производственной безопасности.

2. Контроль концентрации загрязняющих веществ в компонентах окружающей природной среды.
3. Контроль за состоянием земель лесного фонда и особо охраняемых природных территорий.
4. Поиск и обнаружение несанкционированного размещения отходов производства и потребления.
5. Мониторинг лесных пожаров и чрезвычайных ситуаций на землях лесного фонда.
6. Антикризисное управление в период паводка и оценка ущерба, причинённого имуществу третьих лиц.
7. Мониторинг и контроль объектов животного мира, идентификация и учет особей.
8. Борьба с несанкционированной добычей водных биоресурсов и объектов животного мира.

Безопасность

Использование беспилотной авиации в целях обеспечения безопасности в любое время суток позволяет снизить ущерб при ликвидации стихийных бедствий, предупредить неправомерную деятельность в зонах ответственности, оповестить население о ЧС, проводить оперативное координирование действий наземных служб.

Такие беспилотные летательные аппараты применяются для:

1. Мониторинга территорий в любое время суток;
2. Оповещения и поиска людей;
3. Обнаружения несанкционированной деятельности и охрана объектов;
4. Координации действий наземных групп;
5. Мониторинга радиационного фона;
6. Обнаружения утечек газа.

Электроэнергетика

Беспилотная съемка ЛЭП существенно сокращает время на поиск повреждений при их аварийном отключении, увеличивает скорость контроля по сравнению с традиционным способом обследования с земли.

Основные возможности дистанционного зондирования объектов электроэнергетики при помощи БПЛА:

1. Оценка общего состояния трассы: характер растительности вдоль трассы, наличие пожарного мусора, строений, состояние пересечений с другими линиями или автодорогами, наличие подтоплений, заболоченностей и т.д.
2. Оценка состояния опор (траверсы, стойки, оттяжки, фундаменты): изгибы, поломки некомплектность.
3. Оценка состояния проводов, изоляторов и контактных соединений (общий вид, локальные перегревы, места перекрытия и т.д.).
4. Определение геометрических параметров: координат участков охранных и санитарных зон ЛЭП; координат и высот опор ЛЭП; длин пролетов ЛЭП; величин

стрел провеса проводов; определение местоположения пересечения с постройками, объектами дорожной сети и гидрографии; определение габаритов до объектов.

5. Оперативное создание цифровой модели местности, а также цифровой модели рельефа (без учета растительности, зданий, инженерных объектов и т.д.), цифровых ортофотопланов, планов и карт.
6. Высокая производительность – от десятков до сотен километров в день на одном воздушном судне.
7. Значительное снижение цены по сравнению с классическими методами дистанционной диагностики с Земли.

Строительство и архитектура

БПЛА благодаря повсеместному распространению технологии автоматизации фотограмметрических процессов, особое место в строительной отрасли занимает использование средств беспилотной авиации с геодезическим оборудованием в проектировании и своевременном контроле за соблюдением сроков исполнения работ подрядных организаций.

Современные беспилотные комплексы, предоставленные в распоряжение застройщика, позволяют заметным образом сэкономить время и финансовые издержки с учетом мониторинга изменений объектов стройплощадки на временной шкале и получить расчет объемов выемки и использования материалов для сооружения и развития сопутствующей инфраструктуры с контролем транспортной загрузки.

Данные дистанционного обследования, собранные с использованием БПЛА, позволяют выявить скрытые дефекты и определить масштаб положительных и негативных изменений. Визуализация собранных данных осуществляется с учетом построения цифровых моделей рельефа и местности, а также подготовкой информационной модели зданий и объектов инфраструктуры с определением стоимости эксплуатации и возможностью оперативной координации проектирования.

Проведение контрольных измерений в целях сопоставления данных проектной документации и реальных показателей во многом определяет специфику использования БВС при осуществлении следующих мероприятий:

1. Тепловизионная съемка с целью оценки тепловпотерь зданий и сооружений.
2. Создание точных и фотореалистичных 3D моделей местности для исследования поверхности.
3. Проведение исполнительной геодезической съемки с БВС.
4. Точное картографирование с изучением специфики конкретного ландшафта.
5. Подсчет объемов выемки и насыпи с контролем земляных работ.
6. Мониторинг соблюдения контрольных сроков возведения сооружения.
7. Идентификация состояния контрольных объектов с определением степени износа.

Горное дело

Сегодня крупные горнодобывающие предприятия активно привлекают технологические решения для автоматизации процессов и трансформации отрасли с появлением новых возможностей для проведения оценки и расчетов на месторождении.

Привлечение средств беспилотной авиации позволяет решить задачи, связанные с планированием горных работ по итогам проведения следующих мероприятий:

1. Картографирование местности, изучение рельефа, обнаружение и визуализация его изменений.
2. Расчет объемов по добыче полезных ископаемых.
3. Получение топографических данных с использованием аэрофотосъемки в труднодоступных местах.
4. Цифровизация полученных данных для построения трехмерных моделей местности и объектов инвентаризации.
5. Получение оперативных данных о возможностях и загрузке транспортной инфраструктуры, необходимости модернизации и пропускной способности.

Транспорт

Беспилотный транспорт отличает, прежде всего, система автономного управления, когда оператор техники находится вне средства передвижения или участие человека вовсе не предусмотрено. В ближайшее десятилетие эксперты ожидают массовое распространение беспилотных технологий в России и мире.

Развитие беспилотных автомобильных перевозок будет осуществляться по 2 направлениям:

- внедрение автомобильных грузовых междугородних перевозок на ключевых магистралях. К 2024 году планируется запуск первых проектов беспилотных автомобильных грузовых перевозок на трассе М-11;
- развитие грузовых и пассажирских перевозок в крупнейших агломерациях.

Распространение автономного водного транспорта будет со временем происходить как в пассажирских, так и грузовых перевозках.

В малонаселенных и труднодоступных районах использование беспилотников позволит быстро и качественно оказывать почтовые и курьерские услуги. Повышение грузоподъемности специализированных беспилотников в совокупности с их удешевлением станет стимулом к сокращению расходов на строительство и содержание сети аэродромов на удаленных территориях и иной транспортной инфраструктуры, а также приведет к существенным изменениям на рынке электронной торговли.

Связь

Среди различных обБПЛАстей использования БПЛА их применение в качестве ретрансляторов в системах беспроводной коммуникации является одним из важнейших (рис. 49).

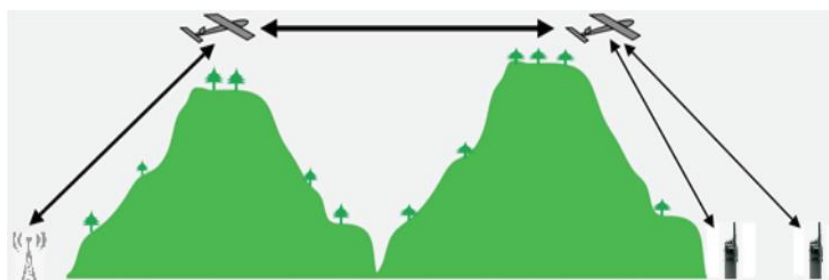


Рис. 49. Применение БПЛА для ретрансляции сигнала

Системы связи, использующие БПЛА, обБПЛАдают важнейшим преимуществом – в отличие от наземных систем ретрансляции сигналов, их функционирование не может быть затруднено затенением городской или горной местностью или повреждением инфраструктуры связи, вызванным природными катастрофами. Стоит отметить, что помимо использования БПЛА альтернативным решением для обеспечения беспроводной коммуникации является применение иных объектов, таких как, например, воздушные шары. Обычно они функционируют, находясь в стратосфере, что примерно в десятках километров над земной поверхностью. Однако БПЛА (обычно функционирующие на высоте, не превышающей нескольких километров) имеют ряд преимуществ по сравнению с подобными системами и их наземными и спутниковыми аналогами. Во-первых, применение связано с меньшими материальными затратами и более быстрой подготовкой, что делает их подходящим вариантом для кратковременного использования. Кроме того, эксплуатация БПЛА для подобных целей часто обеспечивает прямую видимость объектов связи для БПЛА, что приводит к повышению качества связи. Высокая степень маневренности подобных аппаратов также отражается на улучшении связи БПЛА благодаря возможности адаптации к особенностям местности, в которой они действуют. Более того, возможен вариант функционирования БПЛА, при котором качество связи может оказывать влияние на особенности процесса их полета. Например, при наличии стабильной связи с наземными объектами скорость полета аппарата будет уменьшаться, чтобы обеспечить передачу большего количества данных. БПЛА благодаря данным преимуществам БПЛА могут стать важнейшим компонентом систем беспроводной коммуникации в будущем.

Здравоохранение

В сфере здравоохранения можно выделить следующие примеры использования беспилотных летательных аппаратов:

- Доставка крови, медикаментов, анализов, а также органов посредством беспилотных авиационных систем.
- Использование БПЛА в качестве медицинского оборудования. Например, БПЛА-дефибриллятор.

- Обработка антисептическими и дезинфицирующими средствами потенциально заражённых территорий.
- Мониторинг мест массового скопления людей, карантинных зон.
- Перевозка пациентов посредством БПЛА.

Культура и досуг

Наиболее очевидное применение БПЛА – съёмка земной поверхности. Многие пользователи приобретают БПЛА для того, чтобы снимать масштабные или удалённые объекты. Камера БПЛА позволяет подлететь к достопримечательности и запечатлеть её. Также некоторые пользователи предпочитают снимать себя.

Кроме этого, БПЛА можно использовать для панорамных съёмок спортивных мероприятий. При этом зрелищно будет выглядеть практически любой вид спорта: от гольфа до Формулы 1.

БПЛА часто применяют при съёмке промороликов, рекламных кампаний, а также на торжественных церемониях, различных мероприятиях.

Использование БПЛА в кинематографе позволяет сократить общий бюджет картины за счёт отказа от дорогостоящих съёмок с вертолётa. С помощью БПЛА можно снимать красивые кадры на более низкой высоте. Высокая маневренность позволяет беспилотнику вести запись с таких ракурсов, которые невозможны для любой другой техники.

Логистика

Безусловно, одно из наиболее трендовых использований беспилотных летательных аппаратов – это в логистических целях, тем самым создавая новую среду конкуренции автомобильным транспортным компаниям. Здесь преобладают несколько основных направления: курьерское, для доставки «последней мили», аэротакси для транспортировки людей, и внутрипроизводственное, то есть складские БПЛА, способные считывать штрих-коды с упаковок и проводить технологичную инвентаризацию.

5.4. Классификация БПЛА по принципу полёта

По принципу полёта различают следующие виды БПЛА:

1. БПЛА самолётного типа;
2. БПЛА с гибким крылом;
3. БПЛА вертолётного типа;
4. БПЛА с машущим крылом;
5. БПЛА аэростатического типа.

Рассмотрим более подробно каждый из представленных видов БПЛА.

5.4.1. БПЛА самолётного типа

Этот тип аппаратов известен также как БПЛА с жестким крылом. Подъемная сила у этих аппаратов создается аэродинамическим способом за счет напора воздуха, набегающего на неподвижное крыло. Аппараты такого типа, как правило, отличаются большой длительностью полета, большой максимальной высотой полета и высокой скоростью.

Существует большое разнообразие подтипов БПЛА самолетного типа, различающихся по форме крыла и фюзеляжа. Практически все схемы компоновки самолета и типы фюзеляжей, которые встречаются в пилотируемой авиации, применимы и в беспилотной.

Все ЛА самолетного типа можно классифицировать по следующим конструктивным признакам:

- по числу и расположению крыльев;
- по типу фюзеляжа;
- по форме и расположению оперения;
- по типу, количеству и расположению двигателей;
- по типу и расположению шасси.

По количеству крыльев ЛА подразделяются на монопланы (с одним крылом) и бипланы (с двумя крыльями, расположенными одно над другим).

По расположению крыла относительно фюзеляжа различают низкоплан, среднеплан и высокоплан (рис. 50).

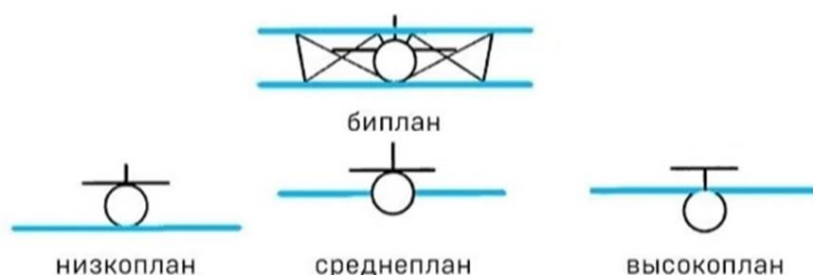


Рис. 50. Биплан и монопланы: низкоплан, среднеплан и высокоплан

Фюзеляжи, не несущие оперения, называют гондолами. Оперение в этом случае поддерживается двумя балками, и ЛА при этом называют двухбалочными.

В зависимости от расположения хвостового оперения различают (рис. 51):

- ЛА стандартной схемы, у которых стабилизатор и киль размещаются в хвостовой части фюзеляжа;
- ЛА схемы «утка», у которых горизонтальное оперение расположено впереди крыла;

- ЛА типа «бесхвостка», у которых горизонтальное оперение отсутствует.

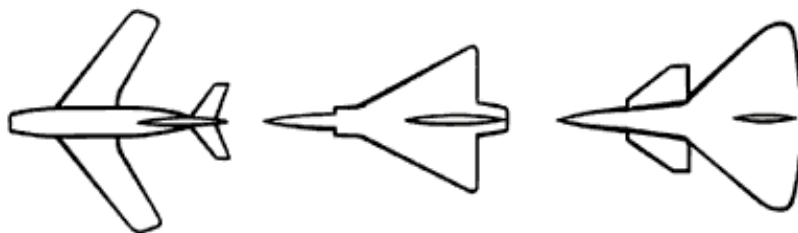


Рис. 51. Схемы ЛА в зависимости от расположения хвостового оперения: стандартная, «бесхвостка», «утка»

Большинство современных БПЛА самолётного типа выполнено по первой схеме, которая имеет следующие конструктивные разновидности:

- однокилевое оперение;
- разнесенное вертикальное оперение;
- V-образное оперение;
- Т-образное оперение.

Переднее расположение горизонтального оперения при использовании схемы «утка» повышает его эффективность, исключая его затенение впереди находящимся крылом.

Взаимное пространственное расположение частей ЛА и его оборудования называется компоновкой БПЛА. В настоящее время сложились две основные схемы компоновки БПЛА самолетного типа: стандартная (классическая) и «летающее крыло». Реже используют схему «бесхвостка».

К основным элементам БПЛА самолетного типа относятся: планер, включающий в себя: крыло, фюзеляж и хвостовое оперение, двигатель с топливной системой, систему управления ЛА с автопилотом, шасси и спецоборудование. Иногда можно обойтись без шасси. В этих случаях ЛА запускаются с рук или с помощью катапульты. Наиболее дорогостоящие элементы — спецоборудование, авионика, программное обеспечение. Двигатель ЛА может быть поршневым или электрическим. Причем, поршневой двигатель внутреннего сгорания обеспечивает большее полетное время. Однако такой мотор сложен, менее надежен и требует большего времени для подготовки ЛА к взлету. Поршневой бензиновый двигатель внутреннего сгорания на ЛА имеет смысл применять в тех случаях, когда необходима большая дальность полета. Электрический мотор, напротив, очень нетребователен к уровню квалификации обслуживающего персонала. Важными составляющими БПЛА являются системы управления, навигации и связи. Автопилот – с инерциальной системой – наиболее важный элемент системы управления ЛА. В комплект автопилота, кроме мощного процессора, входят трехосевые гироскоп и акселерометр, приемник спутниковой навигационной системы, датчик давления, датчик воздушной скорости. С такой авионикой ЛА сможет лететь строго по программе. В ЛА

имеется радиомодем для получения управляющих команд и отправки сообщений на землю телеметрических данных о полете и текущем местоположении.

По сравнению с вертолетным типом БПЛА самолетного типа имеют следующие преимущества:

- скорость полета;
- радиус действия;
- грузоподъемность;
- более простая конструкция.

Для аппаратов самолетного типа обычно необходима взлетно-посадочная полоса (ВПП). Для некоторых типов при взлете используют стартовые катапульты. Есть также самолетные БПЛА легкого класса, запускаемые "с руки". При посадке может применяться ВПП, парашют или специальные уловители (тросы, сетки, растяжки).

Взлеты и посадки традиционных БПЛА самолетного типа – процесс достаточно трудоемкий и затратный, требующий наличия специальных вспомогательных средств (ВПП, устройств запуска и посадки), поэтому разработчики новой техники все чаще обращаются к нетрадиционным схемам самолетных БПЛА, позволяющим создать безаэродромные БАС. Речь идет, прежде всего, о самолетах вертикального взлета и посадки (СВВП). На сегодняшний день существует много разновидностей аппаратов СВВП, которым в большей степени присущи свойства самолета, чем вертолета, обычно имеют в качестве движителя реактивный двигатель, импеллер или небольшие по размеру пропеллеры. Их условно можно разделить по положению фюзеляжа при взлете и посадке на аппараты с вертикальным положением фюзеляжа (тэйлситтеры) и аппараты с горизонтальным положением фюзеляжа.

Особой разновидностью тэйлситтеров можно считать *кольцепланы* (или колеоптеры) – летательные аппараты с крылом, имеющим при виде спереди правильную кольцевую форму. Внутренняя полость кольцевого крыла обдувается воздушной струей, отбрасываемой двумя соосными винтами противоположного вращения, расположенными на входе в крыло. Хвостовое оперение в конце короткого фюзеляжа и управляющие элероны, установленные на двух профилированных пилонах, крепящих кольцевое крыло к фюзеляжу, находятся в зоне интенсивного обдува струей от винтов, что повышает их эффективность. В 1959 во Франции фирмой SNECMA был построен экспериментальный пилотируемый кольцеплан с турбореактивным двигателем и проведены его испытания в вертикально подвешенном состоянии. При попытке перейти к горизонтальному полету произошло крушение, и после этого проект был закрыт. Однако в наши дни кольцепланы получили новое развитие, но уже в виде беспилотных аппаратов. Кольцевое замкнутое крыло имеет свои преимущества (нет срыва потока по краям, допускаются очень большие углы атаки, большая маневренность, большая прочность и меньшая масса крыла, хорошее соотношение массы полезной нагрузки к общей массе аппарата).

5.4.2. БПЛА с гибким крылом

Это дешевые и экономичные летательные аппараты аэродинамического типа, в которых в качестве несущего крыла используется не жесткая, а гибкая (мягкая) конструкция, выполненная из ткани, эластичного полимерного материала или упругого композитного материала, обладающего свойством обратимой деформации.

В этом классе БПЛА можно выделить беспилотные моторизованные парапланы, дельтапланы и БПЛА с упруго деформируемым крылом.

Беспилотный моторизованный параплан – аппарат на основе управляемого парашюта-крыла, снабжённый мототележкой с воздушным винтом для автономного разбега и самостоятельного полёта. Крыло обычно имеет форму прямоугольника или эллипса. Крыло может быть мягким, иметь жесткий или надувной каркас. Пример – разработки американской фирмы Atair Aerospace, которая предложила серию беспилотных парапланов под общим названием LEAPP (Long Endurance Autonomous Powered Paraglider – автономный параплан с длительным сроком службы). Их основное достоинство – экономичность. Они снабжены двигателями внутреннего сгорания и способны длительное время медленно барражировать над объектом, производя, например, видеосъемку. Для запуска требуется площадка длиной 2-3 м для короткого разбега. Недостатком беспилотных моторизованных парапланов является трудность управления ими, так как навигационные датчики не имеют жесткой связи с крылом. Ограничение на их применение оказывает также очевидная зависимость от погодных условий.

Беспилотный моторизованный дельтаплан – это аппарат на основе мягкого крыла дельтавидной формы. Такое крыло представляет собой три жесткие направляющие, соединённые между собой в передней точке и образующие в горизонтальной плоскости веер, с углом между трубами 90-140 градусов. Между трубами натянута прочная ткань. Две боковые направляющие и задняя кромка ткани образуют при виде сверху почти треугольник. Крыло крепится на тележку, на которой смонтированы двигатель с винтом (тянущим или толкающим) и аппаратура. Управление полётом осуществляется обычно с помощью дополнительных аэродинамических элементов, небольшой деформации крыла или с помощью перемещаемого центра тяжести. Скорость современных дельтапланов составляет от 25 км/ч до 100-130 км/ч, высота полётов достигает 6 км и более. По сравнению с беспилотными мотопарапланами мотодельтапланы значительно проще и стабильнее в управлении благодаря наличию жестких связей крыла с остальной конструкцией. Преимущество мотодельтаплана по отношению к другим БПЛА заключается в простоте и надёжности конструкции, дешевизне и компактности в сложенном виде, минимальной необходимой длине площадки для взлёта и посадки, бесшумности, отсутствию влияния вибраций от ротора несущего винта на аэродинамические элементы конструкции.

БПЛА с упруго деформируемым крылом – аппарат, крыло которого выполняется из композитного материала с большой степенью упругости. Это позволяет сворачивать крыло без опасения потерять его форму. Оно также хорошо противостоит соударениям с землей и препятствиями.


5.4.3. БПЛА вертолётного типа

Этот тип аппаратов известен также как БПЛА с вращающимся крылом. Часто их называют также VTOL UAV (Vertical Take-off and Landing UAV) – БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой. Последнее не совсем корректно, так как в общем случае вертикальный взлет и посадку могут иметь и БПЛА с неподвижным крылом (например, как в СВВП – за счет реактивного сопла, при взлете и посадке направляемого вертикально вниз).

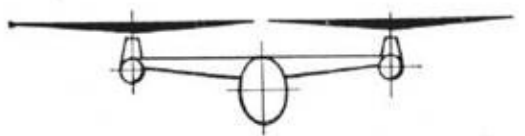
Подъемная сила у аппаратов этого типа также создается аэродинамически, но не за счет крыльев, а за счет вращающихся лопастей несущего винта (винтов). Крылья либо отсутствуют вовсе, либо играют вспомогательную роль. Очевидными преимуществами БПЛА вертолетного типа являются способность зависания в точке и высокая маневренность, поэтому их часто используют в качестве воздушных роботов.

Существует множество схем построения аппаратов вертолетного типа. Все рассматриваемые далее схемы построения вертолетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Схемы построения БПЛА вертолётного типа.

Название	Описание	Схема
Классическая одновинтовая схема с хвостовым рулевым винтом	Одновинтовая схема. Это летательный аппарат с приводным несущим винтом, который при подъеме аппарата вращается в горизонтальной плоскости. Вертолет движется горизонтально за счёт наклона плоскости вращения винта.	

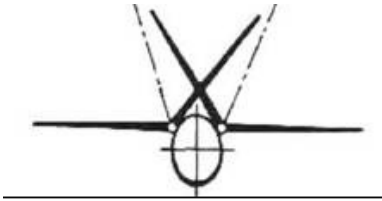
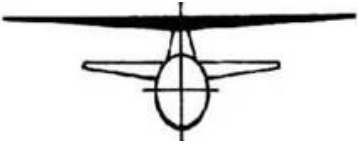
Продолжение таблицы 2.

Название	Описание	Схема
Двухвинтовая поперечная схема	Двухвинтовая поперечная схема: вертолеты имеют два	



	<p>несущих винта, установленных по бокам фюзеляжа на консолях крыла или фермах. Реактивные моменты уравниваются противоположным направлением вращения винтов, которые могут иметь перекрытие при количестве лопастей менее 4-х.</p> <p>Достоинства схемы: аэродинамическая симметрия схемы; небольшие индуктивные потери на режиме горизонтального полета, что повышает экономичность и дальность полета; относительно высокая грузоподъемность.</p> <p>Недостатки схемы: сложность конструкции системы управления и трансмиссии, необходимость синхронизации вращения винтов, дополнительная масса и лобовое сопротивление фермы, поддерживающей крыло.</p>	
--	--	--

Продолжение таблицы 2.


Название	Описание	Схема
----------	----------	-------

<p>Схема с перекрещивающимися несущими винтами</p>	<p>Схема с перекрещивающимися несущими винтами (синхроптер). У таких вертолетов несущие винты расположены по бокам фюзеляжа, а их оси наклонены наружу. Из-за наклона винтов реактивные моменты уравниваются только относительно вертикальной оси, а их проекции относительно поперечной оси складываются, образуя момент тангажа, что необходимо учитывать при расчете продольной устойчивости. Достоинством схемы являются малые габариты вертолета, а недостатками – необходимость синхронизации вращения винтов, сложная система трансмиссии, большой уровень вибраций, возникновение продольного момента, усложняющего балансировку вертолета. Вертолет хорошо приспособлен для вертикального подъема грузов.</p>	
<p>Вертолёты с крылом</p>	<p>Рост скорости вертолета ограничен срывом потока с отступающей лопасти несущего винта. Для увеличения скорости полета необходимо разгрузить несущий винт. Это может осуществляться постановкой крыла на вертолет.</p>	

Продолжение таблицы 2.

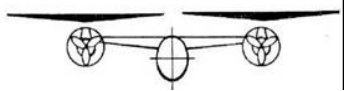
Название	Описание	Схема
<p>Двухвинтовая соосная схема</p>	<p>Двухвинтовая соосная схема: вертолеты имеют два несущих винта, расположенных на одной оси, с противоположным направлением вращения, за счет чего и компенсируются реактивные моменты. Плоскости вращения винтов удалены друг от друга для предотвращения схлестывания лопастей нижнего и верхнего винтов на всех режимах полета. Достоинством схемы являются малые габариты. Недостатки схемы: сложная система трансмиссии и управления, недостаточная путевая устойчивость на авторотации.</p>	
<p>Двухвинтовая продольная схема</p>	<p>Двухвинтовая продольная схема. У таких вертолетов реактивный момент компенсируется за счет противоположного направления вращения винтов, которые расположены один за другим вдоль фюзеляжа. Несущие винты располагаются с перекрытием, причем задний винт имеет превышение, чтобы уменьшить вредное влияние на него потока от переднего винта. Достоинство схемы – большой объем грузовой кабины. Недостатками являются сложная система трансмиссии, необходимость синхронизации вращения несущих винтов, большие индуктивные потери при горизонтальном полете и переменные нагрузки на несущих винтах, а также сложная посадка при авторотации.</p>	

Продолжение таблицы 2.


Название	Описание	Схема
<p>Реактивные вертолёты</p>	<p>У таких вертолетов механический привод несущего винта заменен реактивным. Суммарный крутящий момент на втулке несущего винта близок к нулю, так как момент несущего винта от сил сопротивления воздуха уравнивается моментом, создаваемым тягой реактивных двигателей или сопел, установленных на концах лопастей. При этом отпадает необходимость в мощном рулевом винте. Реактивный привод несущего винта может осуществляться, например, установкой на концах лопастей реактивных двигателей различного типа, топливо к которым подается через втулку и лопасти винта. Достоинствами вертолетов с реактивным приводом являются простая система трансмиссии и высокая весовая отдача.</p> <p>К недостаткам следует отнести сложную конструкцию втулки и лопасти несущего винта, трудность создания специальных двигателей, работающих в поле центробежных сил, большой расход топлива, а также шум от прямоточных и пульсирующих воздушно-реактивных двигателей.</p>	

Продолжение таблицы 2.

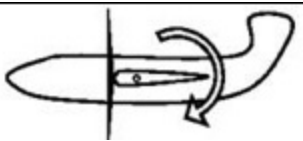

Название	Описание	Схема
----------	----------	-------

<p>Винтокрылы</p>	<p>Для увеличения скорости полета у этих аппаратов используют крылья и дополнительные тянущие двигатели. Подъемная сила на режиме вертикального полета создается несущим винтом, а на режиме горизонтального полета – крылом с дополнительными тянущим (или толкающим) винтом. В полёте наличие крыла и дополнительных движителей, как у самолёта, позволяет ему развивать достаточно большую скорость по сравнению с аналогичным вертолётom, что является основным преимуществом. В горизонтальном полёте несущий винт винтокрыла работает в режиме авторотации (или очень близким к нему), как у автожира. Недостатком является сложность конструкции.</p>	
-------------------	--	---

Продолжение таблицы 2.

Название	Описание	Схема
Гибридные винтокрылые аппараты		
Автожиры	<p>Автожир (другие названия: гирокоптер, гироплан, ротаплан, англоязычные: autogiro, gyrocopter, gyroplane, rotorplane) – схема, подобная самолёту, у которого в качестве крыла (или в дополнение к нему) установлен свободно вращающийся винт.</p> <p>Большинство автожиров не могут взлетать вертикально, но им требуется гораздо более короткий разбег для взлёта (10-50 м, с системой предраскрутки ротора), чем самолётам. Почти все автожиры способны к посадке без пробега или с пробегом всего несколько метров. По маневренности они находятся между самолётами и вертолётами, несколько уступая вертолётам и абсолютно превосходя самолёты. Автожиры превосходят самолёты и вертолёты по безопасности полёта. Самолёту опасна потеря скорости, поскольку он сваливается при этом в штопор. Автожир при потере скорости начинает снижаться. При отказе мотора автожир не падает, вместо этого он снижается (планирует), используя эффект авторотации (несущий винт вертолёта при отказе двигателя также переводится в режим авторотации, но на это теряется несколько секунд и падают обороты ротора, важные при вынужденной посадке). При посадке автожиру не требуется посадочная полоса.</p>	

Продолжение таблицы 2.

Название	Описание	Схема
<p>Конвертопланы</p>	<p>Конвертоплан – летательный аппарат с поворотными винтами, которые на взлёте и при посадке работают как подъёмные, а в горизонтальном полёте – как тянущие (при этом в полете подъёмная сила обеспечивается крылом самолётного типа). Таким образом, этот аппарат ведет себя как вертолет при взлете и посадке, но как самолет в горизонтальном полете. Большие винты конвертоплана помогают ему при вертикальном взлете, однако в горизонтальном полете они становятся менее эффективными по сравнению с винтами меньшего диаметра традиционного самолета.</p> <p>В некоторых конструкциях используют не открытые винты, а импеллеры. Импеллер ОБПЛАдет очень высокой скоростью отбрасываемого воздушного потока, что позволяет обойтись очень маленькими крыльями, обеспечивая высокую компактность конвертоплана.</p> <p>Среди конвертопланов можно выделить три принципиально различающихся подкласса: аппараты с поворотными винтами, с поворотным крылом и со свободным крылом.</p>	 <p>Схема конвертоплана, показывающая корпус, крыло и поворотный винт.</p>
<p>Многовинтовые вертолёт (мультикоптеры)</p>	<p>Многовинтовые вертолеты (мультикоптеры). К этой группе относятся вертолеты, имеющие больше двух несущих винтов. Реактивные моменты уравниваются за счет вращения несущих винтов попарно в разные стороны или наклона вектора тяги каждого винта в нужном направлении. Беспилотные мультикоптеры, как правило, относятся к классам мини- и микро-БПЛА.</p>	 <p>Схема мультикоптера с четырьмя несущими винтами, показывающая их расположение и направление вращения.</p>

5.4.4. БПЛА с машущим крылом

БПЛА с машущим крылом основаны на бионическом принципе – копировании движений, создаваемых в полете летающими живыми объектами – птицами и насекомыми. Хотя в этом классе БПЛА пока нет серийно выпускаемых аппаратов, и практического применения они пока не имеют, во всем мире проводятся интенсивные исследования в этой области. В последние годы появилось большое количество разных интересных концептов малых БПЛА с машущим крылом.

Главные преимущества, которые имеют птицы и летающие насекомые перед существующими типами летательных аппаратов – это их энергоэффективность и маневренность. Если разработчикам "машущих" БПЛА удастся по показателям энергоэффективности и маневренности приблизиться к тому, что уже имеется в живой природе, то тогда их усилия будут не напрасными, и можно ожидать, что этот класс аппаратов начнет находить свое применение.

Виды БПЛА с машущим крылом:

1. *Орнитоптеры* – летательные аппараты, основанные на имитации движений птиц.

При создании БПЛА, имитирующих движения птиц, много внимания уделяется механическому приводу крыльев. Механические передачи должны обеспечивать необходимый набор движений и при этом быть простыми и легкими. Кроме махов вверх/вниз с нужной частотой, система управления движением в подходящие по внешним условиям моменты должна реализовывать режим парения для того, чтобы аппарат мог максимально эффективно использовать набегающие и восходящие потоки воздуха.

2. *Энтомоптеры* – летательные аппараты с машущими крыльями, имитирующие летающих насекомых.

БПЛА, имитирующие движения летающих насекомых, условно можно подразделить на имитаторы четырехкрылых и имитаторы двукрылых насекомых. Четырехкрылые (стрекозы, бабочки) совершают более сложные движения, чем двукрылые, и возможностей управления полетом у них гораздо больше.

5.4.5. БПЛА аэростатического типа

БПЛА аэростатического типа – это особый класс БПЛА, в котором подъемная сила создается преимущественно за счет архимедовой силы, действующей на баллон, заполненный легким газом (как правило, гелием). Этот класс представлен, в основном, беспилотными дирижаблями.

Дирижабль – летательный аппарат легче воздуха, представляющий собой комбинацию аэростата с движителем (обычно это винт (пропеллер, импеллер) с электрическим двигателем или ДВС) и системы управления ориентацией.

По конструкции дирижабли подразделяются на три основных типа: мягкий, полужесткий и жесткий. В дирижаблях мягкого и полужесткого типа оболочка для

несущего газа мягкая, которая приобретает требуемую форму только после закачки в неё несущего газа под определённым давлением. В дирижаблях мягкого типа неизменяемость внешней формы достигается избыточным давлением несущего газа, постоянно поддерживаемым баллонетами – мягкими ёмкостями, расположенными внутри оболочки, в которые нагнетается воздух. Баллонеты, кроме того, служат для регулирования подъемной силы и управления углом тангажа (дифференцированная откачка/закачка воздуха в баллонеты приводит к изменению центра тяжести аппарата). Дирижабли полужёсткого типа отличаются наличием в нижней части оболочки жесткой (в большинстве случаев на всю длину оболочки) фермы. В жёстких дирижаблях неизменяемость внешней формы обеспечивается жестким каркасом, обтянутым тканью, а газ находится внутри жёсткого каркаса в баллонах из газонепроницаемой материи. Жесткие дирижабли в беспилотном исполнении пока практически не применяются.

5.5. Классификация БПЛА по лётным характеристикам

Рассмотрим следующие классификации БПЛА по лётным характеристикам:

1. Классификация UVS International;
2. Российская универсальная классификация.

5.5.1. Классификация UVS International

Кроме принципа полета, для классификации БПЛА может быть использовано большое количество объективных критериев: взлетная масса, дальность, высота и продолжительность полета, размеры аппарата и т.д.

Международной ассоциацией по беспилотным системам AUUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International, до 2004 она называлась Европейской ассоциацией по беспилотным системам – EURO UVS) была предложена универсальная классификация БПЛА, объединяющая многие из названных критериев (см. таблицу 3).

Таблица 3. Универсальная классификация БПЛА по лётным параметрам.

Группа	Категория		Взлётная масса, кг	Дальность полёта, км	Высота полёта, м	Продолжительность полёта, ч
	Рус.	Англ.				
Малые БПЛА Нано-БПЛА	Нано-БПЛА	Nano	< 1	100	1	
	Микро-БПЛА	Micro	< 5	< 10	250	1
	Мини-БПЛА	Mini	5-150*	< 10	150-300*	< 2
Тактические	Легкие БПЛА для контроля переднего края обороны	Close Range (CR)	25-150	10-30	3000	2-4
	Легкие БПЛА с малой дальностью полета	Short Range (SR)	50-250	30-70	3000	3-6
	Средние БПЛА	Medium Range (MR)	150-500	70-200	5000	6-10

Продолжение таблицы 3.

Группа	Категория		Взлётная масса, кг	Дальность полёта, км	Высота полёта, м	Продолжительность полёта, ч
	Рус.	Англ.				

Тактические	Средние БПЛА с большой продолжительностью полета	Medium Range Endurance (MRE)	500-1500	>500	8000	10-18
	Маловысотные БПЛА для проникновения в глубину обороны противника	Low Altitude Deep Penetration (LADP)	250-2500	>250	50-9000	0,5-1
	Маловысотные БПЛА с большой продолжительностью полета	Low Altitude Long Endurance (LALE)	15-25	>500	3000	>24
	Средневысотные БПЛА с большой продолжительностью полета	Medium Altitude Long Endurance (MALE)	1000-1500	>500	5000-8000	24-48
Стратегические	Высотные БПЛА с большой продолжительностью полета	High Altitude Long Endurance (HALE)	2500-5000	>2000	20000	24-48
	Боевые (ударные) БПЛА	Unmanned Combat Aerial Vehicles (UCAV)	>1000	1500	12000	2
Специального назначения	БПЛА, оснащенные боевой частью (летального действия)	Lethal (LET) (Offensive)	< 150	300	4000	3-4
	БПЛА - ложные цели	Decoys (DEC)	150-500	0-500	50-5000	<4
	Стратосферные БПЛА	Stratospheric (STRA)	>2500	>2000	>20000	>48
	Экзостратосферные БПЛА	Exo-stratospheric (EXO)	–	–	> 30500	–
* – зависит от ограничений, принятых в конкретной стране						

5.5.2. Российская универсальная классификация

Российская классификация отличается от предложенной UVS International по ряду параметров – некоторые классы зарубежной классификации отсутствуют в РФ, лёгкие БПЛА в России имеют значительно большую дальность и т. д. Согласно российской классификации, которая ориентирована преимущественно пока только на военное назначение аппаратов, БПЛА можно систематизировать следующим образом:

1. Микро- и мини-БПЛА ближнего радиуса действия – взлётная масса до 5 кг, дальность действия до 25-40 км.

2. Лёгкие БПЛА малого радиуса действия – взлётная масса 5-50 кг, дальность действия 10-70 км.
3. Лёгкие БПЛА среднего радиуса действия – взлётная масса 50-100 кг, дальность действия 70-150 (250) км.
4. Средние БПЛА – взлётная масса 100-300 кг, дальность действия 150-1000 км.
5. Среднетяжёлые БПЛА – взлётная масса 300-500 кг, дальность действия 70-300 км.
6. Тяжёлые БПЛА среднего радиуса действия – взлётная масса более 500 кг, дальность действия 70-300 км.
7. Тяжёлые БПЛА большой продолжительности полёта – взлётная масса более 1500 кг, дальность действия около 1500 км.
8. Беспилотные боевые самолёты – взлётная масса более 500 кг, дальностью около 1500 км.

5.6. Монокоптер

Монокоптеры – это тип беспилотных летательных аппаратов, у которых есть только один двигатель, и с помощью одного двигателя мы можем перемещать БПЛА только вверх и вниз. Эта основная концепция исключает монокоптеры из ряда полноценных БПЛА, поскольку невозможно создать разность потоков воздуха для управления БПЛА. Аппарат будет взлетать и лететь, но изменение его движения по различным осям координат невозможно.

5.7. Мультикоптеры. Различные схемы построения мультикоптеров

Существует несколько разновидностей мультикоптеров, различающихся количеством и расположением двигателей относительно центра аппарата.

Виды мультикоптеров:

1. Бикоптер;
2. Трикоптер;
3. Квадрокоптер;
4. Гексакоптер;
5. Октокоптер.

Бикоптеры имеют два электродвигателя (рис. 52), один из которых вращается по часовой стрелке (CW), а другой против часовой стрелки (CCW). Управление достигается за счет независимого изменения скорости каждого ротора для создания желаемой общей тяги. Поместив центр тяги, как в поперечном, так и в продольном направлении, можно создать желаемый общий крутящий момент или силу поворота, изменяя скорость каждого ротора. Пропеллеры на бикоптере вращаются в обратном направлении друг относительно друга. Эти пары пропеллеров будут создавать подъемную силу, не вращаясь в одном направлении. Каждый ротор генерирует мощность и крутящий момент вдоль своей оси вращения, а также силу сопротивления в направлении, противоположном траектории полета транспортного средства. Чистый

аэродинамический крутящий момент и угловое ускорение по оси рыскания равны нулю, если все роторы вращаются с одинаковой угловой скоростью.



Рис. 52. Схема бикоптера

Трикоптеры имеют три электродвигателя (рис. 53). Они могут летать в большем количестве направлений, чем бикоптеры, а также могут нести значительный груз. У трикоптеров есть Y- или T-конфигурации, причем электродвигатели расположены в удаленной части лучей. Если взять в руки трикоптер, то можно заметить, что он имеет гораздо большую устойчивость, чем бикоптер, из-за дополнительного пропеллера. Хотя даже при легком ветре управление трикоптером может стать нестабильным. По сравнению с квадрокоптером, у трикоптера больше возможностей по рысканию, что означает, что, когда квадрокоптер или гексакоптер движется по рысканию, половина двигателей замедляется, а другая половина ускоряется. Если коптер летит на максимальной скорости (все моторы включены), ему придется замедлиться, чтобы достичь рыскания. С другой стороны, трикоптер использует сервопривод для достижения рыскания, поэтому он теряет меньше тяги в той же ситуации.

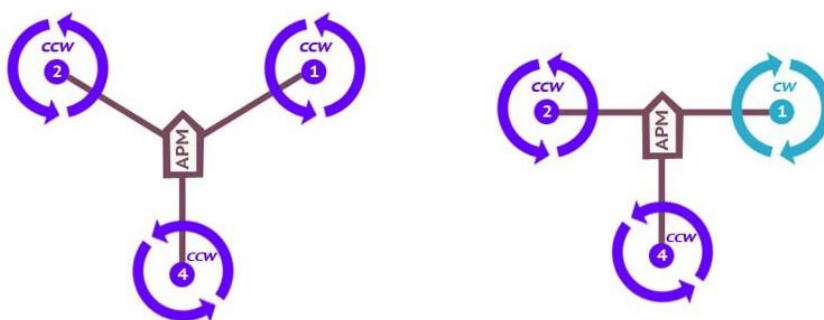


Рис. 53. Схема трикоптера

Квадрокоптер – самый популярный мультикоптер (рис. 54). Все предпочитают квадрокоптеры, будь то любители или профессиональные производители БПЛА, потому что было продемонстрировано, что четыре – это оптимальное число электродвигателей для баланса цены, производительности, стабильности и времени полета. Квадрокоптер – это многороторный БПЛА с 4-мя электродвигателями, летающий по вертолётной схеме. Этот БПЛА стабилизирует свой полет с помощью электронных датчиков и системы управления. Есть три типа квадрокоптеров – квадрокоптер в форме плюса, квадрокоптер крестообразной формы и квадрокоптер формы в виде буквы Н (подробнее описано в разделе 5.8.5). Все формы стабильны в прямом полете, но квадрокоптеру требуется управление рысканием в прямом полете. Принципы управления рысканием

идентичны для всех конфигураций, но принципы управления по тангажу и крену различны в случае поперечной конфигурации. БПЛА с Н-образной рамой были первыми и самыми популярными. Они могут работать с большим количеством FPV-снаряжения, работая от LiPo батареи. У них более широкое основание, что обеспечивает устойчивое передвижение. Батареи для БПЛА с Н-образной рамой, как правило, служат дольше, поскольку их расположение предотвращает легкое повреждение. Это также лучшая рама для гонок, потому что в ней много места для легкой сборки.

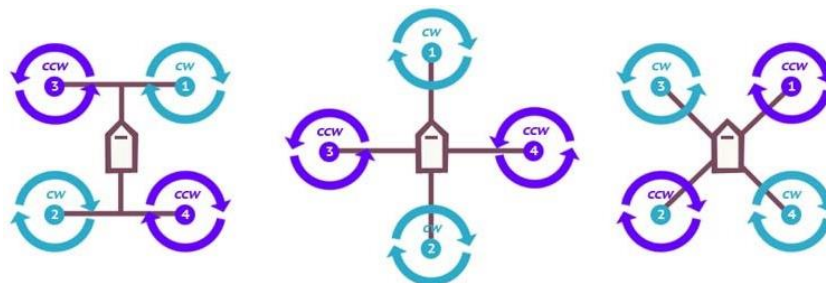


Рис. 54. Схема квадрокоптера

Гексакоптер имеет шесть электродвигателей (рис. 55). В нижней части машины есть пара опор, которые позволяют ей безопасно приземляться на землю. Из-за своих шести электродвигателей гексакоптер является более мощным летательным аппаратом, чем квадрокоптер, и может нести больше полезной нагрузки. У гексакоптера есть существенное преимущество, заключающееся в том, что даже если один из пропеллеров откажет, аппарат все еще может летать БПЛА благодаря другим пяти. Это означает, что, если один из пропеллеров выйдет из строя, БПЛА не упадет на землю. Устройство не сможет летать, если два пропеллера выйдут из строя, но оно останется достаточно устойчивым, чтобы безопасно приземлиться. Гексакоптер может лететь быстрее и достигать больших высот, чем квадрокоптер. Поскольку гексакоптеры более дорогие, они обычно используются для перевозки более ценных грузов, которые нельзя уничтожить в случае аварии. Они также крупнее и сложнее в сборке и хранении, чем квадрокоптеры.

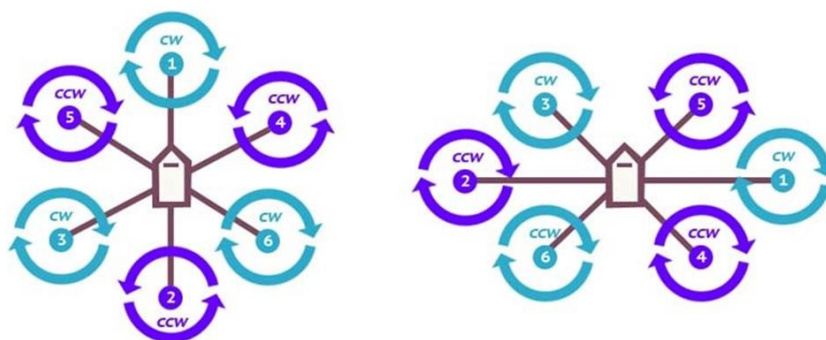


Рис. 55. Схема гексакоптера

Октокоптер – это БПЛА с восемью пропеллерами (рис. 56), он значительно мощнее квадрокоптера или гексакоптера. По сравнению с предыдущими мультикоптерами, они могут летать выше, двигаться быстрее и нести более тяжелую

полезную нагрузку. Октокоптер также чрезвычайно устойчив в воздухе, что позволяет снимать кадры с высококачественной графикой и минимальным дрожанием. Когда речь идет о выборе качественного БПЛА, они считаются лучшими из лучших из-за их высокой производительности. Они используются для узкоспециализированных задач, которые могут потребовать перемещений под дождем или сильными порывами ветра. Прочность машины позволяет ей выдерживать суровые погодные условия, не сбиваясь с курса. Даже если два-три пропеллера выйдут из строя, БПЛА продолжит летать. Когда дело доходит до прикрепления дорогостоящих камер или хрупкого груза к БПЛА, октокоптер – лучший вариант, поскольку он имеет наилучшие шансы сохранить полезную нагрузку в безопасности и выполнить работу в срок. Октокоптер часто используют в фильмах и телешоу, требующих съемки с большой высоты. Поскольку это оборудование настолько огромно, держать его в доме может быть сложно. Кроме того, следует проявлять осторожность при перевозке БПЛА в автомобиле или грузовике, чтобы избежать повреждений. Поскольку октокоптер потребляет много энергии, он не может оставаться в воздухе очень долго, прежде чем ему потребуется приземлиться для перезарядки. Если вы хотите использовать октокоптер, имейте запасные батареи на случай, если аппарат израсходует свой заряд до того, как работа будет завершена.

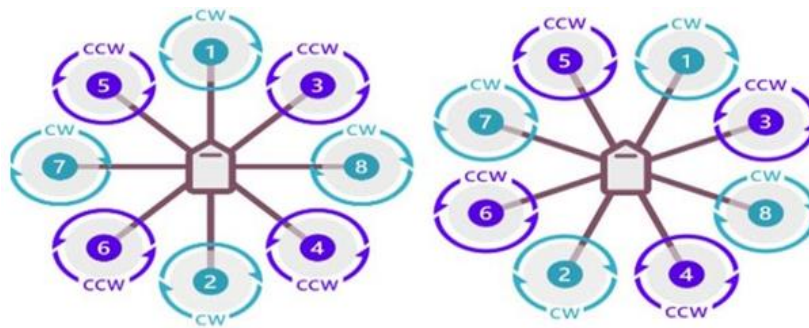


Рис. 56. Схема октокоптера

5.8. Обязательный состав компонентов квадрокоптера

В состав беспилотного летательного аппарата входят следующие компоненты (рис. 57):

1. Электродвигатель;
2. Плата распределения питания;
3. Пропеллер;
4. Приёмник радиосигнала;
5. Рама;
6. Регуляторы оборотов электродвигателей;
7. Аккумулятор;
8. Полётный контроллер.



Рис. 57. Состав беспилотного летательного аппарата

Рассмотрим каждый из представленных компонентов более подробно.

5.8.1. Электродвигатели

Одна из самых главных частей квадрокоптера – *электродвигатели*. Электродвигатели квадрокоптеров подразделяются на коллекторные (щёточные) и бесколлекторные (бесщёточные). В данном разделе будут рассмотрены их основные отличия, преимущества и недостатки, а также критерии, по которым следует выбирать электродвигатель для летательного аппарата.

Устройство и принцип действия щёточного (коллекторного) электродвигателя БПЛА

Коллекторные электродвигатели (рис. 58) используются, в основном, на лёгких летательных аппаратах начального уровня, а чаще всего – на игрушках. Причина в том, что они не могут развивать значительные обороты и мощность, что приводит к развитию малой подъемной силы. Такой тип моторов склонен к поломкам, так как у них больше трущихся компонентов.

Принцип работы коллекторных электродвигателей (рис. 59): мотор состоит из корпуса, внутри него находятся магниты – плюс и минус, корпус неподвижен, а в движение приводится ротор с обмоткой с помощью щеток, которые подают электричество на обмотку. Он неподвижен и имеет щёточно-коллекторный узел. Коллектор представляет собой набор контактов, которые расположены на вращающемся элементе (роторе). Щётка – скользящий контакт – расположена на неподвижном элементе (статоре). В движение приводится ротор с помощью щёток, подающих постоянный ток на обмотку. Направление вращения зависит от полярности.

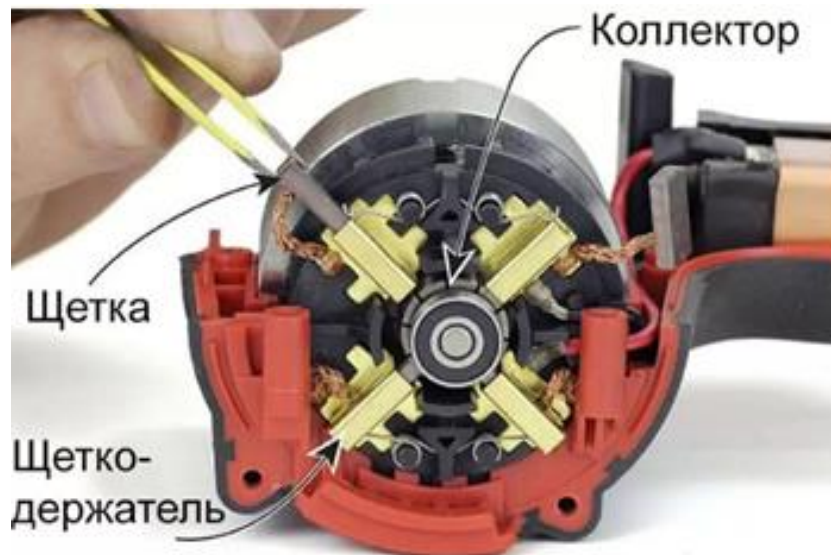


Рис. 58. Устройство щёточного электродвигателя

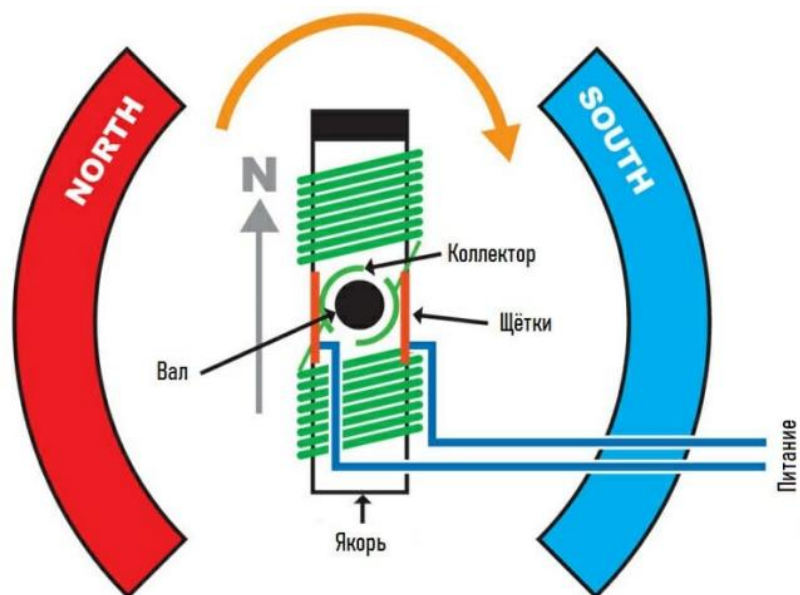


Рис. 59. Схема устройства коллекторного электродвигателя

Достоинства данного типа электродвигателя:

- Малый вес и габаритные размеры;
- Низкая цена;
- Простота ремонта и обслуживания.

Недостатки данного типа двигателя:

- Низкий коэффициент полезного действия;
- Малая скорость вращения;
- Склонность к перегреву;
- Хрупкость;
- Небольшой ресурс.

Устройство и принцип действия бесщёточного (бесколлекторного) электродвигателя

Бесщёточный электродвигатель состоит из следующих элементов (рис. 60, 61):

- **Статор.** Статор – это обмотка электродвигателя, состоящая из 3 фаз длинных тонких проводов, которые обматываются вокруг сердечника. Провода покрыты эмалью/лаком, чтобы предотвратить короткое замыкание в обмотке при работе. Что позволяет двигателю работать даже под водой. Если вспомнить курс школьной физики, то известно, что ток, протекающий по проводу, создает магнитное поле. Когда провод обмотан вокруг какого-то объекта, это приводит к увеличению магнитного поля. Чем больше ток, тем больше сила магнитного поля и больше крутящий момент у двигателя. Однако большие токи приводят к сильному нагреву обмотки, особенно если использовались тонкие провода. В таком случае защитная эмаль может оплавиться, что приведёт к короткому замыканию, и двигатель станет нерабочим.
- **Неодимовые магниты.** Эти магниты из редкоземельных металлов генерируют фиксированное магнитное поле, они обладают малыми размерами, но создают очень сильное магнитное поле. Элементы приклеены эпоксидной смолой или цианокрилатом к корпусу мотора, а точнее к его колоколу.
- **Корпус двигателя** защищает магниты и обмотку. Обычно он изготовлен из легкого металла такого, как алюминий. Более продвинутые двигатели имеют корпуса, которые сделаны как вентиляторы, т.е. при вращении нагоняют воздух на обмотку сердечника, чтобы охладить её.
- **Вал мотора** жестко прикреплен к верхней части. Это рабочий компонент мотора, который передает крутящий момент на пропеллеры.

Смена направления вращения производится путём смены полярности (меняются местами два контакта из трёх). Такие электроприводы обладают разным числом полюсов, и чем их больше, тем медленнее, но со значительным усилием, будет вращаться ротор.

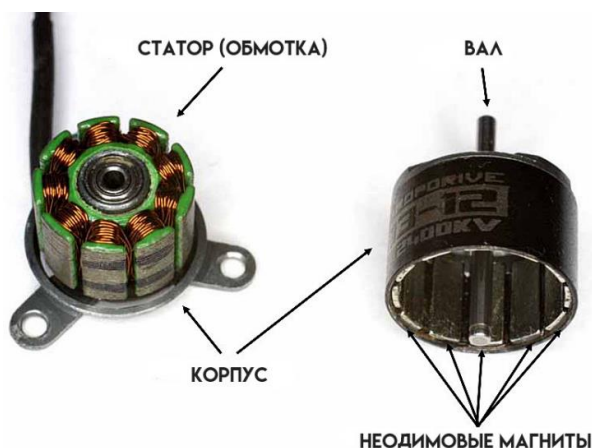


Рис. 60. Бесщёточный электродвигатель

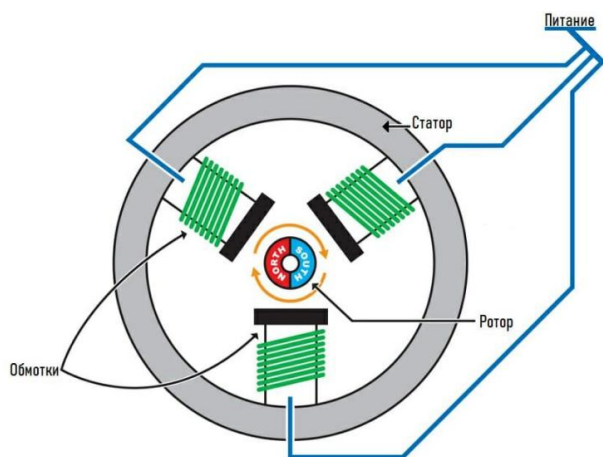


Рис. 61. Схема устройства бесколлекторного электродвигателя

Принцип действия заключается в том, что магниты и обмотка образуют движущую силу ввиду взаимодействия и создания магнитного поля между ними. Это происходит благодаря подаче постоянного тока на конкретную обмотку (три фазы, соответственно, три отдельных провода на обмотке). Ток поступает и прекращает поступать на конкретные обмотки кратковременно, заставляя вращаться верхнюю часть с магнитами. За данный процесс отвечают регуляторы оборотов электродвигателей (ESC), которые определяют момент начала и прекращения подачи тока определённой частоты.

Достоинства данного типа двигателя:

- Большая скорость вращения;
- Износоустойчивость;
- Стойкость к внешним воздействиям;
- Высокое значение коэффициента полезного действия;
- Меньший уровень нагрева во время работы по сравнению с коллекторными двигателями;
- Меньший уровень шума при работе по сравнению с коллекторными двигателями;
- Меньший вес по сравнению с коллекторными двигателями.
- Большой ресурс работы по сравнению с коллекторными двигателями.

Недостатки:

- Высокая цена;
- Сложность ремонта.

Электродвигатели такого типа отличаются большими мощностями, значительными тягой и количеством оборотов, долговечностью за счёт минимального количества движущихся частей.

Маркировка моторов электродвигателей

В соответствии с общепринятыми нормами, маркировка электродвигателей строится следующим образом: A2212/15T, где

- Первая буква определяет класс привода, и отображает качество изготовления:
 - серия «V» – так обозначаются электродвигатели мультикоптеров гоночного или премиального сегмента, изготовленные из наилучших материалов с высокой точностью сборки;
 - серия «X» – серия электродвигателей мультикоптеров средней ценовой категории соответствующего качества и сборки;
 - серия «A» – электродвигатели бюджетного сегмента.
- Четыре цифры обозначают параметры магнитопровода. Первые две цифры – это диаметр (в миллиметрах), две следующие – толщина набора (в миллиметрах).
- После знака дроби указываются цифры, обозначающие количество витков.
- Последняя буква отвечает за тип намотки.

Рассмотрим пример: A2212/15T, где

- A – электродвигатель, относящийся к бюджетному сегменту;
- 22 – магнитопровод диаметром 22 миллиметра;
- 12 – толщина набора 12 миллиметров;
- 15 – 15 витков;
- T – (иногда может встречаться обозначение Δ) – тип намотки «треугольником».

Также в маркировке может указываться количество оборотов в минуту на единицу напряжения (Вольт) – KV.



Рис. 62. Маркировка N/P

В описаниях электромоторов могут присутствовать значения вида: «12N14P». Цифры перед «N» означают число электромагнитов в статоре, а перед «P» – число постоянных магнитов в роторе (рис. 62). У разных типоразмеров электродвигателей разное число полюсов, которое определяет дистанцию между ними. Большее число полюсов обеспечивает плавность вращения, меньшее – более высокую мощность.

Критерии выбора электромотора

1. Вес.

Чем меньшим весом обБПЛАдет двигатель, тем легче ему раскручиваться, следовательно, чем большим, тем он мощнее, но медленнее раскручивается. Для новичков пилотирования больше подойдут массивные электродвигатели, которые при возникновении аварийной ситуации не повредятся. Для гонок более подходящими являются электродвигатели потяжелее, а для фристайла – легковесные. Здесь важно соблюдать баланс соотношения мощности к весу.

2. Размер рамы и пропеллеров.

Размер и мощность электродвигателей определяются габаритами выбранной рамы БПЛА. Для правильного выбора следует ответить на следующие вопросы:

- Какие габариты будут у пилотируемого аппарата?
- Какого размера будут пропеллеры, устанавливаемые на раму?
- Какой тип аккумуляторов будет использован?

Если пилот хочет собрать гоночный беспилотник, то раму следует выбирать небольшую и усиленную. Если же БПЛА будет летать на дальние дистанции, то ему понадобится малый фюзеляж и длинные лучи, на которых крепятся моторы. В описании рамы продавцы отмечают допустимые габариты пропеллеров, применяемые с данной рамой, а также назначение использования.

На таблице ниже представлены рекомендованные характеристики двигателей в зависимости от размера рамы и пропеллеров.

Таблица 4. Рекомендованные характеристики двигателей в зависимости от размера рамы и пропеллеров.

Размер рамы, мм	Размер пропеллеров, дюймы	Рекомендуемый размер статора	Минимальный KV	Максимальный KV
<100	2	1102 – 1204 – 1303	4500	15000 – 19000
100 — 140	3	1306	3000	4000
140 — 250	4	1806	2600	2800
190 — 220	5	2204 – 2206	2300	2600
230 — 270	6	2204 – 2208	1960	2300
280 — 350	7	2206 – 2210	1450	1600
360 — 450	8	2212	1000	1200
450>	9	2214 – 2216	900	1000

3. Тяга двигателей.

В описании к электродвигателям обычно указывается максимальная тяга. Тяга или подъёмная сила, показывает тот вес, который может поднять электродвигатель с установленным на него пропеллером. Однако, лёгкий беспилотник с двигателями, у которых малая тяга, в воздухе может повести себя таким же образом, как и тяжёлый квадрокоптер с электродвигателями с большой

тягой. Поэтому гораздо более важным является показатель соотношения тяги к весу.

4. Соотношение тяги и общего веса БПЛА.

Общее правило по соотношению выглядит следующим образом:

$$\text{тяга 1 электродвигателя} \\ = \text{вес беспилотника} \cdot 2 / \text{количество электродвигателей}$$

Превышение тяги вдвое – тот самый минимум, который необходим для того, чтобы аппаратом было комфортно управлять при зависании. Если тяга слишком мала, то беспилотник будет довольно плохо реагировать на команды управления, а также будут сложности с взлётом. В целом, чем больше это соотношение, тем лучше квадрокоптер управляется и ускоряется.

Так, для медленной аэрофотосъёмки может быть достаточно соотношения 3:1, либо 4:1. Для гоночных беспилотников предпочтительно соотношение 8:1.

5. Размер двигателей.

Габариты бесколлекторных электродвигателей обычно обозначаются 4 цифрами, первые две – диаметр статора (в миллиметрах), две следующие – высота статора (в миллиметрах). Чем больше высота статора, тем он более мощный на больших оборотах. Чем больше диаметр, тем больше крутящий момент при малых оборотах.

6. Количество оборотов в минуту на единицу напряжения (KV).

KV – количество оборотов в минуту на единицу напряжения. Это важный параметр бесколлекторных электродвигателей, который показывает, как увеличится количество оборотов электромотора с подачей напряжения 1В без пропеллера. К примеру, KV 8000 будет означать, что если подать на электродвигатель 1 Вольт, то он будет крутиться со скоростью 8000 оборотов в минуту. При установке пропеллера количество оборотов снизится ввиду сопротивления воздуха. Приводы с более высоким KV будут раскручивать пропеллеры быстрее, потребляя при этом больший ток. Поэтому рекомендуется устанавливать большие пропеллеры на моторы с малым KV, а компактные лёгкие пропеллеры – на двигатели с высоким KV.

Следует запомнить общее правило: чем тяжелее планируемый летательный аппарат, тем меньше значение KV его электродвигателей, а на небольших беспилотниках принято использовать моторы с очень большим значением KV.

7. Прямое или обратное вращение моторов.

Направление вращения имеет значение для электродвигателей коллекторного типа, поскольку щётки стираются довольно быстро при вращении в обратную сторону. Электроприводы бесколлекторного типа эта проблема не затрагивает. На электродвигателях, предназначенных для мультикоптеров, присутствует

обозначения направления вращения CW (от англ. Clockwise – по часовой стрелке) и CCW (от англ. Counterclockwise – против часовой стрелки).

8. Регуляторы оборотов мотора (ESC).

ESC – Electronic Speed Controller – регулятор хода или скорости. Он предназначен для регулирования скорости вращения. ESC получает сигнал от полётного контроллера и управляет бесколлекторным двигателем путём изменения его скорости вращения посредством управления мощностью. При выборе ESC важно учитывать его размер и вес, максимальный ток, напряжение питания, прошивку, процессор, используемые протоколы, активное торможение и аппаратный ШИМ.

9. Эффективность (КПД – коэффициент полезного действия).

Эффективность измеряется в граммах/ватт и представляется как требуемая тяга/мощность. КПД двигателя влияет на время полета, срок службы аккумулятора и на падение напряжения в полете. Идеальный двигатель – это когда все параметры эффективны при любых оборотах двигателя, а не только при самых высоких. Аккумулятор должен уметь отдавать большие токи, этот параметр указывается буквой C (токоотдача). Маленькие аккумуляторы с низким значением параметра токоотдачи не смогут реализовать высокую эффективность двигателя. Например, аккумулятор с 90C покроет потребности практически любых двигателей для фристайла и гонок.

КПД рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta = \frac{P}{\sqrt{3}UI\cos\varphi},$$

где: P – Номинальная мощность электродвигателя (берется из паспортных данных электродвигателя);

U – Номинальное напряжение (напряжение, на которое подключается электродвигатель);

I – Номинальный ток электродвигателя (берется из паспортных данных электродвигателя, а при их отсутствии определяется расчетным путем);

$\cos\varphi$ – Коэффициент мощности — отношение активной мощности к полной (принимается от 0,75 до 0,9 в зависимости от мощности электродвигателя).

5.8.2. Плата распределения питания (PDB)

PDB (Power Distribution Board) переводится как плата распределения питания. Как правило, это небольшая плата размером с полетный контроллер, на которой есть 5 контактных площадок (плюс и минус) (рис. 63). На одну площадку припаивается разъем для подключения аккумулятора (часто эти контакты выведены в сторону), на остальные 4 (если вы собираете обычный квадрокоптер) припаиваются контакты от регуляторов оборотов (ESC), то есть, простыми словами, эта плата распределяет ток от аккумулятора по всей системе квадрокоптера.

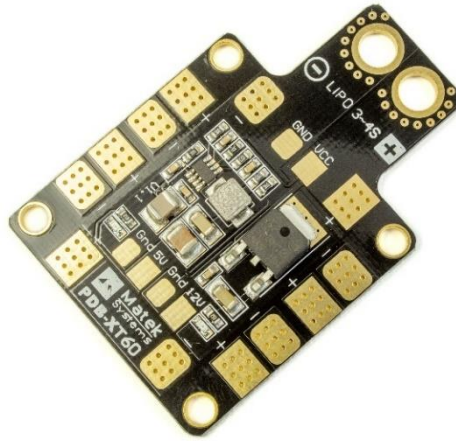


Рис. 63. Плата распределения питания

Большинство PDB содержат регуляторы напряжения для подключения периферии. Как правило, периферия, в том числе и полетный контроллер, работают на 5V, а аккумулятор квадрокоптера – это обычно 12-16V. Некоторые PDB могут содержать и прочие компоненты, которых нет в полетном контроллере, начиная от электрических фильтров и заканчивая OSD (система отображения дополнительной информации о полете на экран).

Основная задача PDB – это передавать ток от аккумулятора регуляторам оборотов (ESC) и питать полетный контроллер.

Есть два типа регуляторов напряжения на PDB:

Первый тип – это *ВЕС (регулятор переключения)*. Работает он по принципу быстрого включения и отключения питания с аккумулятора, таким образом, достигая более низкого напряжения, например, если входное напряжение 16V, то регулятор будет делать более долгие промежутки между отключениями, далее другой компонент «сглаживает» эти скачки напряжения, чтобы периферии уже шло около 12V (как правило, это значение колеблется в пределах 0.5V). Такие регуляторы очень эффективны и меньше нагреваются.

Второй тип регуляторов – *линейный регулятор*. Работает как резистор для «сжигания» избыточного напряжения и переработки его в тепло, оставляя нужное напряжение для периферии. Применяемое сопротивление зависит от аккумулятора и нагрузки компонентов потребления. Такой регулятор обычно производит очень много тепла и сильно греется, особенно если к нему подключены энергоемкие компоненты, такие как видеопередатчик. Это самый простой и дешевый тип регуляторов.

5.8.3. Пропеллер

Пропеллеры нужны для того, чтобы создать подъемную силу с помощью электродвигателя, они непосредственно влияют на то, как себя будет вести БПЛА в

воздухе. Чтобы максимально эффективно использовать летательный аппарат, нужно знать некоторые основные моменты о пропеллерах.

При выборе пропеллеров, нужно учитывать 4 основных параметра:

1. Размер;
2. Шаг;
3. Конфигурация лопастей;
4. Материал.

Маркировка пропеллеров состоит из 3 чисел, следующего вида: 5045 и DP5x4.5x3V, где 5045 – это сокращенная цифра общей маркировки. Общая маркировка – DP5x4.5x3V: первая цифра означает размер, в представленном случае составляет 5 дюймов, 4.5 – это шаг или угол наклона лопастей, который обозначает расстояние, которое пропеллер пройдет за 1 полный оборот по своей оси. Третья цифра (3) – это количество лопастей на пропеллере. На рисунке 64 представлен пропеллер с такими же техническими характеристиками:



Рис. 64. Пропеллеры с параметрами DP5x4.5x3V

Маркировка пропеллеров имеет следующий вид: размер (в дюймах) X шаг (в дюймах) X количество лопастей.

Рассмотрение следующих трёх, не менее важных, критериев подбора пропеллеров:

1. Стил полёта.

Условно можно выделить 2 стили полёта — это гонки и съёмка. Для съёмочного БПЛА нужны большие и широкие пропеллеры, им не нужна большая скорость вращения и резкий разгон. Для гонок нужны небольшие и тонкие пропеллеры, чтобы была возможность быстрого ускорения.

2. Тип рамы.

Обычно, в названии пропеллеров пишут для какой рамы разработаны эти пропеллеры. Например, пропеллер разработан для 250 рамы, это означает, что он подходит для рамы размером 250 миллиметров. Можно использовать пропеллеры размером немного большим или меньшим, но технически рамы проектируются так, чтобы край лопасти был всего в нескольких миллиметрах от фюзеляжа.

3. Тип двигателя.

Для слабого двигателя не подходят огромные и широкие пропеллеры, он не сможет их быстро разгонять и поддерживать вращение, в итоге мотор будет перегреваться под большой нагрузкой, что приведет к его быстрому выходу из строя. Например, если у вас двигателя 2205 2300KV, то вам подойдут пропеллеры 5045. Такие двигатели ставят на малого размера квадрокоптеры с рамами 210-250 мм. Каждый производитель двигателей для БПЛА выполняет много разных тестов и составляет специальную таблицу, где указывает какие пропеллеры подойдут именно для этих двигателей на основе используемых аккумуляторов и регуляторов оборотов.

Ниже представлена таблица, на которой демонстрируется маркировка пропеллеров для двигателей Racerstar 2306 BR2306S.

Таблица 5. Маркировка пропеллеров для двигателей Racerstar 2306 BR2306S.

Модель	KV (обороты/ вольт)	Напряжение аккумулятора (V)	Тип пропеллера	Ток нагрузки (A)	Тяга (г)	Мощность (Вт)	Эффективность (г/Вт)	Количество ячеек аккумулятора	Вес (г)
BR2306S	2400	11.1	5045	23.7	660	250	2.6	2-4S	33.5
		14.8		33.0	980	458	2.1		
	2700	11.1	4045	16.5	480	175	2.7		
		14.8		24.5	760	345	2.2		
		11.1	5045	25.0	705	262	2.7		
		14.8		35.0	1070	490	2.2		

Шаг и размер пропеллера

Под *шагом* (рис. 65) понимают расстояние, которое пропеллер может преодолеть за один оборот, в некой плотной среде (например, для простоты понимания можно вспомнить шуруп, и то, как он вкручивается в доску). Величина шага у лопастей квадрокоптера зависит от угла атаки лопастей (рис. 66). Пропеллер с большим углом атаки поднимает аппарат вверх за один оборот на большее значение, но, при этом, сильнее нагружает мотор. Для разгона и маневренности нужен менее энергозатратный угол атаки. Уменьшая длину луча пропеллера и увеличивая шаг, снижается сопротивление воздуха и повышается скорость подъема беспилотника. Если сделать наоборот, то динамические характеристики БПЛА снижаются, но повышается его грузоподъемность, стабильность полета.

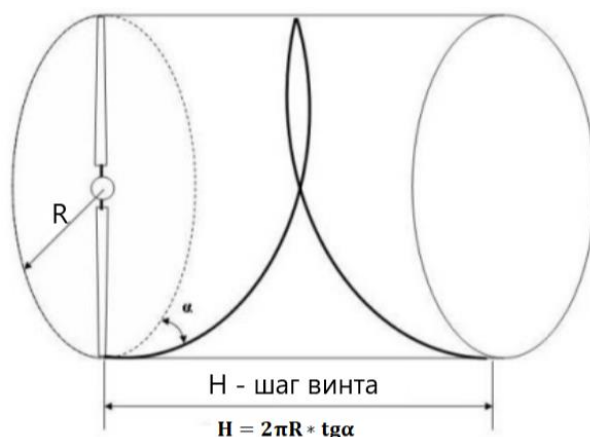


Рис. 65. Шаг винта

Тяга считается сильной, когда винтомоторная группа перемещает большой объём воздуха. При увеличении длины, размера лопасти или какого-то одного из этих параметров при неизменной скорости вращения, тяга пропеллеров увеличивается. Вместе с этим образуется турбулентность за счет увеличения сопротивления воздуха. И, как следствие, большой радиус пропеллера и угол наклона лопастей, потребует больших затрат энергии, за счет чего будет уменьшено время полёта.



Рис. 66. Шаг винта

Размер пропеллеров напрямую связан с тягой, отзывчивостью и тем, как он «цепляется» за воздух. Большой пропеллер будет проталкивать собой больше воздуха и будет тратить много энергии для вращения. Он будет усложнять резкое изменение скорости вращения двигателей, потому что оБПЛАдает большими размерами и повышенным весом, следовательно, повышенной инертностью. Преимущество больших пропеллеров заключается в хорошей тяге БПЛА благодаря большой площади лопастей, он будет лучше держать аппарат в воздухе.

Пропеллеры малого размера быстрее реагируют на изменение скорости вращения двигателей. Они проталкивают через себя меньше воздуха, соответственно тратят меньше энергии при изменении скорости вращения. Небольшие пропеллеры ставят на гоночные квадрокоптеры, чтобы мгновенно менять скорость вращения двигателей, совершать быстрые падения, которые не получатся на больших пропеллерах из-за планирования, и быстро изменять направление полета.

Пропеллеры должны соответствовать электродвигателям, потому что, если установить 3-х дюймовые пропеллеры на двигатель, который рассчитан на 5 дюймовые пропеллеры, то это приведет к чрезвычайно высоким оборотам и большому потреблению энергии из-за маленькой нагрузки, при этом тяга будет небольшая. Это не только неэффективно, но и очень быстро выведет электродвигатель из строя (попутно приведя к поломкам регуляторов оборотов), так как он не рассчитан работать на таких оборотах.

Наиболее популярным пропеллером считается 5-дюймовый, для которого подходят двигатели в диапазоне размеров 2204-2307.

Конфигурация пропеллера

По количеству лопастей пропеллеры подразделяются на:

- Двухлопастные (рис. 67);



Рис. 67. Двухлопастной пропеллер

3-лопастные (рис. 68);



Рис. 68. Трехлопастной пропеллер

- 4-лопастные (рис. 69);



Рис. 69. Четырёхлопастной пропеллер

- 5-лопастные (рис. 70).



Рис. 70. Пятилопастной пропеллер

Конфигурация пропеллера – это количество лопастей, использующихся в нем. Увеличение числа лопастей компенсирует размер пропеллера, особенно в микросборках, так как если на маленький аппарат на раме 100 мм поставить 2-лопастные пропеллеры, он вряд ли будет адекватно реагировать на команды управления, а также это приведет к большим оборотам двигателей, а, следовательно, к их перегреву. Именно поэтому в микросборках чаще всего используются 4-лопастные пропеллеры, а в БПЛА большего размера – трёхлопастные.

Из-за сложной физики и аэродинамики увеличение количества лопастей не так эффективно, как увеличение размера. Пропеллер с удвоенным количеством лопастей не будет работать так же хорошо, как с удвоенным размером, но он обеспечивает большую тягу за счет большей мощности. Увеличение количества лопастей приведет к увеличению тяги и сцепления в воздухе за счет отзывчивости и увеличения

потребляемой энергии. Если проектируется БПЛА, на котором будет совершаться много постоянных и резких изменений направления в полете, то нужны пропеллеры с увеличенным количеством лопастей.

Меньшее количество лопастей предпочтительнее, если требуется более быстрый отклик двигателя, а тяга не так важна. Профессиональные гонщики с современными сверхлегкими гоночными рамами довольно часто используют 2-лопастные пропеллеры, потому что рама настолько легкая, что требуемая тяга намного меньше, и, следовательно, может быть реализован более быстрый отклик легких и менее «тянущих» пропеллеров.

В наиболее распространенной категории 5 дюймовых пропеллеров принято считать, что пропеллеры с тремя лопастями обеспечивают наилучший баланс эффективности, тяги и сцепления.

Важный фактор, которому часто не уделяют должного внимания — долговечность. Во время полетов, особенно если пилот начинающий, будет очень много аварий и падений, поэтому пропеллеры станут расходным материалом. Но если использовать 2-лопастные пропеллеры, то ломаться они будут меньше. Дело в том, что когда аппарат с трехлопастными пропеллерами падает, две из трёх лопастей в любом случае ударятся об землю, в то время как двухлопастной, наиболее вероятно, повернется и ничего не сломает.

Материал пропеллера

Выбор лопастей для беспилотного летательного аппарата является непростой задачей. Чаще всего в магазинах выставлены на продажу пропеллеры из поликарбоната, ОБПЛАдающего пластичностью и высокой прочностью. Также широко представлены пропеллеры из углеродного волокна и АБС-пластика. Углеродное волокно ОБПЛАдает высокой жесткостью конструкции, легкостью, поддается балансировке и не теряет форму. АБС-пластик – это тоже очень прочный материал, но имеющий недостаток в виде хрупкости. Отличие АБС-пластика от поликарбонатных пропеллеров в том, что при ударе лопасть из АБС-пластика, скорее всего, сломается, а из поликарбоната просто погнется, причем эту лопасть можно выпрямить, но это чревато возникновением вибрации из-за нарушенной балансировки. Существуют пропеллеры из пластика, который армирован стекловолокном – это пропеллеры, ОБПЛАдающие внушительным показателем жесткости конструкции.

Выбор материала пропеллеров также зависит и от времени года. Пластмассы для пропеллеров термопластичны, то есть, их жесткость и пластичность зависит от температуры. Если полёты осуществляются в зимний период, то лучше ставить пропеллеры из АБС-пластика, так как поликарбонат на холоде дубеет и становится более хрупким. Если полёты осуществляются в жаркий период, то лучше использовать пропеллеры, армированные стекловолокном, для хорошей жесткости, так как АБС-пластик и поликарбонат будут становиться мягкими под действием высоких температур от солнца, что может привести к потере тяги.

Поликарбонатный пропеллер отличается от АБС-пластика прозрачностью (рис. 71).



Рис. 71. Материал пропеллеров: слева – АБС-пластик, справа – поликарбонат

Схема установки пропеллеров

На схемах используются следующие обозначения направления вращения пропеллеров (рис. 72):

- CW – стандартная система с работой по часовой стрелке.
- CCW – вращение лопастей против часовой стрелки.

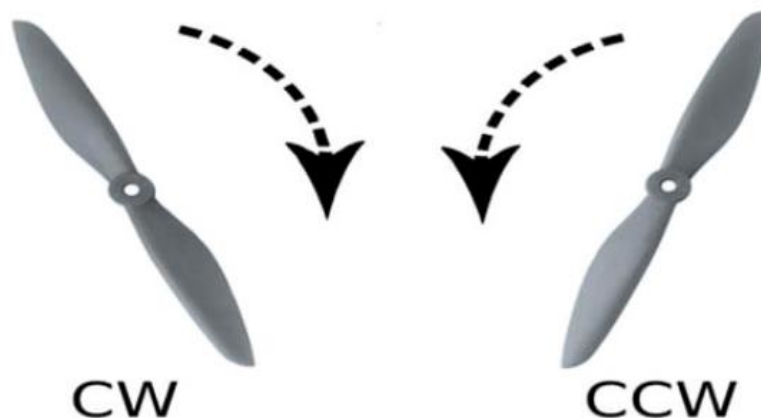


Рис. 72. Маркировка направления вращения пропеллеров

Для того чтобы определить, для какого направления вращения подойдет какой пропеллер можно по поднятой кромке лопасти на нем. Эта часть детали направляется в сторону вращения.

Прежде, чем устанавливать пропеллеры на квадрокоптер, следует узнать, в правильную ли сторону будут крутиться моторы. Большинство квадрокоптеров летает на конфигурации Multiwii, схема которой представлена на рисунке 73.

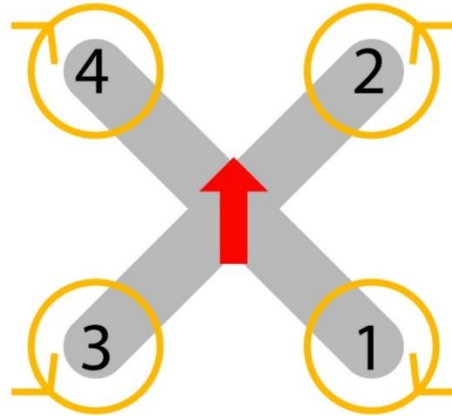


Рис. 73. Конфигурация Multiwii

Красная стрелка — это направление полёта квадрокоптера. Желтые стрелки — направления вращения пропеллеров. Можно легко запомнить в какую сторону какой двигатель крутится: два передних мотора крутятся в сторону камеры, а два задних мотора крутятся от камеры (передние внутрь, задние наружу). Есть еще реверсивная схема, это когда передние вращаются наружу, а задние внутрь. Такая схема позволяет избавиться от летящей грязи в камеру из-за вращения пропеллеров внутрь.

Для более сложных конфигураций беспилотных летательных аппаратов используются следующие схемы направлений вращения моторов, представленные на рисунке 74.

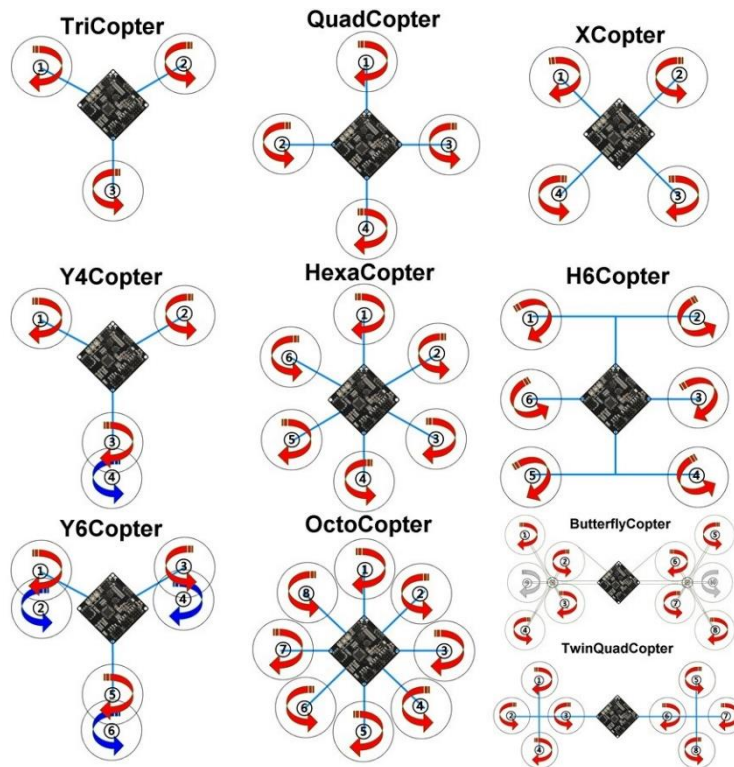


Рис. 74. Схемы направления вращения моторов при различных конфигурациях БПЛА

5.8.4. Приёмник радиосигнала

В общем случае аппаратура радиоуправления состоит из пульта радиоуправления (передатчика) и приемника. Основными параметрами являются протокол кодирования сигнала и количество каналов передачи команд. В настоящее время практически вся аппаратура работает на частоте 2.4 ГГц. Протокол кодирования сигнала означает способ, которым команды, полученные с органов управления пульта, «упакованы» в поток данных, проходящих по радиоканалу. При разработке протоколов руководствуются помехоустойчивостью и плотностью потока информации. Протокол передатчика и приемника радиосигнала должны быть одинаковыми. Параметр, который принципиально важен, – количество каналов. Для управления квадрокоптером их нужно минимум четыре:

- общий газ;
- тангаж;
- крен;
- рысканье.

На самом деле этого мало. Во-первых, нужны каналы для управления включением сенсоров и режимов полетного контроллера (удержание высоты по барометру, включение/выключение компаса, удержание позиции или возврат домой по GPS). Во-вторых, могут понадобиться каналы для управления бортовой видеокамерой, бортовыми огнями или включения системы поиска упавшего аппарата. Комфортное управление квадрокоптером начинается при восьми и более каналах. Количество каналов приемника и передатчика не обязательно должно совпадать, если ваш приемник поддерживает 8 каналов, а передатчик 12, то значит у вас в распоряжении 8 каналов.

5.8.5. Рама

Рама для квадрокоптера – это рама, которая служит жестким каркасом, размещающим на себе различные компоненты и двигатели (рис. 75).



Рис. 75. Рама беспилотника

Именно от рамы зависит, с какими последствиями переживёт летательный аппарат падение. Её можно изготовить самостоятельно либо купить. Главные составляющие рамы – крестовина (тело) и лучи. В центре располагаются «мозг» в виде полётного контроллера, а на лучах «сердца» копитера – двигатели. Корпус изготавливают из различного спектра материалов: алюминий, пластмасса, карбон, дерево, а также фанера.

Существует 2 основных типа рамы:

1. Цельная – когда все лучи и крестовина выполнены из цельного куска материала (зачастую таким материалом является карбон).
2. Сборная – когда лучи и крестовина собираются друг с другом.

Также существуют рамы, в которые интегрирована защита камеры и прочих элементов (рис. 76).



Рис. 76. Рама беспилотника с основными элементами конструкции

Идеальная рама для квадрокоптера должна обладать двумя основными характеристиками: легкостью и прочностью; но это требует жертв, например, в балансе. Конструкция и материал рамы определяют, насколько она устойчива к авариям. Крепкие рамы, обычно, тяжелые, но более стабильны в воздухе, в то время как легкие, наоборот, обладают повышенной мобильностью.

Легкая рама позволяет дольше летать, за счет сокращения расходов энергии на удержание тяжелого веса, быстрее реагирует на команды и быстрее ускоряется. Но существует неприятный недостаток – легкие рамы подвержены повышенной вибрации и гибкости, это может влиять на полетный контроллер и на его настройку. Также у легких рам, обычно, отсутствует какая-либо защита компонентов для снижения веса.

Рама оказывает огромное влияние на летные характеристики такие, как: аэродинамика, распределение веса, жесткость и другие.

Материал рамы квадрокоптера

Как отмечалось ранее, рама для квадрокоптера может быть сделана из любых материалов: дерево, пластмасса, стекловолокно, алюминий, и даже ПВХ-трубы. Самым

популярным, по рекомендациям покупных рам, материалом считается карбон, он легкий и прочный, а также обладает умеренной ценой.

Достоинства карбоновой рамы:

- Малый вес. Для гоночного мультикоптера важно обладать отличной маневренностью и малым весом. Последний параметр также позволяет уменьшить силу удара, относительно такой же рамы по габаритным размерам, но выполненной из материала более тяжелого.
- Прочность. Карбон является крепким и долговечным материалом.
- Жесткость. Жесткость очень важна для стабильности и эффективности полета.

Недостатки карбоновой рамы:

- Карбон является электропроводящим материалом. Этот недостаток играет важную роль, если в сборке присутствуют оголенные провода, так как это может привести к короткому замыканию через раму.
- Карбон блокирует радиочастоты, например, 2.4 ГГц и 5.8 ГГц. Поэтому спрятанные антенны в корпусе будут работать менее эффективно, следовательно, их нужно выводить наружу.

Строение рамы

Раму для мультикоптера можно разделить на 2 части: тело (элементы тела иногда называют деками – верхняя и нижняя дека) и лучи (лучи еще называют руками, от английского слова arm – рука, а английская аббревиатура луча рамы – arm).

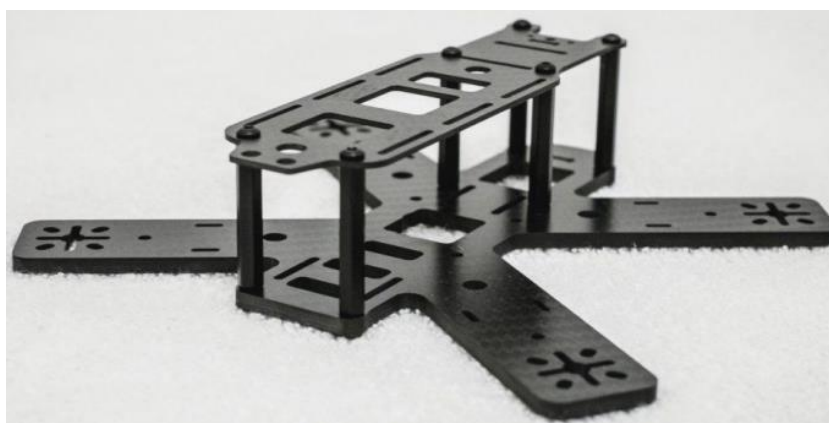


Рис. 77. Рама беспилотника

В теле рамы размещаются электронные компоненты, включая полетный контроллер, PDB, камеру и прочие устройства периферии. Обычно тело состоит из нижней и верхней пластины и некоторых промежуточных маленьких пластин. Обычно тело скрепляется вертикальными стойками на винтах (рис. 77).

Лучи – это место, куда крепятся двигатели и регуляторы оборотов. Лучи, обычно, делаются из толстого слоеного карбона от 3 до 4мм, это необходимо для прочности и долговечности. В настоящее время последние модели все чаще имеют лучи толщиной

5мм и более, потому что скорость и мощность мультикоптеров имеет тенденцию на увеличение.

Размер рамы

Размер рамы представляет собой длину по диагонали от одной точки центра местоположения двигателя до другой, считается в миллиметрах (рис. 78).



Рис. 78. Размер рамы беспилотника

Размер рамы напрямую влияет на размер таких компонентов и параметров беспилотника, как:

- Размер пропеллеров;
- Размер двигателей;
- Количество, тип и положение регуляторов оборотов двигателя (раздельные или в контроллере);
- Совместимость с определёнными камерами;
- Сопротивление воздуха;
- Инерция;
- Вес.

Размер рамы определяет выбор почти всех компонентов, которые будут использоваться при сборке. Для мощного квадрокоптера требуется большая рама, чтобы можно было использовать большие пропеллеры и мощные двигатели, в то время как на маленьких рамах такое оборудование не поставишь. От размера рамы зависит размер пропеллеров. Например, рамы размером 210 мм называют «5-ти дюймовой рамой», потому что самые большие пропеллеры, которые можно использовать с этой рамой – это пропеллеры на 5 дюймов.

Двигатели на раму ставят на самом краю лучей, там находятся отверстия для крепления. Чем дальше двигатели от центра, тем больше момент инерции. В остальном, чем меньше рама, тем резвее себя ведет квадрокоптер, так как маленькую раму проще и быстрее наклонять/поворачивать. Также, у большой рамы больше сопротивление воздуха и больше значение парусности за счет большей площади (рис. 79).



Рис. 79. Сравнение размерной линейки квадрокоптеров

Таблица 6. Рекомендованные размеры пропеллеров относительно размера рамы БПЛА.

Размер рамы, мм	Размер пропеллера, дюйм
280+	7
220 – 280	6
180 – 220	5
150 – 180	4

Тип рамы и лучей

Форма рамы определяется тем, как лучи соединены с телом (рис. 80). Это не только влияет на внешний вид, но и на летные характеристики. На сегодняшний день популярны следующие формы рам:

- Н – образная;
- Х – образная;
- Гибрид Х;
- Вытянутый Х;
- Квадратная (коробка);
- Плюс-образная.

Вопрос о влиянии формы рамы на полётные характеристики является дискуссионным. Однозначно констатируется факт, что при каждой форме рамы, аппарат в полёте ведет себя по-своему.



Рис. 80. Типы рам квадрокоптеров

Рассмотрим основные типы рам:

- **Рама H-образная.** Это самые первые рамы, которые начали использовать на квадрокоптерах. У них много места для компонентов. Лучи соединены на теле в форме буквы «Н», это дает простое и большое тело, в котором удобно размещать и ремонтировать электронику. Камеру и аккумулятор можно расположить в верхней плоскости, вес распределяется по одному направлению, что не очень БПЛАгоприятно влияет на инерцию по тангажу. Т.е. вправо-влево аппарат будет легко наклоняться, а наклон вперед-назад будет затрагивать немного больше энергии и силы. В этом заключается отличие от более новых рам X-образных. Рамы H-образные предпочитают пилоты для более плавного полета, а не для сложного фристайла или гонок.
- **Рама X-образная.** В такой раме лучи встречаются на теле рамы в самом центре, образуя форму буквы «X». Тело максимально короткое, а компоненты размещаются ровно посередине, чтобы была максимальная центровка веса по раме. Отцентрированная масса на такой раме позволяет сократить инерцию мультикоптера в полете, что очень важно для FPV-гонок, в этом заключается основное преимущество X-образной рамы над H-образной. Рамы X-образные, зачастую, ОБПЛАдают меньшим весом, так как при её постройке используется меньше материала. На такой раме сложнее разместить периферию, так как все располагается в центре, включая камеру и аккумулятор. Этот тип также называют «Настоящий X», чтобы отличить эту раму от гибридов.

- **Рама типа Гибрид X.** Гибридные X рамы имеют тип соединения лучей, как у X-образной, но тело имеет удлиненную форму, как у H-образной рамы. Как говорят пилоты, по летным характеристикам они ничем не отличаются от типа H-образных, так как масса распределена одинаково. Но надо все же учитывать, как передается нагрузка с лучей на тело, как передается вибрация.
- **Рама удлиненная (вытянутая) X-образная.** Внешний вид очень похож на «Настоящий X», но лучи расположены ближе друг к другу сзади и спереди, смысл в том, что так улучшаются повороты в гонках и скоростных полетах. Смещенное расположение передних пропеллеров от задних исключает возникновение турбулентных завихрений, или, как минимум, значительно их сократит, позволяя мультикоптеру летать более стабильно. Они ОБПЛАдают большим весом относительно «Настоящего X», так как используется больше материала.
- **Рама типа Квадрат (коробка).** Квадратная рама может быть сделана из рам H-образных или X-образных, с дополнительными ребрами жесткости, соединяющих лучи. Таким образом, получается очень жесткая конструкция, которая редко ломается. Однако, увеличение таким способом рамы, ведет к повышенному воздушному сопротивлению и увеличивает общий вес. Рама для новичков, чтобы при частых падениях не вывести из строя электронику или свести к минимуму повреждения.
- **Рама плюс-образная.** Это интересная, но не очень популярная рама. Два луча расположены ровно вперед/назад от тела рамы по ходу движения и вбок. Такой тип имеет существенное достоинство, которое заключается в отсутствии турбулентности двигателей, так как они все вращаются довольно далеко друг от друга. А недостатком является передний двигатель с лучом, которые, вероятно, будут попадать в поле зрения камеры. Для решения проблемы с попаданием двигателя в поле зрения камеры, дизайнеры удлиннили передний и задний лучи, создав тип рамы «Удлиненный плюс».

Цельные рамы

Рама может быть спроектирована таким образом, чтобы летательный аппарат можно было неоднократно разбирать/собирать, модернизировать конструкцию, быстро отремонтировать. Для этого необходимо сделать все элементы разборными, что приводит к повышению веса такой рамы, относительно цельной, так как появляются дополнительные элементы в виде винтов, гаек, шайб и т.д.



Цельная рама



Сборная рама

Рис. 81. Цельная и сборная рамы квадрокоптеров

Избежать лишнего веса поможет цельная рама (монорама), где лучи и тело – единая пластина. Такая рама не только легче, но и значительно упрощает и ускоряет сборку. Но в случае поломки какого-то элемента, например, луча, менять потребуется всю пластину, поэтому дешевле поменять один луч в сборной раме, а не целиком менять пластину, да еще и переносить всю электронику. Для начала полётов более предпочтительным вариантом является использовать сборную раму, к числу достоинств которой можно отнести и повышенную жесткость конструкции относительно цельной (рис. 81).

Толщина рамы

Большая толщина материала изготовления повышает жесткость и прочность рамы, а также повышает вес. В связи с тем, что лучи принимают на себя основной удар, то их принято делать толще тела рамы.

Например, 5-и дюймовые рамы обычно делаются из карбона толщиной от 3 до 6мм толщину. Идеальным значением толщины считается 4мм, такая рама будет ОБПЛАдвать умеренным весом и достаточной жесткостью для выполнения большинства задач.

После покупки новой рамы или собственного изготовления, рекомендуется подготовить её к последующей эксплуатации: протереть от остатков материала и удалить различные заусенцы. Если на раме присутствуют острые края, то рекомендуется обработать их надфилем. Это необходимо для того, чтобы не перетёрлись провода или иные элементы.

5.8.6. Регуляторы оборотов электродвигателей

Регуляторы оборотов – в англоязычном сообществе называются – Electric Speed Controller (электронный контроллер скорости) или сокращенно – ESC. Основная задача ESC – передача энергии от аккумулятора к бесколлекторному мотору. Потребность в их применении возникла вследствие некоторых особенностей БК – мотора. Аккумулятор отдает постоянный ток, а бесколлекторный мотор принимает трехфазный переменный ток.

Принцип работы

На вход ESC подается напряжение с аккумулятора и сигналы от полетного контроллера, а на выход регулятор отдает управляющее напряжение для привода. Соответственно регулятор должен обеспечивать:

- Совместимость с полетным контроллером.
- Максимальный ток для мотора (рассчитывается из спецификаций мотора и пропеллера плюс 20 – 30%).

- Потребление тока меньше, чем ток, отдаваемый аккумулятором поделенный на количество ESC.

ВЕС и UBES

Дополнительно к основной функции, регуляторы оборотов могут также передавать питание к другим узлам БПЛА: полетному контроллеру, сервоприводам и так далее. Это достигается внедрением в регулятор блока исключения батареи – Battery Eliminator Circuit (BEC).

Использование ВЕС значительно упрощает конструкцию БПЛА, однако такая схема ОБПЛАдет рядом минусов. Блок исключения батареи может перегреваться при больших перепадах напряжения и больших нагрузках. Регуляторы оборотов с ВЕС, как правило, стоят дороже, чем регуляторы без него.

Правильнее и дешевле было бы сделать отдельно ESC и отдельно один ВЕС. Такое решение есть и называется оно универсальный блок исключения батареи – Universal Battery Eliminator Circuit (UBES).

Преимущества UBES

UBES подключается напрямую к аккумулятору и питает нужный узел БПЛА. Преимущества такого подхода весьма существенны:

- Регуляторы оборотов будут меньше перегреваться, поскольку из них будет исключен ВЕС.
- UBES ОБПЛАдают большим коэффициентом полезного действия;
- Следовательно, из предыдущих двух пунктов UBES способен отдавать больший ток с меньшим риском.
- Отсутствие переплаты за несколько лишних ВЕС, располагающихся в ESC. Для некоторых полетных контроллеров крайне не рекомендуется подключать больше одного ESC ВЕС.
- Меньший вес регуляторов.

Виды ВЕС и их преимущества

ВЕС бывают двух видов: линейные (LBES) и импульсные (SBES).

Линейный преобразует энергию в тепло, а при перегреве отключается. Что может приводить к неприятным результатам: в лучшем случае коптер не сможет взлететь, а в худшем – неконтролируемое падение. Поэтому стал применяться в сборке с сервоприводами, которые, в свою очередь, не потребляют много тока, не позволяя блоку перегреваться.

Импульсный регулирует напряжение быстрым включением и выключением питания, такой подход исключил перегрев, повысил выходную мощность, и позволил достигать КПД 90%, а также импульсные ВЕС выигрывают у линейных в весе.

Возникающие в цепи помехи, которые отрицательно сказываются на работе радиоаппаратуры, исключаются добавлением LC-фильтра.

Программное обеспечение ESC

Поскольку регулятор оборотов выполняет некоторые преобразования с высокой частотой и может быть настроен на различные режимы работы, для него пишут отдельное программное обеспечение, называемое прошивкой. Со временем выходят обновления, позволяющие исправлять прошлые ошибки в алгоритмах управления, создавать более совершенные прошивки (и, тем самым, например, уменьшать расходы аккумулятора на среднем газу) и производить гибкие настройки. В коптерах известных компаний, например, DJI смена ПО регулятора происходит автоматически при помощи полетного контроллера.

Внимание! Перезапись ПО для регуляторов скорости может повлечь за собой поломки БПЛА различного характера, а также снятие с гарантийного обслуживания! Помните, что вы делаете это на свой страх и риск!

Смена программного обеспечения

Сменить программное обеспечение регулятора можно несколькими способами:

- Используя специальную плату управления;
- Используя полетный контроллер;
- Используя ASP программатор.

Третий вариант проще и в настоящее время активно внедряется в новые модели.

Выбор регулятора оборотов

Исходя из всего вышеперечисленного, можно выделить особые критерии выбора регулятора оборотов для БПЛА:

- Совместимость с полетным контроллером. Полетный контроллер должен поддерживать ВЕС и прошивку ESC.
- Совместимость со спецификациями мотора и аккумулятора.
- Наличие или отсутствие ВЕС и его тип (LBEC или SBEC).
- Теплоотвод и герметичность.

5.8.7. Аккумулятор

Одним из основных технологических достижений, обусловивших взлет популярности гражданских БПЛА, стали литий-полимерные (LiPo – lithium-ion polymer battery) батареи. Весьма сходные по устройству с батареями для смартфонов, литий-полимерные батареи имеют намного большее соотношение «емкость/вес» по сравнению с никель-кадмиевыми (NiCD) и никель-металлгидридными (NiMH) батареями. Такое избавление от лишнего веса помогло беспилотным аппаратам оторваться от земли.

Для рассмотрения основных маркировочных данных возьмём аккумулятор Infinity 1500mAh 4SP1 как одного из самых доступных:

- Infinity – торговое название аккумулятора.
- 1500mAh – это ёмкость аккумулятора, которая измеряется в миллиампер-час, чем выше ёмкость, тем дольше будет летать квадрокоптер, но также увеличивается и вес аккумулятора.
- 4S – количество элементов в аккумуляторе, в представленном случае таких элементов 4. Каждый элемент имеет напряжение примерно 3.7В, а в сумме все 4 секции выдают ток 14.8В.
- 1P – количество блоков в сборке, в представленном случае 1 блок. Если написано 2P, то это означает 2 блока в сборе. Для простоты понимания 2P означает, что берется 2 аккумулятора, провода припаяны параллельно (плюс к плюсу, минус к минусу), следовательно, получается аккумулятор ёмкостью 3000 mAh, но выдающий напряжение 14.8В.
- 70С – токоотдача.

Метод выбора аккумулятора

Главный критерий при выборе аккумулятора заключается в целевом использовании беспилотника. В зависимости от того, собирается ли аппарат для съёмок, долгого и дальнего полёта или гоночный, подбирается соответствующий аккумулятор. Съёмочный аппарат ОБПЛАдет большими габаритами, повышенным весом и малой манёвренностью, относительно гоночного.

Если собирается гоночный летательный аппарат, то необходим аккумулятор со следующими характеристиками для наиболее эффективных полетов:

- Количество элементов в аккумуляторе:
 - 180–220 мм и 220–250 мм – 4S, 5S и 6S LiPo.
 - 150–180 мм и 120–150 мм – 2S, 3S и 4S LiPo.
 - 90–120 мм – 1S, 2S и 3S LiPo.
- Максимальный ток разряда – не менее 80С.
- Ёмкость аккумулятора рекомендуется использовать не более 1800mAh для аппаратов с рамой от 210 до 250 мм, так как аккумуляторы большей ёмкости будут ОБПЛАдывать избыточным весом, беспилотник будет менее манёвренным. Рекомендуемые ёмкости аккумуляторов в зависимости от размера рамы представлены в таблице ниже.

Таблица 7. Рекомендуемая ёмкость аккумулятора в зависимости от размера рамы.

Размер рамы беспилотника, мм	Параметры аккумулятора
180	LiPo 1000–1300mAh 3S/4S
210	LiPo 1000–1500mAh 3S/4S
250	LiPo 1300–1800mAh 3S/4S
280/290	LiPo 1500–3300mAh 3S
330/360	LiPo 2200–3200mAh 4S

400	LiPo 3200/3300mAh 4S
450	LiPo 3300mAh 4S
500	LiPo 3300–5000mAh 4S
540	LiPo 5000–5200mAh 4S
550/650/750	LiPo 5000–8000mAh 4S/5S/6S
800 и более	LiPo 8000–30000mAh 6S

Например, при использовании аккумуляторов LiPo 4S 1300 и 1500 mAh ощущается разница в поведении беспилотника в связи с увеличившейся массой аппарата, при этом, разница во времени полёта составляет не более 2-х минут.

Характеристика аккумулятора

Ёмкость – это вместимость аккумулятора, – измеряется в ампер-часах или миллиампер-часах.

Пример: Батарея емкостью 1000 мАч говорит о том, что она будет отдавать в нагрузку ток, равный 1000 мА или 1 А в течение часа. Время разряда напрямую зависит от силы тока в цепи, если к такой батарее подключить лампочку, которая потребляет 100 мА или 0.1 А, то она будет светить аж 10 часов и, наоборот, – если подключить мотор, который потребляет 6 А, то этого аккумулятора хватит всего на 10 минут работы такого мотора.

Время работы можно вычислить, разделив емкость на ток нагрузки, из примера выше; мы имеем батарею 1 Ач и нагрузку 1 А – 1 Ач, делим на 1А = 1час, $T=C/I$, T – время разряда, C – ёмкость аккумулятора, I – ток нагрузки. Пример с лампочкой 1Ач делим на 0.1 А=10 ч и с мотором 1 Ач делим на 6 А =0.16 ч – 10 минут. Стоит обратить внимание на то, что не любой аккумулятор способен разряжаться с такой скоростью, как с мотором из примера (6 А), некоторые батареи при таком быстром разряде выйдут из строя. Для того чтобы такого не случилось на аккумуляторах, пишут еще один параметр.

Токоотдача – это допустимая скорость разряда данного аккумулятора, на батареях или одиночных элементах она обозначается «число и буква С», это указывает на то, что данная батарея может отдать всю накопленную энергию за время, которое определяется, как один час разделить на число перед "С", то есть, возьмем батарею 1Ач, её токоотдача равна 10С, это значит, что она может отдать всю энергию за 1ч, делим на 10С = 0.1ч, то есть 6 минут, получается, что мотор из примера выше не повредит её, разрядив за 10 минут, ибо это по времени на 4 минуты дольше, чем максимальная скорость разряда в 6 минут, до её полного разряда. Так мы высчитали время, за которое можно разрядить батарею без вреда её здоровью, а рассчитать максимальный ток, который она выдаёт, можно получить, умножив её емкость 1 Ач на число, указанное как токоотдача "С" 1 Ач x 10С = 10 А.

Пример: Беспилотный самолет потребляет на максимальных оборотах 10 А, а аккумулятор имеет ёмкость в 2 Ач, это значит, что самолет разрядит эту батарею за

$2/10=0.2$ ч – 12 минут, а теперь узнаем какое для этого потребуется значение токоотдачи "С". Токоотдачу можно вычислить так: 1 час разделить на время, полученное выше, для удобства час разобьём на минуты, и так $60/12 = 5$ – получается, что для 12 минутного полёта ему понадобится аккумулятор емкостью 2 Ач и токоотдачей 5С.

Стоит обратить внимание на тот факт, что токоотдача никак не влияет на время полета в данном случае. Можно взять батарею с той же ёмкостью и токоотдачей 100С, время полета останется 12 минут и никак иначе, потому как на время работы модели влияет только ёмкость батареи, часто новички выбирают батарею с гигантским "С" и практически не смотрят на емкость. Например, если мы возьмем ту же модель из описания выше и установим туда аккумулятор 500 мАч и токоотдачей 60 С (мы уже знаем, что она на 2Ач аккумуляторе летит 12 минут), то высчитаем время полета – 0,5 Ач делим на ток нагрузки 10А = 0,05 ч – 3 минуты, и это при том, что батарейка у нас 60С. А сколько же "С" нам потребуется для трехминутного полета на такой батарейке? $60/3=20$ С, так зачем же тогда переплачивать за лишние 40 С, если время полета у нас не изменилось хоть 20 С, хоть 60 С все равно 3 минуты.

Напряжение – все литий-полимерные батареи для достижения нужного напряжения формируются из последовательных соединенных одиночных ячеек, конструктивно объединенных в блок. Номинальное напряжение каждой ячейки 3.7 В (4.2 В при полном заряде). Это означает, что в нашем примере номинальное напряжение составит $3 \cdot 3.7 = 11.1$ В и может достигнуть $3 \cdot 4.5 = 12.6$ В при полном заряде.

5.8.8. Полётный контроллер

Полетный контроллер (ПК, FC – Flight Controller) – это мозг летательного аппарата. По своей сути ПК – это плата с большим количеством различных датчиков, которая отслеживает положение летательного аппарата и команды от пользователя. Используя полученные данные, она управляет скоростью вращения моторов для того, чтобы беспилотник двигался так, как задумал пилот. У всех полётных контроллеров имеется базовый набор датчиков: гироскопы (Gyro) и акселерометры (acc); некоторые продвинутые конфигурации имеют также барометр (датчик, измеряющий давление воздуха, БПЛА благодаря которому можно измерять высоту полета) и магнитометр (компас). ПК – это также точка подключения всей периферии типа GPS, светодиодов, сонаров и т.д. Контроллеры для гоночных БПЛА очень быстро эволюционируют: становятся меньше, имеют всё более быстрые процессоры, более современные датчики и всё больше встроенных функций (рис. 82).

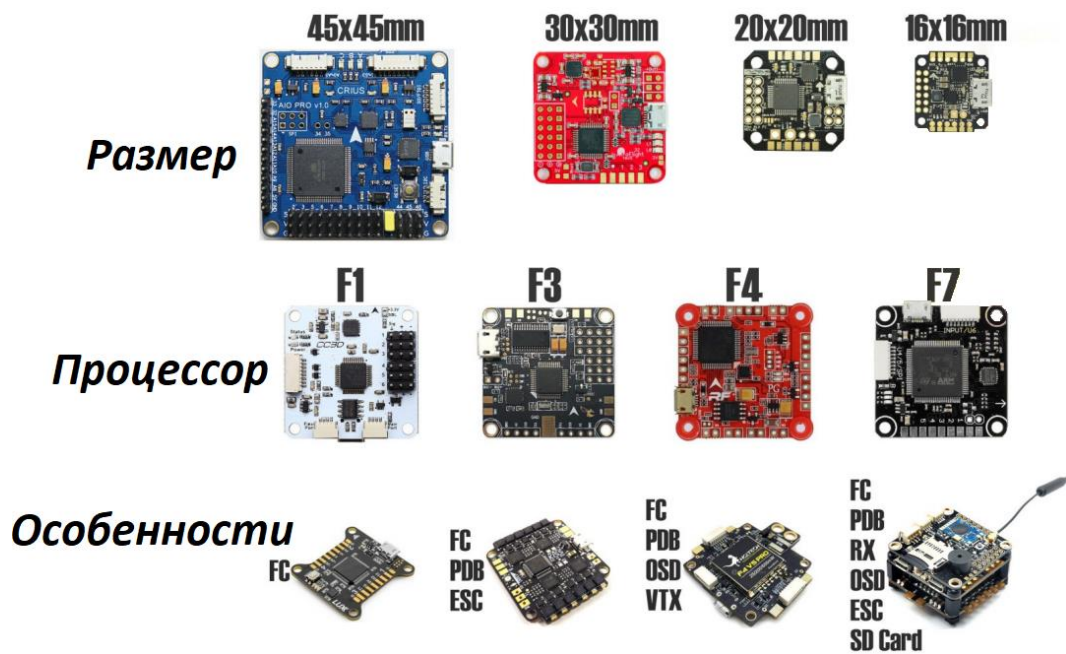


Рис. 82. Эволюция полётных контроллеров

На рисунке 83 представлен пример подключения различной периферии к полётному контроллеру.

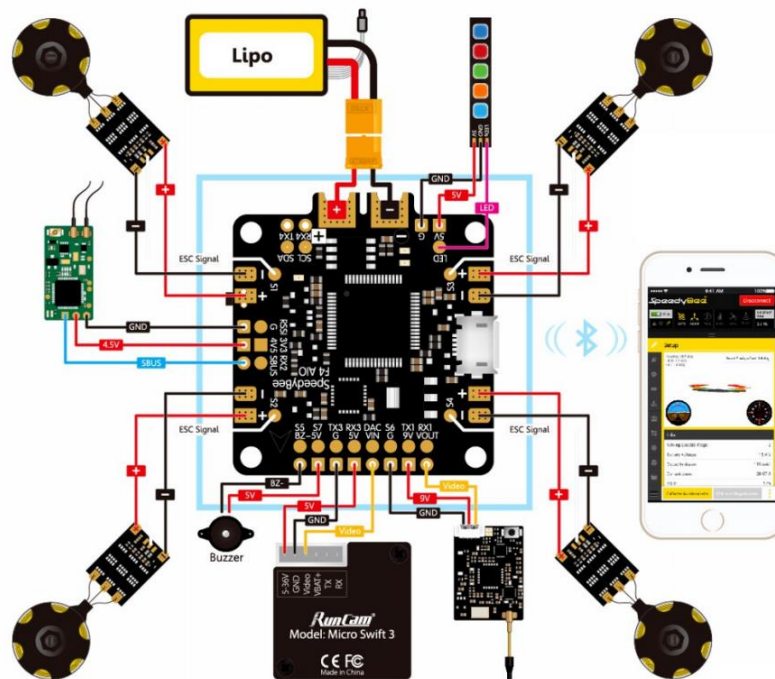


Рис. 83. Пример подключения периферийных устройств к полётному контроллеру

Периферия — дополнительные внешние устройства. Например, GPS, bluetooth, wi-fi, OSD, датчики тока, напряжения и другие. Рассмотрим некоторые из элементов периферии:

GPS – Global Positioning System – спутниковая система навигации, которая позволяет беспилотнику летать на автопилоте по заданным маршрутам и возвращаться в точку посадки.

Система передачи видеосигнала. Чаще всего применяется в формате полетов FPV (First Person View – вид от первого лица), когда пилот в режиме реального времени управляет БПЛА. Пользователь ориентируется по изображению с камеры летательного аппарата. Видеопоток транслируется на монитор, планшет, смартфон либо на экран специального устройства, такого как шлем или очки.

OSD – On Screen Display – система отображения дополнительной информации о полете на экран.

Прошивка полётного контроллера

Помимо различий в железе, имеются различия и в прошивках, которые работают на полётных контроллерах. Прошивки также реализовывают разный функционал и рассчитаны на разные ОБПЛАсти применения. Например, iNAV разработана для использования с GPS, а KISS – предназначена для гонок.

Betaflight – это конфигуратор с открытым исходным кодом, разрабатывается и поддерживается сообществом единомышленников. У неё большая пользовательская база, что позволяет достаточно оперативно получить ответ на возникающий вопрос. Также она поддерживает обширное число полетных контроллеров. Другие популярные прошивки для FPV-аппаратов – это FlightOne и KISS. Их исходный код закрыт, а железо и сами прошивки поддерживаются только производителями, что приводит к тому, что количество полётных контроллеров, поддерживаемых этой прошивкой, ограничено. Таким образом, при выборе полетного контроллера следует изучить прошивку, которая поддерживает именно его.

Современные прошивки для полётных контроллеров можно настраивать, используя специальные программы, установленные на компьютер или смартфон; или прямо с пульта управления. У каждой прошивки свой пользовательский интерфейс управления, при помощи которого меняются настройки. Некоторые программы имеют схожий дизайн, но установка одних и тех же параметров в разных прошивках может дать совершенно разный результат.

Микроконтроллер

В настоящее время существует 5 основных типов процессоров: F1, F3, F4, F7 и H7. В основном они отличаются размером памяти и вычислительными мощностями. В таблице ниже представлены значения объёма памяти и тактовой частоты процессоров.

Таблица 8. Значения тактовой частоты и памяти процессоров микроконтроллеров.

Тип	F1	F3	F4	F7	H7
Характеристики					

Тактовая частота, МГц	72	72	168	216	480
Объём памяти	128 кБ	256 кБ	1 Мб	1 Мб	128 кБ

Количество каналов полётного контроллера

Минимальное требование – минимум 4 канала, поскольку они будут использоваться для управления 4-мя основными функциями БПЛА:

- Канал газа – отвечает за уменьшение и увеличение оборотов двигателей БПЛА;
- Канал тангажа – отвечает за наклон аппарата вперед и назад;
- Канал крена – отвечает за наклон беспилотника влево и вправо;
- Канал рыскания – отвечает за вращение аппарата вокруг своей оси.

UART (последовательные порты)

UART (от англ. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter – универсальный асинхронный приёмопередатчик). *UART* – аппаратный последовательный интерфейс, который позволяет подключить разные внешние устройства к полетному контроллеру. Например, приемник GPS-сигнала, телеметрию, транспондер для гонок, управление видеопередатчиком и т.д. У каждого последовательного порта два контакта: TX – для передачи данных, RX – для приема. Следует запомнить, TX на периферийном устройстве подключается к RX на полетном контроллере и наоборот.

Количество последовательных портов в полетном контроллере

Количество портов зависит от дизайна платы и используемого процессора. Например, на полётном контроллере типа F1 обычно только 2 порта, у F3 и F4 может быть от 3 до 5, а у F7 — 6 или 7.

Таблица 9. Количество последовательных портов в зависимости от процессора контроллера.

Тип процессора	F1	F3	F4	F7
Количество последовательных портов	2	3 – 5	3 – 6	6 – 7

Инвертирование сигнала последовательного порта

Процессоры F3 и F7 могут инвертировать сигнал встроенным инвертором, а F1 и F4 — нет. Сигналы SBUS и SmartPort являются инвертированными, поэтому владельцы полётных контроллеров типа F3 и F7 принимают такие сигналы без проблем.

Однако, более старые процессоры, типа F1 и F4 требуют наличия внешнего инвертора сигнала, который подключается к соответствующему последовательному порту. Для удобства пользователей некоторые полётные контроллеры на F4 уже имеют схемы для инверсии сигналов SBUS и SmartPort, так что приемник подключается напрямую к контроллеру. Если встроенного инвертора нет, то необходимо использовать одно из обходных решений, например, программную эмуляцию последовательного порта (soft serial) или найти неинвертированный сигнал на приемнике.

Если портов не хватает, можно использовать программную эмуляцию (soft serial), чтобы «создать» ещё больше портов. Следует помнить, что эмулируемые порты работают медленнее аппаратных (нельзя выставить большую скорость) и не подходят для важных задач, где требуется быстрая реакция, например, они не подойдут для работы с приемниками. Ещё одним недостатком программной эмуляции является большое использование ресурсов процессора.

Гироскопы (Gyro), инерциальная навигация (IMU)

Цель датчиков на полётном контроллере заключается в определении ориентации летательного аппарата в пространстве и отслеживании его движения. Микросхема с датчиками (IMU – Inertial Measuring Unit – инерциальный измерительный блок) содержит как гироскопы, так и акселерометры. К самым часто используемым полетным режимам Betaflight можно отнести Acro (acro или ручной режим) и Angle (самовыравнивание). В ручном режиме используются только гироскопы, а в Angle и гироскопы, и акселерометры. В связи с тем, что большинство пилотов FPV-аппаратов летают в ручном режиме, то акселерометры часто отключаются в настройках Betaflight, что позволяет сэкономить вычислительные ресурсы. По этой же причине под инерциальной навигацией обычно подразумевают только гироскопы (gyro). Наиболее популярные гироскопы, используемые в беспилотниках, представлены в таблице 10.

Таблица 10. Перечень популярных гироскопов.

Наименование гироскопа	Способ подключения (шина)	Максимальная частота опроса, кГц
MPU6000	SPI, i2c	8
MPU6050	i2c	4
MPU6500	SPI, i2c	32
ICM20689	SPI, i2c	32

У IMU есть две основные характеристики: максимальная частота опроса датчика и зашумленность полученных данных (механическими вибрациями и электрическими помехами). В настоящее время очень часто используют микросхему MPU6000, которая поддерживает частоту опроса до 8 кГц и ОБПЛАдает хорошей устойчивостью к

различным шумам и помехам. Желательно стараться избегать MPU6500, хотя у него больше рабочая частота, но и уровень шумов также значительно выше. Следует учесть, что разные серии гироскопов ICM имеют разные характеристики. Например, ICM20689 — один из наименее предпочтительных вариантов, легко восприимчив к шуму, с надежностью возникают проблемы.

В последнее время появляется всё больше и больше полётных контроллеров с гироскопами на отдельной плате с антивибрационной прокладкой.

Шина подключения

i2c и SPI — это названия шин для подключения гироскопов к процессору. Выбранная шина может ограничить частоты опроса гироскопов. Лучше всего использовать SPI, так как она позволяет работать с большими частотами, чем i2c, у которой лимит в 4 кГц. Практически все современные полётные контроллеры используют SPI.

Типы приемников

Приемники также играют важную роль в управлении БПЛА. Ниже приведены наиболее распространенные типы приемников:

- Приемники PWM.

PWM — это устаревший тип приемников, они использовались на протяжении десятилетий, и для нынешней волны технологий с ними слишком много хлопот, не говоря уже об их размерах. В PWM используют один провод сервопривода для одного канала. Если вы выберете 9-и канальный передатчик или выше, вам придется подключить 9 или более проводов. Такая сложная и тяжелая проводка приведет к повышению массы летательного аппарата.

- Приемники PPM или CPPM.

Эти виды приемников новее, они последовательно отправляют несколько сигналов PPM по одному проводу. По одному проводу можно подключить до 8 каналов, чего достаточно для большинства пользователей. До сих пор PPM используют в большинстве мультикоптеров.

- Приемники SBUS.

SBUS похож на PPM. Это последовательное соединение, которое передает все управляющие сигналы только по одному проводу, но намного быстрее, чем PPM.

- Приемники DSM2 / DSMx.

DSM2 или DSMX устойчивы к помехам и могут переключаться на разные частоты, чтобы поддерживать сигнал между приемником и передатчиком.

Телеметрия

Телеметрия – это передача физических параметров коптера на пульт управления. Это может быть местоположение, процент заряда батареи, высота, скорость, потребление тока и другие значения. Для телеметрии передатчик должен иметь прошивку Open TX.

Крепление контроллера к раме

В полете контроллер испытывает вибрации и шумы. Эти воздействия негативно влияют на показания некоторых датчиков. Их показания искажаются, и это может вызвать серьезные проблемы при полете. Поэтому контроллер должен иметь смягчающие прокладочные материалы в местах крепления к раме.

5.9. Настройка БПЛА

После сборки всех компонентов квадрокоптера, нужно установить программное обеспечение на полетный контроллер и регуляторы оборотов специальными программами — это Betaflight и BLHeli.

Установка программного обеспечения Betaflight на полетный контроллер и ESC BLHeli на регуляторы оборотов

Квадрокоптер – это сложное устройство, состоящее из многих компонентов, которыми необходимо управлять. Для этого было придумано программное обеспечение, устанавливаемое в полетный контроллер с помощью кабеля microUSB и конфигуратора.

Конфигуратор (Configurator) – это программа, которая загружает программное обеспечение в полетный контроллер, а также позволяет его настраивать. Популярностью пользуются 2 основных конфигуратора:

- Betaflight Configurator;
- CleanFlight Configurator.

Для установки ПО на квадрокоптер необходимо следующее:

- Квадрокоптер с полетным контроллером, который поддерживает Betaflight;
- MicroUSB кабель;
- Компьютер;
- Интернет.

Теперь необходимо установить Конфигуратор, с помощью которого устанавливается ПО на полетный контроллер квадрокоптера.

Подключение квадрокоптера к компьютеру

Для того чтобы установить ПО на полетный контроллер, необходимо зажать и удерживать кнопку «Boot» на плате полетного контроллера, и в этот же момент подсоединить его к компьютеру. При нажатии на кнопку запускается режим «Bootloader», то есть полетный контроллер переводится в режим обновления программного обеспечения. После подключения USB-кабеля к компьютеру и полетному контроллеру должен гореть только один светодиод. Если второй светодиод мигает, то в настройках допущена ошибка. Постоянно должен гореть синий светодиод.

Установка ПО на полетный контроллер

Переходим к процессу установки.

1. Переходим во вкладку Betaflight Configurator «Firmware Flasher» (1), нажимаем кнопку «Connect» (2) (рис. 84).

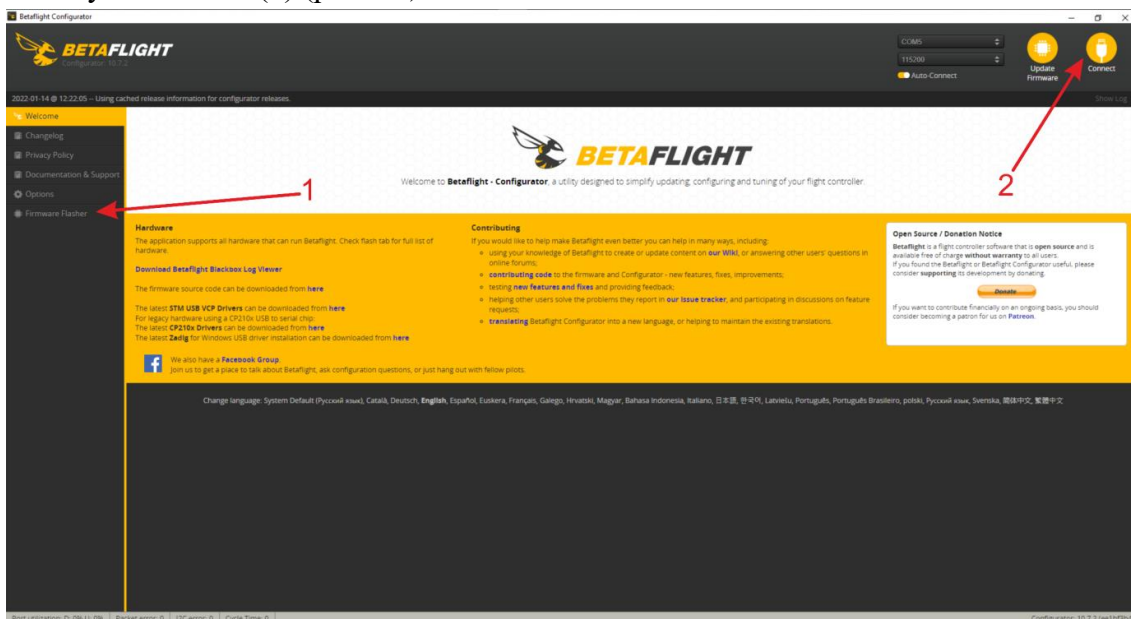


Рис. 84. Введение в режим установки программного обеспечения

В последующем для настройки на эту вкладку переходить не нужно, достаточно нажать на «Connect» после подсоединения кабеля к БПЛА и ПК.

2. Рассмотрим рисунок 85:

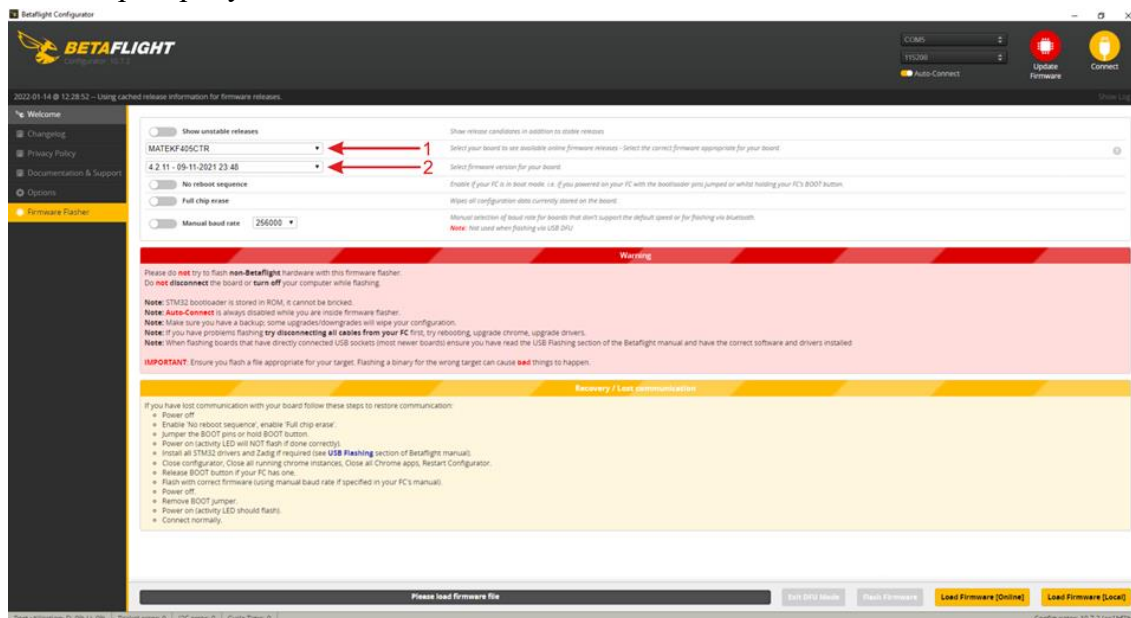


Рис. 85. Установка программного обеспечения на полётный контроллер

Под цифрой 1 — название вашего полетного контроллера.

Под цифрой 2 — версия прошивки.

В этом списке выбираем последнюю новую версию. Если активировать верхний ползунок «Show unstable», то можно установить бета-версию прошивки.

Все остальное оставляем как есть.

3. Выбираем свой контроллер и версию прошивки, затем спускаемся вниз и нажимаем кнопку «Load Firmware» (3). Начнется процесс загрузки ПО с сервера (рис. 86).

При этом кнопка «Flash Firmware» (4) еще неактивна.

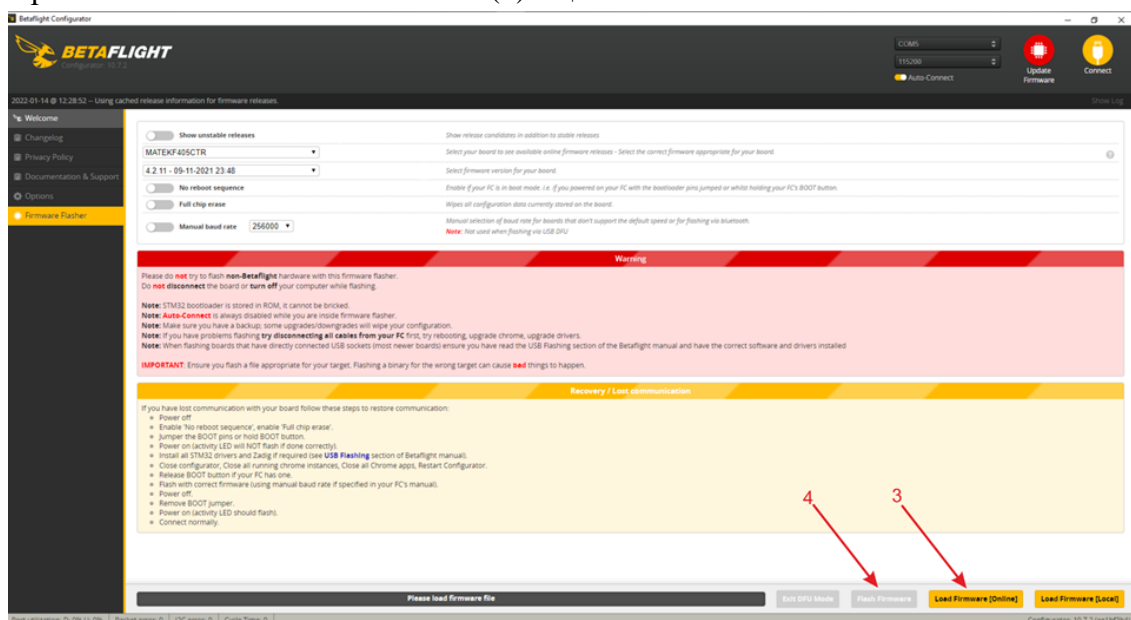


Рис. 86. Установка программного обеспечения на полётный контроллер

4. После загрузки файлов ПО на компьютер будет доступно его описание, а также активируется кнопка «Flash Firmware», и будет написан размер прошивки.
5. Теперь необходимо нажать на кнопку «Flash Firmware», чтобы установить ПО на полетный контроллер. Требуется при этом следить за проводом USB, чтобы он был надежно вставлен в порт.
6. Начнётся процесс загрузки файлов прошивки в полетный контроллер.
7. После того, как Конфигуратор загрузит файлы, он их проверит.
Теперь снова необходимо нажать на кнопку, которая сначала называлась «Connect», и отсоединить квадрокоптер. Затем подсоединить снова. Должны загореться оба светодиода, причем один будет мигать, а другой – постоянно светить.

Прошивка регуляторов оборотов (ESC)

Переходим к установке BLHeli Configurator (рис. 87).

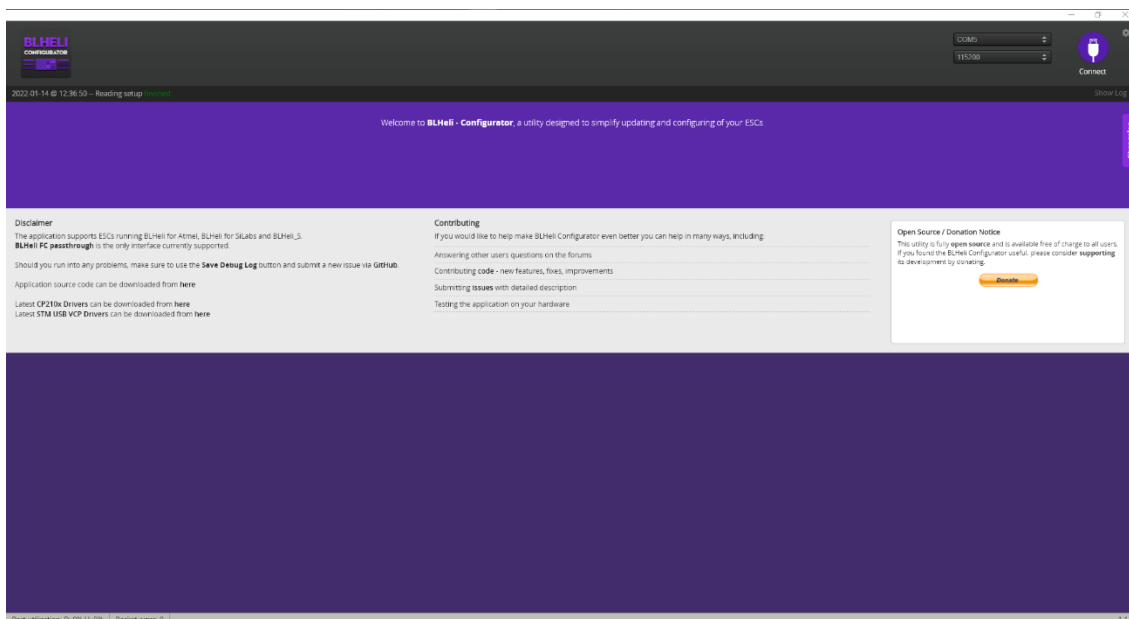


Рис. 87. Установка программного обеспечения для регуляторов оборотов (ESC)

Для настройки регуляторов оборотов необходимо выполнить следующие шаги:

1. Снять с квадрокоптера пропеллеры. Это обязательное условие.
2. Подключить аккумулятор.
3. Подключиться к компьютеру с помощью USB-кабеля. Нажимать и удерживать кнопку «Boot» как с прошивкой полетного контроллера не требуется.
4. Открыть BLHeli.
5. Нажать «Connect», после чего откроется предварительное окно, в котором должна отображаться жёлтая полоса-уведомление. Затем необходимо нажать на кнопку «Read Setup» в нижнем правом углу, после чего активируется главное окно настроек.

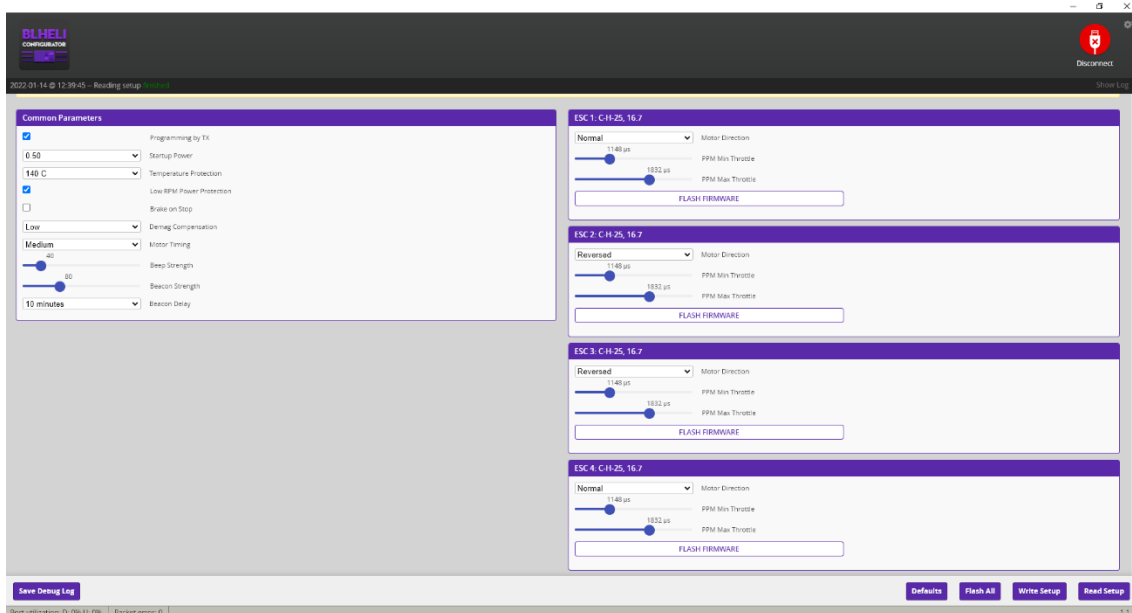


Рис. 88. Установка программного обеспечения для регуляторов оборотов (ESC)

Рассмотрим термины блока, расположенного справа на рисунке 88:

1. На фиолетовой полосе расположено *название регуляторов*;
 2. *Motor Direction* – это направление вращения моторов. Если моторы крутятся не в ту сторону (это проверяется по схеме, которая есть в Betaflight во вкладке Motors), то перепаивать их не нужно, достаточно поменять направление вращения этой вкладкой.
 3. *PPM min Throttle* – это минимальные обороты двигателей во время работы.
 4. *PPM Max Throttle* – это максимальные обороты двигателей во время работы.
 5. Кнопка «*Flash Firmware*» – это кнопка прошивки регуляторов.
 6. Если все регуляторы одинаковые, то требуется нажать на кнопку «Flash All» внизу, если регуляторы разные, то – на кнопку «Flash Firmware»;
- Здесь появляются следующие параметры:
- ESC* – это название регуляторов, определяется самостоятельно.
- Mode* присваивается MULTI.
- Version* – это версия устанавливаемого программного обеспечения, рекомендуется всегда выбирать последнюю версию.
7. Если всё выбрано, то следует нажать на кнопку «Flash»;
 8. Прошивка началась;
 9. Необходимо проделать описанные выше процедуры со всеми регуляторами, если у них разные версии, либо нажать на кнопку «Flash All».
- После прошивки требуется нажать на кнопку «Write Setup» и отключиться от конфигуратора, затем отключить аккумулятор и снова подключить.
10. На этом процесс установки ПО заканчивается.

Резервное копирование

Перед любыми настройками в конфигураторе, сделайте *резервную копию* кнопкой «Сохранить» на главной странице Betaflight. В любой момент можно будет воспользоваться резервной копией и восстановить сохранённые данные.

Включите режим эксперта

По умолчанию программа работает в упрощенном режиме, скрывая часть своего функционала. Этот режим подойдет для начинающих. Для того чтобы получить доступ ко всем функциям, необходимо нажать на флажок «Включить режим эксперта» (рис. 89).



Рис. 89. Включение режима эксперта

Порты

На этой вкладке находятся настройки для UART-портов, то есть для последовательных портов, которые используются для обмена данными с различными компонентами такими, как приемник, видео-передатчик, GPS-модуль и так далее. USB VCP всегда включен, это тот порт, в который вставляется провод microUSB.

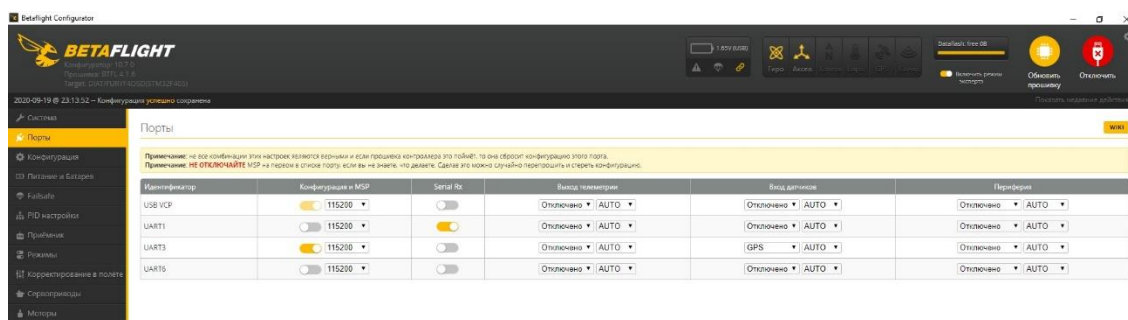


Рис. 90. Вкладка портов

В этом разделе обязательно нужно включить порт, который используется для обмена информацией с приемником. У различных полетных контроллеров он может быть разным, на рисунке 90 выбран порт для приемника – UART1. Поэтому включен ползунок на Serial Rx.

Конфигурация

На этой вкладке выполняются базовые настройки такие, как протокол связи полетного протокола с регуляторами оборотов, протокол связи приемника с полетным протоколом, расположение платы и многое другое (рис. 91, 92).

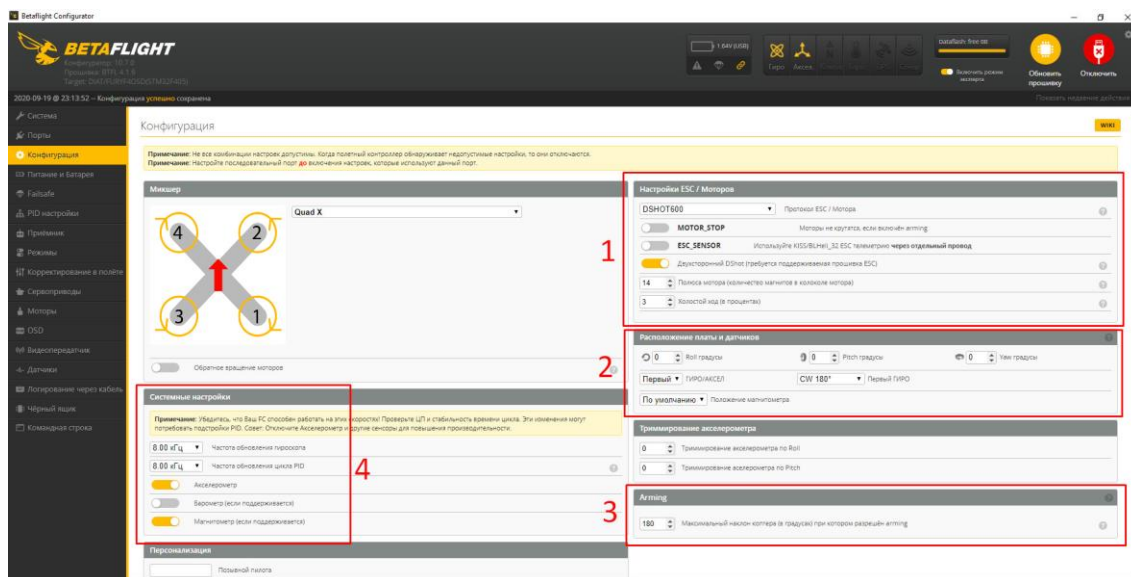


Рис. 91. Настройка конфигурации

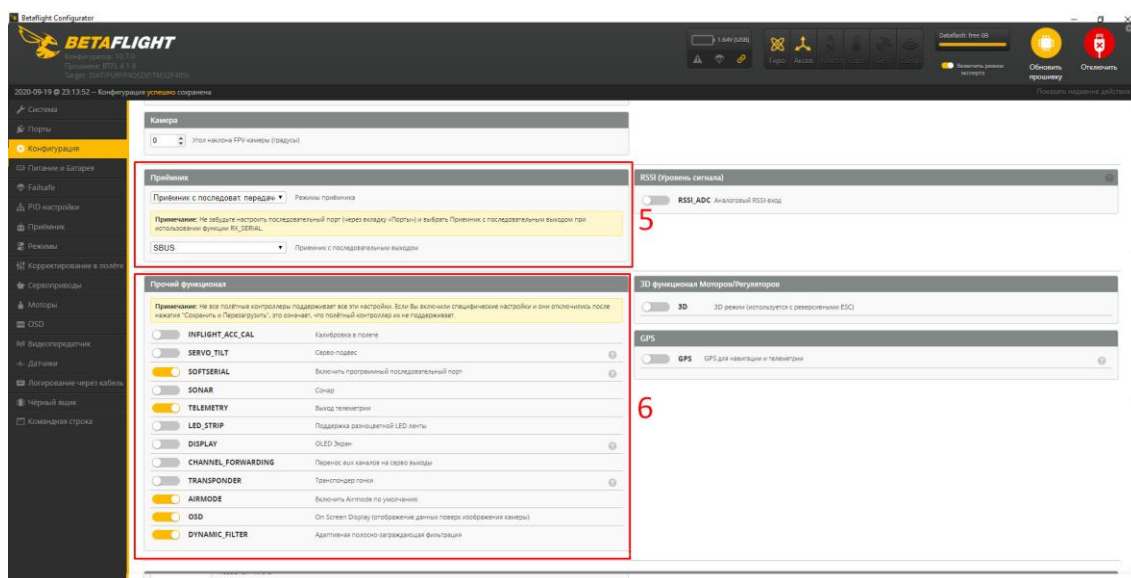


Рис. 92. Настройка конфигурации

1. Настройки ESC/Моторов

В этом блоке настраиваются протокол и двигатели.

DSHOT600 – это протокол, на котором будут общаться регуляторы оборотов и полетный контроллер. Все современные ESC и ПК поддерживают *DSHOT300*, *DSHOT600* и *DSHOT1000*. Необходимо выбирать тот, который рекомендует производитель.

MOTOR-STOP – используется для остановки двигателей при включении. Обычно функцию не включают, так как нужно контролировать работу двигателей.

ESC_SENSOR – используется для включения телеметрии, если на регуляторах для этого используется отдельный сигнальный провод.

Двухсторонний Dshot – новая функция в Betaflight 4.x, которая позволяет контроллеру полета получать точную телеметрию оборотов вращения двигателя по сигнальному каналу ESC. Но сигнал поступает без использования дополнительных проводов и каналов.

Полюса моторов – окошко, в которое необходимо записать количество магнитов в колоколе.

Холостой ход – это то, с какой скоростью будут крутиться пропеллеры после включения (Arming). Обычно хватает 2-4%.

2. Расположение платы и датчиков

В этом блоке обычно настраивается только «Первый ГИРО». Производители всегда ставят порт USB где-нибудь сбоку, и пилот, конечно же, поставит плату полетного контроллера так, чтобы было удобно подключать провод. В этом случае есть большой шанс, что Betaflight будет показывать модельку неправильно, то есть при наклоне БПЛА вперед, моделька будет отклоняться вправо. Чтобы это исправить, используется вот такой виртуальный поворот платы.

3. Arming

Максимальный наклон коптера. Если будет стоять маленькое число, то БПЛА будет запускаться только на идеально ровной площадке. Например, если выставить 180 градусов, то БПЛА можно будет запустить хоть боком.

4. Системные настройки

Здесь выбирается частота обновления вычислений гироскопа и цикла PID, чем они больше, тем чище будет лететь квадрокоптер в воздухе, но нужно следить, чтобы у процессора был запас для дополнительной работы, эта строчка показывается в самом низу программы.

В этом блоке также включаются датчики полетного контроллера.

Акселерометр включает и отключает автоматическую стабилизацию квадрокоптера.

Барометр включает и выключает функцию удержания высоты.

Магнитометр – это компас, который позволяет удерживать БПЛА в одном направлении.

5. Приемник

Здесь выбирается режим работы, в нашем случае выбран режим с последовательной передачей данных и протоколом SBUS. В зависимости от производителя, будет свой выбор, например, у FrSky используется SBUS, а у FlySky — IBUS.

Таблица 11. Соответствие бренд/протокол.

Название аппаратуры	Протокол
DSM2 Satellite	SPEKTRUM1024
DSMX Satellite	SPEKTRUM2048
FrSky RX	SBUS
Futaba RX	SBUS
FlySky RX	IBUS
Turnigy RX	IBUS

6. Прочий функционал

На данной вкладке можно включать или отключать разные функции. На стандартном квадрокоптере, обычно включены:

TELEMETRY – чтобы была возможность принимать телеметрию.

AIRMODE – это ручной режим управления, без стабилизации. Включается, чтобы не было необходимости включать его тумблером.

OSD – чтобы в вашем видео-шлеме или видео-очках показывались значения телеметрии такие, как заряд аккумулятора, время и другое.

DYNAMIC_FILTER – это новый фильтр, который появился недавно. Позволяет БПЛА летать более стабильно.

Остальные:

INFLIGHT_ACC_CAL – функция для «долголетов», которые летают более 20 минут. Функция позволяет время от времени калибровать акселерометр. На гоночных и миниквадрокоптерах калибруется при подключении аккумулятора.

SERVO_TILT – функция, включающая сервопривод, которым можно в процессе полета регулировать наклон FPV-камеры.

SOFTSERIAL – функция, позволяющая подключать много компонентов по UART.

SONAR – функция, включающая поддержку соответствующих датчиков, например, датчик высоты.

LED_STRIP – функция для управления LED-светодиодными лентами, настраиваются во вкладке «LED Strip».

DISPLAY – функция подключения LED-дисплеев к квадрокоптеру.

CHANNEL_FORWARDING – функция, предназначенная для управления сервоприводами через каналы RC AUX channels (каналы 5-16). После включения каждый канал надо будет настроить.

TRANSPONDER – функция для подключения транспондера.

После всех настроек необходимо нажать на кнопку «Сохранить и перезагрузить» в нижнем правом углу, иначе настройки не сохранятся.

Приемник и аппаратура управления

После настройки конфигурации, переходим к настройке раздела «Приёмник», здесь настраивается аппаратура управления (рис. 93).

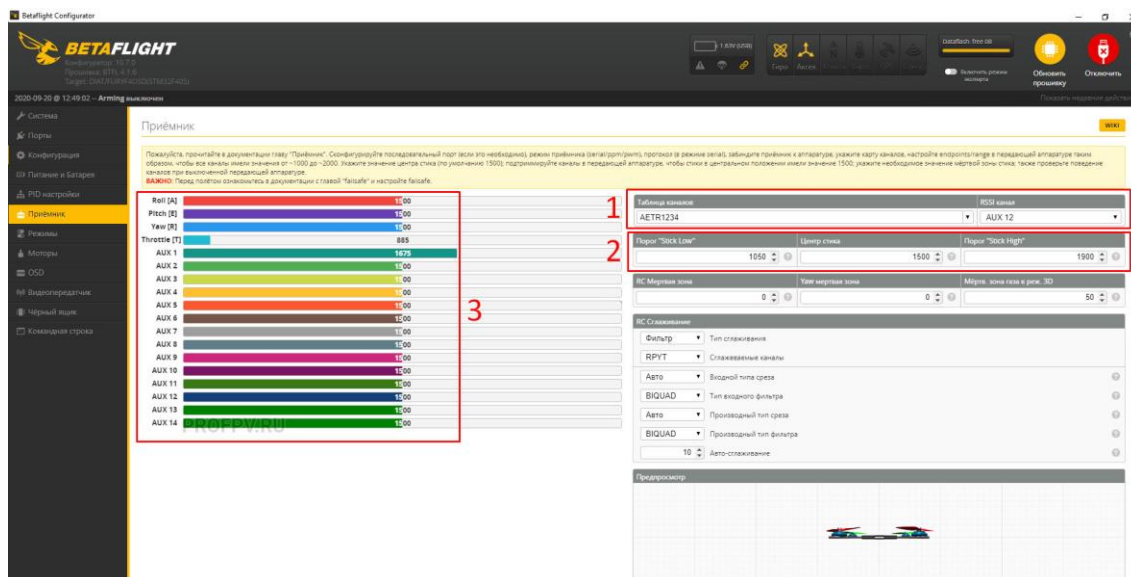


Рис. 93. Настройка раздела «Приёмник»

1. Если вы летаете с помощью аппаратуры Taranis, FlySky, Turnigy или Spektrum, то вам нужно выбрать во вкладке «Таблица каналов» нужный пункт: «JR / Spektrum/Graupner» или «FrSky, Hutaba, Hitec», затем автоматически вставится таблица AETR1234. Следующий шаг – нажатие кнопки «Сохранить».
2. Пороги. Здесь прописывается цифровое значение стиков в крайнем нижнем положении и в крайнем верхнем положении, а также по центру. Настройка применяется для калибровки положения стиков на вашей аппаратуре. Значения по умолчанию обычно не требуют изменения.
3. При включении пульта и при движении стиков в различных направлениях, разноцветные полосы будут бегать в пределах от 1000 до 2000, среднее положение при отпускании стика должно быть на отметке $1500 \pm 1-2$ единицы, но лучше, чтобы было точно 1500. Потому что эти 2 градуса будут вносить свои коррективы в полете.

Режимы

Этот раздел сделан для настройки разных тумблеров на пульте управления (рис. 94).

Настраиваются следующие два стика:

- Arming – установка и снятие с охраны квадрокоптера;
- Включение режима стабилизации и АКРО-режима (ручной режим управления).

Чтобы назначить тумблеру действие, необходимо сделать следующее:

- Навести мышь на ARM и нажать кнопку «Добавить диапазон» (1).

- Выбрать канал, например AUX1, либо оставить «АВТО» и щелкнуть любым удобным тумблером. Автоматически будет выбран канал, который привязан к этому тумблеру (2). После того, как выбран AUX, требуется пощёлкать тумблером. По полоске будет «бегать» желтая точка, соответствующая положению тумблера (3). Если переместить желтые полоски на ОБПЛАсть, где будет находиться желтая точка, то квадрокоптер начнет реагировать на это положение, в данном случае это Arming или снятие с охраны.
- Нажать «Сохранить».

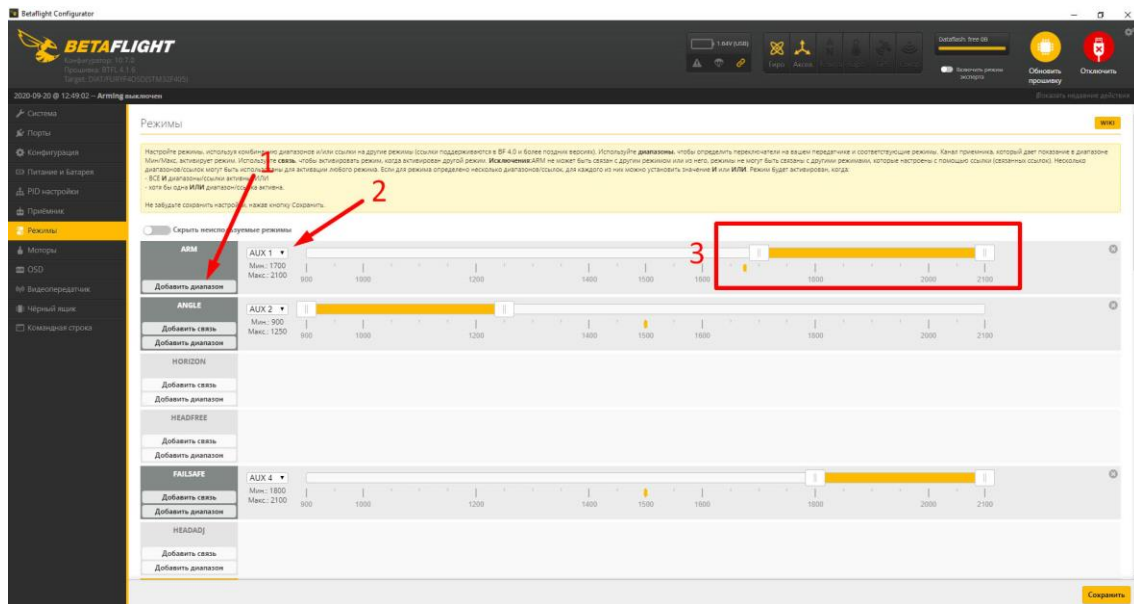


Рис. 94. Настройка раздела «Режимы»

Теперь при переводе тумблера моторы БПЛА начнут вращаться с маленькой скоростью, БПЛА будет снят с охраны.

Так как на странице «Конфигурация» был включен ползунок на AIRMODE, то квадрокоптер находится в ручном режиме без стабилизации, то есть, в режиме ACRO.

Режим ANGLE – это режим стабилизации. Назначается на другой тумблер. Обычно эти 2 режима назначают на один тумблер, у которого 3 позиции, то есть, на вторую позицию настраивают ARM и АКРО, а на 3 позицию режим ANGLE, чтобы они не накладывались друг на друга. При переводе тумблера в верхнее положение включится стабилизация.

Fail-safe

Режим сохранения, то есть, то, что будет делать квадрокоптер, если он потеряет связь с пультом управления (рис. 95).

Существуют 3 режима:

- Падение;

Если выбрать этот режим, то через секунду после потери сигнала, БПЛА отключит все двигатели и упадет (настраивается в поле «Failsafe при низком значении газа, где стоит цифра 100).

- **Приземление;**

При потере сигнала БПЛА будет плавно приземляться, двигатели будут работать. Режим достаточно опасный, так как требует хорошей настройки оборотов двигателей.

- **GPS-спасение.**

Если на квадрокоптере установлен GPS-модуль, то с его помощью можно настроить возврат квадрокоптера.

Функция экстренная и созданная с целью вернуть управление квадрокоптером, а не посадить его, так как нет дополнительных датчиков. Функция сработает, если улететь на расстояние не менее 50 метров. Сажать БПЛА с помощью данного модуля не рекомендуется, так как БПЛА может удариться о землю (нет других датчиков).

Вся задача модуля состоит в том, что в случае потери связи активируется функция GPS Rescue, БПЛА поднимется на определенную высоту и полетит в примерную точку взлета.

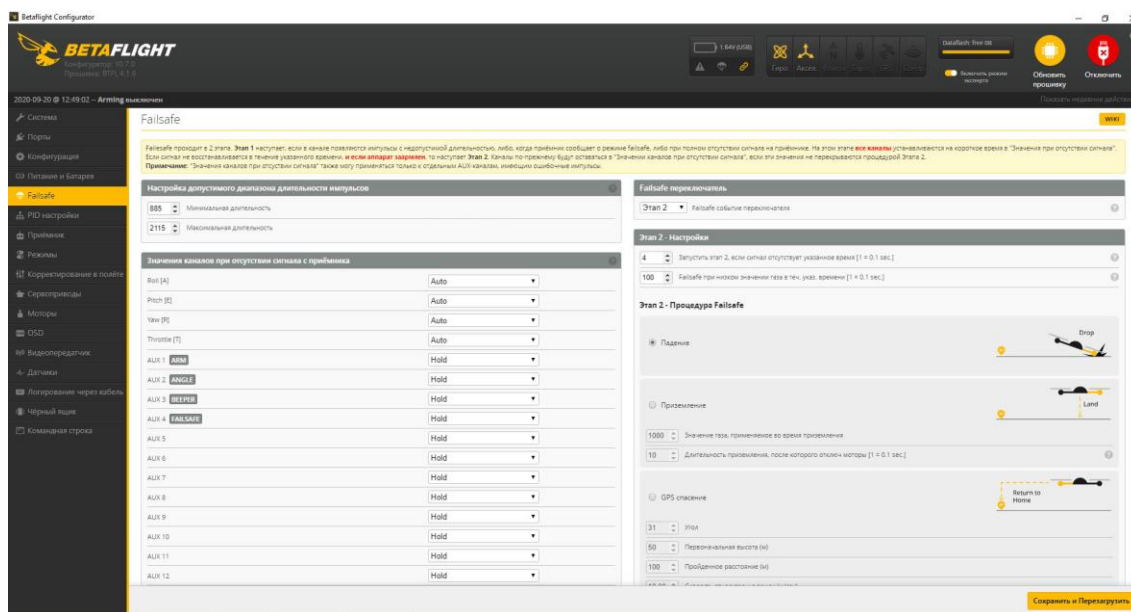


Рис. 95. Вкладка «Failsafe»

Обычно включают режим «Падение». При выборе режима «Приземление», нужно настроить скорость вращения моторов, которые позволят ему плавно спускаться.

Блок «Failsafe переключатель» выполнит действие при активации тумблера, который присваивается функции на вкладке «Режимы». При активации тумблера выполнится сценарий Этапа 2.

PID-настройки

PID – аббревиатура из 3 слов:

1. P – Proportional (пропорциональная);
2. I – Integral (интегральная);
3. D – Derivative (производная).

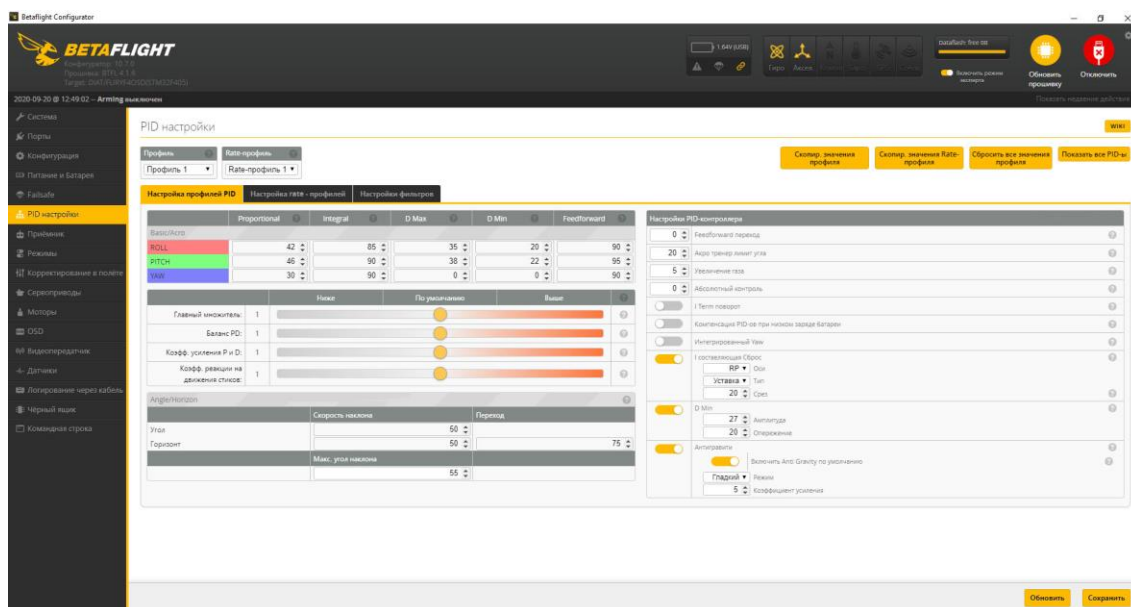


Рис. 96. Вкладка «PID-настройки»

PID – функция в полетном контроллере, которая считывает информацию с датчиков (как правило, это гироскоп и акселерометр), обрабатывает и вносит корректировки, а затем отправляет команды регуляторам оборотов (ESC), а они, в свою очередь, управляют двигателями (увеличивают или уменьшают скорость оборотов). Самый главный параметр в PID – это *Proportional*. С помощью этого параметра колебания при полете снижаются до минимума (рис. 96).

Колебания – внешние факторы, которые влияют на квадрокоптер в полете (ветер, притяжение, вибрация, дрожание и другие).

В некотором смысле P пропорциональна степени контроля над осью (под осью понимается ROLL, PITCH или YAW – тангаж, крен или рысканье, соответственно). Чем меньше P, тем меньше контроля над осями; чем больше P, тем больше контроля со стороны этой функции. Проблема при завышенном параметре P в том, что он начинает перевыполнять ожидаемый, что приводит к колебаниям.

Качественные регуляторы оборотов (ESC), а также большая скорость вычисления PID-контуров помогает полетному контроллеру гораздо быстрее и эффективнее вносить корректировки в полет для избавления от колебаний.

I и D исправляют оставшиеся ошибки, с которыми не смог или не успел справиться параметр P. Параметр I собирает за P накопленные ошибки, связанные с дрейфом, и исправляет их. Поэтому если БПЛА меняет угол наклона после резкой смены

положения стика газа, то следует увеличить параметр I. Но сначала следует увеличить сам P, так как может оказаться, что этот параметр для БПЛА слишком низкий, вследствие чего не выполняет свою работу. D контролирует, насколько быстро ось достигает нужного значения. Например, если дать квадрокоптеру команду быстро остановить двигатели (газ в 0), значение P при корректировке может проскочить и не внести корректировки. Увеличение D может помочь снизить колебания, которые возникают сразу после резкой смены уровня газа.

Blackbox

Черный ящик (рис. 97) нужен для того, чтобы записывать данные полета – телеметрию. Blackbox по умолчанию включен. Данные будут писаться либо во встроенную флеш-память, либо на внешнюю SD-карту. Если у полетного контроллера есть разъем, то следует подключить карточку и убедиться, что туда записываются данные черного ящика.

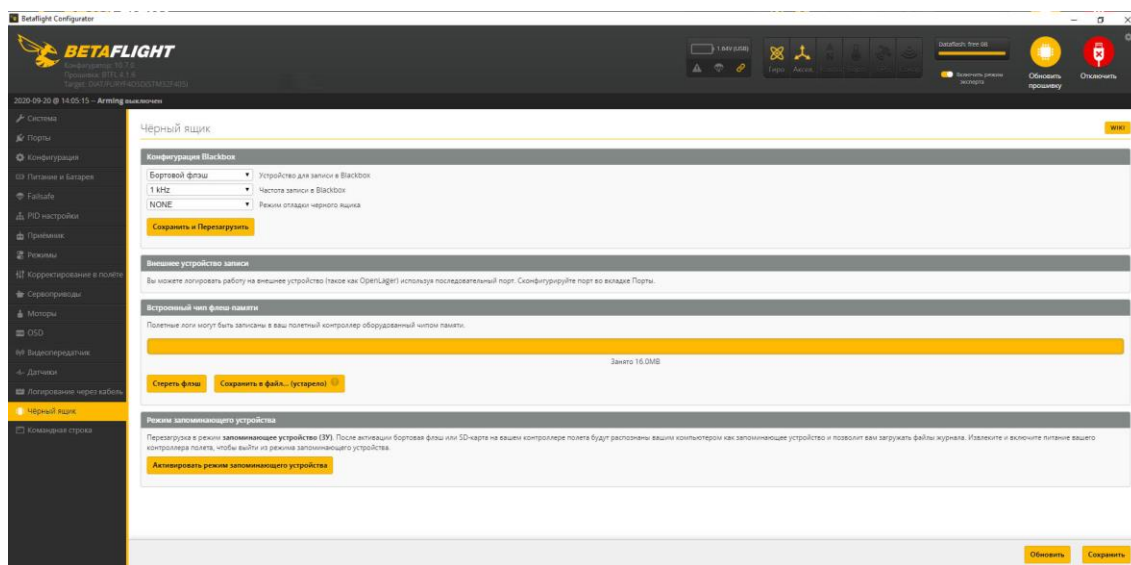


Рис. 97. Вкладка «Чёрный ящик»

У всех современных полетных контроллеров есть своя память и это как минимум 16 мегабайт. Этого вполне хватит, чтобы записывать данные полета.

Моторы

На этой вкладке проверяется работоспособность двигателей (рис. 98).

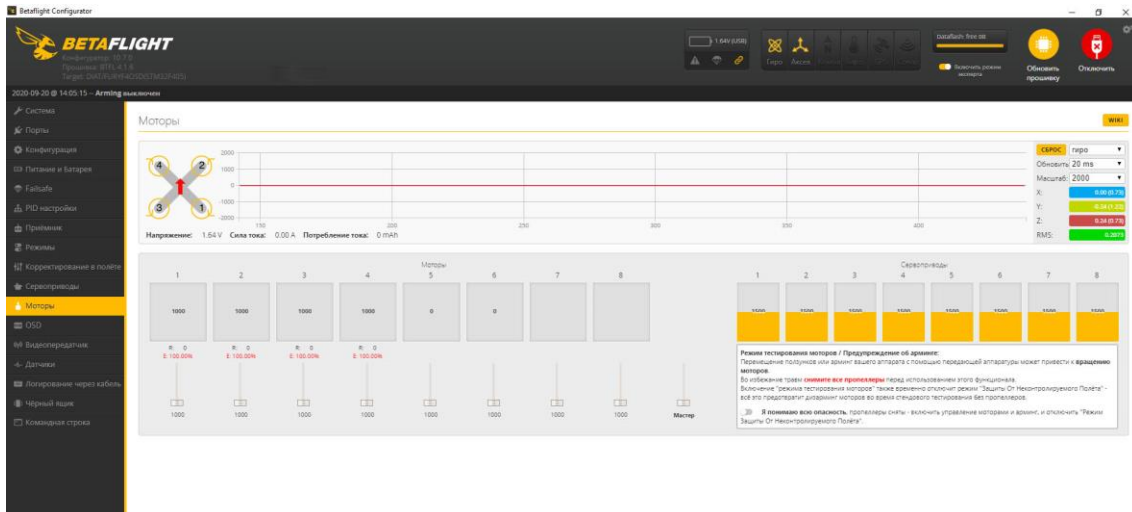


Рис. 98. Вкладка «Моторы»

Перед любыми действиями, обязательно снимайте пропеллеры с двигателей!

Перед тем, как крутить двигатели ползунками, необходимо переключить флажок «я понимаю всю опасность», чтобы активировать функционал. Теперь можно двигать указатель оборотов, моторы начнут крутиться (рис. 99).



Рис. 99. Активация двигателей

Выше располагается график гироскопа, информация о том, сколько потребляется тока, напряжения и силы тока. Это необходимо для проверки и настройки двигателей.

Питание и батарея

В этом разделе настраивается датчик тока, а также параметры аккумулятора (рис. 100). Это необходимо для того, чтобы квадрокоптер по OSD передавал актуальные и правильные данные об аккумуляторе, напряжении и токе во время полета.

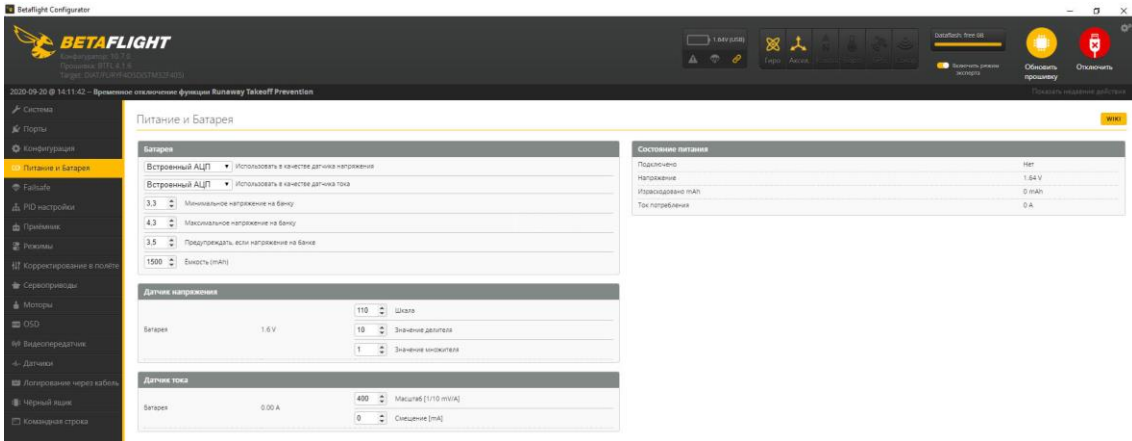


Рис. 100. Вкладка «Питание и батарея»

OSD

В этом разделе настраивается отображение различной информации на экране очков или шлема (рис. 101). По центру располагается имитация экрана. Слева следует поставить галочки на нужных параметрах, затем они появятся на окне. Для того чтобы узнать, что означает параметр, необходимо навести на него мышкой – появится подсказка того, что обозначает этот параметр.

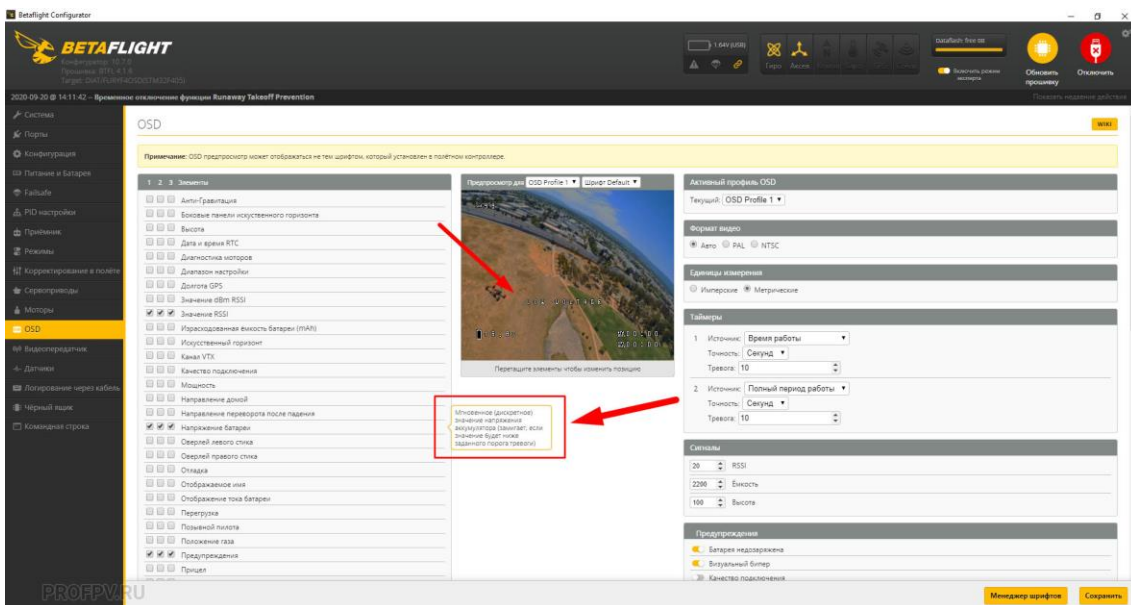


Рис. 101. Вкладка «OSD»

На рисунке 101 включено:

- RSSI (сила приема сигнала);
- Предупреждения;
- Напряжение батареи;

- Таймеры.

У нас добавлено 2 таймера, один — это общее время работы, а второй — время полета.

Справа находятся еще некоторые общие настройки, которые настраиваются по усмотрению.

Командная строка (CLI)

Через командную строку можно влиять на какую-либо информацию в прошивке, вносить изменения, а также выводить информацию о каком-либо параметре или компоненте (рис. 102). Список команд большой и выводится по команде «help».

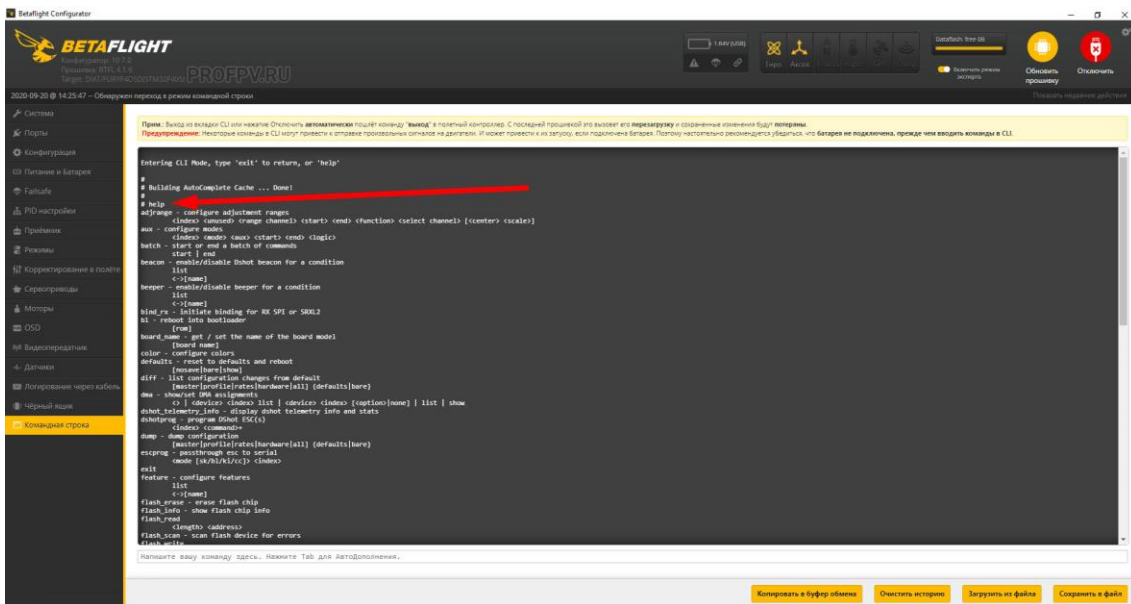


Рис. 102. Вкладка «Командная строка (CLI)»

Перед установкой пропеллеров рекомендуется выполнить ряд проверок, чтобы избежать проблем перед полетом.

1. Проверить направление двигателей.
 - Для этого требуется перейти во вкладку «Моторы» и включить режим тестирования по кнопке «Я понимаю всю опасность»;
 - Запустить моторы и проверить, в правильную ли сторону крутятся двигатели в соответствии со схемой вращения моторов на квадрокоптере.
2. Проверить загрузку процессора.

Пока квадрокоптер подключен к Betaflight, нужно посмотреть на нижний сайдбар. Если загрузка будет 95% и выше, то возникнут проблемы во время полета, так как процессор перегружен и не будет успевать вовремя обрабатывать данные. Чтобы решить эту проблему, необходимо отключить некоторые функции или

отключить разгон, если контроллер F4. Но на современных полетных контроллерах такая проблема – большая редкость.

3. Проверить гироскоп.

Для этого требуется перейти во вкладку «Система» и проверить настройки гироскопа: взять квадрокоптер в руки и наклонить его во все стороны, действия должны точь-в-точь повторять 3D-модель на экране. Стрелка указывает на нос БПЛА. Если это не так, то необходимо вернуться в начало, на вкладку «Конфигурация». Кроме этого, после настроек и прошивки, нужно калибровать акселерометр. Для этого необходимо поставить квадрокоптер на ровную поверхность и нажать кнопку «Калибровать Акселерометр».

4. Сделать резервную копию всех настроек.

После полной настройки и проверки квадрокоптера необходимо обязательно сделать резервную копию ваших настроек.

5.10. Формула для расчета мощности, выдаваемой аккумуляторной батареей

Формула для расчета мощности, выдаваемой аккумуляторной батареей, имеет следующий вид:

$$N_{bat} = IU,$$

где N_{bat} – мощность, производимая батареей;

I – сила тока;

U – напряжение.

Доступный заряд батареи зависит от скорости ее разряда:

$$C = \frac{C_{пот}^K}{I^{K-1} \cdot t_0^{K-1}},$$

где C – доступный заряд батареи;

$C_{пот}$ – номинальная ёмкость батареи;

t_0 – заявленное производителем время разряда;

K – коэффициент, зависящий от температуры окружающей среды и типа (конструкции) аккумуляторной батареи.

Ёмкость литиевой аккумуляторной батареи линейно падает при постоянной скорости разряда, таким образом, формула, описывающая напряжение такой батареи, имеет следующий вид:

$$U_{bat} = U_{init} - \frac{U_{init} - U_{пот}}{\varphi \cdot C_0} \cdot (C_0 - C_{bat}),$$

где U_{bat} – текущее напряжение, выдаваемое батареей;

U_{init} – начальное (заявленное производителем) напряжение батареи;

$U_{пот}$ – номинальное напряжение батареи;

φ – коэффициент номинальной емкости при линейном процессе разряда;

C_{bat} – текущая емкость батареи.

Алгоритм расчета радиуса действия

Для расчета радиуса действия при установившемся горизонтальном полете необходимо применить итеративный метод вычислений, поскольку доступная емкость батареи, её напряжение и сила тока зависят от оставшегося заряда. Метод состоит из следующих шагов:

1. Выбрать малый промежуток времени, который будет единичной величиной времени при осуществлении расчетов.
2. Составить итеративную формулу для расчетов на основе выражения для расчета текущего напряжения батареи:

$$U_{n+1} = U_{init} - \frac{U_{init} - U_{nom}}{\varphi * C_0} * (C_0 - C_n).$$

3. Необходимо, чтобы мощность, производимая батареей, была равна мощности, потребной для полета. Таким образом, выражение для силы тока имеет следующий вид:

$$I_{n+1} = \frac{N}{U_{n+1}}.$$

4. Выражение для доступной емкости батареи получает следующий вид:

$$C_{n+1} = I_{n+1}^{1-K} * t_0^{1-K} * C_0^K - \sum_{j=1}^{n+1} I_j + \nabla t.$$

5. Необходимо производить вычисления до тех пор, пока доступная емкость батареи не примет следующее значение:

$$C_{n+1} \approx C_0 * (1 - \varphi).$$

Сопоставление вычислений с доступными полетными данными

В открытом доступе имеются полетные данные различных БПЛА. В частности, в удобном для анализа формате приведены данные для аппарата с шестью двигателями и литий-ионным полимерным аккумулятором. Некоторые значения получены с помощью расчетов на основе имеющихся данных. Так, форма и конфигурация летательного аппарата напрямую влияют на коэффициент аэродинамического сопротивления, от которого зависят величина аэродинамического сопротивления и потребная мощность.

Поскольку расчет коэффициента аэродинамического сопротивления является нетривиальной задачей, следует вначале определить его примерное значение на основе доступных данных для различных летательных аппаратов, а затем путем перебора найти уточненное значение на основе полетных данных.

Примеры основных параметров летательных аппаратов:

- Масса аппарата без полезной нагрузки и аккумуляторов – 10 кг;
- Коэффициент аэродинамического сопротивления – 0.96;
- Радиус пропеллера – 559 мм;
- Емкость одного аккумулятора – 16000 мАч;
- Масса одного аккумулятора – 2 кг;
- Номинальное напряжение аккумулятора – 22.2 В;
- Максимальное напряжение аккумуляторов – 50 В;
- Коэффициент номинальной емкости аккумулятора при процессе разрядки – 0.7;
- Время разрядки аккумулятора – 720 с;
- Коэффициент типа аккумулятора – 1.05;
- Площадь поперечного сечения аппарата – 0.83 м².

В режиме висения форма и размеры летательного аппарата не влияют на потребляемую мощность; в режиме установившегося горизонтального полета основной вклад в величину потребляемой мощности вносят мощность, необходимая для преодоления аэродинамического сопротивления, и индуктивная мощность. С ростом скорости полета индуктивная скорость падает, т.е. индуктивная мощность снижается. Следует отметить, что сила аэродинамического сопротивления пропорциональна квадрату скорости полета; при этом мощность, необходимая для преодоления аэродинамического сопротивления, пропорциональна кубу скорости полета. Таким образом, при равномерном увеличении скорости полета потребляемая мощность вначале снижается благодаря уменьшению индуктивной мощности, а затем возрастает из-за резкого увеличения аэродинамического сопротивления.

При отсутствии полезной нагрузки на борту аппарата максимальное полетное время составляет 1332 секунды; если масса полезной нагрузки практически равна полетной массе, время полета уменьшается до 560 секунд. Кроме того, с ростом доли полезной нагрузки уменьшается оптимальная скорость полета.

Описываемый беспилотный аппарат произвел несколько полетов с различным количеством аккумуляторов и различными установившимися скоростями. Полеты производились при хороших погодных условиях. Следует отметить, что расхождение между расчетными данными и реальными измерениями может быть вызвано наличием ветра на протяжении маршрута, что невозможно проконтролировать.

Таблица 12. Результаты измеренного и расчетного времени полета беспилотника.

Полетная масса, кг	14	14	14	18	18	18	22	22
Количество аккумуляторов, шт	2	2	2	4	4	4	6	6
Суммарная емкость, МАч	16000	16000	16000	32000	32000	32000	48000	48000
Скорость полета, м/с	висение	1.4	12	висение	1.4	12	висение	1.4
Расчетное время полета, с	1334	1410	1422	1873	1955	1948	2095	2169
Измеренное время полета, с	1329	1386	1348	1904	1922	1949	2169	2260
Отклонение расчетных данных от измеренных, %	0.38	1.73	5.49	1.63	1.72	0.05	3.41	4.01

Максимальная разница между расчетным полетным временем и измеренным составила 5.5%, а среднее отклонение составило 2.3%; таким образом, описываемый метод расчета радиуса действия является достоверным для использования.

Следует учесть, что увеличение полетного времени не пропорционально увеличению количества (емкости) аккумуляторов, т.е. установка дополнительных аккумуляторов не является достаточно эффективным способом увеличения радиуса действия аппарата.

6. Правовое использование беспилотных летательных аппаратов

Современный уровень развития науки и техники, технологий, организации производства предполагают обеспечивать переход мировой экономики к технологическому укладу, предполагающему в первую очередь, перевод транспортной системы на беспилотную модель развития. Техническая сторона развивается в быстром темпе, однако правовое регулирование таких технологий, правил их использования, контроля и надзора, привлечение к ответственности, формирование нормативной правовой базы, в целом, находится в стадии становления.

Ключевое направление в развитии беспилотного транспорта – беспилотная авиация, в частности, беспилотные летательные аппараты, которые уже применяются во

многих сферах жизни общества таких, как предпринимательство, правоохранительная деятельность, искусство и т.д.

На данный момент правовое регулирование БПЛА реализуется в Воздушном кодексе Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ, который закрепляет понятие беспилотного воздушного судна, правовой статус командира такого судна. Правила использования БПЛА закреплены в Федеральных правилах использования воздушного пространства, утвержденных Постановлением Правительства РФ от 11.03.2010 № 138 (далее – Федеральные правила).

Согласно правилам, пилот БПЛА весом менее 250 грамм может осуществлять полет без согласования плана полета и без получения разрешения у контролирующих органов. Соответственно, для БПЛА весом более 250 грамм появляется обязанность согласования и получения разрешения. Также полет должен проходить в зоне прямой видимости в светлое время суток на высоте не более 150 метров от земли или водной поверхности, вне аэродромов (аэроузлов, вертодромов), в местах проведения публичных мероприятий, спортивных соревнований и в иных местах (зоны над частной собственностью).

Российская правовая база в данной сфере еще недостаточно развита и требует значительных изменений, прежде всего, правового и организационного характера. Законодатель находится в процессе создания нормативно-правовой базы, которая в полной мере регламентировала бы правовой статус БПЛА. Беспилотные летательные аппараты представляют собой новое технологическое решение, правовое регулирование их использования является недостаточно стабильным и устоявшимся как в российском правовом пространстве, так и зарубежном.

В последнее время отмечается значительное увеличение случаев нарушений порядка использования воздушного пространства Российской Федерации, допущенных гражданами – владельцами беспилотных воздушных судов. Наибольшую опасность представляли случаи несанкционированного запуска БВС в районах аэродромов (вертодромов, посадочных площадок), которые могли повлечь за собой угрозу для безопасности полетов, а также запуски БВС над населенными пунктами, представляющие угрозу для безопасности людей и объектов на земле.

Основное количество нарушений было совершено владельцами БВС с максимальной взлетной массой до 30 кг при выполнении полетов в частных целях. В большинстве случаев допускаемые нарушения связаны с незнанием владельцами БВС правил использования воздушного пространства Российской Федерации и факторов опасности, связанных с запуском БВС. В целях исключения случаев несанкционированных запусков беспилотных гражданских воздушных судов следует обратить внимание владельцев БВС на требования воздушного законодательства Российской Федерации. Беспилотные гражданские воздушные суда с максимальной взлетной массой от 0.25 до 30 кг, ввезенные в Российскую Федерацию или произведенные в Российской Федерации, подлежат учету в порядке, установленном

Правилами учета беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлетной массой от 0.25 килограмма до 30 килограммов, ввезенных в Российскую Федерацию или произведенных в Российской Федерации, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 25.05.2019 № 658, и Административным регламентом Федерального агентства воздушного транспорта предоставления государственной услуги по учету беспилотных гражданских воздушных судов, утвержденным приказом Росавиации от 28.10.2019 № 1040-П.

Беспилотные гражданские воздушные суда с максимальной взлетной массой более 30 килограммов подлежат государственной регистрации в порядке, установленном Административным регламентом Федерального агентства воздушного транспорта предоставления государственной услуги по государственной регистрации гражданских воздушных судов и ведению государственного реестра гражданских воздушных судов Российской Федерации, утвержденным приказом Минтранса России от 05.12.2013 № 457 (утратит силу 1 сентября 2023 года).

Полеты БВС отнесены к деятельности по использованию воздушного пространства. Физические или юридические лица, планирующие осуществлять запуски БВС, должны знать и выполнять правила и процедуры, установленные воздушным законодательством Российской Федерации в сфере использования воздушного пространства. Порядок использования воздушного пространства Российской Федерации, в том числе и БВС, установлен Федеральными правилами использования воздушного пространства Российской Федерации, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 11.03.2010 № 138.

Для выполнения полетов БВС Федеральными правилами установлен разрешительный порядок использования воздушного пространства независимо от класса воздушного пространства, в котором выполняется полет. Разрешительный порядок использования воздушного пространства предусматривает направление в оперативные органы (центры) Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (далее – ЕС ОрВД) представленного плана полета летательного аппарата, а также получение разрешения центра ЕС ОрВД на использование воздушного пространства, за исключением полетов БВС, предусмотренных пунктом 52 Федеральных правил. Направление представленного плана полета воздушного судна в центры ЕС ОрВД осуществляется пользователем воздушного пространства (гражданином-владельцем БВС) в соответствии с Табелем сообщений о движении воздушных судов в Российской Федерации, утвержденным приказом Минтранса России от 24.01.2013 № 13.

При необходимости использования воздушного пространства БВС (за исключением полетов беспилотных воздушных судов с максимальной взлетной массой менее 0.25 кг) над населенным пунктом пользователю воздушного пространства в соответствии с пунктом 49 Федеральных правил дополнительно необходимо получить разрешение органа местного самоуправления такого населенного пункта, а в городах

федерального значения Москве, Санкт-Петербурге и Севастополе – разрешения соответствующих органов исполнительной власти указанных городов.

Пунктом 52(1) Федеральных правил предусмотрен упрощенный порядок использования воздушного пространства в случае выполнения визуальных полетов БВС с максимальной взлетной массой до 30 кг, осуществляемых в пределах прямой видимости в светлое время суток на высотах менее 150 метров от земной или водной поверхности в воздушном пространстве:

- вне диспетчерских зон аэродромов гражданской авиации, районов аэродромов (вертодромов) государственной и экспериментальной авиации, запретных зон, зон ограничения полетов, специальных зон, воздушного пространства над местами проведения публичных мероприятий, официальных спортивных соревнований, а также охранных мероприятий, проводимых в соответствии с Федеральным законом «О государственной охране»;
- на удалении более 5 км от контрольных точек неконтролируемых аэродромов и посадочных площадок.

Для выполнения вышеуказанных полетов БВС не требуется представление соответствующего плана полета, получение разрешения на использование воздушного пространства, а также направление представления на установление временных, местных режимов и кратковременных ограничений.

В приграничной полосе запрещены полеты без представления плана полета воздушного судна, разрешения на использование воздушного пространства и без радиосвязи экипажа воздушного судна с органом обслуживания воздушного движения (управления полетами). Использование воздушного пространства приграничной полосы при выполнении авиационных работ осуществляется при наличии у пользователей разрешения территориального органа Федеральной службы безопасности Российской Федерации. В целях предотвращения непреднамеренного нарушения государственной границы Российской Федерации, пункты управления БВС, находящиеся в приграничной полосе, должны иметь систему наблюдения, позволяющую осуществлять контроль за полетом БВС.

Согласно пункту 40 Федеральных правил, при необходимости использования воздушного пространства запретных зон и зон ограничения полетов пользователи воздушного пространства обязаны получить разрешение лиц, в интересах которых установлены такие зоны.

За нарушение правил использования воздушного пространства Кодексом Российской Федерации об административных правонарушениях (ст. 11.4) установлена соответствующая ответственность граждан, должностных и юридических лиц.

Рынок любительских и коммерческих БПЛА на территории Российской Федерации значительно вырос за последние несколько лет. В 2019 году российское правительство издало Постановление Правительства РФ от 25.05.2019 № 658 «Об

утверждении Правил государственного учета беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлетной массой от 0.15 килограмма до 30 килограммов, ввезенных в Российскую Федерацию или произведенных в Российской Федерации», по которому теперь все владельцы БПЛА определенной массы должны были поставить свои беспилотники на учет, зарегистрировав их в Росавиации.

19 марта 2022 года правительством было принято несколько поправок к этому постановлению, и сегодня обязательной регистрации подлежат все БПЛА весом более 150 граммов. При этом максимальный вес регистрируемого по этим правилам БПЛА не изменился и составляет 30 кг.

Если коптер приобретен совсем недавно, то перед запуском своего БПЛА необходимо знать следующее:

- Беспилотные летательные аппараты на территории РФ **подлежат обязательной регистрации** в Росавиации, если их вес находится в диапазоне **от 150 граммов до 30 килограммов**.
- Все полеты должны осуществляться только в дневное время, когда беспилотник хорошо и отчетливо виден оператором, а высота запуска не должна превышать 150 метров.
- Законодательно в России запрещено запускать любительские и коммерческие БПЛА в следующих зонах: в пределах аэродромов, в зоне стратегических или специальных объектов, которые обозначены как ОБПЛАсти, в пределах которых запуск любых летательных средств ограничен. Спешим отметить, что за 2022-начало 2023 года был издан ряд постановлений на региональном уровне, запрещающих или ограничивающих полеты БПЛА. Поэтому **перед запуском своего БПЛА обязательно уточните, не запрещено ли у вас в ОБПЛАсти, крае или республике проводить полеты беспилотников** без выдачи разрешения соответствующего регионального органа. В особенности это касается приграничных регионов европейской части России, где губернаторы приняли постановление о временном ограничении использования коптеров для полетов без согласования и одобрения региональных оперативных штабов.
- Запрещен запуск БПЛА в местах массового скопления людей.

Любой запуск БПЛА над городом или поселением должен быть согласован с органами местной администрации. При этом требования к регистрации БПЛА всё те же – от 0.150 до 30 кг. Поставить БПЛА на учет владелец обязан не позднее 10 дней с даты его покупки.

Беспилотные летательные аппараты с массой более 30 килограммов должны быть поставлены на учет в ФСБ и проходят отдельную процедуру регистрации. При этом для получения разрешения на использование такого тяжелого БПЛА вы должны указать свое полное имя, контактный телефон, адрес и ИНН. Запрашивается также техническая информация о возможностях беспилотного летательного аппарата (количество и тип двигателей, их мощность, максимальный вес коптера при взлете, название фирмы-

изготовителя БПЛА и год его производства, серия и номер БПЛА и т.д.). Большие коптеры также обязаны проходить процедуру сертификации, о чем сказано в п. 9 ст. 37 Воздушного кодекса РФ.

Ввиду того, что по закону запускать БПЛА над населенным пунктом и местами скопления людей нельзя, даже для проведения свадебной съемки вы должны взять соответствующее разрешение у владельца территории, над которой будет проходить съемка, или муниципальных властей. Разрешенные и запрещенные для полета зоны в Москве можно уточнить на официальной странице мэра Москвы.

Любительские и коммерческие БПЛА, как правило, используются для проведения фото- и видеосъемки. Если коптер запускается именно с этой целью, то необходимо уведомить управление ФСБ в вашем регионе о своих намерениях. При этом в заявлении должны быть указаны как все данные БПЛА, так и сведения об операторе БПЛА. Также прописываются место проведения полета и цель, для которой необходима съемка. После получения разрешения, которое должно быть выдано в 10-дневный период, владелец и оператор БПЛА связываются уже с региональным центром Единой системы по организации воздушного движения для согласования точного маршрута передвижения своего БПЛА. Управление полетов должно выдать свое разрешение на проведение запланированного мероприятия с использованием беспилотника.

Советуем владельцам БПЛА и их операторам не пренебрегать выполнением предписанных норм и процедур, ведь за это грозит административная ответственность. Оплата штрафа ложится на плечи владельца БПЛА. Несанкционированный запуск БПЛА над запрещенной территорией грозит штрафом в размере 20000 – 50000 рублей для физических лиц, 100000 – 150000 рублей для должностных лиц и 250000 – 300000 рублей для юридических лиц. Для последней категории может быть введено административное приостановление деятельности сроком до 90 дней. Если БПЛА был запущен без предварительно выданного разрешения и в процессе полета или приземления причинил вред здоровью человека или стал причиной его смерти, то в данном случае предусмотрена уже уголовная ответственность.

Владелец БПЛА обязательно должен изучать законодательную базу перед покупкой беспилотника, а также выполнять все предписанные законом процедуры регистрации, сертификации и получения разрешений для полетов.

7. Список литературы

1. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования. / П.П. Афанасьев, И.С. Голубев, В.Н. Новиков, С.Г. Парафесь, М.Д. Пестов, И.К. Туркин / Под редакцией И.С. Голубева и И.К. Туркина. – изд. второе, переработанное и дополненное. – М.:2008. – 656 с.: ил.
2. Конструкция самолетов: Учебник для студентов авиационных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1991. – 400 с.: ил.
3. Надежность летательных аппаратов: Учеб. пособие/ С.К. Кириакиди. В.А. Сатин и др. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2009. 107 с.
4. Основы аэродинамики. Учебник, 2-е издание. /Кокунина Л.Х. Москва: Изд-во Транспорт, 1982-197 с.
5. Махонин А.А., Аль-Духэйдахави М.А.Л., Аль-Карави Р.Д.С. Анализ энергопотребления беспилотного летательного аппарата малых размеров // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2021. №3.
6. Аэродинамика и самолетостроение: учеб. пособие / [В.В. Бирюк и др.]. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. – 180 с.: ил.
7. Аэромеханика и аэродинамика. / В.Г. Ципенко / методическое пособие по программе Дополнительного профильного образования для педагогических работников, работающих в инженерных классах, разработанной и утвержденной в рамках Соглашения между Департаментом образования г. Москвы и МГТУГА 28.04.15 №92.
8. Основы авиации. Часть I. Основы аэродинамики и динамики полета летательных аппаратов: Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2012. – 64 с.
9. Булат П.В., Дудников С.Ю., Кузнецов П.Н. Основы аэродинамики беспилотных воздушных судов: Учебное пособие. – М.: Издательство «Спутник +», 2021. – 273 с.
10. Корнеев В.М. Конструкция и основы эксплуатации летательных аппаратов: конспект лекций / В. М. Корнеев. – Ульяновск: УВАУ ГА(и), 2009. – 130 с.
11. Надежность летательных аппаратов: Учеб. пособие/ С.К. Кириакиди. В.А. Сатин и др. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2009. 107 с.