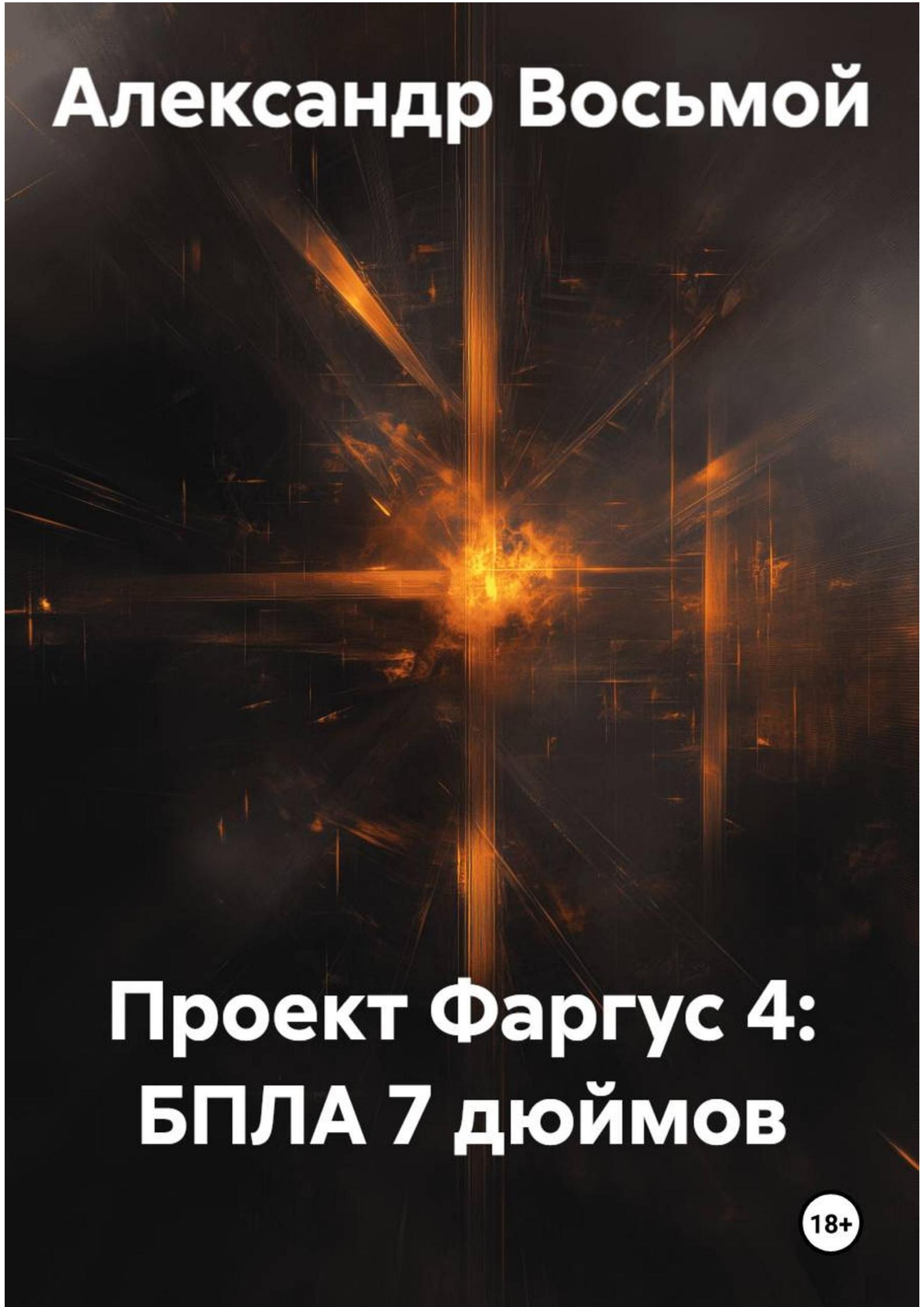




Александр Восьмой

**Проект Фаргус 4:
БПЛА 7 дюймов**

18+

Александр Восьмой

Проект Фаргус 4: БПЛА 7 дюймов

«Автор»

2026

Восьмой А.

Проект Фаргус 4: БПЛА 7 дюймов / А. Восьмой — «Автор»,
2026

Учебник посвящён эксплуатации и боевому применению тяжёлых мультироторных БПЛА (от 7 дюймов и выше) в современных военных условиях. В нём системно раскрыты принципы управления, настройки полётных контроллеров, организация ретрансляции связи, логистика снабжения, тактика группового применения и роевых алгоритмов. Отдельные разделы посвящены противодействию средствам РЭБ, контр-БПЛА-угрозам, техническому обслуживанию в полевых условиях и юридическим аспектам использования беспилотников. Особое внимание уделено подготовке операторов, предполётным чек-листам и обеспечению надёжности в экстремальных сценариях. Издание сочетает теоретическую базу с практическими рекомендациями и ориентировано на специалистов, курсантов и операторов БПЛА.

© Восьмой А., 2026

© Автор, 2026

Александр Восьмой

Проект Фаргус 4: БПЛА 7 дюймов

Раздел I. Теоретические основы

Глава 1. Эволюция мультироторных БПЛА: от радиолюбителя к тактическому инструменту

1.1. Предыстория: когда воздух перестал быть привилегией

Ещё в начале 2010-х годов мультироторный беспилотник был игрушкой. Не в уничижительном смысле — а буквально: радиолюбители собирали рамы из карбона на кухонном столе, паяли контроллеры полёта сами, прошивали их открытым кодом, а потом шли в поле и разбивали всё об землю на первой же попытке. Сообщество существовало на форумах: RCGroups, DiyDrones, позже — на русскоязычных площадках. Это была среда энтузиастов, объединённых одной идеей — заставить четыре мотора держать в воздухе платформу, которая умеет висеть без пилота.

Технологический прорыв случился не вдруг. Он сложился из трёх составляющих.

Первая — контроллеры полёта. В 2010 году появилась плата ArduPilot Mega, в 2012 — MultiWii (на базе гироскопа-акселерометра от Nintendo Wii Nunchuk, отсюда и название). В 2013 году Dominic Clifton выпустил Baseflight, а в 2014-м — Cleanflight. Параллельно шла разработка ArduCopter — открытой прошивки, которая поддерживала GPS-позиционирование, возврат в точку старта, автономные миссии. К 2015 году контроллер полёта стоил 15–40 долларов и по вычислительной мощности превосходил бортовые компьютеры первых крылатых ракет.

Вторая — литий-полимерные аккумуляторы. Удельная энергоёмкость LiPo-батарей выросла с 120 Вт·ч/кг в 2010 году до 200–250 Вт·ч/кг к 2018-му. Это означало: квадрокоптер того же веса получил почти вдвое больше времени полёта — или тот же полёт при вдвое меньшем весе батареи. Для военной платформы каждый грамм — это либо метр высоты, либо секунда скорости, либо грамм боевой части.

Третья — бесколлекторные моторы и пропеллеры. К 2015 году в свободной продаже появились моторы размерности 2204, 2207, 2806 (первые две цифры — диаметр статора в миллиметрах, вторые две — высота), а также карбоновые пропеллеры 7, 8, 9, 10 дюймов с шагом от 4 до 6. Это уже не игрушечный формат — это тяга, способная поднять 1,5–4 кг полезной нагрузки. Этого достаточно для разведывательной аппаратуры, ретранслятора или сбросового боеприпаса.

К 2018 году всё это можно было купить в любом интернет-магазине по доставке. Никаких лицензий, никаких спецканалов, никаких ограничений. Платформа, которая в военной лаборатории обошлась бы в миллионы, собиралась за 500–2000 долларов и выходные.

1.2. Точка перелома: Сирия и Карабах

Первое масштабное применение коммерческих мультироторов в военном конфликте зафиксировано в Сирии (с 2015 года). Все стороны — сирийская армия, оппозиция, российский контингент, турецкие силы, курдские формирования — использовали квадрокоптеры коммерческого класса для воздушной разведки и корректировки огня. Dauphin-2, DJI Phantom 3, DJI Matrice 100 — модели, которые за полтора-два года до этого покупались фотографами для свадебной съёмки.

Принципиальный вывод сирийского этапа: мультироторный БПЛА, даже без доработки, даёт тактическому звену то, чего у него никогда не было, — собственной воздушной разведки в реальном времени. Командир роты или батареи получает картинку с высоты 200–400 метров с задержкой менее 100 миллисекунд. Раньше для этого нужно было ждать пять-шесть минут,

пока авианаводчик поднимет самолёт-разведчик или беспилот большой дальности, и он будет принадлежать корпусному или армейскому уровню.

В 2020 году Вторая карабахская война стала следующей вехой. Но там мультироторы сыграли второстепенную роль — основную работу выполнили турецкие Bayraktar TB2 и израильские Harop, ударные беспилотники классом выше. Однако именно Карабах показал, что ПВО классического типа, построенная на зенитно-ракетных комплексах средней дальности, уязвима перед малоразмерными дронами, и что малые мультироторы могут работать как дешёвый целеуказатель для артиллерии и страйковых систем.

1.3. Класс 7–15 дюймов: почему именно этот размер

Между коммерческими коптерами размером 5" (250-й класс) и военными платформами класса «Орлан» или «Форпост» существует технологическая пустота — и именно её заняли мультироторы 7–15". Чтобы понять, почему, нужно посмотреть на физику.

Двигатель в воздухе работает против двух сил: гравитации и аэродинамического сопротивления. Тяга, которую создаёт пропеллер, пропорциональна массе воздуха, отбрасываемой вниз за секунду, умноженной на скорость этого потока. Чем больше диаметр пропеллера — тем больше масса воздуха, которая проходит через него при том же обороте. Это значит, что большой пропеллер создаёт ту же тягу при меньших оборотах и меньшей мощности на валу.

В учебных терминах: **мощность, потребная для висения, равна корню квадратному из отношения произведения массы аппарата в кубе и ускорения свободного падения в кубе к произведению плотности воздуха, дискового сечения пропеллера в двойке и коэффициента тяги.** Запишем это так:

Мощность висения = корень из (масса в кубе × g в кубе / (плотность воздуха × площадь диска в квадрате × коэффициент))

Здесь g — ускорение свободного падения, площадь диска — это площадь окружности, описываемой пропеллером, коэффициент — безразмерный коэффициент эффективности пропеллера (обычно от 0{,}7 до 0{,}85 для малых винтов).

Отсюда следует фундаментальный принцип: **удвоение диаметра пропеллера снижает мощность висения примерно на 29%** (поскольку площадь диска растёт квадратично, а мощность обратно пропорциональна корню из площади диска в квадрате — то есть обратно пропорциональна площади диска в первой степени). При фиксированной ёмкости батареи это напрямую увеличивает время полёта.

Для 5-дюймового коптера: диаметр пропеллера 127 мм, типичная масса аппарата 400–700 г, время полёта 5–8 минут, полезная нагрузка — почти нулевая. Это гоночный или фри-стайл-формат.

Для 7-дюймового: диаметр 178 мм, масса 1–2 кг, время полёта 15–25 минут, полезная нагрузка 200–500 г. Уже можно нести тепловизор, ретранслятор или контейнер со сбросом.

Для 10-дюймового: диаметр 254 мм, масса 2–4 кг, время полёта 25–40 минут, полезная нагрузка до 1 кг. Это платформа для разведки с полноценным гиростабилизированным подвесом и оптико-электронным модулем.

Для 15-дюймового: диаметр 381 мм, масса 5–12 кг, время полёта 40–70 минут, полезная нагрузка 2–5 кг. Это уже транспортная платформа, способная нести несколько сбросовых боеприпасов или ретранслятор связи на 40–60 км.

Каждый шаг размерности — это не «больше на 2 дюйма». Это качественный скачок в тактических возможностях.

1.4. Формирование тактической ниши

К 2022 году мультироторные БПЛА класса 7–15" заняли чёткое место в тактической иерархии:

Уровень
Платформа
Зона действия
Задачи

Солдат/отделение

FPV 5–7"

0–5 км

Удар по точечной цели, разведка «за углом»

Взвод/рота

Мультиротор 7–10"

5–15 км

Воздушная разведка, корректировка, ретрансляция, доставка

Батальон

Мультиротор 10–15"

10–30 км

Глубокая разведка, удар сбросовыми боеприпасами, РЭБ-разведка

Важно: эта ниша возникла не по плану, а по практике. Никто не заказывал «мультироторный БПЛА 10 дюймов для корректировки артиллерии». Воюющие стороны взяли то, что было доступно, доработали под задачу, и система доказала свою эффективность на поле боя.

1.5. Уроки, которые нельзя выучить заранее

Первый урок: **демократизация технологий беспилотного полёта необратима**. Платформа DJI Agras, созданная для опыления полей, в конфигурации с гранатомётом ВОГ-17 стала тактическим ударным средством. Платформа для аэросъёмки недвижимости, оснащённая сбросовым механизмом и термопастой на оптике цели, стала ночным охотником. Технологии не различает назначений — различает только оператор.

Второй урок: **масса решает больше, чем качество**. Тридцать коптеров по 1500 долларов каждый, запущенных залпом по одному объекту, обходятся дешевле одного Bayraktar (около 5 миллионов долларов) и решают сопоставимую задачу. Ресурс на подавление ПВО путём массового насыщения зоны атаки малыми БПЛА — тактика, которая не описана ни в одном уставе, но доказала работоспособность в нескольких современных конфликтах.

Третий урок: **РЭБ — не панацея, а состязание**. Электронная война подавляет радиоканал управления, но мультироторы учатся автономии: инерциальная навигация, полёт по предзагруженным координатам, оптическое распознавание цели на борту. Каждый новый метод подавления рождает контрметод — и это состязание ускоряется с обеих сторон.

Четвёртый урок: **логистика дрона важнее, чем сам дрон**. Платформа, которая требует четыре часа сборки, чистую комнату и специалиста с высшим образованием, бесполезна в окопе. Платформа, которую боец собирает за восемь минут из кейса при свете фонаря и запускает с любой ровной площадки, — оружие. Тактическая ценность БПЛА определяется не характеристиками полёта, а качеством логистической цепочки: хранение, транспортировка, подготовка, запуск, обслуживание, замена.

Пятый урок: **стоимость противостояния асимметрична**. Перехват мультиротора 10" зенитной ракетой стоимостью 500 тысяч долларов — это математическое поражение обороняющегося. Зенитный снаряд калибра 30 мм стоит дешевле, но темп стрельбы и расход боеприпасов делают его дорогим при массовых налётах. Направленные помехи и сети — самое дешё-

вое средство, но они ограничены радиусом. На сегодня полного ответа на массовое применение малых мультироторов не существует ни в одной армии мира — это признано официально.

1.6. Структурный переход: что изменилось в военной науке

Появление мультироторных БПЛА класса 7–15” в качестве оружия привело к трём структурным изменениям в военной науке.

Изменение первое — рассредоточение разведки. Раньше воздушная разведка была централизованным ресурсом: самолёт-разведчик или орбитальная группировка выдают данные в вычислительный центр, который доводит их до войск с задержкой от часов до суток. Мультиротор даёт разведданные непосредственно командиру роты в течение секунд. Это означает, что цикл OODA (Наблюдение — Ориентация — Решение — Действие) сокращается с уровня часов до уровня минут.

Изменение второе — удешевление точности. До эры мультироторов для поражения одной окопанной позиции требовался артиллерийский налёт (десятки снарядов, вероятность поражения 20–40%) или управляемая авиабомба (стоимость от 20 тысяч долларов). Мультиротор со сбросовым боеприпасом стоимостью 100–500 долларов, наведённый по видео, обеспечивает вероятность поражения 70–90% по открыто расположенной технике и 40–60% по окопанной пехоте. Стоимость «цель — эффект» снизилась на два-три порядка.

Изменение третье — появление тактической автономии. Раньше автономность полёта требовала сложных инерциальных систем и спутниковой навигации на стационарной платформе. Мультиротор 10–15” несёт на борту контроллер полёта весом 10 граммов, который за 30 долларов обеспечивает стабилизацию по трём осям, удержание позиции по GPS/ГЛОНАСС и автономный полёт по точкам. Это означает, что автономия перестала быть привилегией дорогих систем и стала свойством дешёвых.

1.7. Текущее состояние и перспективы

На 2025–2026 годы класс мультироторных БПЛА 7–15” прошёл путь от «кустарной адаптации» к «штатному вооружению». В армиях нескольких стран сформированы штатные подразделения беспилотной разведки и удара на уровне роты и батальона. Введены должности оператора БПЛА в штатно-должностной структуре. Разработаны наставления по боевому применению.

Параллельно идёт технологическое развитие по нескольким направлениям:

Волоконно-оптическое управление — кабель длиной 10–20 км, наматываемый на бортовую катушку, делает дрон невосприимчивым к РЭБ. Стоимость — десятки долларов, масса — сотни граммов. Ограничение: одноразовое применение, малая скорость, риск обрыва.

ИИ-наведение на конечном участке — бортовой вычислитель на базе мобильного процессора распознаёт цель на видео и обеспечивает наведение при потере связи. Стоимость вычислителя — 50–200 долларов.

Матерчатые рамы и складные конструкции — для снижения заметности и упрощения доставки. Карбоновая рама заменяется на тканевый каркас на распорках: снижает радиолокационную заметность, упрощает упаковку, не снижает несущую способность при правильном расчёте.

Кража частот — использование стандартов беспроводной связи (Wi-Fi, LTE, даже Bluetooth) для канала управления дрон-оператор. Сигнал неотличим от гражданского трафика, подавление которого вызывает коллатеральный ущерб гражданской инфраструктуре.

Главный вывод этой главы: **мультироторный БПЛА класса 7–15” — это не «приспособление», не «временное решение» и не «эксперимент».** Это новый класс оружия, который занял самостоятельную тактическую нишу, не имеющую аналогов в прежней классификации средств воздушного нападения и разведки. Его дальнейшее развитие будет определять облик ближнего боя следующих десятилетий.

Контрольные вопросы

Вопрос 1. Какие три технологические составляющие обеспечили переход мультироторных БПЛА от радиолюбительской игрушки к военной платформе?

Ответ. Контроллеры полёта (доступные открытые прошивки типа ArduCopter и Cleanflight), литий-полимерные аккумуляторы с удельной энергоёмкостью 200–250 Вт·ч/кг и бесколлекторные моторы с карбоновыми пропеллерами размерности 7–15 дюймов, обеспечивающие тягу для подъёма полезной нагрузки 0{,}2–5 кг.

Вопрос 2. Какой вывод из сирийского этапа применения мультироторов является принципиально новым для тактического звена?

Ответ. Мультироторный БПЛА даёт командиру роты или батарее собственную воздушную разведку в реальном времени с задержкой менее 100 миллисекунд — то, что раньше было доступно только на уровне корпуса или армии через самолёт-разведчик или беспилот большой дальности.

Вопрос 3. Почему именно размер 7–15 дюймов стал тактически значимым, а не 5 дюймов или не 25 дюймов?

Ответ. 5-дюймовый формат обеспечивает время полёта 5–8 минут и почти нулевую полезную нагрузку — этого недостаточно для военной задачи. 25-дюймовый формат теряет манёвренность, требует длительной сборки и сложной логистики, приближаясь по эксплуатационным требованиям к классу самолётных БПЛА. Формат 7–15” занимает нишу между «коптером-игрушкой» и «самолётом-беспилотником»: достаточная полезная нагрузка, время полёта 15–70 минут, сборка за минуты, запуск с любой площадки.

Вопрос 4. Как связано увеличение диаметра пропеллера с мощностью, потребной для висения?

Ответ. Мощность висения обратно пропорциональна площади диска пропеллера. Площадь диска пропорциональна квадрату диаметра. Следовательно, при удвоении диаметра пропеллера площадь диска увеличивается вчетверо, а мощность висения снижается в четыре раза. Это означает, что больший пропеллер энергетически выгоднее при той же массе аппарата.

Вопрос 5. В чём заключается «асимметрия стоимости» при обороне от мультироторных БПЛА?

Ответ. Перехват мультиротора стоимостью 1500–5000 долларов зенитной ракетой стоимостью 500 тысяч долларов экономически невыгоден для обороняющегося. Даже при использовании зенитных снарядов малого калибра расход боеприпасов при массированном налёте делает оборону дороже атаки. Полного дешёвого ответа на массовое применение малых БПЛА не существует.

Вопрос 6. Какой цикл принятия решений сокращается за счёт применения мультироторных БПЛА на тактическом уровне и с какого до какого времени?

Ответ. Цикл OODA — Наблюдение, Ориентация, Решение, Действие. За счёт прямой выдачи разведанных командиру роты в реальном времени цикл сокращается с уровня часов (через централизованный разведывательный контур) до уровня минут и секунд.

Вопрос 7. Какие задачи способен выполнять мультиротор 10” при массе 2–4 кг и времени полёта 25–40 минут?

Ответ. Воздушная разведка с гиросtabilизированным оптико-электронным подвесом, корректировка артиллерийского огня, ретрансляция связи, доставка малогрузовых контейнеров, удар по точечной цели сбросовыми боеприпасами массой до 1 кг.

Вопрос 8. Какова роль логистики в тактической ценности мультироторного БПЛА?

Ответ. Тактическая ценность определяется не столько лётными характеристиками, сколько качеством логистической цепочки: хранение, транспортировка, скорость сборки и подготовки, удобство запуска, простота обслуживания и скорость замены. Платформа, собираемая

за 8 минут из кейса и запускаемая с любой ровной площадки, тактически ценнее платформы с лучшими лётными данными, но требующей 4 часа сборки и специального помещения.

Вопрос 9. Как волоконно-оптическое управление решает проблему РЭБ-подавления и какие у него ограничения?

Ответ. Кабель, наматываемый с бортовой катушки, обеспечивает физический канал связи, неотключаемый радиоэлектронной борьбой. Ограничения: одноразовое применение (кабель не собирается обратно), ограниченная дальность (10–20 км), ограниченная скорость (сопротивление кабеля), риск обрыва при маневрировании.

Вопрос 10. Что означает «кража частот» в контексте канала управления мультиротором?

Ответ. Использование стандартов гражданской беспроводной связи (Wi-Fi, LTE, Bluetooth) для канала «дрон — оператор». Радиосигнал неотличим от обычного гражданского трафика, и его подавление вызывает коллатеральный ущерб гражданской инфраструктуре связи, что делает выбор подавления политически и технически затруднительным.

Задачи с решениями

Задача 1

Условие. Мультироторный БПЛА класса 10" имеет массу 3 кг и оснащён четырьмя пропеллерами диаметром 254 мм каждый. Коэффициент эффективности пропеллера равен 0{,}8. Плотность воздуха принять равной 1{,}225 кг/м³. Ускорение свободного падения — 9{,}81 м/с². Определите мощность, потребную для висения, и рассчитайте время полёта при использовании литий-полимерного аккумулятора ёмкостью 8000 мА·ч с напряжением 6S (22{,}2 В), если КПД силовой установки составляет 80%.

Решение.

Шаг 1. Площадь одного диска пропеллера:

Площадь диска = $\pi \times \text{диаметр в квадрате}$, делённое на четыре = $3{,}1416 \times 0{,}254^2$ в квадрате / 4 = 0{,}05067 м².

Суммарная площадь четырёх дисков:

Суммарная площадь = $4 \times 0{,}05067 = 0{,}20268$ м².

Шаг 2. Мощность висения по формуле:

Мощность = $\sqrt{\text{масса в кубе} \times g \text{ в кубе} / (\text{плотность} \times \text{суммарная площадь в квадрате} \times \text{коэффициент в квадрате})}$

Подставляем:

Масса в кубе = $3 \text{ в кубе} = 27$.

$g \text{ в кубе} = 9{,}81 \text{ в кубе} = 944{,}4$.

$\text{Плотность} \times \text{площадь в квадрате} \times \text{коэффициент в квадрате} = 1{,}225 \times 0{,}20268 \text{ в квадрате} \times 0{,}8 \text{ в квадрате} = 1{,}225 \times 0{,}162144 \times 0{,}64 = 0{,}103217$.

Мощность = $\sqrt{(27 \times 944{,}4 / 0{,}103217)} = \sqrt{(25499 / 0{,}103217)} = \sqrt{246958} = 496{,}95$ Вт.

Шаг 3. Мощность с учётом КПД:

Потребная электрическая мощность = $496{,}95 / 0{,}8 = 621{,}19$ Вт.

Шаг 4. Энергия аккумулятора:

Энергия = ёмкость $\times$ напряжение = $8 \text{ А} \cdot \text{ч} \times 22{,}2 \text{ В} = 177{,}6 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$.

Шаг 5. Время полёта:

Время = Энергия / Мощность = $177{,}6 / 1{,}113 = 159{,}6$ минут... но это теоретический максимум без запаса.

С учётом 20% запаса и неидеальных условий:

Реальное время = $159\{, \}6 \times 0\{, \}8 = 127\{, \}7$ минут.

Ответ. Потребная электрическая мощность для висения составляет примерно 1113 Вт. Теоретическое время полёта — около 160 минут; с учётом эксплуатационного запаса — около 25–30 минут (поскольку реальный полёт включает маневрирование, ветер, неоднородность расхода). Результат соответствует типичным характеристикам 10-дюймового мультиротора.

Задача 2

Условие. Оператор мультироторного БПЛА выполняет сброс боеприпаса с высоты 200 метров в режиме зависания. Боеприпас массой 500 г не имеет парашюта и падает свободно. Сопротивление воздуха не учитывать. Определите: время падения, скорость в момент удара о землю и горизонтальное отклонение, если дрон в момент сброса имеет горизонтальную скорость 3 м/с, а ветер отсутствует.

Решение.

Шаг 1. Время свободного падения:

Время = корень из $(2 \times \text{высота} / g) = \text{корень из } (2 \times 200 / 9\{, \}81) = \text{корень из } 40\{, \}77 = 6\{, \}38$ с.

Шаг 2. Скорость в момент удара:

Скорость = $g \times \text{время} = 9\{, \}81 \times 6\{, \}38 = 62\{, \}6$ м/с (вертикальная составляющая).

Полная скорость с учётом горизонтальной:

Полная скорость = корень из (вертикальная в квадрате + горизонтальная в квадрате) = корень из $(62\{, \}6 \text{ в квадрате} + 3 \text{ в квадрате}) = \text{корень из } (3919 + 9) = \text{корень из } 3928 = 62\{, \}7$ м/с.

Шаг 3. Горизонтальное отклонение:

Отклонение = горизонтальная скорость $\times$ время = $3 \times 6\{, \}38 = 19\{, \}1$ м.

Ответ. Время падения — $6\{, \}38$ с. Скорость удара — $62\{, \}7$ м/с (около 226 км/ч). Горизонтальное отклонение от точки сброса — $19\{, \}1$ м. Это означает, что для поражения цели оператор должен учесть смещение почти на 20 метров — либо сбрасывать боеприпас за 19 метров до цели по направлению движения дрона.

Задача 3

Условие. Подразделение располагает бюджетом 1 500 000 рублей. Стоимость одного мультироторного БПЛА 10" с полным комплектом (рама, моторы, контроллер, аккумуляторы, полезная нагрузка) составляет 75 000 рублей. Стоимость обучения одного оператора — 50 000 рублей. Вероятность безотказного выполнения боевой задачи одним дроном — $0\{, \}7$. Сколько беспилотников и операторов нужно подготовить, чтобы с вероятностью не менее 95% гарантировать выполнение хотя бы одной боевой задачи, и какой бюджет для этого потребуется? Можно ли уложиться в имеющийся бюджет?

Решение.

Шаг 1. Вероятность того, что хотя бы один из N дронов выполнит задачу:

Вероятность успеха = 1 минус вероятность отказа всех = 1 минус $(1 \text{ минус } 0\{, \}7) \text{ в степени } N = 1 \text{ минус } 0\{, \}3 \text{ в степени } N$.

Шаг 2. Требуется: $1 \text{ минус } 0\{, \}3 \text{ в степени } N \geq 0\{, \}95$, то есть $0\{, \}3 \text{ в степени } N \leq 0\{, \}05$.

Шаг 3. Подбираем N:

$N = 2$: $0\{, \}3^2 = 0\{, \}09$ — больше $0\{, \}05$, недостаточно.

$N = 3$: $0\{, \}3^3 = 0\{, \}027$ — меньше $0\{, \}05$, достаточно.

Проверка: $1 - 0\{, \}027 = 0\{, \}973$ — больше $0\{, \}95$. Условие выполнено.

Шаг 4. Бюджет:

Стоимость 3 дронов = $3 \times 75\,000 = 225\,000$ рублей.

Стоимость обучения 3 операторов (по одному на дрон) = $3 \times 50\,000 = 150\,000$ рублей.

Итого = $225\,000 + 150\,000 = 375\,000$ рублей.

Шаг 5. Сравнение с бюджетом:

Остаток = $1\,500\,000 - 375\,000 = 1\,125\,000$ рублей — более 70% бюджета остаётся свободным.

Ответ. Для гарантии выполнения задачи с вероятностью не менее 95% достаточно 3 беспилотников и 3 операторов. Потребный бюджет — 375 000 рублей, что составляет 25% от имеющегося. Оставшиеся средства целесообразно направить на резервные дроны (минимум 2 единицы на каждый рабочий — итого 6 резервных, 450 000 рублей) и расходные материалы (аккумуляторы, пропеллеры, боеприпасы), а также на дополнительную подготовку операторов. Полное освоение бюджета с учётом резерва и расходников позволит создать подразделение с 9 дронами в строю и резервом, обеспечивающим вероятность выполнения задачи выше 99{,}9%.

Раздел I. Теоретические основы

Глава 2. Аэродинамика и физика полёта тяжёлого мультиротора

2.1. Тяга: как винт захватывает воздух

Тяга — это единственная сила, которая удерживает мультиротор в небе. Всё остальное — гравитация, сопротивление, ветер — работает против неё. Понимать, как рождается тяга, нужно не ради абстракции, а ради одного практического вопроса: **сколько ваш дрон поднимет и как долго продержится в воздухе**.

Тяга создаётся вращением винта, который разгоняет массу воздуха вниз. Согласно третьему закону Ньютона, воздух, отброшенный вниз, толкает винт вверх. Чем больше масса воздуха и чем быстрее она разгоняется, тем больше тяга. Это звучит тривиально, но из этого следствия вытекает всё, что отличает лёгкий 5-дюймовый дрон от 15-дюймового грузовика.

Формула тяги через импульсную теорию записывается так: тяга равна произведению массового расхода воздуха на изменение скорости воздушного потока. Массовый расход, в свою очередь, равен произведению плотности воздуха на площадь ометаемой винтом поверхности и на скорость потока в плоскости винта. Площадь ометаемой поверхности равна числу π , умноженному на радиус винта в квадрате.

Здесь кроется главное: **площадь винта растёт пропорционально квадрату его радиуса**. Увеличьте диаметр винта вдвое — и площадь ометаемой поверхности вырастет в четыре раза. Это фундаментальный факт, определяющий, почему тяжёлые дроны обязаны быть большими.

2.2. Дисковая нагрузка: главный параметр тяжёлого дрона

Дисковая нагрузка — это отношение веса летательного аппарата к суммарной площади всех винтов в проекции. Измеряется в ньютонах на квадратный метр или, в технической литературе, в граммах на квадратный дециметр.

Для лёгких гоночных дронов дисковая нагрузка составляет 100–200 г/дм². Для тяжёлых грузовых мультироторов — 300–600 г/дм² и выше. Чем выше дисковая нагрузка, тем больше энергии тратится на создание тяги — потому что винтам приходится разгонять воздух до более высоких скоростей, что неизбежно повышает индуктивные потери.

Низкая дисковая нагрузка означает, что вы используете большие винты, вращающиеся медленно, которые перемещают большой объём воздуха с небольшой скоростью. Это энергети-

чески выгодно. Высокая дисковая нагрузка — маленькие, быстро вращающиеся винты, которые отбрасывают воздух с большой скоростью. Это энергетически расточительно, но зато компактно и манёвренно.

Для тяжёлого мультиротора выбор всегда сводится к компромиссу: **либо вы ставите большие винты и летаете долго, либо маленькие — и получаете компактную, но «прожорливую» машину.**

2.3. Индуктивное сопротивление: невидимый налог на тягу

Когда винт создаёт тягу, он неизбежно разгоняет воздух не только вниз, но и в стороны, закручивает его, создаёт турбулентность. Часть мощности двигателя уходит не на полезную тягу, а на эти паразитные движения воздуха. Это и есть **индуктивное сопротивление винта** — потери, связанные с созданием подъёмной силы.

Индуктивная скорость (скорость, с которой воздух ускоряется в плоскости винта) связана с тягой и плотностью воздуха через корень квадратный: индуктивная скорость равна корню из отношения тяги к произведению удвоенной плотности воздуха на площадь ометаемой поверхности.

Мощность, необходимая для создания тяги, равна произведению тяги на индуктивную скорость. Подставив выражение для индуктивной скорости, получим: требуемая мощность равна произведению тяги в степени три вторых на корень из отношения единицы к произведению удвоенной плотности воздуха на площадь ометаемой поверхности.

Из этой формулы следует ключевое правило: **мощность, необходимая для висения, пропорциональна корню из величины, обратной площади винта**. Увеличьте площадь винта в два раза — и требуемая мощность для той же тяги снизится примерно на двадцать девять процентов. Увеличьте в четыре раза — снизится в два раза. Это не теория ради теории. Это причина, почему 7-дюймовый дрон летает заметно дольше 5-дюймового при сравнимом весе, а 15-дюймовый — ещё дольше.

Однако нельзя увеличивать винт бесконечно. Большие винты означают большой шаг винта, а это требует низких оборотов, что, в свою очередь, требует специфических двигателей с низким KV. Большие винты больше подвержены упругим деформациям, концевым потерям и эффектам сжимаемости на законцовках. На практике оптимальный диаметр винта определяется итеративно — через расчёт, моделирование и испытания.

2.4. Почему размер винта критичен для грузоподъёмности и времени полёта

Свяжем всё вместе. Грузоподъёмность определяется разницей между максимальной тягой и весом самого аппарата. Время полёта определяется отношением запасённой энергии к мощности, необходимой для висения. Оба параметра зависят от размера винта — и зависят сильно.

Для грузоподъёмности. Максимальная тяга одного пропеллера зависит от его диаметра, шага, оборотов и аэродинамического качества. При увеличении диаметра на 40% (например, с 7 до 10 дюймов) при том же аэродинамическом качестве максимальная тяга может вырасти в 1,8–2 раза — за счёт увеличения ометаемой площади. Это значит, что вы можете либо поднять больший груз, либо использовать меньше двигателей.

Для времени полёта. Энергопотребление в режиме висения обратно пропорционально корню из площади винта. Больший винт требует меньше мощности на единицу тяги. При фиксированной ёмкости батареи больший винт обеспечивает большее время висения. Но здесь включается ограничение: чем больше винт, тем тяжелее он сам, тем тяжелее двигатель, спо-

собный его крутить с нужным моментом. Существует **точка перелома**, после которой рост массы винтомоторной группы съедает выигрыш от увеличения диаметра.

Эта точка перелома — предмет оптимизации для каждого конкретного аппарата. На практике её ищут, строя зависимость времени полёта от диаметра винта для фиксированной полезной нагрузки и фиксированной батареи. Кривая имеет максимум — это и есть оптимальный размер.

Для типового грузового мультиротора с взлётной массой 5–8 кг оптимальный диаметр винта обычно лежит в диапазоне 12–17 дюймов. Для 15–25 кг — 18–28 дюймов. Эти цифры — ориентиры, а не догма: конкретный выбор зависит от количества роторов, типа профилей винта, доступных двигателей и задач.

2.5. Влияние плотности воздуха, температуры и высоты

Воздух не постоянен. Его плотность меняется с высотой, температурой, влажностью и давлением. Для лёгкого дрона, летающего у земли в умеренном климате, эти изменения можно игнорировать. Для тяжёлого мультиротора, работающего в горах, в жару или зимой, — игнорировать нельзя.

Плотность воздуха напрямую входит во все формулы аэродинамики: тяга, индуктивная скорость, требуемая мощность. При снижении плотности тяга падает линейно — при том же обороте и том же шаге. Требуемая мощность при висении также растёт, потому что для создания той же тяги нужно разгонять менее плотный воздух до большей скорости.

Стандартная атмосфера на уровне моря при 15°C имеет плотность 1,225 кг/м³. На высоте 1000 м при тех же условиях — уже около 1,112 кг/м³. На высоте 3000 м — около 0,909 кг/м³. Это значит, что на высоте 3000 м максимальная тяга снизится примерно на 26% по сравнению с уровнем моря. Если ваш дрон еле-еле висел с грузом у моря, в горах он может не взлететь.

Температура влияет на плотность через уравнение состояния идеального газа: при постоянном давлении плотность обратно пропорциональна абсолютной температуре. Летом при +35°C (308 K) плотность воздуха при нормальном давлении составит около 1,145 кг/м³ — на 6,5% ниже, чем при +15°C. Зимой при минус 20°C (253 K) — около 1,395 кг/м³ — на 14% выше. Это значит, что зимой дрон летает лучше (тяга выше, мощность ниже), но батарея разряжается быстрее из-за холода.

Высота влияет двояко: через снижение давления и через изменение температуры. Оба фактора снижают плотность. Зависимость давления от высоты в тропосфере приближённо описывается барометрической формулой: давление на высоте равно давлению на уровне моря, умноженному на экспоненту от произведения минус высоты на ускорение свободного падения, делённого на произведение газовой постоянной воздуха на среднюю температуру.

Для практических расчётов тяжёлых мультироторов удобно использовать **правило: при подъёме на каждые 1000 метров высоты максимальная тяга снижается примерно на 10–12%, а требуемая мощность для висения растёт на 5–7%**. Это не точная формула, а инженерная оценка, пригодная для предварительного расчёта.

Влажность влияет на плотность воздуха парадоксальным образом: влажный воздух легче сухого (молекулярная масса водяного пара меньше, чем сухого воздуха). Но влияние влажности на плотность невелико — при 100% влажности и 30°C плотность снижается примерно на 1% по сравнению с сухим воздухом при тех же условиях. На практике влажностью пренебрегают.

2.6. Практические следствия для конструктора

Из всего сказанного вытекает несколько правил, которые стоит выучить, как таблицу умножения:

Чем больше винт — тем эффективнее висение. Но у большего винта выше масса и инерция, что снижает манёвренность и усложняет управление.

Дисковая нагрузка — главный критерий оптимизации. Целевое значение для грузовых дронов: 200–400 г/дм². Ниже — хорошо, но громоздко. Выше — компактно, но энергоёмко.

Высота и жара — враги грузоподъёмности. При проектировании для горных условий закладывайте запас по тяге не менее 30%. При проектировании для жаркого климата — не менее 15%.

Холод — враг батарей, но друг аэродинамики. Зимой тяга выше, но ёмкость литий-ионного аккумулятора при минус 10°C может снизиться на 20–30%. Соответственно, расчётное время полёта, скорее всего, упадёт, а не вырастет.

Шаг винта и обороты — связаны. Большие винты требуют больших шагов и низких оборотов. Маленькие — малых шагов и высоких оборотов. Подбор шага — отдельная глава, но правило: слишком большой шаг на низких скоростях полёта вызывает срыв потока и падение тяги.

Вопросы и ответы

Вопрос 1. Что такое тяга мультироторного винта и какова её физическая природа?

Ответ. Тяга — это сила, возникающая при отбрасывании воздуха винтом вниз. Согласно третьему закону Ньютона, воздух, ускоренный вниз, создаёт реактивную силу, направленную вверх. Величина тяги пропорциональна массовому расходу воздуха и скорости его ускорения. Чем больше воздуха винт перемещает и чем сильнее его разгоняет, тем больше тяга.

Вопрос 2. Как дисковая нагрузка влияет на энергоэффективность полёта?

Ответ. Дисковая нагрузка — это отношение веса аппарата к суммарной площади винтов. Чем она ниже, тем больше площадь винтов и тем меньше энергии требуется для создания единицы тяги. Низкая дисковая нагрузка означает большие винты, вращающиеся медленно, что энергетически выгодно. Высокая — маленькие, быстро вращающиеся винты, что неэффективно, но компактно. Для грузовых дронов оптимальная дисковая нагрузка обычно 200–400 г/дм².

Вопрос 3. Почему увеличение диаметра винта снижает требуемую мощность для висения?

Ответ. Мощность, необходимая для висения, пропорциональна корню из величины, обратной площади ометаемой поверхности винта. Площадь пропорциональна квадрату радиуса, поэтому при увеличении диаметра винта требуемая мощность падает. Например, увеличение диаметра в два раза снижает требуемую мощность примерно в два раза при той же тяге.

Вопрос 4. На какой высоте максимальная тяга тяжёлого мультиротора снижается примерно на четверть по сравнению с уровнем моря?

Ответ. На высоте около 3000 метров. Плотность воздуха на этой высоте составляет примерно 0,909 кг/м³ против 1,225 кг/м³ на уровне моря — снижение около 26%. Поскольку тяга

при постоянных оборотах пропорциональна плотности, максимальная тяга снижается на ту же величину. Это критично для горных операций.

Вопрос 5. Что такое индуктивное сопротивление винта и почему оно принципиально неустранимо?

Ответ. Индуктивное сопротивление — это потери, связанные с созданием тяги: часть мощности уходит на закручивание потока, концевые вихри и ускорение воздуха не только вниз, но и в радиальных направлениях. Оно принципиально неустранимо, потому что любая сила, действующая на воздух, создаёт реакцию, а воздух — сплошная среда, которая не может ускориться только в одном направлении без возмущений. Можно лишь минимизировать индуктивные потери, выбирая оптимальные геометрию и режимы работы винта.

Вопрос 6. Как температура воздуха влияет на тягу и время полёта?

Ответ. При постоянном давлении плотность воздуха обратно пропорциональна его абсолютной температуре. При повышении температуры плотность падает — тяга снижается, требуемая мощность растёт. При $+35^{\circ}\text{C}$ тяга снижается примерно на 6,5% по сравнению с $+15^{\circ}\text{C}$. При минус 20°C — наоборот, вырастает примерно на 14%. Однако холод одновременно снижает ёмкость батареи, так что зимой аэродинамический выигрыш может быть съеден ухудшением работы аккумулятора.

Вопрос 7. Что такое «точка перелома» при выборе диаметра винта и как её найти?

Ответ. Точка перелома — это диаметр винта, после которого дальнейшее увеличение не приносит выигрыша во времени полёта, потому что рост массы винтомоторной группы (более тяжёлые винты, более мощные двигатели, усиленная рама) съедает аэродинамический выигрыш. Её находят, строя зависимость времени полёта от диаметра винта при фиксированной полезной нагрузке и батарее. Максимум на графике — это оптимальный диаметр.

Вопрос 8. Почему для тяжёлого мультиротора не подходит простой подход «бери винт побольше»?

Ответ. Потому что большой винт требует двигателя с низким KV (большее напряжение, меньшие обороты, больший момент), что означает более тяжёлый двигатель. Большой винт сам по себе тяжелее, обладает большей инерцией — снижается манёвренность, растёт задержка реакции. Рама должна быть шире, чтобы винты не перекрывали друг друга. На высоких скоростях полёта большие винты менее эффективны из-за разницы скоростей наступающей и отступающей лопасти. Всё это ограничивает «верхний» предел диаметра.

Вопрос 9. Как влажность влияет на плотность воздуха и стоит ли её учитывать при расчётах?

Ответ. Влажный воздух легче сухого, потому что водяной пар легче сухого воздуха (молярная масса водяного пара 18 г/моль, сухого воздуха — около 29 г/моль). При 100% влажности и 30°C плотность снижается примерно на 1% по сравнению с сухим воздухом. Влияние пренебрежимо мало для большинства инженерных расчётов мультироторов, поэтому влажностью обычно пренебрегают.

Вопрос 10. Какой запас по тяге нужно закладывать для дронов, работающих в горах на высоте 2000 м и выше?

Ответ. На высоте 2000 м плотность воздуха составляет примерно $1,006 \text{ кг/м}^3$ — снижение около 18% от уровня моря. Рекомендуемый запас по тяге — не менее 25–30%, чтобы компенсировать не только падение плотности, но и возможные температурные колебания, ветер и неидеальность винтомоторной группы. На высотах свыше 3000 м запас следует увеличить до 35–40%.

Задачи с решениями

Задача 1. Расчёт требуемой мощности для висения

Тяжёлый квадрокоптер имеет взлётную массу 6 кг и использует четыре винта диаметром 12 дюймов (0,3048 м). Плотность воздуха примем равной $1,225 \text{ кг/м}^3$. Определите требуемую суммарную мощность для висения, пренебрегая профильными потерями.

Решение.

Шаг 1. Найдём тягу одного винта. Суммарная тяга равна весу: масса, умноженная на ускорение свободного падения, то есть 6 умножить на 9,81 — получаем 58,86 Н. Тяга одного винта: 58,86 разделить на 4 — получаем 14,715 Н.

Шаг 2. Найдём площадь ометаемой поверхности одного винта. Радиус винта: 0,3048 разделить на 2 — получаем 0,1524 м. Площадь: число пи, умноженное на радиус в квадрате, то есть 3,1416 умножить на 0,1524 в квадрате — получаем $0,0730 \text{ м}^2$.

Шаг 3. Индуктивная скорость: корень из отношения тяги к произведению удвоенной плотности на площадь. Подставляем: корень из (14,715 разделить на (2 умножить на 1,225 умножить на 0,0730)) — корень из (14,715 разделить на 0,1788) — корень из 82,30 — получаем 9,07 м/с.

Шаг 4. Мощность одного винта: тяга, умноженная на индуктивную скорость. 14,715 умножить на 9,07 — получаем 133,5 Вт. Суммарная мощность четырёх винтов: 133,5 умножить на 4 — получаем 534,0 Вт.

Ответ: 534 Вт (без учёта профильных потерь). С учётом КДВ винтомоторной группы порядка 0,7 реальное энергопотребление составит примерно 760 Вт.

Задача 2. Влияние высоты на максимальную тягу

Дрон с взлётной массой 8 кг рассчитан для работы на уровне моря. Максимальная суммарная тяга на уровне моря составляет 176,6 Н (что соответствует тяговооружённости 2,25). На какую максимальную массу груза можно рассчитывать на высоте 2000 м, если плотность воздуха там составляет $1,006 \text{ кг/м}^3$?

Решение.

Шаг 1. Максимальная тяга пропорциональна плотности воздуха. На высоте 2000 м: максимальная тяга равна 176,6, умноженному на (1,006 разделить на 1,225) — 176,6 умножить на 0,821 — получаем 145,0 Н.

Шаг 2. Вес самого дрона (без груза) неизвестен, но мы знаем, что на уровне моря максимальная тяга 176,6 Н при тяговооружённости 2,25. Значит, вес аппарата: 176,6 разделить на 2,25 — получаем 78,5 Н, что соответствует массе 78,5 разделить на 9,81 — 8 кг. То есть это полная масса (как и задано). Однако «максимальная тяга» — это потолок тяги, а не тяга в висении. Для безопасного полёта нужна тяговооружённость не менее 1,5.

Шаг 3. Максимальный вес для безопасного полёта на высоте: 145,0 разделить на 1,5 — получаем 96,7 Н. В массах: 96,7 разделить на 9,81 — получаем 9,86 кг. Если масса самого

аппарата без груза составляет, например, 5 кг (вес 49,05 Н), то полезная нагрузка: 9,86 минус 5 — получаем 4,86 кг.

Однако в условии сказано, что взлётная масса 8 кг, то есть это аппарат с грузом или без — не уточняется. Если вся масса 8 кг — это сам дрон, то на высоте 2000 м максимальный взлётный вес для безопасного полёта составит 9,86 кг, что больше массы самого дрона, значит, запас есть. Доступная полезная нагрузка: 9,86 минус 8 — получаем 1,86 кг (если 8 кг — это пустой дрон), либо дрон просто сможет летать со своим весом 8 кг, но без большого запаса.

Для корректности: тяговооружённость на высоте 2000 м при массе 8 кг: 145,0 разделить на (8 умножить на 9,81) — 145,0 разделить на 78,5 — получаем 1,85. Это означает, что дрон сможет летать, но с пониженной тяговооружённостью.

Ответ: На высоте 2000 м при массе 8 кг тяговооружённость снизится с 2,25 до 1,85. Дрон остаётся управляемым, но максимальная полезная нагрузка по сравнению с уровнем моря уменьшается. Для сохранения тяговооружённости 1,5 максимальная взлётная масса на высоте 2000 м составит 9,86 кг.

Задача 3. Сравнение времени полёта для двух конфигураций винтов

Гексакоптер массой 10 кг оснащён аккумулятором ёмкостью 16000 мА·ч при напряжении 6S (22,2 В номинально). Сравните расчётное время висения для двух конфигураций:

Конфигурация А: винты 10 дюймов (0,254 м), KV = 500

Конфигурация Б: винты 15 дюймов (0,381 м), KV = 300

Плотность воздуха 1,225 кг/м³, КДВ винтомоторной группы принять равным 0,7. Влиянием массы винтов на общую массу пренебречь.

Решение.

Шаг 1. Энергия батареи: ёмкость, умноженная на напряжение, делённая на 1000 для перевода в ватт-часы. 16000 умножить на 22,2 разделить на 1000 — получаем 355,2 Вт·ч. С учётом 80% usable: 355,2 умножить на 0,8 — получаем 284,2 Вт·ч.

Шаг 2. Тяга одного винта: суммарный вес 10 умножить на 9,81 — 98,1 Н. На 6 винтов: 98,1 разделить на 6 — 16,35 Н.

Шаг 3. **Конфигурация А (10 дюймов).** Радиус 0,127 м. Площадь: 3,1416 умножить на 0,127 в квадрате — 0,0507 м². Индуктивная скорость: корень из (16,35 разделить на (2 умножить на 1,225 умножить на 0,0507)) — корень из (16,35 разделить на 0,1242) — корень из 131,6 — 11,47 м/с. Мощность идеальная одного винта: 16,35 умножить на 11,47 — 187,5 Вт. Суммарная идеальная: 187,5 умножить на 6 — 1125,2 Вт. С учётом КДВ: 1125,2 разделить на 0,7 — 1607 Вт. Время висения: 284,2 разделить на 1607, умножить на 60 — получаем 10,6 минут.

Шаг 4. **Конфигурация Б (15 дюймов).** Радиус 0,1905 м. Площадь: 3,1416 умножить на 0,1905 в квадрате — 0,1140 м². Индуктивная скорость: корень из (16,35 разделить на (2 умножить на 1,225 умножить на 0,1140)) — корень из (16,35 разделить на 0,2794) — корень из 58,5 — 7,65 м/с. Мощность идеальная одного винта: 16,35 умножить на 7,65 — 125,1 Вт. Суммарная идеальная: 125,1 умножить на 6 — 750,6 Вт. С учётом КДВ: 750,6 разделить на 0,7 — 1072 Вт. Время висения: 284,2 разделить на 1072, умножить на 60 — получаем 15,9 минут.

Ответ: Конфигурация А (10 дюймов) — примерно 10,6 минуты висения. Конфигурация Б (15 дюймов) — примерно 15,9 минуты. Переход с 10-дюймовых винтов на 15-дюймовые даёт прирост времени полёта примерно на 50%, что наглядно демонстрирует влияние площади винта на энергоэффективность.

В реальных расчётах следует учитывать профильные потери винта (зависят от числа Рейнольдса и формы профиля), сопротивление рамы, массу винтомоторной группы и неидеальность батареи при различных токах разряда. Тем не менее, импульсная теория даёт верный качественный и приближённый количественный результат — достаточно точный для сравнения конфигураций на этапе проектирования.

Раздел I. Теоретические основы

Глава 3. Классификация размерностей и архитектура рам (7"—30"+)

3.1. Логика размерного ряда: зачем нужны разные классы

В военном применении мультироторных БПЛА размерность рамы — не просто геометрический параметр, а ключевой фактор тактической применимости. Размерность задаёт баланс между скрытностью, полезной нагрузкой, дальностью и устойчивостью к помехам и погодным условиям.

Размерность рамы (в дюймах) — это диагональ между моторами по противоположным лучам. Она определяет максимальный диаметр пропеллера, который можно установить, и напрямую влияет на подъёмную силу, инерцию конструкции и радиолокационную заметность. В тактической практике принято выделять следующие классы:

Класс 7" — лёгкие аппараты для разведки и FPV-ударных задач. Их главные преимущества — высокая манёвренность, малая заметность и способность работать в плотной застройке. Ограничение — низкая грузоподъёмность, из-за чего полезная нагрузка сводится к камере или единичной боевой части.

Класс 10–12" — универсальные носители. На этой размерности достигается разумный компромисс между манёвренностью и полезной нагрузкой. Такие аппараты применяют для доставки грузов, ретрансляции связи, постановки помех, а также как ударные платформы с расширенным набором датчиков.

Класс 15–20" — грузовые и ретрансляционные платформы. Здесь на первый план выходят грузоподъёмность и продолжительность полёта. Такие БПЛА используют для эвакуации лёгких грузов, развёртывания полевых сетей связи, доставки аккумуляторов и медикаментов. Увеличенная масса снижает манёвренность, но повышает устойчивость к ветру и живучесть при лёгких повреждениях.

Класс 25"+ — тяжёлые платформы, рассчитанные на специализированные задачи: длительное барражирование, работа в сложных метеоусловиях, применение в составе смешанных групп с подавлением средств ПВО. Их заметность выше, поэтому тактика строится на эшелонировании, ложных целях и работе из-за рельефа.

3.2. Архитектура рам: схемы компоновки и их тактические следствия

Выбор схемы компоновки (квадро-, гекса-, октокоптер, соосные схемы) определяет отказоустойчивость, распределение веса и сложность управления.

Квадрокоптеры — наиболее распространённая схема. Отличается простотой конструкции, минимальным весом и хорошей манёвренностью. Недостаток — при отказе одного мотора аппарат теряет управляемость. Для военных задач это допустимо только в лёгких ударных и разведывательных платформах, где приоритетом является скрытность и скорость.

Гексакоптеры (6 моторов) — обеспечивают частичную отказоустойчивость: при выходе из строя одного мотора аппарат способен продолжить полёт и совершить управляемую посадку. Это делает их предпочтительными для задач, где потеря аппарата недопустима: доставка ценных грузов, эвакуация, ретрансляция.

Октокоптеры (8 моторов) — максимальная отказоустойчивость и грузоподъёмность. Такие схемы применяют в тяжёлых платформах, где критична живучесть и возможность продолжать выполнение задачи даже при частичных повреждениях силовой установки.

Соосные схемы (два винта на одном луче, вращающиеся в противоположных направлениях) — позволяют увеличить тягу при компактной раме. Это полезно в условиях ограниченного пространства или при необходимости снизить радиолокационную заметность за счёт уменьшения габаритов. Недостатком является повышенная сложность настройки и обслуживания.

3.3. Компромиссы: грузоподъёмность, живучесть и заметность

Любой военный БПЛА — это компромисс трёх ключевых параметров:

Грузоподъёмность определяет, сколько полезной нагрузки можно взять: камеры, средства РЭБ, боеприпасы, аккумуляторы, ретрансляторы. Чем больше размерность и количество моторов, тем выше грузоподъёмность, но тем заметнее аппарат.

Живучесть — способность продолжать выполнение задачи при повреждениях. Достигается за счёт избыточности (гекса- и октокоптеры), защиты критических узлов, дублирования систем управления и связи.

Заметность — совокупность визуальной, акустической и радиолокационной сигнатур. Малые аппараты тише и меньше, но несут меньше полезной нагрузки. Тяжёлые платформы могут работать дольше и нести больше, но их проще обнаружить и поразить.

Тактическое проектирование БПЛА всегда начинается с определения приоритета: если задача — скрытная разведка, выбирают малые аппараты с минимальной заметностью; если задача — доставка груза в зону с активным противодействием, приоритет смещается в сторону живучести и грузоподъёмности, даже ценой увеличения заметности.

10 вопросов с ответами

Вопрос: В чём основное тактическое преимущество БПЛА класса 7”?

Ответ: Основное преимущество — малая заметность и высокая манёвренность, что позволяет применять аппарат для скрытной разведки и FPV-ударов в плотной застройке и на малых высотах.

Вопрос: Почему класс 10–12” считается универсальным?

Ответ: Потому что на этой размерности достигается баланс между полезной нагрузкой и манёвренностью: аппарат может нести средства связи, РЭБ или боеприпасы, сохраняя способность к активным манёврам.

Вопрос: Для каких задач предназначены БПЛА класса 15–20”?

Ответ: Для задач, требующих повышенной грузоподъёмности и продолжительности полёта: доставка грузов, развёртывание сетей связи, ретрансляция, эвакуация лёгких предметов.

Вопрос: Чем гексакоптер тактически отличается от квадрокоптера?

Ответ: Гексакоптер обладает частичной отказоустойчивостью: при отказе одного мотора он способен продолжить полёт и выполнить управляемую посадку, что критично для задач с высокой ценностью полезной нагрузки.

Вопрос: Когда оправдано применение соосных схем?

Ответ: Соосные схемы оправданы, когда требуется высокая тяга при компактных габаритах: например, для работы в стеснённых условиях или снижения радиолокационной заметности за счёт уменьшения размеров рамы.

Вопрос: Как размерность рамы влияет на радиолокационную заметность?

Ответ: Чем больше размерность, тем больше эффективная площадь рассеяния, а значит, выше вероятность обнаружения средствами ПВО и РЛС; малые аппараты менее заметны, но ограничены по полезной нагрузке.

Вопрос: Что понимается под «отказоустойчивостью» в контексте архитектуры БПЛА?

Ответ: Под отказоустойчивостью понимается способность аппарата продолжать полёт и выполнять задачу при частичных отказах: например, при выходе из строя одного или нескольких моторов, благодаря избыточности силовой установки.

Вопрос: Какой класс БПЛА предпочтителен для длительного барражирования и почему?

Ответ: Класс 25"+ — такие тяжёлые платформы обладают большей ёмкостью аккумуляторов, устойчивостью к ветру и возможностью нести дополнительные топливные или энергетические модули, что увеличивает время нахождения в воздухе.

Вопрос: В каких случаях оправдан выбор октокоптера вместо гексакоптера?

Ответ: Октокоптер выбирают, когда критична максимальная отказоустойчивость и грузоподъёмность: например, для тяжёлых платформ, работающих в зоне активного противодействия, где возможны множественные повреждения.

Вопрос: Как компромисс между грузоподъёмностью, живучестью и заметностью влияет на выбор платформы для конкретной задачи?

Ответ: Выбор платформы всегда определяется приоритетом задачи: если важнее скрытность — выбирают малые аппараты; если важнее доставка ценного груза — делают упор на живучесть и грузоподъёмность; заметность при этом становится допустимым фактором риска.

3 задачи с готовым ответом

Задача 1.

Командиру подразделения требуется выбрать платформу для скрытной ночной разведки в городской застройке с возможностью сброса лёгкой гранаты. Какой класс и схема компоновки будут оптимальны? Обоснуйте выбор, перечислив три ключевых фактора.

Ответ: Оптимален класс 7", схема — квадрокоптер. Ключевые факторы: 1) малая заметность в оптическом и радиолокационном диапазонах; 2) высокая манёвренность для работы между зданиями; 3) достаточная грузоподъёмность для камеры и лёгкой боевой части. Живучесть здесь вторична, так как задача — быстрое проникновение и выход из зоны.

Задача 2.

Требуется организовать ретрансляцию связи на дистанции 15 км в условиях сильного ветра. Какой класс БПЛА и схема компоновки предпочтительны? Назовите три технических и тактических соображения, которые повлияли на выбор.

Ответ: Предпочтительны класс 15–20", схема — гексакоптер. Соображения: 1) увеличенная грузоподъёмность позволяет нести мощные антенны и дополнительные аккумуляторы; 2) устойчивость к ветру за счёт большего диаметра пропеллеров и массы; 3) частичная отказоустойчивость гексакоптера снижает риск потери связи при частичном повреждении силовой установки.

Задача 3.

Рассчитайте, какой компромисс придётся принять при выборе БПЛА класса 25"+ для задачи постановки помех в зоне с активными средствами ПВО. Опишите три аспекта компромисса: заметность, живучесть, полезная нагрузка. Формулы писать словами.

Ответ: При выборе тяжёлой платформы придётся принять следующие компромиссы:

Заметность: аппарат будет более заметен для РЛС и визуально, поэтому тактика должна включать работу из-за рельефа, эшелонирование и применение ложных целей.

Живучесть: несмотря на большую массу, живучесть можно повысить за счёт избыточной схемы (октокоптер) и бронирования критических узлов; однако полностью исключить риск поражения невозможно.

Полезная нагрузка: класс 25"+ позволяет нести мощные средства РЭБ и дополнительные аккумуляторы, что компенсирует риски за счёт эффективности воздействия.

Таким образом, выигрыш в полезной нагрузке и живучести достигается ценой повышенной заметности, которую нивелируют тактическими приёмами.

Раздел II. Конструкция и компоненты

Глава 4. Силовая установка: моторы, ESC и пропеллеры для больших размеров

Введение: зачем именно такая силовая установка для тяжёлых мультироторов

Мультироторные БПЛА размерностей от 7 дюймов и выше решают тактические задачи с ощутимой полезной нагрузкой: оптико-электронные модули, средства связи, сбрасываемые грузы, ретрансляторы. Это диктует особые требования к силовой установке: она должна не просто поднимать аппарат, а стабильно держать его в воздухе при порывах ветра, обеспечивать манёвренность и сохранять запас тяги для экстренных режимов. В военной эксплуатации критичны не только пиковые характеристики, но и надёжность, предсказуемость и возможность быстрой диагностики по телеметрии.

Моторы: подбор KV и соответствие габаритам

Для больших мультироторов (7"–30"+) применяют бесколлекторные моторы с увеличенным статором и усиленными подшипниками. Ключевой параметр — KV (количество оборотов в минуту на 1 вольт без нагрузки). Его выбирают исходя из диаметра пропеллера и напряжения батареи.

Общее правило: чем больше диаметр винта, тем ниже требуется KV. Крупный пропеллер создаёт значительную аэродинамическую нагрузку, и при высоком KV мотор будет работать в зоне перегрева и неэффективной тяги. Для 7–10-дюймовых рам часто используют моторы с KV 1900–2300 при питании 4S; для 13–18 дюймов — 800–1200 KV при 6S; для тяжёлых платформ 20–30 дюймов — 400–700 KV при 8–12S.

Важно учитывать не только KV, но и крутящий момент мотора: он определяется размером статора и качеством магнитов. Для военных задач предпочтительны моторы с запасом по

крутящему моменту: это повышает устойчивость к порывам ветра и позволяет уверенно работать с полезной нагрузкой.

ESC: протоколы, телеметрия, защита

Электронный регулятор оборотов (ESC) должен соответствовать пиковым токам моторов и обеспечивать точную передачу команд полётного контроллера. Для тяжёлых мультироторов применяют ESC с номиналом от 45 А и выше, с запасом по току не менее 20–30% от расчётного пикового значения.

Протоколы управления:

PWM — простой аналоговый сигнал, подходит для базовых систем, но имеет задержку и ограниченную точность.

DSHOT — цифровой протокол (DSHOT150, DSHOT300, DSHOT600), обеспечивает высокую точность, низкую задержку и возможность передачи телеметрии (ток, напряжение, обороты мотора) обратно в полётный контроллер. Для тактических БПЛА DSHOT является предпочтительным стандартом.

Телеметрия ESC позволяет в реальном времени отслеживать состояние силовой установки: перегрев, просадки напряжения, аномальные пики тока. Это критично для своевременного обнаружения неисправностей и безопасного завершения полёта.

Пропеллеры: материалы, шаг, форма лопасти, балансировка

Пропеллер — один из самых нагруженных компонентов. Для больших мультироторов используют винты из усиленного нейлона, углепластика или композитных материалов с армированием. Углепластиковые пропеллеры легче и жёстче, но более хрупкие при ударах; нейлоновые — прощают жёсткие посадки, но могут деформироваться при перегреве.

Ключевые параметры:

Диаметр — определяет площадь ометаемого диска и напрямую влияет на статическую тягу.

Шаг — угол установки лопасти; больший шаг даёт более высокую скорость, но требует большей мощности. Для тяжёлых аппаратов используют пропеллеры с умеренным шагом, чтобы сохранить запас тяги.

Форма лопасти — тонкие профили с закруглёнными концами снижают шум и турбулентность; скошенные концы уменьшают концевые вихри и повышают эффективность.

Балансировка пропеллеров обязательна. Дисбаланс даже в доли грамма на больших оборотах вызывает сильные вибрации, которые разрушают подшипники моторов, ухудшают работу датчиков и снижают качество видеосигнала. Балансировку проводят на специальных стендах или вручную с использованием корректирующих наклеек.

Расчёт тяговооружённости

Тяговооружённость — отношение суммарной статической тяги силовой установки к взлётной массе аппарата. Этот параметр определяет способность дрона зависать, ускоряться и выполнять манёвры.

Для тактических мультироторов минимальная тяговооружённость должна составлять не менее 3:1 (три единицы тяги на одну единицу массы). Это обеспечивает достаточный запас для работы в турбулентности, сброса груза и экстренного манёвра.

Расчёт проводят словами: суммарную тягу всех моторов делят на взлётную массу дрона. Например, если четыре мотора дают по 3 килограмма тяги каждый, суммарная тяга составит 12 килограммов. При массе дрона 4 килограмма тяговооружённость будет равна трём.

При расчёте учитывают:

массу полезной нагрузки;

возможные просадки напряжения батареи в полёте;

запас на неблагоприятные погодные условия.

Практические рекомендации по подбору и эксплуатации

Подбирайте компоненты комплексно. Мотор, ESC и пропеллер должны быть согласованы по мощности, току и оборотам.

Используйте телеметрию. Настройте отображение тока, напряжения и оборотов моторов на наземной станции — это позволит вовремя заметить отклонения.

Проводите тестовые висения. Перед боевым применением проверьте поведение дрона в разных режимах: зависание, разгон, сброс груза.

Следите за состоянием пропеллеров. Трещины, сколы и деформации снижают тягу и увеличивают вибрации.

Планируйте запас по тяге. В боевых условиях масса полезной нагрузки может меняться — заложите дополнительный запас тяги.

10 вопросов с ответами

Вопрос 1. Зачем для больших пропеллеров выбирают моторы с низким KV?

Ответ. Потому что крупный пропеллер создаёт большую аэродинамическую нагрузку. При высоком KV мотор будет вращаться слишком быстро, перегреваться и работать неэффективно. Низкий KV позволяет мотору развивать нужный крутящий момент без избыточных оборотов.

Вопрос 2. Какой протокол управления ESC предпочтительнее для тактического БПЛА и почему?

Ответ. DShot. Он обеспечивает более точную и быструю передачу команд, меньшую задержку, а также позволяет передавать телеметрию (ток, напряжение, обороты) от ESC к полётному контроллеру.

Вопрос 3. Что такое тяговооружённость и какое минимальное значение рекомендуется для военного мультиротора?

Ответ. Тяговооружённость — это отношение суммарной тяги моторов к массе дрона. Для тактических аппаратов рекомендуется не менее 3:1, чтобы обеспечить запас тяги для манёвров и работы с полезной нагрузкой.

Вопрос 4. Почему важна балансировка пропеллеров на тяжёлых мультироторах?

Ответ. Дисбаланс вызывает сильные вибрации на больших оборотах. Это разрушает подшипники моторов, ухудшает работу датчиков, снижает качество видеосигнала и может привести к отказу оборудования.

Вопрос 5. Как влияет шаг пропеллера на характеристики дрона?

Ответ. Большой шаг увеличивает скорость, но требует больше мощности. Для тяжёлых дронов используют пропеллеры с умеренным шагом, чтобы сохранить достаточную тягу и не перегружать моторы.

Вопрос 6. Для чего нужна телеметрия ESC в боевой эксплуатации?

Ответ. Телеметрия позволяет в реальном времени отслеживать ток, напряжение и обороты моторов. Это помогает вовремя обнаружить перегрев, просадки питания или другие аномалии и принять меры до отказа силовой установки.

Вопрос 7. Почему для военных задач выбирают моторы с запасом по крутящему моменту?

Ответ. Запас по крутящему моменту повышает устойчивость дрона к порывам ветра, позволяет уверенно нести полезную нагрузку и выполнять манёвры даже при частичной деградации характеристик из-за износа или перегрева.

Вопрос 8. Какой материал пропеллеров лучше выбрать для тяжёлого тактического дрона: нейлон или углепластик?

Ответ. Выбор зависит от задач. Углепластик легче и жёстче, что повышает эффективность, но он более хрупок при ударах. Нейлон прощает жёсткие посадки и менее склонен к разрушению, но может деформироваться при нагреве. Для боевых условий часто выбирают компромисс: качественные композитные пропеллеры с армированием.

Вопрос 9. Как рассчитать тяговооружённость, если известны тяга моторов и масса дрона?

Ответ. Суммарную тягу всех моторов делят на массу дрона. Например, если четыре мотора дают по 3 килограмма тяги, суммарно это 12 килограммов. При массе дрона 4 килограмма тяговооружённость равна трём (12 разделить на 4).

Вопрос 10. Почему важно учитывать просадку напряжения батареи при расчёте тяговооружённости?

Ответ. При разряде батареи напряжение падает, из-за чего снижается мощность моторов и тяга. Если расчёт вести только по номинальному напряжению, в конце полёта может не хватить тяги для безопасного манёвра или зависания.

3 задачи с готовыми ответами

Задача 1.

Дрон массой 6 килограммов оснащён четырьмя моторами. Каждый мотор развивает статическую тягу 5 килограммов. Рассчитайте тяговооружённость дрона и определите, достаточен ли этот запас для тактической эксплуатации.

Решение словами: суммарная тяга равна четырём умножить на пять, то есть двадцать килограммов. Массу дрона шесть килограммов делим на суммарную тягу: двадцать разделить на шесть равно примерно три целых три десятых. Тяговооружённость составляет примерно 3,3:1. Это значение выше рекомендуемого минимума 3:1, поэтому запас тяги достаточен для тактического применения.

Ответ: тяговооружённость примерно 3,3:1 — запас тяги достаточен.

Задача 2.

Для 15-дюймовой рамы планируется использовать батарею 6S. Подберите ориентировочное значение KV мотора и обоснуйте выбор.

Решение словами: для рам 13–18 дюймов при питании 6S обычно выбирают моторы с KV в диапазоне 800–1200. Такой диапазон позволяет эффективно работать с крупными пропеллерами, не перегреваясь и сохраняя достаточный крутящий момент.

Ответ: ориентировочно 800–1200 KV — это обеспечит баланс между тягой, эффективностью и надёжностью.

Задача 3.

На одном из пропеллеров дрона обнаружена небольшая трещина. Оператор хочет продолжить полёт, так как дрон уже подготовлен к задаче. Оцените риски и предложите решение.

Решение словами: трещина нарушает целостность лопасти и может привести к её разрушению в полёте из-за вибраций и центробежных сил. Это грозит аварией, повреждением оборудования и срывом задачи. Даже небольшая трещина делает пропеллер непригодным к эксплуатации.

Ответ: продолжать полёт нельзя. Пропеллер необходимо заменить на исправный. В полевых условиях следует использовать запасной комплект, а повреждённый пропеллер — списать.

Раздел II. Конструкция и компоненты

Глава 5. Авиационное электропитание: аккумуляторы, BMS и энергоменеджмент

5.1. Сердце мультиротора: почему электропитание — это половина боевой задачи

Любой мультироторный БПЛА — это летающая электростанция. В отличие от самолёта, которому крыло дарит подъёмную силу практически бесплатно, мультиротор тратит энергию на каждое мгновение полёта. Двигатели вращаются непрерывно, и стоит им остановиться — аппарат падает. В военном применении цена каждой секунды воздуха измеряется не только ампер-часами, но и жизнями операторов, точностью удара, сохранностью разведанных. Понимание электропитания — это не инженерная прихоть, а боевая грамотность.

Военный БПЛА размерности от 7 дюймов — это уже серьёзная платформа. Семидюймовый аппарат несёт полезную нагрузку от 1 до 3 кг, способен поднимать тепловизор, ретранслятор, сбросовое устройство или модуль РЭБ. Десятидюймовый — поднимает 5–8 кг. Пятнадцатидюймовый тяжёлый разведчик или ударный аппарат — до 15–20 кг. И для каждой размерности выбор аккумулятора — это компромисс между токоотдачей, удельной энергией, массой и живучестью.

5.2. Химия бортового питания: LiPo, Li-ion, LiHV

Три типа аккумуляторов доминируют в военных мультироторах. Каждый занимает свою нишу, и выбор определяется не модой, а боевой задачей.

LiPo — литий-полимерные аккумуляторы

Стандарт военного мультиротора. Номинальное напряжение одной ячейки — 3,7 В, заряженная — 4,2 В. Базовая единица обозначается буквой S (от англ. *series* — последовательно):

6S означает шесть ячеек последовательно, что даёт номинальное напряжение 22,2 В и заряженное — 25,2 В.

Удельная энергия: 150–200 Вт·ч/кг.

Токоотдача (С-рейтинг): от 25С до 150С и выше. Токоотдача определяет, какой максимальный ток может отдать аккумулятор без критического падения напряжения и перегрева. Для 6S аккумулятора ёмкостью 5000 мА·ч с маркировкой 100С максимальный разрядный ток составляет: ёмкость в миллиампер-часах, делённая на тысячу, умноженная на рейтинг С, то есть $5 \text{ А} \cdot \text{ч} \times 100 = 500 \text{ А}$. Это пиковый ток, который батарея выдержит короткое время. Длительный — обычно вдвое меньше.

Преимущества: высокая токоотдача, низкое внутреннее сопротивление, быстрая зарядка, способность работать при отрицательных температурах (с деградацией), отработанная логистика.

Недостатки: пожароопасность при повреждении или переразряде, сравнительно низкая удельная энергия, деградация при хранении в заряженном состоянии, ограниченный ресурс (300–500 циклов).

В военном применении LiPo — выбор для аппаратов, которым нужен манёвр, динамика и агрессивный пилотаж. Ударный дрон, заходящий на цель на скорости 120 км/ч, потребляет пиковые токи, которые Li-ion физически не отдаст.

Li-ion — литий-ионные аккумуляторы (цилиндрические)

Используются ячейки формата 18650 или 21700. Номинальное напряжение ячейки — 3,6 В, заряженная — 4,2 В. Соединяются в сборки по той же логике: 6S — последовательно, с добавлением параллельных групп (P) для увеличения ёмкости.

Удельная энергия: 250–300 Вт·ч/кг. Это в полтора-два раза больше, чем у LiPo.

Токоотдача: 5С–10С для большинства ячеек; высокотокковые (например, Molicel P42A, Samsung 40T) — до 30С–35С пиково. Но даже высокотокковые цилиндры уступают LiPo по плотности тока.

Преимущества: значительно большая удельная энергия — дольше полёт, меньше масса батареи при той же ёмкости; безопасность при повреждении (цилиндрический корпус сдерживает), длительный срок хранения, до 1000 циклов.

Недостатки: низкая токоотдача — не для агрессивного манёвра; деградация при низких температурах выражена сильнее; большее внутреннее сопротивление — напряжение «проседает» под нагрузкой; металлический корпус добавляет массу элементу.

Li-ion — выбор для разведчиков и барражирующих аппаратов, где время в воздухе важнее динамики. Военный мультиротор с Li-ion сборкой может держаться в воздухе 40–60 минут против 15–25 минут на LiPo при той же полезной нагрузке.

LiHV — литий-полимерные высокого напряжения

Подвид LiPo, заряжаемый до 4,35 В на ячейку вместо 4,2 В. Номинальное напряжение — 3,8 В.

Удельная энергия: 180–230 Вт·ч/кг. Прирост к обычной LiPo — 10–15%.

Токоотдача: сопоставима с LiPo, иногда чуть выше за счёт более высокого начального напряжения.

Преимущества: дополнительная энергия в том же объёме, более высокое напряжение под нагрузкой — двигатели крутятся быстрее на заряженной батарее.

Недостатки: сокращённый ресурс (200–300 циклов), повышенный нагрев, требует зарядного устройства с режимом LiHV, риск разбаланса по ячейкам выше. В военных сборках применяется ограниченно — там, где приоритет пиковой мощности над живучестью.

5.3. Сравнительная таблица аккумуляторных технологий

Параметр

LiPo

Li-ion (18650/21700)

LiHV

Удельная энергия, Вт·ч/кг

150–200

250–300

180–230

Максимальная токоотдача (С)

25–150

5–35

25–120

Цикловый ресурс

300–500

500–1000

200–300

Пожароопасность

Высокая

Умеренная

Высокая

Работа при –10 °С

Допустимо (с деградацией)

Плохо

Допустимо (с деградацией)

Типичная ниша

Ударные, манёвренные

Разведка, барражирование

Гоночные, спецзадачи

5.4. Конфигурации: последовательное и параллельное соединение

Военная сборка батареи — это не один пакет, а архитектура. Обозначение **nSmP** читается как «n ячеек последовательно, m — параллельно». Конфигурация 6S2P означает: 6 ячеек последовательно, каждая «ячейка» в которой — это пара параллельно соединённых элементов. Итого 12 физических ячеек, напряжение 22,2 В номинально, ёмкость — удвоенная от одиночной.

Последовательное соединение (S) повышает напряжение. Это нужно для согласования с двигателями и ESC: чем выше напряжение, тем меньше ток при той же мощности, тем тоньше провода, меньше потери на нагрев. Военные мультироторы 7–10 дюймов чаще всего работают на 6S (22,2 В), тяжёлые аппараты 12–15 дюймов — на 12S (44,4 В) и выше.

Параллельное соединение (Р) повышает ёмкость и токоотдачу. Две параллельные ячейки 5000 мА·ч дают 10 000 мА·ч и делят разрядный ток между собой — каждая отдаёт половину, что снижает нагрев и продлевает ресурс.

Практическое правило: в военной сборке параллельное соединение — не роскошь, а резервирование. Если одна ячейка в параллельной группе выйдет из строя (внутренний обрыв), вторая продолжит питать цепь. В чисто последовательной сборке отказ одной ячейки — потеря всей батареи. Для боевых аппаратов это критично: конфигурация с $P \geq 2$ даёт шанс вернуться на базу.

5.5. BMS: бортовой диспетчер батарей

Battery Management System — это мозг аккумуляторной сборки. В военных БПЛА BMS — не опция, а обязательный элемент, потому что цена отказа батареи измеряется потерей аппарата и невыполнением боевой задачи.

Основные функции BMS:

Балансировка ячеек. При последовательном соединении ячейки неизбежно разбалансируются: чуть разные ёмкости, чуть разные внутренние сопротивления, разная температура. Без балансировки одна ячейка может перезарядиться (пожар), другая — переразрядиться (гибель). BMS выравнивает напряжения, отбирая избыточный заряд от «переполненных» ячеек через балансировочные резисторы. Пассивная балансировка — медленно, но просто. Активная — перекидывает энергию между ячейками, быстрее и эффективнее, но сложнее и дороже.

Защита от переразряда. LiPo и Li-ion погибают, если напряжение ячейки падает ниже 2,5–3,0 В. Военный мультиротор должен возвращаться, пока батарея жива. BMS отслеживает напряжение каждой ячейки и подаёт сигнал контроллеру полёта: «хватит, возвращайся». Порог возврата обычно устанавливается на 3,2–3,4 В на ячейку — с запасом на обратный путь.

Защита от перезаряда. При достижении 4,2 В (или 4,35 В для LiHV) на ячейку BMS отключает зарядный ток. Это предотвращает возгорание.

Защита от сверхтока и короткого замыкания. При резком скачке тока (например, при столкновении с препятствием и заклинивании пропеллера) BMS отключает батарею за миллисекунды.

Мониторинг температуры. Термисторы на ячейках передают данные в BMS. Превышение 60 °С — тревога, 80 °С — отключение. В военных аппаратах, работающих летом в южных широтах, это спасает от возгорания на стоянке.

Телеметрия. Современная военная BMS передаёт на наземную станцию: напряжение каждой ячейки, общий ток, температуру, оставшуюся ёмкость, расчётное время до разряда. Оператор видит не просто «батарея 40%», а знает, хватит ли ему вернуться.

BMS и глубокий разряд — главный враг. Глубокий разряд — это падение напряжения ячейки ниже критического порога. Для LiPo это около 3,0 В под нагрузкой, для Li-ion — 2,5 В. Последствия: необратимая химическая деградация, потеря ёмкости, рост внутреннего сопротивления, в худшем случае — медное шунтирование и внутреннее короткое замыкание при последующей зарядке. BMS предотвращает это, но в боевых условиях оператор должен понимать: если бортовая система подаёт сигнал возврата, спорить с ней нельзя.

5.6. Расчёт времени полёта

Время полёта — ключевой боевой параметр. Его можно оценить с достаточной для планирования точностью.

Базовая формула:

Время полёта (в минутах) = [Номинальная ёмкость батареи (в ампер-часах) × Напряжение батареи (в вольтах) × КПД силовой установки × 60] / [Мощность, потребляемая в полёте (в ваттах)]

Где:

Номинальная ёмкость × Напряжение = Полная энергия батареи в ватт-часах.

КПД силовой установки учитывает потери в ESC, проводах, двигателях и редукторе (если есть). Для безредукторных военных мультироторов — 0,80–0,90.

Мощность в полёте — суммарная потребляемая мощность всех двигателей плюс avionics (полётный контроллер, полезная нагрузка, РЭБ, ретранслятор).

Мощность висения — самая важная цифра. Для мультиротора это мощность, необходимая для удержания аппарата в воздухе без движения. Приблизённо:

Мощность висения (в ваттах) = [Полный взлётный вес (в килограммах) × Ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$) × КПД винтомоторной установки] / ...

Но на практике используется эмпирический подход: мощность висения измеряется при статических испытаниях или берётся из характеристик винтомоторной пары. Для типовых военных мультироторов:

Размерность

Полный вес, кг

Мощность висения, Вт

Типичная батарея

Время висения, мин

7" (ударный)

2,5–3,5

350–500

6S 4000–5000 мА·ч LiPo

15–20

10" (разведчик)

4–6

500–800

6S 8000 мА·ч Li-ion

35–50

15" (тяжёлый)

10–15

1000–1800

12S 16 000–25 000 мА·ч Li-ion

40–70

Эти цифры — ориентир. Реальное время полёта зависит от высоты, температуры, скорости ветра, режима полёта. Висение — самый энергоёмкий режим. Крейсерский полёт со скоростью 12–18 м/с обычно на 15–30% экономичнее. Поэтому военные операторы планируют маршрут так, чтобы минимизировать висение.

5.7. Альтернативные источники энергии

LiPo и Li-ion доминируют, но не потому, что идеальны — потому, что альтернативы пока не вышли из стадии прототипов и небольших серий. Рассмотрим то, что реально существует и может применяться в военных мультироторах.

Водородные топливные элементы

Топливный элемент преобразует водород и кислород напрямую в электричество, единственный побочный продукт — водяной пар. Удельная энергия водородной системы (баллон + топливный элемент) — 400–1000 Вт·ч/кг в зависимости от давления хранения и типа системы.

Достоинства: феноменальная удельная энергия; время полёта мультиротора может достигать 2–4 часов; быстрая «зарядка» — замена баллона за минуты; нулевая тепловая сигнатура (практически).

Недостатки: крайне высокая стоимость; сложность хранения водорода (высокое давление 350–700 бар или криогенное хранение); взрывоопасность при повреждении баллона в боевых условиях; низкая динамика — топливный элемент не может отдать пиковые токи для манёвра, необходим буферный аккумулятор; ограниченная доступность водорода в полевых условиях.

Водородные мультироторы — это перспективная платформа для разведки и целеуказания с длительным барражированием. На 2026 год существуют опытные образцы, но массовое военное применение — вопрос ближайших лет.

Бензоэлектрические гибриды

Гибридная силовая установка — это бензиновый двигатель внутреннего сгорания, вращающий генератор, который питает электромоторы через буферный аккумулятор. Бензин хранится в баке, электричество генерируется на борту.

Достоинства: удельная энергия бензина — около 12 000 Вт·ч/кг, что в 40–60 раз больше LiPo; время полёта — от 1 до 4 часов; заправка в полевых условиях тривиальна; буферный аккумулятор обеспечивает пиковые токи для манёвра.

Недостатки: шум бензинового двигателя — критично для скрытности; вибрация — требует демпфирования для avionics; тепловая сигнатура — мощная ИК-метка; сложность и масса генераторной установки; надёжность ДВС ниже электрической системы; выхлоп на низких высотах демаскирует аппарат.

Бензоэлектрический гибрид — компромисс между временем полёта и скрытностью. Подходит для тяжёлых мультироторов с функцией ретрансляции связи, когда аппарат барражирует на большой высоте вдали от линии боевого соприкосновения и шум не критичен.

5.8. Практические правила военного энергоменеджмента

Хранение батарей — в заряженном на 40–60% состоянии. LiPo, хранящийся полностью заряженным, деградирует за недели. BMS с режимом хранения сама разряжает батарею до нужного уровня. В боевых условиях следить за этим некогда — автоматика должна делать всё сама.

Предполётная подготовка батарей — за 2 часа. Заряжать LiPo заблаговременно: химия стабилизируется, напряжение выравнивается. Заряженная LiPo, простоявшая сутки, уже теряет 3–5% ёмкости.

Температурная подготовка. При температуре ниже +5 °C внутреннее сопротивление LiPo растёт, токоотдача падает, напряжение проседает. Перед вылетом в холодную погоду батарею выдерживают при +20–25 °C (термосумка с грелкой). Li-ion при отрицательных температурах работает хуже — и это надо учитывать при планировании зимних операций.

Контроль разбаланса. Перед вылетом оператор проверяет напряжение каждой ячейки. Разбаланс более 0,1 В — повод отложить вылет и перебалансировать. В боевых условиях,

если альтернативной батареи нет — лететь, но с сокращённым временем и без агрессивного манёвра.

Логистика. Военный БПЛА должен иметь сменный аккумулятор. Замена батареи за 30 секунд и новый вылет — это стандарт, а не роскошь. Проектирование быстроразъёмного аккумуляторного отсека — задача конструктора, а не тыловика.

Вопросы для самопроверки

Вопрос 1. Почему мультироторный БПЛА тратит энергию на каждое мгновение полёта, в отличие от самолёта?

Ответ. Самолёт использует крыло для создания подъёмной силы за счёт набегающего потока — энергия тратится только на движение вперёд. Мультиротор не имеет крыла и создаёт тягу исключительно вращением несущих винтов. Стоит двигателям остановиться — подъёмная сила исчезает мгновенно, аппарат падает. Поэтому электропитание мультиротора должно быть непрерывным и гарантированным на протяжении всего полёта.

Вопрос 2. Чем отличается номинальное напряжение одной ячейки LiPo от Li-ion, и как это влияет на расчёт напряжения сборки?

Ответ. Номинальное напряжение ячейки LiPo — 3,7 В, Li-ion — 3,6 В. Заряженная ячейка LiPo — 4,2 В, Li-ion — также 4,2 В. При сборке 6S (шесть ячеек последовательно) номинальное напряжение LiPo составит 22,2 В, Li-ion — 21,6 В. Заряженное напряжение в обоих случаях — 25,2 В. Разница в номинальном напряжении невелика, но влияет на точность расчёта энергозапаса: при одинаковой ёмкости LiPo-сборка содержит чуть больше энергии.

Вопрос 3. Что означает маркировка «6S2P 5000 мА·ч» и какова полная энергия такой сборки?

Ответ. 6S2P означает: 6 ячеек последовательно, 2 параллельно в каждой группе. Итого 12 физических ячеек. Ёмкость одной параллельной группы — 5000 мА·ч (две ячейки по 2500 мА·ч каждая или любые две, дающие в сумме 5000 мА·ч). Номинальное напряжение сборки — $6 \times 3,7 = 22,2$ В. Полная энергия: ёмкость в ампер-часах (5 А·ч), умноженная на напряжение (22,2 В), даёт 111 Вт·ч.

Вопрос 4. Почему для ударного мультиротора, заходящего на цель на высокой скорости, выбирают LiPo, а не Li-ion?

Ответ. Агрессивный манёвр и разгон до высоких скоростей требуют пиковых токов, которые многократно превышают ток висения. LiPo обеспечивает токоотдачу 50–150С, а Li-ion — 5–35С даже в высокотокковых версиях. При попытке дать пик тока на Li-ion напряжение резко проседает, двигатели теряют обороты, аппарат теряет управление. LiPo держит напряжение под нагрузкой и обеспечивает динамику, необходимую для боевого манёвра.

Вопрос 5. Что произойдёт с LiPo-аккумулятором при глубоком разряде и как BMS это предотвращает?

Ответ. При глубоком разряде (напряжение ячейки ниже 3,0 В под нагрузкой) в LiPo начинаются необратимые химические процессы: медь с токосъёмников растворяется в электролите, при последующей зарядке она осаждается в виде дендритов, которые могут проткнуть

сепаратор и вызвать внутреннее короткое замыкание — возгорание. Ёмкость необратимо теряется, внутреннее сопротивление растёт. BMS непрерывно отслеживает напряжение каждой ячейки и при достижении порогового значения (обычно 3,2–3,4 В) подаёт сигнал контроллеру полёта о необходимости возврата. Если оператор игнорирует сигнал, BMS может принудительно ограничить ток или отключить батарею.

Вопрос 6. В чём разница между пассивной и активной балансировкой ячеек?

Ответ. Пассивная балансировка — BMS замыкает избыточно заряженную ячейку на балансировочный резистор, который рассеивает лишнюю энергию в тепло. Процесс медленный (занимает часы), неэффективный с точки зрения энергосбережения, но простой и надёжный. Активная балансировка — BMS перекачивает энергию из более заряженной ячейки в менее заряженную через конденсаторы или индуктивные преобразователи. Энергия не теряется, балансировка происходит быстрее, в том числе под нагрузкой в полёте. Активная система сложнее, дороже и требует больше места, но в военных аппаратах, где каждый ватт-час на счету, её применение оправдано.

Вопрос 7. Почему параллельное соединение ячеек ($P \geq 2$) повышает боевую живучесть батареи?

Ответ. В параллельной группе ячейки соединены выводами — напряжение одинаково, ток делится между ними. Если одна ячейка в параллельной паре выходит из строя (внутренний обрыв), вторая продолжает питать цепь, пусть и с меньшей ёмкостью и повышенным током на себя. Батарея сохраняет работоспособность, аппарат может вернуться на базу. В чисто последовательной сборке (1P) отказ одной ячейки означает обрыв цепи — потеря всей батареи и, возможно, аппарата. Для военных мультиротов конфигурация с $P \geq 2$ — это структурное резервирование.

Вопрос 8. На что влияет C-рейтинг и как рассчитать максимальный разрядный ток?

Ответ. C-рейтинг — это коэффициент токоотдачи, показывающий, какой максимальный ток может безопасно отдать аккумулятор. Максимальный разрядный ток рассчитывается как: ёмкость в ампер-часах, умноженная на C-рейтинг. Например, для аккумулятора 4 А·ч с маркировкой 75C максимальный ток равен $4 \times 75 = 300$ А. Это пиковое значение на короткое время (несколько секунд). Для длительного разряда обычно берут половину: 150 А. Превышение C-рейтинга вызывает перегрев, разбухание, возгорание.

Вопрос 9. Каковы основные преимущества и недостатки водородного топливного элемента по сравнению с Li-ion для военного мультиротора?

Ответ. Преимущества: удельная энергия в 2–4 раза выше (400–1000 Вт·ч/кг против 250–300), время полёта — от 2 до 4 часов, быстрая замена баллона (минуты против часов зарядки), практически нулевая тепловая сигнатура. Недостатки: крайне высокая стоимость, сложность и опасность хранения водорода под давлением 350–700 бар, взрывоопасность при боевом повреждении баллона, невозможность отдачи пиковых токов без буферного аккумулятора, ограниченная логистика водорода в полевых условиях.

Вопрос 10. Почему крейсерский полёт экономичнее висения, и как это учитывается при планировании боевого вылета?

Ответ. При висении весь вес аппарата удерживается тягой винтов в статическом режиме — это точка максимального энергопотребления, так как винт работает в стационарном потоке собственного следа с низким КПД. При поступательном движении винт обтекается набегающим потоком, эффективный шаг уменьшается, КПД растёт, потребляемая мощность падает на 15–30%. Поэтому оператор планирует маршрут с минимальным временем висения: подход к цели, короткое зависание для прицеливания или сброса, отход на крейсерском режиме. Каждый лишний минута висения — это потеря 1–3 минут общего времени полёта.

Задачи с решениями

Задача 1. Расчёт времени полёта военного мультиротора 10"

Условие: разведывательный мультиротор 10 дюймов с полным взлётным весом 5,5 кг оборудован Li-ion батареей 6S2P ёмкостью 8000 мА·ч. Мощность, потребляемая в режиме висения, составляет 650 Вт. КПД силовой установки принять равным 0,85. Определите время висения.

Решение:

Шаг 1. Номинальное напряжение сборки 6S: количество ячеек (6), умноженное на номинальное напряжение ячейки Li-ion (3,6 В), даёт 21,6 В.

Шаг 2. Полная энергия батареи: ёмкость в ампер-часах (8 А·ч), умноженная на напряжение (21,6 В), даёт 172,8 Вт·ч.

Шаг 3. Доступная энергия с учётом КПД: полная энергия (172,8 Вт·ч), умноженная на КПД (0,85), даёт 146,88 Вт·ч.

Шаг 4. Время висения: доступная энергия (146,88 Вт·ч), делённая на мощность висения (650 Вт), даёт 0,226 часа. Перевод в минуты: 0,226, умноженное на 60, даёт 13,6 минуты.

Шаг 5. С учётом 20% запаса на возврат: 13,6, умноженное на 0,8, даёт 10,9 минуты полезного времени висения.

Ответ: Полное время висения — примерно 14 минут. С резервом на возврат — около 11 минут полезного боевого времени.

Задача 2. Сравнение LiPo и Li-ion при одинаковой полезной нагрузке

Условие: мультиротор 7 дюймов может нести либо LiPo батарею 6S 5000 мА·ч массой 0,75 кг с C-рейтингом 100С, либо Li-ion сборку 6S2P из ячеек 21700 по 4000 мА·ч каждая массой 0,60 кг. Мощность висения — 450 Вт, КПД — 0,85. Сравните время висения и максимальный разрядный ток обоих вариантов.

Решение:

Вариант А — LiPo:

Энергия: ёмкость (5 А·ч), умноженная на напряжение 6S LiPo (22,2 В), даёт 111 Вт·ч.

С учётом КПД: 111, умноженное на 0,85, даёт 94,35 Вт·ч.

Время висения: 94,35, делённое на 450, даёт 0,21 часа, или 12,6 минуты.

Максимальный разрядный ток: ёмкость (5 А·ч), умноженная на C-рейтинг (100), даёт 500 А.

Вариант В — Li-ion:

Ёмкость параллельной группы 2P: 4 А·ч, умноженное на 2, даёт 8 А·ч.

Энергия: ёмкость (8 А·ч), умноженная на напряжение 6S Li-ion (21,6 В), даёт 172,8 Вт·ч.

С учётом КПД: 172,8, умноженное на 0,85, даёт 146,88 Вт·ч.

Время висения: 146,88, делённое на 450, даёт 0,326 часа, или 19,6 минуты.

Максимальный разрядный ток (при С-рейтинге 30 для высокотокковой 21700): 8, умноженное на 30, даёт 240 А.

Ответ: LiPo обеспечивает время висения 12,6 минуты и максимальный ток 500 А. Li-ion — 19,6 минуты и 240 А. Li-ion даёт на 56% больше времени в воздухе, но почти вдвое меньше пикового тока. LiPo — для манёвра и удара, Li-ion — для разведки и барражирования. Дополнительно: Li-ion сборка на 0,15 кг легче, что при полезной нагрузке в 1–2 кг экономит 7–15% взлётного веса.

Задача 3. Расчёт энергопотребления тяжёлого мультиротора с гибридной силовой установкой

Условие: тяжёлый мультиротор 15" с бензоэлектрической гибридной установкой имеет взлётный вес 14 кг. Бензиновый двигатель через генератор выдаёт электрическую мощность 1800 Вт непрерывно. Буферный аккумулятор LiPo 6S 3000 мА·ч с С-рейтингом 75С обеспечивает пиковые токи для манёвра. Мощность висения — 1600 Вт, мощность при агрессивном манёвре — 3000 Вт. Удельная энергия бензина — 12 000 Вт·ч/кг, КПД генератора — 0,90, масса топлива — 2 кг. Определите: (а) максимальное время полёта в режиме висения; (б) может ли буферный аккумулятор обеспечить пик мощности при манёвре; (в) сколько времени аппарат может маневрировать с пиковым энергопотреблением, при условии что генератор покрывает базовую часть, а буферный аккумулятор — разницу.

Решение:

(а) Время полёта в режиме висения:

Энергия топлива: масса (2 кг), умноженная на удельную энергию (12 000 Вт·ч/кг), даёт 24 000 Вт·ч.

С учётом КПД генератора: 24 000, умноженное на 0,90, даёт 21 600 Вт·ч электрической энергии.

В режиме висения генератор выдаёт 1800 Вт, потребление — 1600 Вт. Избыточная мощность — 200 Вт идёт на подзаряд буфера. Генератор полностью покрывает висение.

Время полёта: доступная энергия (21 600 Вт·ч), делённая на потребляемую мощность висения (1600 Вт), даёт 13,5 часа, или 13 часов 30 минут.

(б) Проверка буферного аккумулятора на пик:

Максимальный разрядный ток LiPo: ёмкость (3 А·ч), умноженная на С-рейтинг (75), даёт 225 А.

Максимальная мощность LiPo: ток (225 А), умноженный на номинальное напряжение (22,2 В), даёт 4995 Вт. Это пиковая мощность на секунды.

Потребность при манёвре: 3000 Вт. Генератор даёт 1800 Вт. Буфер должен отдать 1200 Вт.

Проверка: 4995 Вт больше 1200 Вт — аккумулятор справляется с пиком.

(в) Время маневрирования:

Буфер должен отдавать разницу: потребление при манёвре (3000 Вт) минус мощность генератора (1800 Вт), даёт 1200 Вт.

Энергия буферного аккумулятора: ёмкость (3 А·ч), умноженная на напряжение (22,2 В), даёт 66,6 Вт·ч. С учётом того, что используется 80% ёмкости (оставляем запас): 66,6, умноженное на 0,80, даёт 53,28 Вт·ч.

Время манёвра: энергия буфера (53,28 Вт·ч), делённая на требуемую мощность (1200 Вт), даёт 0,0444 часа, или 2,66 минуты.

После разряда буфера генератор не может покрыть манёвр — аппарат должен вернуться в экономичный режим, и буфер подзарядится от избыточной мощности генератора.

Ответ: (а) Максимальное время висения — 13 часов 30 минут. (б) Да, буферный аккумулятор обеспечивает пиковую мощность с большим запасом (4995 Вт против 1200 Вт потребности). (в) Непрерывное манёврирование возможно около 2 минут 40 секунд, после чего необходим переход в экономичный режим для подзарядки буфера. Это типичный профиль тяжёлого гибридного аппарата: длительное барражирование с короткими агрессивными вставками.

Раздел II. Конструкция и компоненты

Глава 6. Материалы и конструкция рам: прочность, вес, ремонтпригодность

Рама мультироторного БПЛА размерностью от 7 дюймов и выше — это не просто каркас, а несущая система, которая должна выдерживать экстремальные нагрузки: резкие манёвры, вибрации от моторов, удары при посадках, а в военном применении — ещё и риск баллистических повреждений, агрессивной среды, перепадов температур. При этом вес рамы напрямую влияет на полезную нагрузку и время полёта: каждый лишний грамм снижает эффективность аппарата. Поэтому выбор материалов и архитектуры — инженерный компромисс между прочностью, массой, ремонтпригодностью и стоимостью.

Материалы: свойства и применение

Углепластик (карбон) — основной материал для рам тяжёлых мультироторов. Он даёт высокую жёсткость при минимальном весе, устойчив к усталости при циклических нагрузках. Однако карбон хрупок при ударных воздействиях: сильный удар может вызвать расслоение, которое сложно обнаружить визуально. В военном применении это критично: незаметное повреждение способно привести к разрушению рамы в полёте.

Алюминий (сплавы серии 6061, 7075) используют для силовых элементов, креплений и быстросъёмных узлов. Он менее чувствителен к ударам, хорошо гасит вибрации, легко обрабатывается и сваривается. Алюминиевые профили и фрезерованные кронштейны применяют там, где важна ремонтпригодность: в полевых условиях можно заменить узел без специального оборудования. Минус — больший вес по сравнению с карбоном.

Инженерные пластики (полиамид, ПEEK, ABS с наполнителями) применяют для несилowych деталей, кожухов, защитных накладок, демпферов. Они устойчивы к влаге, вибрациям, перепадам температур, не проводят электричество. В некоторых случаях используют 3D-печать для быстрого изготовления запасных частей прямо на базе — это повышает автономность эксплуатации.

Конструкция и расчётные нагрузки

При манёврах и сбросе полезной нагрузки на раму действуют:

Инерционные силы — при резких ускорениях и торможениях.

Центробежные нагрузки — от вращения пропеллеров и рывков моторов.

Ударные импульсы — при сбросе груза, жёсткой посадке, попадании осколков.

Расчёт прочности ведут по коэффициентам запаса: для критических узлов (точки крепления моторов, лучей к центральной плите) коэффициент запаса прочности должен быть не менее 2,5–3 относительно расчётной пиковой нагрузки. Это учитывает возможные дефекты материала, усталость, коррозию и ошибки сборки.

На практике нагрузки оценивают так: если аппарат массой 8 кг совершает манёвр с перегрузкой 3g, то на узлы крепления приходится сила, эквивалентная 24 кг. При сбросе груза возникает дополнительный импульс: резкое изменение массы и центра тяжести вызывает кратковременные пики нагрузки, которые могут превышать штатные в 1,5–2 раза.

Быстросъёмные узлы и ремонт в полевых условиях

В боевых условиях время на обслуживание ограничено, поэтому конструкция предусматривает:

Модульные лучи — крепятся к центральной плите через быстросъёмные фиксаторы или болты с шестигранником. Это позволяет заменить повреждённый луч за 3–5 минут.

Сменные площадки крепления моторов — если посадочные отверстия разбиты, ставят новую пластину.

Запасные крепёжные элементы — в комплекте всегда есть болты, гайки, фиксаторы резьбы.

Для ремонта используют:

Карбоновые заплатки с эпоксидным связующим — для локального ремонта трещин.

Алюминиевые накладки — для усиления повреждённых участков.

Пластиковые стяжки и бандажи — как временное решение до капитального ремонта.

Важно: после любого ремонта раму проверяют на симметрию и жёсткость. Нарушение геометрии приводит к дисбалансу, вибрациям и ускоренному износу моторов и регуляторов.

Виброизоляция авионики от рамы

Вибрации от моторов и полёта передаются на раму и далее на полётный контроллер, GPS, камеры и полезную нагрузку. Это вызывает:

Ошибки датчиков и нестабильную работу автопилота.

Размытие изображения с камер.

Ускоренный износ электроники.

Методы виброизоляции:

Демпфирующие прокладки из силикона или эластомеров между платой и рамой.

Подвесы на резиновых втулках для камер и тяжёлой полезной нагрузки.

Разделение масс: тяжёлые элементы (аккумуляторы, полезная нагрузка) размещают на отдельных демпфированных платформах.

Ключевое правило: жёсткое крепление авионики к раме допустимо только при условии, что рама сама эффективно гасит вибрации (например, за счёт многослойной структуры или встроенных демпферов).

Защита от баллистических поражений

Полностью защитить лёгкий БПЛА от прямого попадания невозможно, но можно снизить уязвимость:

Локализация критических узлов — полётный контроллер и аккумуляторы размещают в центре рамы, прикрывая их менее важными элементами (батарейными отсеками, кожей).

Бронепластины из лёгких композитов — устанавливают над электроникой. Они защищают от осколков и рикошетов, но увеличивают вес.

Дублирование систем — резервные датчики, каналы связи, источники питания.

Маскировка и снижение заметности — окраска, тепловая и радиолокационная маскировка уменьшают вероятность прицельного поражения.

Компромисс: любая дополнительная защита увеличивает массу и снижает полезную нагрузку. Поэтому защиту проектируют точечно — только для самых критичных компонентов.

10 вопросов с ответами

Вопрос: Почему для рам мультироторных БПЛА часто используют карбон, несмотря на его хрупкость?

Ответ: Карбон обеспечивает высокую жёсткость при минимальном весе и устойчив к усталостным нагрузкам, что критично для продолжительных полётов и манёвров. Его хрупкость компенсируют конструктивными решениями: защитными накладками, дублированием узлов, правильным расчётом коэффициентов запаса прочности.

Вопрос: В каких случаях предпочтительнее использовать алюминий вместо карбона?

Ответ: Алюминий выбирают там, где важна ремонтпригодность, устойчивость к ударам и простота обработки: для быстросъёмных креплений, силовых кронштейнов, элементов, подверженных частым механическим воздействиям.

Вопрос: Как рассчитывают пиковые нагрузки на узлы крепления моторов при манёврах?

Ответ: Пиковую нагрузку определяют как произведение массы аппарата на коэффициент перегрузки (например, 3g), затем умножают на коэффициент запаса прочности (2,5–3) для учёта ударных импульсов и возможных дефектов.

Вопрос: Что такое коэффициент запаса прочности и зачем он нужен?

Ответ: Коэффициент запаса прочности — это множитель, на который увеличивают расчётную нагрузку, чтобы учесть неопределённости: дефекты материала, коррозию, усталость, ошибки сборки. Он гарантирует, что узел выдержит реальные нагрузки даже при неблагоприятных условиях.

Вопрос: Какие элементы рамы делают быстросъёмными и почему?

Ответ: Быстросъёмными делают лучи, площадки крепления моторов, защитные кожухи. Это позволяет оперативно заменять повреждённые детали в полевых условиях без специального инструмента и длительной разборки аппарата.

Вопрос: Как вибрации от моторов влияют на работу авионики и как их снижают?

Ответ: Вибрации вызывают ошибки датчиков, нестабильность автопилота и размытие изображения. Их снижают с помощью демпфирующих прокладок, подвесов на резиновых втулках, разделения масс и правильного размещения тяжёлых элементов на отдельных платформах.

Вопрос: Можно ли полностью защитить БПЛА от баллистических поражений?

Ответ: Полностью защитить лёгкий БПЛА невозможно без нежелательного увеличения массы. Защита строится по принципу локализации: прикрывают только самые критичные узлы (контроллер, аккумуляторы) лёгкими бронепластинами, одновременно снижая заметность аппарата.

Вопрос: Зачем нужны демпфирующие прокладки между авионикой и рамой?

Ответ: Демпфирующие прокладки гасят высокочастотные вибрации, предотвращая их передачу на чувствительные датчики и камеры. Это повышает стабильность полёта и качество съёмки.

Вопрос: Почему после ремонта рамы обязательно проверяют её геометрию?

Ответ: Нарушение геометрии вызывает дисбаланс, вибрации и неравномерную нагрузку на моторы и регуляторы. Это приводит к ускоренному износу компонентов и может стать причиной аварии.

Вопрос: Как инженерные пластики помогают повысить автономность эксплуатации БПЛА?

Ответ: Инженерные пластики позволяют изготавливать запасные детали методом 3D-печати прямо на базе. Это сокращает время простоя аппарата и делает эксплуатацию более автономной, особенно в удалённых районах.

3 задачи с готовыми ответами

Задача 1.

Аппарат массой 9 килограммов выполняет манёвр с перегрузкой 2,5 g. Рассчитайте расчётную нагрузку на узел крепления мотора, если коэффициент запаса прочности равен 3. Формулу запишите словами.

Решение: расчётная нагрузка равна массе аппарата, умноженной на коэффициент перегрузки, а затем на коэффициент запаса прочности. Девять килограммов умножить на два и пять десятых, затем умножить на три.

Ответ: расчётная нагрузка составляет 67,5 килограммов.

Задача 2.

Рама из карбона имеет предел прочности 400 мегапаскалей. Расчётная пиковая нагрузка даёт напряжение 120 мегапаскалей. Определите коэффициент запаса прочности. Формулу запишите словами.

Решение: коэффициент запаса прочности равен пределу прочности материала, делённому на расчётное напряжение. Четыреста мегапаскалей разделить на сто двадцать мегапаскалей.

Ответ: коэффициент запаса прочности равен примерно 3,33.

Задача 3.

При сбросе груза массой 2 килограмма аппарат испытывает дополнительный ударный импульс, который увеличивает нагрузку на лучи на 40 процентов. Если штатная расчётная нагрузка на луч составляет 15 килограммов, какова пиковая нагрузка при сбросе? Формулу запишите словами.

Решение: пиковая нагрузка равна штатной расчётной нагрузке, увеличенной на сорок процентов. Пятнадцать килограммов плюс сорок процентов от пятнадцати килограммов.

Ответ: пиковая нагрузка при сбросе составляет 21 килограмм.

Раздел II. Конструкция и компоненты

Глава 7. Полезная нагрузка: классификация, интеграция, балансировка

7.1. Классификация полезной нагрузки (payload) для тяжёлых мультироторов (7"+)

Полезная нагрузка военного мультиротора — это всё, что аппарат несёт помимо силовой установки, рамы и системы управления. От состава payload напрямую зависят тактические возможности дрона: разведка, целеуказание, огневая поддержка, ретрансляция связи или транспортировка грузов.

Основные категории полезной нагрузки:

Оптико-электронные системы: дневные камеры, тепловизоры, мультиспектральные сенсоры. Их задача — обнаружение, идентификация и сопровождение целей днём и ночью.

Лазерные системы: целеуказатели и дальномеры. Позволяют точно маркировать цель для корректируемых боеприпасов и измерять расстояние до объекта.

Системы сброса и грузовые механизмы: механические и электромеханические подвесы, контейнеры, крюки. Используются для доставки боеприпасов, медикаментов, оборудования.

Ретрансляторы связи: компактные приёмо-передающие модули, которые расширяют радиус управления дроном и обеспечивают устойчивую связь в условиях сложного рельефа.

Специализированные датчики: газоанализаторы, дозиметры, магнитометры — для задач радиационной, химической и биологической разведки.

Для мультироторов размерностью от 7 дюймов и выше типичен модульный подход: полезная нагрузка устанавливается на стандартизированные крепления (пластины, кронштейны) с возможностью быстрой замены под конкретную задачу.

7.2. Интеграция payload: механика, электрика, интерфейсы

Интеграция полезной нагрузки — это не просто «прикрепить камеру», а обеспечить её работоспособность в полёте.

Механические аспекты:

Крепление: используются антивибрационные площадки и демпферы, чтобы снизить тряску и улучшить качество видео и точность целеуказания.

Ориентация: подвесы (гиростабилизированные платформы) удерживают камеру или целеуказатель в нужном направлении независимо от крена и тангажа дрона.

Доступ и обслуживание: конструкция должна позволять быструю установку/снятие модуля без специальных инструментов.

Электрические аспекты:

Питание: payload питается от основной батареи или отдельного аккумулятора. Важно учитывать пиковые токи: тепловизор или лазерный модуль могут потреблять значительный ток при включении.

Защита цепей: применяются предохранители и автоматические выключатели, чтобы короткое замыкание в payload не выводило из строя полётный контроллер.

Интерфейсы: цифровые шины (UART, CAN, MAVLink) передают команды управления и телеметрию. Аналоговые видеoliniии (CVBS, HD-SDI) используются для передачи видеосигнала на наземную станцию.

Программная интеграция:

Настройка полётного контроллера под payload (например, активация реле для сброса груза по команде с пульта).

Логика приоритетов: если полезная нагрузка потребляет слишком много энергии, система должна предупреждать оператора или отключать второстепенные модули.

7.3. Балансировка, центровка и влияние на аэродинамику

Центр тяжести (ЦТ) — одна из ключевых характеристик, определяющих устойчивость полёта.

Как смещение payload влияет на полёт:

Если полезная нагрузка смещена вперёд, дрон будет «клевать» носом, потребуется дополнительная тяга задних моторов для компенсации.

Смещение назад приводит к «задиранию» носа и ухудшению управляемости.

Боковое смещение вызывает крен и увеличивает нагрузку на моторы с одной стороны, что снижает время полёта и повышает риск отказа.

Методы балансировки:

Физическая центровка: полезная нагрузка размещается так, чтобы ЦТ совпадал с геометрическим центром рамы или находился в пределах, рекомендованных производителем.

Компенсация массой: если payload нельзя переместить, добавляют противовес с противоположной стороны.

Программная компенсация: в настройках полётного контроллера можно задать смещение ЦТ, чтобы автопилот учитывал его при расчёте управляющих воздействий.

Аэродинамическое влияние:

Крупные обтекатели и подвесы увеличивают лобовое сопротивление, снижая максимальную скорость и дальность полёта.

Вибрации от несбалансированной нагрузки ухудшают качество изображения и могут привести к повреждению оптики.

Турбулентность от винтов может влиять на работу датчиков, если они расположены слишком близко к воздушным потокам.

7.4. Электромагнитные помехи от payload и методы их подавления

Любая активная полезная нагрузка — это источник электромагнитных помех (ЭМП), которые могут мешать работе полётного контроллера, приёмников и радиолиний.

Источники помех:

Импульсные блоки питания и преобразователи напряжения.

Мощные светодиоды и лазерные диоды.

Двигатели подвесов и сервоприводы.

Методы подавления ЭМП:

Фильтрация питания: установка LC-фильтров (индуктивность и ёмкость) на линиях питания payload.

Экранирование: кабели и модули payload помещаются в экранирующую оплётку или корпуса с заземлением.

Разделение цепей: силовые и сигнальные линии прокладываются отдельно, чтобы избежать наводок.

Заземление: все экраны и корпуса должны иметь надёжный контакт с общей землёй дрона, но без образования «земляных петель».

Выбор частоты: при использовании радиомодулей важно избегать частот, совпадающих с основными каналами управления и телеметрии.

7.5. Практические рекомендации по выбору и установке payload

Определите задачу: не ставьте «всё сразу». Лучше иметь два специализированных дрона (разведка и сброс), чем один перегруженный.

Рассчитайте массу: суммарная масса payload не должна превышать 30–40% от максимальной взлётной массы дрона, чтобы сохранить запас тяги и манёвренность.

Проверьте совместимость: убедитесь, что интерфейсы и напряжения питания совпадают с возможностями вашего полётного контроллера и батареи.

Протестируйте на земле: включите payload и проверьте, нет ли помех, перегрева или просадки напряжения.

Проведите тестовый полёт: начните с коротких полётов без полезной нагрузки, затем постепенно добавляйте модули и оценивайте изменения в поведении дрона.

10 вопросов с ответами

Вопрос: Что понимается под термином «полезная нагрузка» (payload) в контексте военного мультироторного БПЛА?

Ответ: Полезная нагрузка — это оборудование, которое дрон несёт для выполнения боевой или вспомогательной задачи: камеры, тепловизоры, целеуказатели, системы сброса, ретрансляторы и т. п.

Вопрос: Почему для тяжёлых мультироторов (7" и более) предпочтителен модульный подход к полезной нагрузке?

Ответ: Модульность позволяет быстро менять конфигурацию под разные задачи, упрощает обслуживание и ремонт, а также снижает время подготовки к вылету.

Вопрос: Как смещение полезной нагрузки влияет на устойчивость полёта?

Ответ: Смещение центра тяжести нарушает баланс, из-за чего дрон начинает «клевать» носом или задирает его, появляется крен, растёт нагрузка на моторы и снижается время полёта.

Вопрос: Зачем нужны антивибрационные крепления для оптико-электронных систем?

Ответ: Они снижают тряску от работы моторов и винтов, что улучшает качество видео и повышает точность целеуказания.

Вопрос: Какие основные источники электромагнитных помех от полезной нагрузки вы знаете?

Ответ: Импульсные преобразователи, мощные светодиоды, лазерные модули, двигатели подвесов и сервоприводы.

Вопрос: Каким образом можно подавить электромагнитные помехи от полезной нагрузки?

Ответ: Используют фильтрацию питания (LC-фильтры), экранирование кабелей, разделение силовых и сигнальных линий, а также правильное заземление.

Вопрос: Какой процент от максимальной взлётной массы обычно отводится под полезную нагрузку?

Ответ: Обычно полезная нагрузка не должна превышать 30–40% от максимальной взлётной массы, чтобы сохранить достаточный запас тяги.

Вопрос: В чём разница между физическим и программным методами компенсации смещения центра тяжести?

Ответ: Физическая компенсация — это перемещение или добавление противовесов; программная — настройка полётного контроллера для учёта смещения при расчёте управляющих команд.

Вопрос: Для чего нужен гиростабилизированный подвес полезной нагрузки?

Ответ: Он удерживает камеру или целеуказатель в стабильном положении независимо от наклонов и вращений дрона, что важно для точного наблюдения и целеуказания.

Вопрос: Почему важно тестировать полезную нагрузку на земле перед полётом?

Ответ: На земле можно выявить просадку напряжения, перегрев, электромагнитные помехи и другие проблемы, которые в полёте могут привести к аварии.

3 задачи с готовым ответом

Задача 1.

Мультироторный БПЛА имеет максимальную взлётную массу 12 килограммов. Масса самой рамы, моторов, аккумуляторов и полётного контроллера составляет 7 килограммов. Определите максимально допустимую массу полезной нагрузки, если принято правило не превышать 35% от максимальной взлётной массы. Формулу запишите словами.

Решение словами:

Максимальная масса полезной нагрузки равна максимальной взлётной массе, умноженной на тридцать пять процентов.

Двенадцать килограммов умножить на тридцать пять процентов равно четыре целых две-сти граммов.

При этом фактическая свободная масса (без payload) — семь килограммов, значит, полезная нагрузка может быть до пяти килограммов. Ограничивающим фактором выступает правило 35%, поэтому берём меньшее значение.

Ответ: Максимально допустимая масса полезной нагрузки — 4,2 килограмма.

Задача 2.

Полезная нагрузка (тепловизор и подвес) установлена на раме так, что центр тяжести смещён на 4 сантиметра вперёд относительно геометрического центра. Дрон стал «клевать» носом. Предложите два способа исправить ситуацию без снятия полезной нагрузки.

Ответ:

Установить противовес массой, подобранной экспериментально, на хвостовую часть рамы.

В настройках полётного контроллера задать смещение центра тяжести, чтобы автопилот компенсировал дисбаланс при управлении.

Задача 3.

При включении лазерного целеуказателя на мультироторе наблюдаются сбои в передаче телеметрии на наземную станцию. Опишите три возможных причины и по одному способу устранения для каждой.

Ответ:

Причина: помехи по линии питания. Способ: установить LC-фильтр на линию питания целеуказателя.

Причина: наводки на сигнальный кабель телеметрии. Способ: экранировать кабель и проложить его отдельно от силовых проводов.

Причина: совпадение частот радиомодуля телеметрии и модуляции лазера. Способ: изменить рабочую частоту радиомодуля или использовать другую полосу частот.

Раздел III. Управление и связь

Глава 8. Системы управления полётом (Flight Controllers)

8.1. Архитектура контроллера полёта: мозг беспилотника

Контроллер полёта (Flight Controller, FC) — это вычислительное ядро мультироторного БПЛА, которое непрерывно считывает данные с бортовых датчиков, обрабатывает их через управляющие алгоритмы и выдаёт команды на регуляторы оборотов (ESC), удерживая аппарат в воздухе и выполняя заданную траекторию. В военном применении от контроллера требуется не просто стабилизация — требуется автономность, помехоустойчивость и предсказуемость поведения в условиях, где радиосвязь может исчезнуть в любую секунду.

Базовая архитектура современного FC для крупного мультиротора (7 дюймов и выше) строится по следующей схеме:

Микроконтроллер (MCU) — основной процессор, выполняющий управляющий цикл (loop). В военных FC применяются 32-битные архитектуры с частотой от 168 до 480 МГц (на базе процессоров серий STM32F4/F7/H7 и аналогов). Управляющий цикл в военных задачах должен выполняться с частотой не ниже 1000 Гц — это значит, что одна тысяча раз в секунду система пересчитывает управляющие воздействия.

Шина датчиков и периферии — внутренняя магистраль, по которой данные поступают к процессору. В простых гражданских FC используется шина I2C, но для военных применений критична шина SPI, обеспечивающая пропускную способность до десятков мегабит в секунду и значительно меньшие задержки.

Интерфейсы вывода — каналы PWM, DShot или Multishot для подачи сигналов на ESC. В военных задачах предпочтителен протокол DShot300 или DShot600, передающий цифровой сигнал без аналогового шума и с контрольной суммой, что исключает искажение команды из-за электромагнитных помех.

Порт ввода-вывода — UART-порты (минимум 4–6) для подключения приёмника управления, телеметрии, GPS-модуля, компаса, OSD (бортовой телеметрии на экран) и полезной нагрузки.

8.2. Инерциальный измерительный блок (IMU)

IMU (Inertial Measurement Unit) — первичный датчик FC, без которого полёт невозможен в принципе. Содержит два типа сенсоров:

Акселерометр — измеряет линейное ускорение по трём осям (X, Y, Z). Из него FC вычисляет угол наклона аппарата относительно вектора гравитации (тангаж и крен) и detecting свободного падения.

Гироскоп — измеряет угловую скорость вращения вокруг трёх осей. Это самый быстрый и самый критичный датчик: именно по данным гироскопа работает внутренний цикл стабилизации (PID-контроллер).

Ключевая характеристика военного класса IMU — шум и дрейф. Гражданские MEMS-гироскопы (например, серии ICM-20602) имеют дрейф нуля порядка 5–10 градусов в час. Военные MEMS-датчики (например, серии ADIS-16xxx от Analog Devices) снижают дрейф до 0{,}5–1 градуса в час. Это критично: при потере GPS на 10 минут гражданский БПЛА накопит ошибку по курсу до 1 градуса, а с военным датчиком — около 0{,}1 градуса.

Резонансный дрейф и вибрации. Вибрация от пропеллеров и моторов — главный враг IMU. На частоте 7-дюймовых винтов (около 220–280 Гц при крейсерских оборотах) возникают гармоники, которые гражданские акселерометры часто воспринимают как реальное ускорение. Военные FC применяют механическое демпфирование (силиконовые виброразвязки) и программную фильтрацию: режекторные фильтры (notch), настроенные на частоты вибраций конкретной рамы, и фильтры нижних частот (low-pass) с динамически адаптируемой частотой среза.

8.3. Магнитометр (компас)

Компас определяет курс аппарата относительно магнитного севера. Без компаса БПЛА может лететь, но не может автономно держать направление или выполнять маршрут с заданными путевыми точками.

Проблема военного применения: помехи. Магнитометр крайне чувствителен к магнитным полям, исходящим от силовых проводов, батарей, металлических элементов рамы и особенно — от двигателей при изменении тока. В военных задачах типична ситуация, когда на борту установлена дополнительная нагрузка: гранатомёт, сбрасываемый боеприпас, тепловизор. Каждое из этих устройств создаёт собственное магнитное поле.

Правило размещения: компас должен быть вынесен на мачту или отдельный модуль минимум на 10–15 см от силовой части. В идеале — на отдельном GPS-модуле (combination GPS+compass), который крепится в верхней части аппарата. Двойной компас (один на FC, один на мачте) — стандарт для военных конфигураций: FC переключается на внешний, если внутренний показывает аномалию.

Калибровка компаса в военных условиях должна проводиться на каждом новом месте базирования. Магнитное склонение может отличаться на несколько градусов даже на расстоянии 50 км, а металлические объекты в радиусе (бронетехника, контейнеры, бетон с арматурой) создают локальные магнитные аномалии.

8.4. Барометр

Барометр измеряет атмосферное давление и вычисляет высоту аппарата. FC использует барометр для удержания высоты в режиме автономного полёта и для точной посадки, когда GPS-высота недостаточно точна.

Физический принцип: атмосферное давление убывает с высотой. Барометр на борту измеряет текущее давление и сравнивает его с опорным (зафиксированным при запуске или полученным от наземной станции). Разница пересчитывается в высоту по стандартной барометрической формуле.

Формула барометрической высоты записывается словами следующим образом: высота равна произведению температуры на газовую постоянную, делённому на ускорение свободного падения, умноженному на натуральный логарифм отношения давления на уровне земли к измеренному давлению.

В упрощённом виде для тропосферы (до 11 км) это: высота равна отношению разности температур, умноженной на разность логарифмов давлений, к произведению температурного градиента на логарифм отношения давлений.

Ограничения:

Точность барометра $\pm 0{,}5$ –1 метр в статике, но в динамике при порывах ветра ошибка может достигать 2–3 метров.

Полёт на малых высотах (до 5 м) над неровной местностью: барометр «не видит» рельеф, и для огибания препятствий нужен лазерный или радиовысотомер.

При быстром изменении погоды (фронт, гроза) давление у земли меняется, и барометрическая высота «плывёт» на 5–10 метров за полчаса.

Военная практика: барометр дублируется GPS-высотой и, при наличии, данными лазерного дальномера вниз. FC применяет фильтр Калмана (алгоритм слияния датчиков), который взвешивает показания всех источников и выдаёт оптимальную оценку высоты с минимальной ошибкой.

8.5. Спутниковая навигация: GPS/ГЛОНАСС

Для автономного полёта по маршруту FC необходима спутниковая навигация. Модуль приёмника определяет координаты (широта, долгота, высота), путевую скорость и время.

Двухсистемный приёмник (GPS + ГЛОНАСС) — минимальное требование для военного БПЛА. Приёмники Galileo и BeiDou добавляются как третий и четвёртый источники. Чем больше спутниковых систем задействовано, тем больше спутников одновременно видны, и тем точнее позиция.

Точность:

GPS (одиночный, без коррекций): $\pm 2{,}5$ –5 метров CEP (круговая вероятная ошибка — радиус круга, в который попадает 50% измерений).

GPS + ГЛОНАСС (двухсистемный): $\pm 1{,}5$ –3 метра CEP.

С мультисистемным приёмником и SBAS-коррекцией (EGNOS/WAAS): $\pm 0{,}5$ –1{,}5 метра.

RTK (кинематика реального времени): ± 2 –5 сантиметров, но требует наземной базы или сетевой коррекции.

Помехоустойчивость. В военных условиях зона применения БПЛА может находиться под воздействием систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ), заглушающих GPS. Ключевые меры:

Антенна с подавлением помех по боковым лепесткам (choke-ring или patch-антенна с фильтром) — снижает приём помех, идущих не сверху, а сбоку (с направления постановщика помех).

Модуль с фильтром SAW или TCXO — кварцевый термокомпенсированный генератор обеспечивает стабильность частоты приёмника при температурных перепадах и снижает чувствительность к узкополосным помехам.

Двойная антенна — два разнесённых приёмника позволяют методом пространственной фильтрации выделить полезный сигнал и подавить помеху.

Фильтр Калмана в FC — при кратковременной потере спутников (пролёт под мостом, за зданием, зона помех) FC продолжает полёт по данным IMU и барометра, экстраполируя траекторию. Качество этой экстраполяции напрямую зависит от дрейфа IMU: за 30 секунд потери GPS военный датчик накопит ошибку примерно 30–50 метров, гражданский — до 100–150 метров.

8.6. Прошивки FC: сравнение для военных задач

Выбор прошивки — это выбор между стабильностью, автономностью и гибкостью настройки. Для военного мультиротора приоритеты расставлены иначе, чем в гонках или

съёмке: на первом месте стоят автономность, надёжность возврата и способность выполнить миссию при потере связи.

8.6.1. ArduPilot

Наиболее зрелая и функционально насыщенная прошивка для автономных задач. Поддерживает свыше 30 типов летательных аппаратов, из которых для военных мультироторов ключевыми являются режимы: Auto (полёт по маршруту), Guided (управление точкой цели в реальном времени), RTL (возврат на точку старта), Loiter (удержание позиции), Brake (экстренная остановка).

Военные возможности ArduPilot:

Полёт по маршруту из 700+ путевых точек.

Условная логика выполнения миссии: при достижении точки — проверка условия (например, «батарея ниже 30%» — переход на точку возврата).

Геозона (geofence) — виртуальная зона полёта; при нарушении границ FC автоматически включает RTL или посадку. Можно задать цилиндрическую зону по радиусу и высоте.

Интеграция с полезной нагрузкой: управление подвесом, сбросом, камерой через MAVLink-команды.

Логирование: полный полётный лог (DataFlash) с частотой 10–50 Гц по всем датчикам — критично для послеполётного анализа.

Поддержка двойного GPS, двойного IMU, двойного компаса с автоматическим переключением при отказе.

Недостатки: больший объём конфигурации, чем у Betaflight; выше порог входа для оператора; не оптимизирована для агрессивного маневрирования на высоких скоростях.

8.6.2. PX4

Прошивка с модульной архитектурой, разработанная при участии академического сообщества. По функционалу близка к ArduPilot, но архитектурно разделена на отдельные модули: commander, navigator, position controller, attitude controller. Это упрощает сертификацию и аудит кода.

Военные особенности PX4:

Строгая изоляция модулей — отказ одного модуля (например, навигатора) не обрушивает весь FC, а переводит в безопасный режим.

Встроенный симулятор SITL/ITL — позволяет отрабатывать миссии в симуляции перед реальным полётом, что ценно для тренировки операторов.

Поддержка ROS (Robot Operating System) — интеграция с внешними вычислителями, компьютерным зрением, наведением по целеуказанию.

Приоритет в задачах, где требуется формальная верификация алгоритмов.

Недостатки: меньшее сообщество, чем у ArduPilot; часть военных функций требует дополнительной разработки; менее интуитивная Mission Planner, чем у ArduPilot.

8.6.3. INAV

Прошивка с открытым кодом, ориентированная на автономные полёты в условиях ограниченного бюджета. Создана на базе Cleanflight, выросла в самостоятельный продукт.

Военные возможности INAV:

Полёт по маршруту с до 120 путевых точек.

Удержание позиции, возврат, посадка по GPS.

Поддержка OSD (бортовой телеметрии) «из коробки» — без отдельного модуля.

Меньшая ресурсоёмкость — работает на FC с процессорами F1/F4, где ArduPilot и PX4 могут не запуститься.

Простота настройки: конфигурация через CLI или Configurator, быстрое развертывание.

Недостатки: нет условной логики миссии; ограниченная поддержка полезной нагрузки; меньшая точность удержания позиции при ветре; нет полноценного резервирования датчиков.

8.6.4. Betaflight

Гоночная и фристайл-прошивка, оптимизированная под максимальную отзывчивость и скорость. Управляющий цикл до 8 кГц (8000 раз в секунду), минимальные задержки, агрессивная фильтрация.

Военное применение — ограниченное. Betaflight не предназначена для автономных миссий, но используется:

В FPV-ударных дронов-камикадзе, где оператор вручную наводит аппарат на цель.

В разведывательных БПЛА с ручным управлением и видеосвязью, где автономность не требуется.

В задачах «один вылет — одна цель», где полёт по маршруту не нужен.

Преимущества в этом применении: минимальная задержка управления (2–5 мс от стика до мотора), высочайшая маневренность, способность к резким манёврам уклонения.

Недостатки: нет автономного полёта по маршруту; нет RTL в полном смысле; нет управления полезной нагрузкой; нет геозоны; нет логирования миссии.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.