

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**П.А. КОКУНИН, Д.Е. ЧИКРИН, О.В. ШИНДОР, А.А. ЕГОРЧЕВ
ТЕХНИК-НАЛАДЧИК МУЛЬТИРОТОРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ
АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие



**Казань
2025**

УДК 629.735.7

ББК 39.52я73

Т73

*Печатается по рекомендации
Учебно-методической комиссии института Вычислительной математики и
информационных технологий
Казанского (Приволжского) федерального университета
(протокол № 4 от 21 ноября 2025 г.)*

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент А.А.Авксентьев
(Казанский национальный исследовательский технического
университет им. А. Н. Туполева – КАИ)
Начальник молодежного конструкторского бюро, директор ООО
«МАДАГАСКАР» (Производство летательных аппаратов) А.В. Соловьев
(Казанский государственный энергетический университет)

Кокунин П.А., Чикрин Д.Е., Шиндор О.В., Егорчев А.А.

A72 Техник-наладчик мультироторных беспилотных авиационных систем:
учебное пособие / П.А.Кокунин, Д.Е.Чикрин, О.В.Шиндор, А.А.Егорчев –
Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2025. – 289 с.

Данное пособие составлено в соответствии с современными требованиями к подготовке технических специалистов по обслуживанию беспилотных авиационных систем и является комплексным руководством по техническому обслуживанию, диагностике и ремонту мультироторных БАС. Его специфика заключается в том, что в нем не только изложены теоретические основы конструкции БАС, электроники и систем управления, но и подробно рассмотрены практические аспекты диагностики неисправностей, технологий ремонта, контроля технического состояния. Представлен обширный комплекс практических занятий, контрольных вопросов и реальных сценариев для отработки профессиональных навыков, охватывающих все этапы технической эксплуатации БАС.

**УДК 629.735.7
ББК 39.52я73**

© Издательство Казанского университета, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
ТЕМА 1: УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ	8
Лекция 1.1: Общие сведения о мультироторных беспилотных авиационных системах	8
Лекция 1.2: Конструкция мультироторных БАС	13
Лекция 1.3: Электронные системы мультироторных БАС	21
Практика по теме 1	29
ТЕМА 2: ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС	38
Лекция 2.1: Методы диагностики технического состояния БАС	38
Лекция 2.2: Классификация и признаки неисправностей БАС	45
Лекция 2.3: Инструменты и методы контроля технического состояния	53
Практика по теме 2	61
ТЕМА 3: ТЕКУЩИЙ И КОНТРОЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС	75
Лекция 3.1: Технология выполнения текущего ремонта БАС	75
Лекция 3.2: Технология контрольно-восстановительного ремонта	83
Лекция 3.3: Ремонт и восстановление систем энергообеспечения и связи.....	90
Практика по теме 3	100
ТЕМА 4: ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС..	112
Лекция 4.1: ВИДЫ И РЕГЛАМЕНТЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ БАС	112
Лекция 4.2: Технология выполнения технического обслуживания и обслуживание взлетно-посадочных устройств	119
Лекция 4.3: особенности технического обслуживания различных элементов БАС	130
Практика по теме 4	145
ТЕМА 5: ОБСЛУЖИВАНИЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ И НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ.....	146
Лекция 5.1: Типы аккумуляторных батарей, применяемых в БАС	146

Лекция 5.2: правила эксплуатации и обслуживания аккумуляторных батарей	155
Лекция 5.3: наземные источники электропитания	166
Лекция 5.4: Безопасность при работе с аккумуляторными батареями.....	173
Лекция 5.5: Хранение и транспортировка аккумуляторных батарей	179
ТЕМА 6: УСТАНОВКА И НАСТРОЙКА СЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ...	186
Лекция 6.1: Виды съемного оборудования для мультироторных БАС	186
Лекция 6.2: Порядок установки и снятия съемного оборудования	198
Лекция 6.3: Настройка и калибровка съемного оборудования	208
Лекция 6.4: Балансировка бас и проверка функционирования установленного оборудования	218
ТЕМА 7: ОБНОВЛЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КАЛИБРОВКА БАС	230
Лекция 7.1: Программное обеспечение мультироторных БАС	230
Лекция 7.2: Порядок обновления программного обеспечения	242
Лекция 7.3: Методы калибровки датчиков и систем БАС	255
Лекция 7.4: Цифровые технологии и настройка параметров полетного контроллера.....	267
ТЕМА 8: ВЕДЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ И ХРАНЕНИЕ БАС	282
Лекция 8.1: Система технической документации.....	282
Лекция 8.2: Технологии хранения БАС	284

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие беспилотных авиационных систем в последние десятилетия привело не только к расширению сфер их применения, но и к формированию новых профессиональных компетенций в области технической эксплуатации этих сложных технических комплексов. От простых любительских моделей до профессиональных промышленных платформ - мультироторные БАС стали неотъемлемой частью современной технологической инфраструктуры в картографии, мониторинге, инспекции, сельском хозяйстве и многих других отраслях.

Мультироторные беспилотные авиационные системы, благодаря своей способности к вертикальному взлету и посадке, зависанию в воздухе и высокой маневренности, получили широкое распространение среди профессиональных пользователей. Однако сложность современных БАС, объединяющих достижения механики, электроники, программирования и аэродинамики, требует наличия высококвалифицированных специалистов, способных обеспечить их безотказную работу, своевременное обслуживание и качественный ремонт.

Техническое обслуживание и ремонт беспилотных систем приобретают особую важность в условиях интенсивной коммерческой эксплуатации, где время простоя оборудования напрямую влияет на экономическую эффективность. Профессиональные эксплуатанты БАС нуждаются в технических специалистах, способных быстро диагностировать неисправности, качественно выполнять ремонтные работы, оптимизировать режимы работы оборудования и обеспечивать максимальную готовность техники к выполнению полетных заданий.

В Российской Федерации развитие отрасли беспилотных авиационных систем сопровождается формированием нормативно-правовой базы, регулирующей не только выполнение полетов, но и техническую эксплуатацию БАС. Требования к квалификации технического персонала, процедурам технического обслуживания, ведению документации закреплены в федеральных авиационных правилах, государственных стандартах и отраслевых регламентах.

Данное учебное пособие предназначено для лиц, желающих получить профессиональные знания и навыки в области технического обслуживания и ремонта мультироторных беспилотных авиационных систем:

1. слушатели курсов подготовки техников-наладчиков БАС в учебных центрах и технических учебных заведениях;
2. специалисты сервисных центров и ремонтных организаций;
3. технический персонал эксплуатантов БАС;
4. студенты технических вузов и колледжей, обучающихся по специальностям авиационного и робототехнического профиля.

Основной целью данного учебного пособия является подготовка квалифицированных техников-наладчиков мультироторных беспилотных авиационных систем, способных профессионально выполнять диагностику, техническое обслуживание, ремонт и настройку беспилотных систем для обеспечения их безопасной и эффективной эксплуатации.

Для достижения поставленной цели в пособии решаются следующие задачи:

1. формирование технической грамотности - изучение конструкции мультироторных БАС, принципов работы основных систем и компонентов, понимание взаимосвязи между элементами беспилотной системы;
2. освоение методов диагностики - изучение современных методов и средств диагностики технического состояния БАС, освоение процедур выявления неисправностей, анализа полетных данных и телеметрии;
3. изучение технологий обслуживания - понимание регламентов технического обслуживания, освоение процедур предполетной подготовки, периодических проверок и специальных видов обслуживания;
4. развитие навыков ремонта - освоение технологий текущего и контрольно-восстановительного ремонта, изучение методов замены и восстановления компонентов, работы с инструментами и оборудованием;
5. формирование компетенций в области электроники - изучение бортовых электронных систем, освоение методов диагностики и ремонта электронных компонентов, работы с программным обеспечением;
6. освоение процедур калибровки и настройки - изучение методов калибровки датчиков, настройки систем управления, обновления программного обеспечения, оптимизации параметров полета;
7. развитие навыков работы с документацией - освоение правил ведения технической документации, систем учета наработки и ресурса, процедур сертификации и допуска к эксплуатации;
8. формирование культуры безопасности - изучение требований охраны труда при работе с БАС, мер безопасности при обслуживании аккумуляторных батарей, процедур действий в аварийных ситуациях.

Структура пособия построена по принципу последовательного углубления знаний - от изучения общей конструкции БАС к специализированным методам диагностики и ремонта, от базовых процедур обслуживания к сложным технологиям восстановления и модернизации систем. Каждая тема сопровождается подробными иллюстрациями, таблицами технических характеристик, алгоритмами выполнения операций и практическими заданиями.

Особое внимание в пособии уделяется безопасности при выполнении технических работ, правильному использованию инструментов и оборудования, соблюдению технологических регламентов, что критически важно для формирования профессиональной ответственности и культуры технической эксплуатации.

ТЕМА 1: УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Лекция 1.1: Общие сведения о мультироторных беспилотных авиационных системах

1.1.1. Определение и классификация БАС

Определение: Беспилотная авиационная система (БАС) — это комплекс, состоящий из беспилотного воздушного судна (БВС), наземной станции управления (НСУ) и линии связи между ними, а также дополнительного оборудования, необходимого для эксплуатации данного комплекса.

Мультироторные БАС — разновидность беспилотных летательных аппаратов, имеющих несколько (от трех и более) несущих винтов, расположенных в горизонтальной плоскости и обеспечивающих создание подъемной силы за счет вращения.

БАС классифицируются по различным параметрам, среди которых ключевым является взлетная масса. От взлетной массы зависят требования к регистрации, правила эксплуатации и технические характеристики аппарата. Ниже представлена классификация по этому критерию:

Классификация БАС по взлетной массе:

- Микро БАС (до 250 г);
- Малые БАС (от 250 г до 30 кг);
- Легкие БАС (от 30 до 150 кг);
- Средние БАС (от 150 до 750 кг);
- Тяжелые БАС (более 750 кг).

Количество и расположение двигателей определяет тип мультироторной БАС. Каждая конфигурация имеет свои преимущества и недостатки, которые следует учитывать при выборе аппарата для конкретных задач:

Классификация мультироторных БАС по количеству двигателей:

- Трикоптеры (3 двигателя);
- Квадрокоптеры (4 двигателя);
- Гексакоптеры (6 двигателей);
- Октокоптеры (8 двигателей);
- Y-образные гексакоптеры (6 двигателей, Y-образная конфигурация);
- X-образные октокоптеры (8 двигателей, X-образная конфигурация).

В таблице 1 представлено сравнение различных типов мультироторных БАС, которое позволит понять их основные характеристики и области применения.

Таблица 1

Сравнение различных типов мультироторных БАС

Тип БАС	Количество двигателей	Преимущества	Недостатки
Трикоптер	3	Экономичность, маневренность	Меньшая стабильность, низкая грузоподъемность
Квадрокоптер	4	Оптимальное соотношение стабильности и маневренности	Средняя грузоподъемность
Гексакоптер	6	Высокая стабильность и надежность, возможность полета при отказе одного двигателя	Большее энергопотребление
Октокоптер	8	Максимальная грузоподъемность и стабильность, возможность полета при отказе двух двигателей	Высокое энергопотребление, большие размеры

1.1.2. Основные элементы мультироторных БАС

Беспилотная авиационная система представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных элементов, каждый из которых выполняет свою функцию. Понимание структуры БАС необходимо для эффективной работы с системой и ее обслуживания. Ниже перечислены основные компоненты БАС:

1. Беспилотное воздушное судно (БВС) — летательный аппарат без пилота на борту
2. Наземная станция управления (НСУ) — устройство или комплекс устройств для дистанционного управления БВС
3. Канал связи — система передачи данных между БВС и НСУ
4. Полезная нагрузка — оборудование, устанавливаемое на БВС для выполнения целевых задач.

Для лучшего понимания взаимосвязи компонентов БАС ниже представлена структурная схема, отражающая основные блоки системы и их взаимодействие:

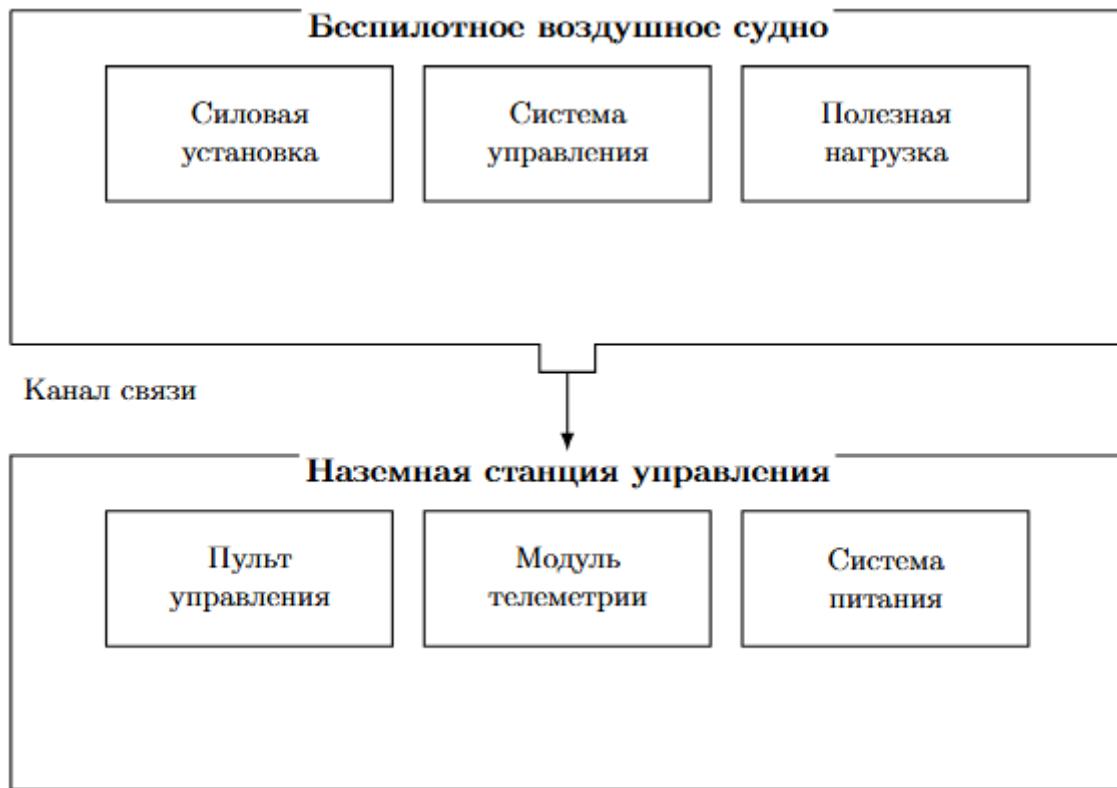


Рис. 1. Структурная схема БАС

Беспилотное воздушное судно мультироторного типа состоит из множества компонентов, которые в совокупности обеспечивают его функционирование. Для техника-наладчика особенно важно понимать назначение и взаимодействие всех этих элементов:

БВС мультироторного типа включает:

1. Рама (каркас) — основная несущая конструкция, на которой крепятся все остальные элементы
2. Силовая установка — совокупность двигателей, винтов и регуляторов оборотов
3. Полетный контроллер — электронное устройство, управляющее всеми системами БВС
4. Системы навигации — датчики и устройства для определения положения в пространстве

5. Система электропитания — аккумуляторные батареи и система распределения энергии

6. Система связи — приемники и передатчики для обмена данными с наземной станцией

7. Полезная нагрузка — целевое оборудование (камеры, сенсоры, грузовые модули).

1.1.3. Принципы полета мульти rotorных БАС

Понимание аэродинамических принципов полета мульти rotorных БАС необходимо для диагностики, настройки и оптимизации их работы. В отличие от традиционных вертолетов, мульти rotorные БАС обладают более простой механической конструкцией, но требуют сложной электронной системы управления.

Принцип создания подъемной силы:

Мульти rotorные БАС создают подъемную силу за счет вращения нескольких несущих винтов (пропеллеров). Винты установлены на вертикальных осях и вращаются в горизонтальной плоскости, создавая вертикальную тягу, которая обеспечивает подъем аппарата.

Управление движением:

Для управления полетом мульти rotorной БАС используется изменение скорости вращения отдельных двигателей, что приводит к созданию разности тяги и, как следствие, к повороту или наклону аппарата.

Рассмотрим основные принципы управления мульти rotorным БАС, которые реализуются через различные комбинации изменения скорости вращения двигателей:

Основные принципы управления:

1. Подъем/снижение — одновременное увеличение/уменьшение скорости всех двигателей

2. Крен (наклон вбок) — изменение скорости противоположных двигателей

3. Тангаж (наклон вперед/назад) — изменение скорости передних/задних двигателей

4. Рыскание (вращение вокруг вертикальной оси) — изменение скорости двигателей, вращающихся в противоположных направлениях.

Схема ниже наглядно демонстрирует изменение скорости вращения двигателей при различных маневрах квадрокоптера. Стрелки вверх (\uparrow) обозначают увеличение скорости, стрелки вниз (\downarrow) — уменьшение (рисунок 2).

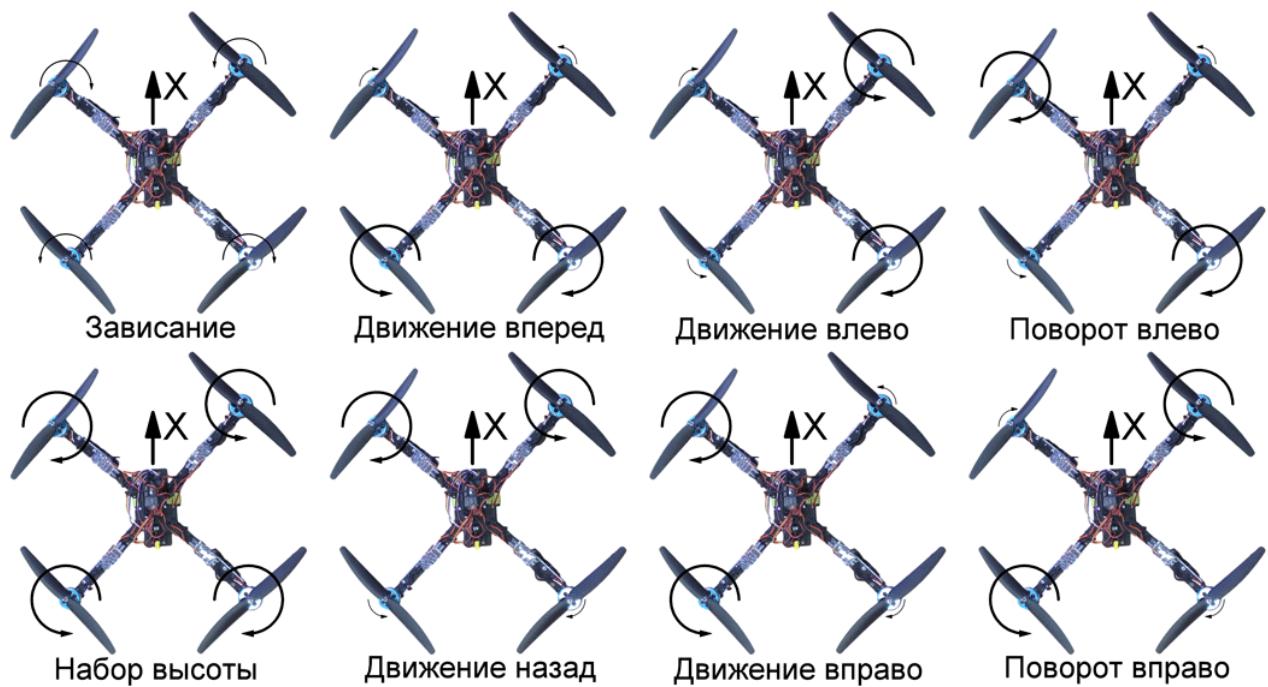


Рис. 2. Принципы управления квадрокоптером

Рекомендуемая литература:

1. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Пер. с англ. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. - 312 с.
2. Чернопятов, А.М. Беспилотные авиационные системы: учебник / А. М. Чернопятов. – Москва: Директ-Медиа, 2024. – 188 с.
3. Гребеников А.Г., Мялица А.К., Парфенюк В.В. и др. Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов / Под ред. А.Г. Гребеникова. - Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2008. - 377 с.

Лекция 1.2: Конструкция мультироторных БАС

1.2.1. Рама и механические компоненты

Рама — основной силовой элемент конструкции БАС, на котором крепятся все остальные компоненты. Рама должна обладать высокой прочностью при минимальном весе.

При выборе конструкции рамы учитываются такие факторы, как назначение БАС, требуемая грузоподъемность, маневренность и компактность. Ниже представлены основные типы рам, применяемые в современных мультироторных БАС:

Основные типы рам:

1. Х-образная — классическая форма для квадрокоптеров, обеспечивает равномерное распределение массы;
2. Н-образная — оптимальна для установки камер и другой полезной нагрузки;
3. Тип «истребитель» — компактная форма с вынесенными назад двигателями для улучшения аэродинамики;
4. Складная — конструкция, позволяющая уменьшить габариты при транспортировке;
5. Выбор материала для изготовления рамы напрямую влияет на вес, прочность, вибрационные характеристики и стоимость БАС. Каждый из материалов имеет свои преимущества и недостатки, которые следует учитывать при проектировании и ремонте.

Материалы для изготовления рам:

1. Углепластик (карбон) — высокопрочный, легкий материал, устойчивый к вибрациям;
2. Стеклопластик — более дешевый аналог углепластика, обладающий хорошими механическими свойствами;
3. Алюминиевые сплавы — обеспечивают хорошую прочность при умеренной массе;
4. Пластик — используется для легких БАС и защитных элементов;
5. Для более детального понимания преимуществ и недостатков различных материалов, используемых при изготовлении рам, рассмотрим сравнительную таблицу 2.

Таблица 2

Сравнение материалов для изготовления рам

Материал	Преимущества	Недостатки	Применение
Углепластик	Высокая прочность, малый вес, устойчивость к вибрациям	Высокая стоимость, сложность обработки	Профессиональные БАС
Стеклопластик	Хорошая прочность, умеренная цена	Больший вес по сравнению с углепластиком	Полупрофессиональные БАС
Алюминий	Доступность, простота обработки	Подверженность усталостному разрушению	Недорогие БАС
Пластик	Низкая цена, легкость	Низкая прочность, хрупкость	Любительские микро-БАС

Рама мультироторной БАС состоит из нескольких ключевых элементов, каждый из которых выполняет определенную функцию в обеспечении прочности, жесткости и функциональности конструкции:

Основные элементы конструкции рамы:

- Центральная пластина — основной элемент, на котором монтируется электроника;
- Лучи — силовые элементы, на которых крепятся моторы;
- Стойки — элементы, соединяющие верхнюю и нижнюю пластины;
- Демпферы — элементы для гашения вибраций;
- Защита пропеллеров — обеспечивает безопасность при столкновениях.
- На схеме ниже представлена типичная конструкция рамы квадрокоптера с обозначением основных элементов (рисунок 3).



Рис. 3. Основные элементы рамы квадрокоптера

1.2.2. Силовая установка

Силовая установка — совокупность компонентов, обеспечивающих создание тяги для полета БАС.

Эффективность и надежность работы силовой установки напрямую влияют на летные характеристики, время полета и полезную нагрузку БАС. Силовая установка состоит из следующих взаимосвязанных компонентов:

Компоненты силовой установки:

1. Бесколлекторные электродвигатели — преобразуют электрическую энергию в механическую;
2. Регуляторы оборотов (ESC — Electronic Speed Controller) — управляют скоростью вращения двигателей;
3. Пропеллеры — создают тягу за счет взаимодействия с воздухом;
4. Элементы крепления — обеспечивают монтаж двигателей на раме;
5. Бесколлекторные электродвигатели (BLDC — Brushless Direct Current) — основной тип двигателей, используемых в современных мульти rotorных БАС благодаря высокому КПД, надежности и хорошему соотношению мощности к весу.

Бесколлекторные двигатели можно классифицировать по разным параметрам, что позволяет выбрать оптимальный вариант для конкретной задачи и конструкции БАС:

Классификация BLDC двигателей:

По расположению ротора:

- Внутрироторные (inrunner) — ротор вращается внутри статора;
- Внешнероторные (outrunner) — ротор вращается вокруг статора (более распространены в БАС).

По величине KV (количество оборотов на вольт):

- Низкий KV (менее 1000) — для больших пропеллеров и тяжелых БАС;
- Средний KV (1000-2000) — для средних БАС;
- Высокий KV (более 2000) — для малых БАС и гоночных моделей.

Для правильного подбора двигателей важно понимать систему их маркировки, которая содержит информацию о размерах и характеристиках:

Маркировка BLDC двигателей, обозначение XXYY (например, 2212), где:

- XX — диаметр статора в мм;
- YY — высота статора в мм;
- KV-рейтинг — количество оборотов двигателя без нагрузки на 1 вольт питания.

Пропеллеры — аэродинамические элементы, преобразующие вращательное движение в тягу.

Выбор пропеллера существенно влияет на эффективность, энергопотребление и шумовые характеристики БАС. При подборе пропеллеров учитываются следующие параметры:

Характеристики пропеллеров:

- Диаметр — расстояние между концами лопастей (в дюймах);
- Шаг — теоретическое расстояние, которое пропеллер проходит за один оборот (в дюймах);
- Количество лопастей — чаще всего 2 или 3, реже 4 и более;
- Направление вращения — правое (CW) или левое (CCW).

Для обозначения размеров пропеллера используется стандартизированная запись:

Обозначение пропеллеров, формат DxP (например, 9x4.5), где:

D — диаметр в дюймах;

P — шаг в дюймах.

Правильный подбор комбинации пропеллера и двигателя критически важен для достижения оптимальных характеристик БАС. В таблице ниже представлены рекомендации по подбору этих компонентов в зависимости от размера рамы (таблица 3).

Таблица 3

Подбор пропеллеров к двигателям

Размер рамы	Размер пропеллера	KV двигателя	Примерная тяга одного мотора
150-180 мм	3-4»	3000-4500	100-200 г
210-250 мм	5-6»	2300-2700	300-500 г
350-450 мм	8-10»	900-1200	700-1200 г
500-650 мм	12-15»	400-700	1500-3000 г

Регуляторы оборотов (ESC) — электронные устройства, управляющие скоростью вращения бесколлекторных двигателей.

Выбор регуляторов оборотов должен соответствовать характеристикам двигателей и требованиям системы управления. При подборе ESC учитывают следующие ключевые параметры:

Основные характеристики ESC:

- Максимальный ток — определяет мощность поддерживаемых двигателей;
- Поддерживаемое напряжение — количество элементов аккумулятора;
- Частота обновления — скорость изменения управляющего сигнала (кГц);
- Наличие BEC (Battery Elimination Circuit) — встроенный преобразователь напряжения для питания электроники.

На схеме ниже показана типичная схема подключения компонентов силовой установки мультироторной БАС:

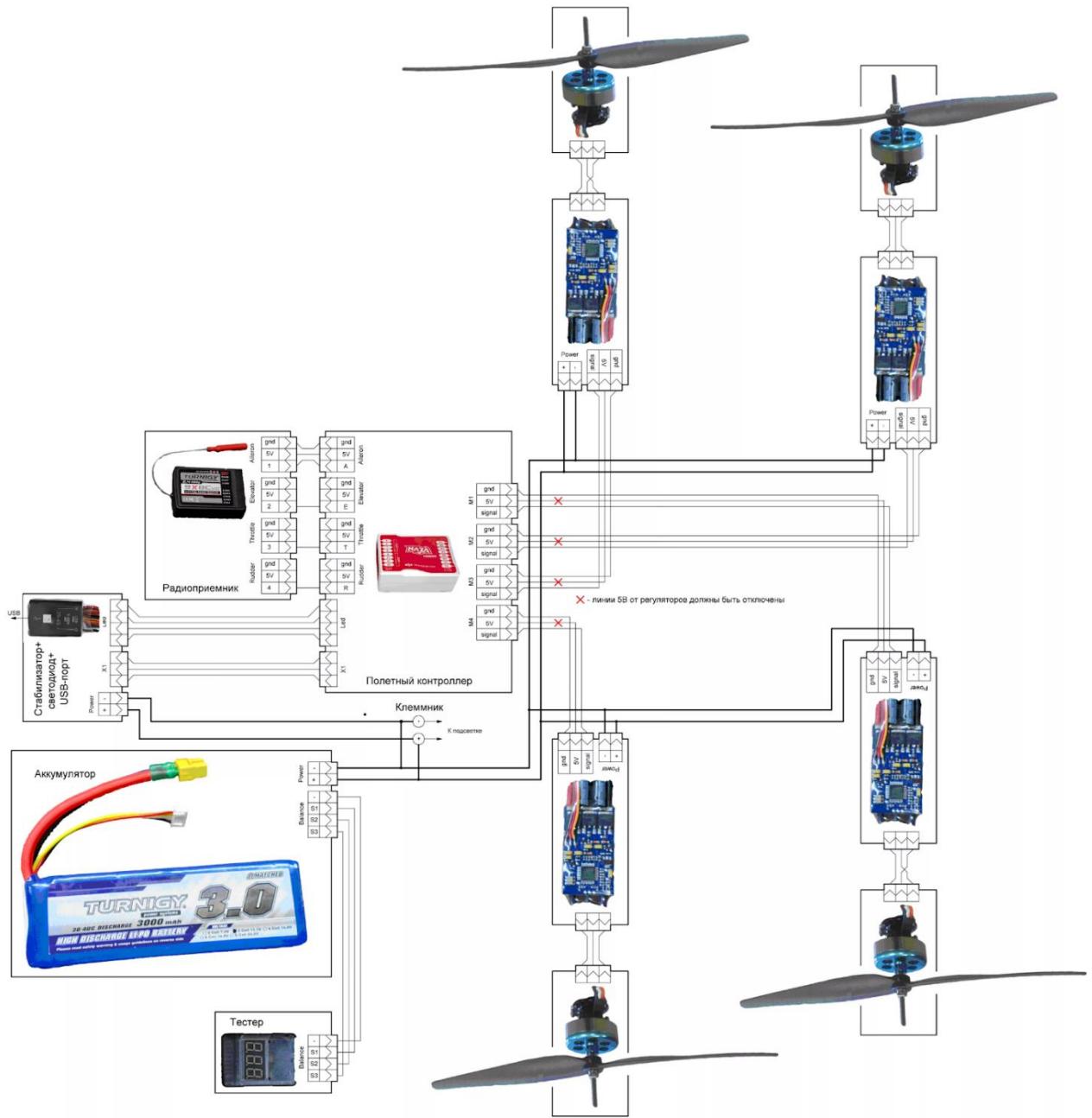


Рис. 4. Схема подключения компонентов силовой установки

1.2.3. Системы стабилизации и взлетно-посадочные устройства

Система стабилизации — комплекс устройств и алгоритмов, обеспечивающих устойчивость БАС в полете.

Стабилизация является одной из ключевых функций БАС, позволяющей удерживать заданное положение в пространстве и корректно выполнять маневры. Система стабилизации включает в себя как аппаратную часть (датчики), так и программную (алгоритмы обработки данных и управления). Основные компоненты этой системы перечислены ниже:

Основные компоненты системы стабилизации:

- Гироскопы — измеряют угловую скорость вращения вокруг осей;
- Акселерометры — измеряют ускорение по трем осям;
- Магнитометр (компас) — определяет ориентацию относительно магнитного поля Земли;
- Барометр — измеряет атмосферное давление для определения высоты
- Алгоритмы стабилизации — программное обеспечение, обрабатывающее данные с датчиков;
- Взлетно-посадочные устройства — элементы конструкции, обеспечивающие безопасный взлет и посадку БАС.

Правильно подобранные и настроенные взлетно-посадочные устройства защищают БАС от повреждений при контакте с поверхностью, обеспечивают устойчивость на площадке и могут адаптировать аппарат к различным типам поверхностей. В зависимости от назначения и конструкции БАС используются различные типы шасси:

Типы взлетно-посадочных устройств:

- Стационарные шасси — жестко закрепленные опоры;
- Убираемые шасси — могут складываться во время полета;
- Амортизационные шасси — снабжены демпферами для смягчения посадки;
- Поплавки — для посадки на водную поверхность.

Выбор материала для изготовления шасси зависит от требуемой прочности, веса и особенностей эксплуатации БАС.

Материалы для изготовления шасси:

- Углепластик;
- Стеклопластик;
- Алюминиевые сплавы;
- Полимерные материалы.

На рисунке ниже представлены различные типы взлетно-посадочных устройств, используемых в мультироторных БАС:



Рис. 5. Типы взлетно-посадочных устройств

Рекомендуемая литература:

1. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М., Адамовский В.В., Красноперов Р.А. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. – Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с.
2. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Пер. С англ. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 312 с.
3. Беспилотные летательные аппараты: основы устройства и функционирования / [П.П. Афанасьев и др.]; под ред. И.С. Голубева, И.К. Туркина – 2-е изд., перераб. И доп. – Москва: МАИ, 2008. – 654 с.

Лекция 1.3: Электронные системы мультироторных БАС

1.3.1. Полетный контроллер и его функции

Полетный контроллер — центральное электронное устройство БАС, выполняющее функции управления, стабилизации и навигации.

Определение: Полетный контроллер (Flight Controller, FC) — это специализированный компьютер, который обрабатывает данные с датчиков, выполняет алгоритмы управления и стабилизации, а также формирует управляющие сигналы для электродвигателей.

Полетный контроллер выполняет широкий спектр задач, от базовой стабилизации до сложной автономной навигации. Понимание этих функций необходимо для правильной настройки и диагностики БАС:

Основные функции полетного контроллера:

1. Стабилизация — поддержание заданного положения БАС в пространстве
2. Управление — преобразование команд оператора в сигналы для двигателей
3. Навигация — определение местоположения и построение маршрутов
4. Безопасность — контроль критических параметров и аварийные процедуры
5. Сбор и передача телеметрии — информации о состоянии БАС.

Современные полетные контроллеры представляют собой сложные электронные устройства, включающие множество компонентов. Их структура определяет функциональные возможности и надежность работы всей системы:

Структура современного полетного контроллера:

- Микропроцессор — основной вычислительный блок
- Инерциальный измерительный блок (IMU) — набор датчиков для определения положения и движения
- Барометрический высотомер — для измерения высоты
- Модули расширения — GPS/ГЛОНАСС, компас, дополнительные порты ввода-вывода
- Интерфейсы подключения — для приемника управления, ESC, телеметрии и т.д.

На рынке представлено множество типов полетных контроллеров, отличающихся по функциональности, открытости архитектуры и целевому назначению:

Наиболее популярные типы полетных контроллеров:

- Коммерческие закрытые системы: DJI A2/A3/N3, DJI Naza-M
- Открытые платформы: Pixhawk, ArduPilot, Betaflight, CleanFlight
- Специализированные решения: Cube, Holybro, T-Motor.

Для выбора оптимального полетного контроллера для конкретной задачи полезно ознакомиться с сравнительной таблицей, представленной ниже:

Таблица 4
Сравнение популярных полетных контроллеров

Название	Тип системы	Поддерживаемые прошивки	Особенности
Pixhawk	Открытая	ArduCopter, PX4	Высокая надежность, широкий функционал
Betaflight F4	Открытая	Betaflight, CleanFlight	Оптимизирован для гоночных дронов
DJI A3	Закрытая	DJI Proprietary	Простая настройка, высокая надежность
Matek F405	Открытая	iNAV, Betaflight	Компактность, встроенные датчики

Для лучшего понимания внутреннего устройства полетного контроллера рассмотрим его структурную схему (рисунок 6).

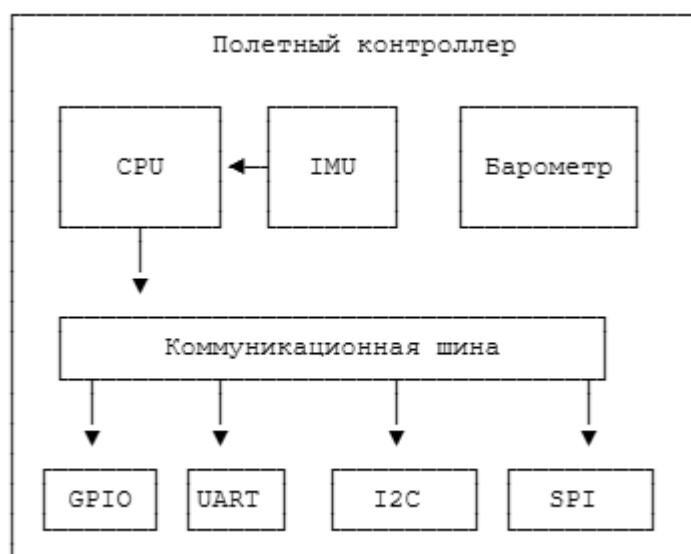


Рис. 6. Структурная схема полетного контроллера

1.3.2. Навигационные системы

Навигационная система — комплекс устройств и алгоритмов, обеспечивающих определение местоположения и ориентации БАС в пространстве.

Навигационные системы играют ключевую роль в обеспечении автономности и точности полета БАС. Они интегрируют данные от различных датчиков для создания полной картины о положении и движении аппарата. Современные БАС используют несколько типов навигационных систем:

Основные компоненты навигационных систем:

Спутниковые системы навигации:

- GPS (Global Positioning System) — американская система
- ГЛОНАСС — российская система
- Galileo — европейская система
- BeiDou — китайская система.

Инерциальные системы навигации:

- Гироскопы
- Акселерометры
- Магнитометры (компасы)

Барометрические системы:

Барометрические высотомеры для определения высоты

Оптические системы:

- Системы оптического позиционирования (Vision Positioning System, VPS)
 - Системы обнаружения препятствий
 - Для понимания работы спутниковой навигации, которая является основой большинства навигационных систем БАС, необходимо разобраться в принципах ее функционирования.

Принцип работы спутниковой навигации:

– Определение местоположения происходит на основе измерения времени прохождения сигналов от спутников до приемника. Для точного определения координат необходим прием сигналов минимум от 4 спутников.

– Различные системы спутниковой навигации обеспечивают разную точность определения координат в зависимости от используемой технологии.

Точность определения координат:

- Стандартный GPS-приемник: 3-5 метров
- GPS с RTK (Real Time Kinematic): до 2-3 см

- GPS с PPK (Post Processed Kinematic): до 1 см.

Инерциальная навигационная система (ИНС) — система, определяющая положение объекта на основе измерений ускорений и угловых скоростей. ИНС имеет как преимущества, так и ограничения, которые следует учитывать при проектировании навигационной системы БАС:

Особенности ИНС:

- Работает автономно, без внешних сигналов
- Подвержена накоплению ошибок с течением времени
- Требует периодической калибровки
- Для повышения точности и надежности навигации в современных БАС используется комплексный подход, объединяющий данные от различных систем.

Комплексированные навигационные системы объединяют данные от разных источников (спутниковая навигация, ИНС, барометр и т.д.) для повышения точности и надежности. Для объединения данных от разных навигационных систем применяются специальные алгоритмы, наиболее распространенные из которых перечислены ниже:

Алгоритмы комплексирования:

- Фильтр Калмана
- Комплементарный фильтр
- Расширенный фильтр Калмана (EKF).

Для выбора оптимальной навигационной системы для конкретной БАС полезно ознакомиться с сравнительной таблицей различных навигационных технологий (таблица 5).

Таблица 5
Сравнение навигационных систем

Тип системы	Преимущества	Недостатки	Точность
GPS/ГЛОНАСС	Абсолютное позиционирование, не накапливает ошибку	Зависимость от приема сигналов, задержка	3-5 м
RTK GPS	Высокая точность	Высокая стоимость, требуется базовая станция	2-3 см

Тип системы	Преимущества	Недостатки	Точность
ИНС	Высокая частота обновления, работа без внешних сигналов	Накопление ошибок со временем	Зависит от качества датчиков
VPS	Работа в помещениях, высокая точность	Зависимость от освещения и текстуры поверхности	0,1-0,3 м
Барометр	Простота, низкая стоимость	Зависимость от атмосферных условий	0,5-1 м по высоте

На схеме (рисунок 7) представлен принцип работы спутниковой навигационной системы, используемой в БАС.



Рис. 7. Принцип работы спутниковой навигационной системы

1.3.3. Системы связи и управления

Система связи — комплекс устройств, обеспечивающих передачу данных между БАС и наземной станцией управления.

Надежная и устойчивая связь — основа безопасной эксплуатации БАС. Система связи включает несколько каналов, каждый из которых выполняет свою функцию:

Основные типы каналов связи:

- Радиоканал управления — передача команд управления от оператора к БАС
- Канал телеметрии — передача данных о состоянии БАС на наземную станцию
- Видеоканал — передача изображения с камеры БАС.

Для обеспечения надежной связи необходимо выбрать оптимальный частотный диапазон, учитывая требования к дальности связи и устойчивости к помехам:

Радиоканал управления:

Частотные диапазоны:

- 2.4 ГГц — наиболее распространенный диапазон
- 900 МГц — обеспечивает большую дальность
- 433 МГц — используется для телеметрии
- 1 ГГц — часто используется для передачи видео.

В системах управления БАС используются различные протоколы для передачи команд от пульта управления к приемнику, каждый из которых имеет свои особенности:

Протоколы управления:

- PWM (Pulse Width Modulation) — классический протокол
- PPM (Pulse Position Modulation) — мультиплексированный PWM
- SBUS — цифровой протокол от Futaba
- DSM/DSM2/DSMX — цифровые протоколы от Spektrum
- CRSF — цифровой протокол от TBS с телеметрией.

Системы телеметрии передают информацию о состоянии БАС на наземную станцию:

- Уровень заряда аккумулятора
- Высота и скорость полета
- Координаты GPS
- Качество приема сигналов
- Данные с датчиков
- Состояние подсистем БАС.

Для передачи телеметрических данных используются специальные протоколы, обеспечивающие надежную передачу информации о состоянии БАС:

Протоколы телеметрии:

- MAVLink — открытый протокол, используемый в ArduPilot и PX4
- FrSky — проприetaryный протокол для аппаратуры FrSky
- LTM (Lightweight Telemetry) — упрощенный протокол для минимальных данных
 - Наземная станция управления (НСУ) — комплекс оборудования для управления БАС:
 - Аппаратура радиоуправления — для ручного управления БАС

– Компьютер или планшет — для программирования маршрута и мониторинга

– Средства отображения видео — мониторы, очки FPV, мобильные устройства

– Антенны и усилители — для увеличения дальности связи.

Для эффективного взаимодействия с БАС используются различные программные продукты, обеспечивающие планирование миссий, мониторинг и управление:

Программное обеспечение НСУ:

– Mission Planner

– QgroundControl

– DJI GO/DJI Pilot

– UgCS

– Tower (DroidPlanner).

При выборе системы радиоуправления для БАС необходимо учитывать дальность, надежность и дополнительные функции, предоставляемые различными производителями:

Таблица 6
Сравнение радиосистем управления

Система	Частота	Дальность	Особенности
FrSky Taranis	2.4 ГГц	1.5-3 км	Двусторонняя связь, телеметрия
Spektrum DX	2.4 ГГц	1-2 км	Высокая надежность
TBS Crossfire	868/915 МГц	10-40 км	Экстремальная дальность
DJI Remote	2.4/5.8 ГГц	3-10 км	Интеграция с экосистемой DJI

Для понимания общей структуры системы связи БАС рассмотрим схему, показывающую взаимодействие основных компонентов (рисунок 8).

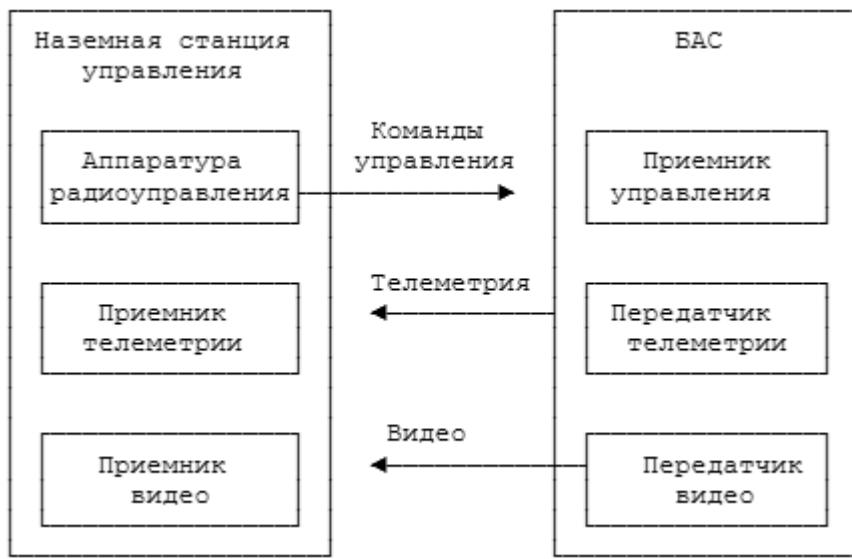


Рис. 8. Структурная схема системы связи

Рекомендуемая литература:

1. Чернопятов, А.М. Беспилотные авиационные системы: учебник / А.М. Чернопятов. – Москва: Директ-Медиа, 2024. – 188 с.
2. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Пер. С англ. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 312 с.
3. Программное обеспечение беспилотных авиационных систем: настройка и обновление / Е.И. Николаев. – М.: Компьютерная литература, 2024. – 220 с.

Практика по теме 1

Практическое занятие 1.1

Изучение конструкции мультироторной БАС

Цель занятия

Ознакомление с устройством и принципами работы мультироторной БАС, идентификация основных элементов и систем.

Оборудование и материалы

1. Мультироторная БАС различных типов (квадрокоптер, гексакоптер)

2. Набор инструментов.

– Шестигранные ключи (1.5 мм, 2.0 мм, 2.5 мм)

– Крестовые отвертки (PH0, PH1)

– Плоские отвертки

– Пинцеты

– Бокорезы.

1. Технические руководства и схемы БАС

2. Цифровой мультиметр

3. Лупа или USB-микроскоп для осмотра мелких компонентов

4. Антистатический коврик и браслет

5. Компьютер с установленным специализированным ПО для проверки компонентов.

Программное обеспечение

1. Mission Planner, QGroundControl или Betaflight Configurator (в зависимости от типа полетного контроллера)

2. Техническая документация в электронном виде

3. BLHeli Suite или BLHeli_32 Suite для проверки регуляторов.

Задание 1: Изучение общей конструкции БАС (1 час)

В рамках этого задания вам предстоит ознакомиться с общей конструкцией мультироторной БАС, выявить ключевые компоненты и понять их взаимодействие. Внимательное изучение конструкции позволит в дальнейшем правильно диагностировать и устранять неисправности.

1. Внешний осмотр БАС, определение типа (квадрокоптер, гексакоптер и т.д.)

2. Идентификация основных узлов: рама, двигатели, пропеллеры, полетный контроллер, аккумулятор

3. Изучение технической документации и схем

4. Составление структурной схемы БАС с указанием всех основных элементов.

Задание 2: Разборка и идентификация компонентов (1.5 часа)

Данное задание предполагает частичную разборку БАС для детального изучения внутренних компонентов. При разборке необходимо соблюдать осторожность, чтобы не повредить хрупкие элементы и соединения. Внимательно фиксируйте последовательность разборки для дальнейшей сборки.

Разборка БАС с соблюдением мер предосторожности.

- Отключение и извлечение аккумуляторной батареи
- Снятие пропеллеров
- Демонтаж защитных кожухов и крышек
- Доступ к основным электронным компонентам.

Идентификация и описание компонентов.

- Определение типа и характеристик двигателей
- Изучение маркировки регуляторов ESC
- Определение типа полетного контроллера
- Изучение системы распределения питания
- Идентификация приемника управления и систем телеметрии.

Задание 3: Изучение электрических соединений и схем (1 час)

В этом задании вы изучите электрические соединения БАС, составите схему и проверите целостность проводки. Понимание электрической схемы БАС необходимо для диагностики неисправностей и проведения ремонтных работ.

1. Составление схемы электрических соединений компонентов БАС
2. Проверка целостности проводки и соединений с помощью мультиметра
3. Изучение способов подключения периферийных устройств к полетному контроллеру
4. Анализ системы распределения питания и защиты от перегрузок.

Задание 4: Сборка БАС и оформление отчета (0.5 часа)

После изучения конструкции и электрических соединений необходимо восстановить исходное состояние БАС, правильно собрав все компоненты. Затем следует оформить отчет, обобщающий полученные знания о конструкции и принципах работы БАС.

1. Аккуратная сборка БАС в обратном порядке
2. Проверка правильности и надежности соединений

3. Оформление отчета, включающего.
 - Схему конструкции БАС с указанием всех основных компонентов
 - Таблицу с перечнем и характеристиками компонентов
 - Схему электрических соединений
 - Выводы о назначении и функциях каждого компонента.

Контрольные вопросы:

1. Какие основные компоненты входят в состав мульти rotorной БАС?
2. В чем отличие конструкции квадрокоптера от гексакоптера?
3. Какие функции выполняет полетный контроллер?
4. Как определить направление вращения двигателей и пропеллеров?
5. Какие датчики установлены на полетном контроллере и для чего они используются?
6. Каким образом осуществляется распределение питания в БАС?
7. Какие меры безопасности необходимо соблюдать при работе с компонентами БАС?

Критерии оценки

- Правильность идентификации компонентов БАС
- Качество составления схем и таблиц
- Понимание функций и взаимодействия компонентов
- Соблюдение мер безопасности при разборке и сборке
- Полнота и грамотность оформления отчета.

Практическое занятие 1.2

Изучение принципов работы силовой установки БАС (3 часа)

Цель занятия

Изучение конструкции, характеристик и принципов работы силовой установки мульти rotorной БАС.

Оборудование и материалы

1. Мульти rotorная БАС или отдельные компоненты.
 - Бесколлекторные электродвигатели разных размеров
 - Регуляторы скорости (ESC)
 - Пропеллеры различных размеров и типов.
2. Измерительное оборудование.

- Стенд для тестирования тяги двигателей
- Тахометр для измерения оборотов
- Мультиметр
- Токовые клещи
- Ваттметр.

3. Источники питания.

- Лабораторный блок питания
- Аккумуляторные батареи LiPo.

4. Инструменты.

- Набор отверток и ключей
- Паяльная станция
- Термоклей или термоусадка.

5. Средства индивидуальной защиты.

- Защитные очки
- Перчатки
- Защитная сетка для тестирования двигателей.

Программное обеспечение

1. BLHeli Suite или BLHeli_32 Suite для настройки ESC
2. Программа для расчета характеристик силовой установки (eCalc или аналог)
3. Таблицы соответствия двигателей и пропеллеров.

Задание 1: Измерение и анализ характеристик двигателей

В этом задании вы проведете испытания бесколлекторных двигателей для определения их ключевых характеристик. Измерение параметров работы двигателей позволит понять принципы их функционирования и научиться выбирать оптимальные режимы работы.

1. Монтаж двигателя на испытательный стенд
2. Подключение ESC к двигателю и источнику питания
3. Измерение следующих параметров при различных режимах работы.
 - Скорость вращения (об/мин)
 - Потребляемый ток (А)
 - Потребляемая мощность (Вт)
 - Создаваемая тяга (г).
4. Построение графиков зависимости тяги от оборотов

5. Анализ эффективности двигателя (отношение тяги к потребляемой мощности).

Задание 2: Исследование влияния типа пропеллеров на характеристики силовой установки

В данном задании вы исследуете, как различные типы пропеллеров влияют на характеристики силовой установки. Это важно для понимания принципов подбора оптимальных комбинаций двигатель-пропеллер для конкретных задач БАС.

1. Подготовка нескольких типов пропеллеров одинакового диаметра, но с разным шагом
2. Поочередная установка пропеллеров на двигатель
3. Измерение для каждого пропеллера.
 - Тяги при фиксированной мощности
 - Потребляемого тока при фиксированной тяге
 - Максимальной тяги.
4. Сравнительный анализ эффективности разных пропеллеров
5. Определение оптимальных сочетаний двигатель-пропеллер для разных задач.

Задание 3: Программирование и настройка регуляторов ESC (1 час)

Регуляторы оборотов (ESC) играют важную роль в работе силовой установки БАС. В этом задании вы научитесь программировать и настраивать ESC для оптимальной работы с конкретными двигателями и под определенные задачи.

1. Подключение ESC к компьютеру через USB-линк или плату программирования
2. Чтение и анализ текущих настроек ESC
3. Программирование параметров ESC.
 - Направление вращения двигателя
 - Режим торможения
 - Частота ШИМ
 - Тайминг
 - Режим запуска (мягкий/жесткий).
4. Проверка работоспособности ESC после программирования
5. Анализ влияния различных настроек на характеристики двигателя.

Контрольные вопросы:

1. Как маркируются бесколлекторные двигатели и что означают цифры в их обозначении?
2. Что такое KV-рейтинг двигателя и как он влияет на характеристики мультироторной БАС?
3. Какие параметры пропеллера влияют на создаваемую им тягу?
4. В чем отличие между пропеллерами для разных направлений вращения?
5. Как влияет настройка тайминга ESC на работу двигателя?
6. Каким образом рассчитывается требуемый ток ESC для конкретного двигателя?
7. Какие параметры необходимо учитывать при подборе комбинации двигатель-пропеллер?
8. Каковы признаки неисправности двигателя и ESC?

Критерии оценки

- Точность проведенных измерений
- Правильность обработки и анализа полученных данных
- Качество настройки регуляторов ESC
- Понимание взаимосвязи параметров силовой установки
- Соблюдение правил безопасности при тестировании.

Практическое занятие 1.3

- Изучение полетного контроллера и системы управления (3 часа)

Цель занятия

Изучение устройства, функций и принципов работы полетного контроллера и системы управления мультироторной БАС.

Оборудование и материалы

1. Полетные контроллеры разных типов (Pixhawk, Naza, F3/F4/F7 и др.)
2. Мультироторная БАС в собранном виде
3. Аппаратура радиоуправления с приемником
4. Компьютер с USB-интерфейсом
5. Соединительные кабели (USB, серво-кабели)
6. Инструменты.
 - Набор отверток
 - Пинцеты

- Мультиметр.
 - 7. Модули расширения для полетного контроллера (GPS, компас, телеметрия).
- Программное обеспечение
- 8. Mission Planner, QGroundControl, Betaflight Configurator (в зависимости от типа контроллера)
 - 9. Драйверы для USB-соединения
 - 10. Техническая документация по полетным контроллерам
 - 11. Программы для просмотра логов полета.

Задание 1: Изучение архитектуры и компонентов полетного контроллера
Полетный контроллер является «мозгом» беспилотной авиационной системы. В этом задании вы изучите его внутреннее устройство, идентифицируете основные компоненты и разберетесь в их функциях. Это знание необходимо для правильной диагностики и обслуживания БАС.

- 1. Внешний осмотр полетного контроллера.
 - Идентификация микропроцессора
 - Определение датчиков IMU (гироскоп, акселерометр)
 - Изучение интерфейсов подключения (UART, I2C, SPI)
 - Анализ системы питания контроллера.
- 2. Составление схемы расположения компонентов и разъемов на плате
- 3. Изучение принципиальной схемы полетного контроллера (при наличии в документации)
- 4. Сравнение технических характеристик различных типов полетных контроллеров.

Задание 2: Подключение и конфигурирование полетного контроллера
В этом задании вы научитесь подключать полетный контроллер к компьютеру и настраивать его базовые параметры. Правильная настройка контроллера — залог стабильной работы БАС и безопасных полетов.

- 1. Подключение полетного контроллера к компьютеру
- 2. Установка и настройка программного обеспечения для работы с контроллером
- 3. Изучение интерфейса программы и основных настроек.
 - Базовые параметры (тип БАС, размещение на раме)
 - Настройки каналов управления

- Параметры безопасности (Failsafe)
- PID-параметры стабилизации.

4. Подключение периферийных устройств к полетному контроллеру.

- Приемник управления
- GPS-модуль
- Телеметрический модуль.

Задание 3: Анализ и настройка системы управления

Система управления обеспечивает связь между оператором и БАС, а также реализует различные режимы полета. В этом задании вы изучите принципы настройки и работы системы управления, что позволит в дальнейшем эффективно эксплуатировать и обслуживать БАС.

1. Подключение аппаратуры радиоуправления.

- Настройка каналов управления
- Калибровка стиков управления
- Настройка переключателей режимов.

2. Настройка режимов полета.

- Режим стабилизации (Stabilize)
- Режим удержания высоты (Altitude Hold)
- Режим удержания позиции (Position Hold)
- Режим автоматического возврата (Return to Home).

3. Анализ работы системы управления.

- Проверка отклика на команды управления
- Проверка работы режимов стабилизации
- Анализ логов для оценки качества работы.

Контрольные вопросы:

1. Какие основные компоненты входят в состав полетного контроллера?

2. Какие датчики необходимы для стабилизации мультироторной БАС?

3. Что такое PID-регулирование и как оно используется в полетных контроллерах?

4. Какие режимы полета существуют в современных полетных контроллерах?

5. Что такое Failsafe и какие действия может выполнять БАС в этом режиме?

6. Как осуществляется калибровка датчиков полетного контроллера?

7. Какие интерфейсы используются для подключения периферийных устройств?

8. Как настраивается карта каналов для аппаратуры радиоуправления?

ТЕМА 2: ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС

Лекция 2.1: Методы диагностики технического состояния БАС

2.1.1. Общие принципы диагностики БАС

Определение: Диагностика технического состояния БАС — это комплекс мероприятий, направленных на определение работоспособности БАС, выявление неисправностей и их причин, а также оценку остаточного ресурса систем и компонентов.

Для эффективного обслуживания и ремонта БАС необходимо четко понимать цели проведения диагностических мероприятий. Это позволяет выбрать оптимальные методы и инструменты, а также определить последовательность действий:

Цели диагностики:

1. Определение текущего технического состояния БАС
2. Выявление имеющихся или потенциальных неисправностей
3. Определение причин возникновения неисправностей
4. Прогнозирование остаточного ресурса компонентов
5. Оценка возможности и целесообразности ремонта.

Диагностика БАС может проводиться в различных условиях и с разной глубиной проверки, в зависимости от требований эксплуатации и выявленных проблем. Для систематизации подходов к диагностике выделяют следующие типы:

Типы диагностики:

1. По времени проведения:
 - Предполетная диагностика
 - Послеполетная диагностика
 - Периодическая диагностика
 - Внеплановая диагностика (после происшествий).
2. По объему проверок:
 - Экспресс-диагностика (основные системы)
 - Полная диагностика (все системы и компоненты)
 - Целевая диагностика (конкретная система).
3. По способу проведения:
 - Визуальная диагностика
 - Инструментальная диагностика
 - Программная диагностика

– Лабораторная диагностика.

Комплексная диагностика БАС включает несколько последовательных этапов, которые позволяют системно выявлять и анализировать возможные неисправности:

Этапы диагностики:

1. Подготовка к диагностике (сбор информации, подготовка инструментов)
2. Внешний осмотр БАС
3. Проверка состояния механических компонентов
4. Диагностика электрических и электронных систем
5. Функциональные проверки
6. Анализ полетных данных и логов
7. Формирование заключения о техническом состоянии.

Различные виды диагностики проводятся с разной периодичностью, в зависимости от интенсивности эксплуатации БАС и требований безопасности. В таблице ниже представлены рекомендуемые интервалы для различных видов диагностики:

Таблица 7

Периодичность проведения различных видов диагностики

Вид диагностики	Периодичность	Основное содержание
Предполетная	Перед каждым полетом	Проверка основных систем, аккумуляторов, внешний осмотр
Послеполетная	После каждого полета	Проверка на повреждения, анализ телеметрии, осмотр
Регламентная	10-20 часов налета	Полная проверка всех систем, калибровка датчиков
После аварии	По факту	Детальная диагностика всех компонентов
Сезонная	При длительном хранении	Проверка перед началом/окончанием сезона эксплуатации

2.1.2. Методы и инструменты диагностики

Для эффективной диагностики БАС используются различные методы, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Комбинирование

этих методов позволяет получить наиболее полную информацию о техническом состоянии аппарата.

Визуальные методы диагностики:

- Осмотр внешнего состояния компонентов
- Проверка целостности рамы и крепежных элементов
- Оценка состояния пропеллеров
- Проверка качества соединений и состояния проводки
- Поиск внешних признаков повреждений (трещины, деформации, перегрев).

Инструментальные методы позволяют получить объективные измерения различных параметров БАС, что необходимо для точной диагностики. Эти методы делятся на несколько групп в зависимости от типа измеряемых параметров:

Инструментальные методы диагностики:

1. Электрические измерения.
 - Измерение напряжения и тока
 - Проверка сопротивления и проводимости
 - Проверка емкости аккумуляторов
 - Диагностика ESC и двигателей.
2. Механические измерения.
 - Измерение вибраций
 - Проверка балансировки пропеллеров
 - Контроль люфтов и зазоров.
3. Измерение параметров сигналов.
 - Проверка качества радиосигнала
 - Измерение уровней напряжений на линиях передачи данных
 - Проверка целостности сигнальных линий.

Современные БАС оснащены сложными электронными системами, диагностика которых требует применения специализированного программного обеспечения:

Программные методы диагностики:

- Анализ полетных логов
- Проверка параметров через интерфейс полетного контроллера
- Диагностика с помощью специализированного ПО
- Проверка работы датчиков и систем навигации

– Тестирование регуляторов и двигателей через программные интерфейсы.

Для проведения диагностики используются различные инструменты и приборы, которые можно разделить на несколько категорий:

Основные диагностические инструменты:

1. Электроизмерительные приборы.

– Мультиметр

– Токовые клещи

– Ваттметр (измеритель мощности)

– Осциллограф.

2. Специализированные устройства.

– Тестеры аккумуляторных батарей

– Тестеры ESC и двигателей

– Анализаторы радиочастотных сигналов

– Виброметры.

3. Программно-аппаратные средства.

– Программаторы для прошивки и диагностики

– Интерфейсные адAPTERЫ для подключения к ПК

– USB-анализаторы протоколов.

Для систематического подхода к диагностике БАС рекомендуется придерживаться определенной последовательности действий, которая показана на схеме (рисунок 9).

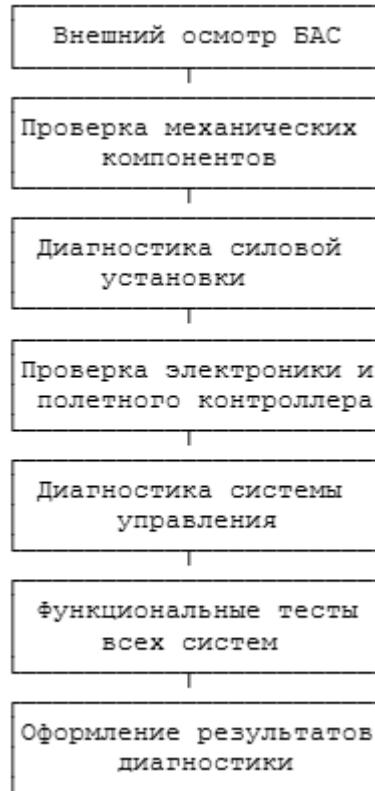


Рис. 9. Общая последовательность диагностики БАС

2.1.3. Автоматизированные системы диагностики

Автоматизированная система диагностики — комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивающих автоматический контроль технического состояния БАС.

Применение автоматизированных систем диагностики позволяет значительно повысить эффективность и качество обслуживания БАС. Эти системы обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами диагностики:

Преимущества автоматизированных систем:

- Сокращение времени диагностики
- Повышение точности и объективности
- Исключение человеческого фактора
- Возможность удаленной диагностики
- Ведение базы данных состояния БАС.

В современной практике применяются различные типы автоматизированных систем диагностики, которые можно разделить на две основные категории:

Основные типы автоматизированных систем:

1. Встроенные системы самодиагностики.
 - Системы контроля целостности (BIT — Built-In Test)
 - Непрерывный мониторинг критических параметров
 - Автоматическая диагностика при включении.
2. Внешние программно-аппаратные комплексы.
 - Стационарные тестовые стенды
 - Мобильные диагностические комплексы
 - Программные анализаторы логов полета.

Процесс автоматизированной диагностики обычно включает несколько последовательных этапов, которые обеспечивают комплексную проверку БАС:

Этапы автоматизированной диагностики:

1. Подключение БАС к диагностическому комплексу
2. Первичное сканирование и определение конфигурации
3. Выполнение стандартных тестовых процедур
4. Анализ полученных данных
5. Формирование отчета о техническом состоянии
6. Рекомендации по устранению неисправностей.

Современные диагностические системы обладают широкими возможностями по проверке всех аспектов функционирования БАС:

Возможности современных диагностических систем:

- Проверка всех электронных компонентов
- Тестирование двигателей и регуляторов
- Калибровка датчиков
- Диагностика радиоканала
- Анализ вибраций и шумов
- Проверка аккумуляторных батарей
- Анализ логов полета.

Для выбора оптимального метода диагностики в конкретной ситуации полезно ознакомиться с сравнительной таблицей различных подходов

Таблица 8

Сравнение методов диагностики

Метод диагностики	Преимущества	Недостатки	Область применения
Визуальный	Простота, не требует специального оборудования	Ограниченные возможности, субъективность	Предполетная проверка, обнаружение внешних повреждений
Инструментальный	Объективность, высокая точность	Требует специализированного оборудования и навыков	Детальная диагностика компонентов, поиск скрытых неисправностей
Программный	Возможность диагностики электронных систем	Ограничен программными интерфейсами	Диагностика ПО, полетного контроллера, анализ логов
Автоматизированный	Комплексная диагностика, высокая скорость	Высокая стоимость оборудования	Профессиональное обслуживание, сервисные центры

Рекомендуемая литература:

- Чернопятов, А.М. Беспилотные авиационные системы: учебник / А.М. Чернопятов. – Москва: Директ-Медиа, 2024. – 188 с.
- Гостев А.В. Технологические процессы технического обслуживания беспилотных ВС: учебно-методическое пособие / А.В. Гостев, Д.В. Богомолов, А.С. Чичерин. – М.: ИД Академии Жуковского, 2023. – 16 с.
- Беспилотные летательные аппараты: основы устройства и функционирования / [П.П. Афанасьев и др.]; под ред. И.С. Голубева, И.К. Туркина - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: МАИ, 2008. - 654 с.

Лекция 2.2: Классификация и признаки неисправностей БАС

2.2.1. Классификация неисправностей

Определение: Неисправность — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической или проектной документации.

Неисправности беспилотных авиационных систем могут возникать по различным причинам, что определяет необходимость их систематической классификации для эффективной диагностики и устранения:

Классификация неисправностей по характеру возникновения:

1. Конструктивные — обусловлены ошибками проектирования или производства
2. Эксплуатационные — возникают в результате неправильной эксплуатации
3. Деградационные — связаны с естественным износом и старением компонентов.

Влияние неисправностей на функционирование БАС различается по степени критичности, что требует дифференцированного подхода к их устраниению:

Классификация неисправностей по степени влияния на функционирование:

1. Критические — приводят к полной потере работоспособности БАС
2. Существенные — значительно ограничивают функциональность БАС
3. Несущественные — не оказывают заметного влияния на основные функции.

Локализация неисправностей по системам БАС позволяет структурировать процесс диагностики и ремонта:

Классификация неисправностей по локализации:

1. Механические системы.
 - Неисправности рамы и корпусных элементов
 - Неисправности двигателей
 - Неисправности пропеллеров
 - Неисправности подвесов и креплений.
2. Электрические и электронные системы.
 - Неисправности системы электропитания

- Неисправности полетного контроллера
- Неисправности регуляторов ESC
- Неисправности системы связи
- Неисправности датчиков и навигационных систем.

3. Программные неисправности.

- Ошибки в прошивке полетного контроллера
- Ошибки в настройках параметров
- Ошибки в конфигурации.

По возможности обнаружения неисправности подразделяются на категории, определяющие методы их выявления:

Классификация неисправностей по возможности обнаружения:

1. Явные — могут быть обнаружены при обычном осмотре или эксплуатации
2. Скрытые — проявляются только при определенных условиях или требуют специальной диагностики.

Таблица 9

Классификация неисправностей по системам БАС

Система	Типичные неисправности	Критичность	Методы диагностики
Рама	Трещины, деформации, ослабление креплений	Высокая	Визуальный осмотр, проверка жесткости
Двигатели	Обрыв обмоток, износ подшипников, разбалансировка	Высокая	Измерение сопротивления, тест на вибрацию, шумовая диагностика
ESC	Выход из строя силовых транзисторов, повреждение контроллера	Высокая	Проверка выходного напряжения, программная диагностика
Полетный контроллер	Отказ процессора, повреждение датчиков, сбои в ПО	Критическая	Программная диагностика, проверка выходных сигналов
Система питания	Повреждение аккумулятора,	Критическая	Измерение напряжения, тестирование под нагрузкой

Система	Типичные неисправности	Критичность	Методы диагностики
	неисправность ВЕС, короткое замыкание		
Система связи	Повреждение антенны, отказ приемника/передатчика	Высокая	Проверка уровня сигнала, тест дальности
Пропеллеры	Трешины, деформация, разбалансировка	Средняя	Визуальный осмотр, тест балансировки

Окончание табл. 9

2.2.2. Признаки и симптомы неисправностей

Раннее выявление неисправностей БАС основывается на знании характерных признаков, проявляющихся при различных типах повреждений:

Общие признаки неисправностей:

1. Визуальные признаки.
 - Механические повреждения (трещины, деформации)
 - Следы перегрева (обесцвечивание, оплавление)
 - Коррозия или окисление контактов
 - Вздутие аккумуляторов
 - Нетипичные люфты или зазоры.
2. Акустические признаки.
 - Посторонние шумы при работе двигателей
 - Нетипичные вибрации
 - Щелчки или треск в электронных компонентах.
3. Функциональные признаки.
 - Нестабильное поведение в полете
 - Отклонение от заданного курса или высоты
 - Неадекватная реакция на команды управления
 - Снижение времени полета
 - Потеря телеметрии или видеосигнала.

Специфические признаки неисправностей различаются в зависимости от поражённой системы БАС:

Признаки неисправностей по системам:

1. Неисправности двигателей и ESC:
 - Неравномерное вращение двигателя
 - Повышенная температура двигателя или ESC
 - Отсутствие вращения при подаче команды

- Самопроизвольное изменение оборотов
 - Посторонние звуки при вращении (гул, свист, щелчки).
2. Неисправности полетного контроллера:
- Самопроизвольный перезапуск
 - Ошибки инициализации датчиков
 - Некорректные показания датчиков
 - Отсутствие реакции на команды
 - Нестабильная работа (зависания, сбои).
3. Неисправности системы питания:
- Быстрый разряд аккумулятора
 - Неравномерное напряжение на ячейках
 - Нестабильное напряжение под нагрузкой
 - Повышенный нагрев аккумулятора
 - Вздутие или деформация корпуса аккумулятора.
4. Неисправности системы связи:
- Снижение дальности управления
 - Периодическая потеря связи
 - Задержки в отработке команд
 - Потеря видеосигнала или телеметрии
 - Интерференция и помехи в сигнале.
5. Неисправности системы навигации:
- Невозможность захвата спутников
 - Дрейф позиции в режиме удержания
 - Некорректное определение высоты
 - Ошибки при следовании по маршруту
 - Неверное определение направления (компас).

Таблица 10
Типичные признаки неисправностей и их причины

Признак неисправности	Возможные причины	Рекомендации по диагностике
БАС не включается	Разряженный аккумулятор, неисправность силовой цепи, короткое замыкание	Проверить напряжение аккумулятора, проверить целостность проводки,

Признак неисправности	Возможные причины	Рекомендации по диагностике
		проверить плавкие предохранители
БАС включается, но двигатели не врашаются	Неисправность ESC, ошибка настройки полетного контроллера, обрыв сигнальных проводов	Проверить настройки, проверить подключение ESC, провести программную диагностику
Нестабильный полет, раскачивание	Неисправность датчиков, неправильная настройка PID, вибрации	Калибровка датчиков, настройка PID-параметров, проверка балансировки пропеллеров
Постоянный дрейф в одном направлении	Неправильная калибровка акселерометра, неисправность датчика, смещение центра тяжести	Калибровка акселерометра, проверка показаний в статическом положении
Внезапная потеря мощности в полете	Проблема с аккумулятором, перегрев ESC, програмчная ошибка	Проверка аккумулятора под нагрузкой, анализ логов полета

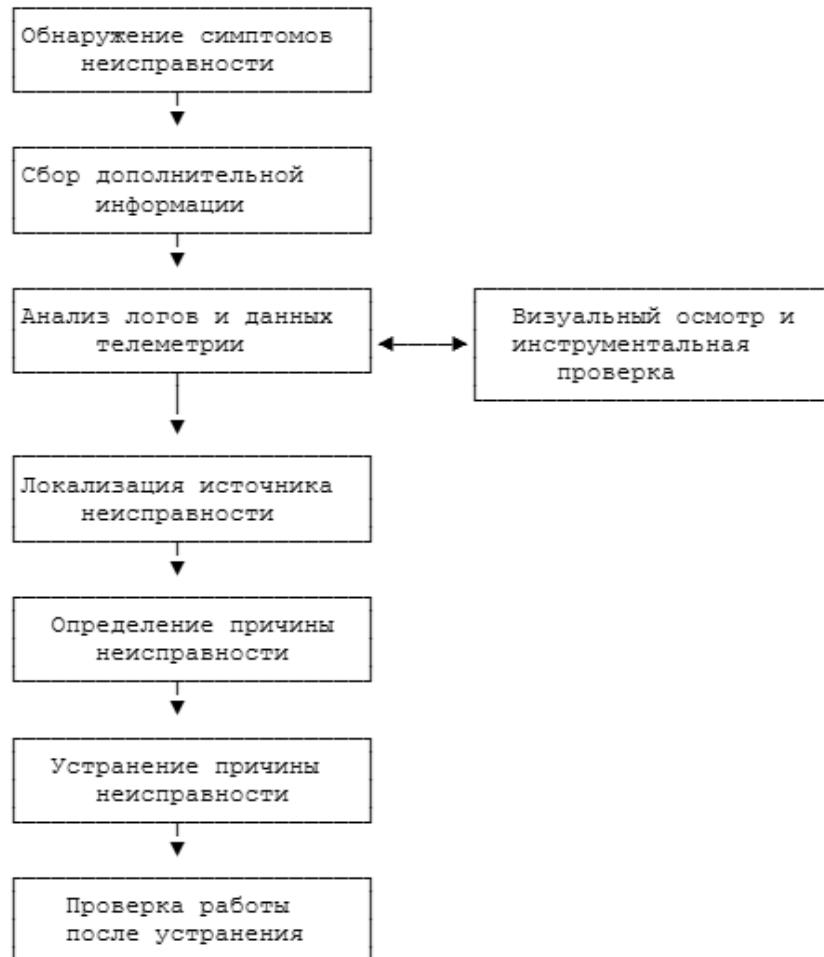


Рис. 10. Алгоритм выявления неисправностей

2.2.3. Методы анализа логов полета для диагностики неисправностей

Полетные логи — записи данных о работе всех систем БАС во время полета, которые могут быть использованы для диагностики и анализа неисправностей.

Информационное содержание полетных логов включает в себя широкий спектр параметров, необходимых для комплексного анализа работы БАС:

Основные типы информации в логах:

1. Данные с датчиков (гироскоп, акселерометр, барометр, GPS)
2. Параметры работы двигателей и ESC
3. Команды управления и реакция системы
4. Напряжение и ток потребления
5. Статусы и ошибки систем
6. Информация о режимах полета.

Для эффективного анализа полетных логов используются специализированные программные средства:

Инструменты для анализа логов:

- Mission Planner Log Viewer
- QGroundControl Log Analysis
- FlightPlot
- UAV Log Viewer
- Python-скрипты для анализа (MAVExplorer, pymavlink).

Методика анализа логов предусматривает систематический подход к выявлению аномалий и отклонений в работе БАС:

Последовательность анализа логов:

1. Загрузка лог-файла в программу анализа
2. Выбор параметров для отображения
3. Синхронизация по времени
4. Поиск аномалий и отклонений от нормы
5. Сопоставление с описанием проблемы
6. Определение корреляций между параметрами
7. Формирование выводов о причинах неисправности.

Характерные признаки неисправностей в полетных логах позволяют диагностировать проблемы, не всегда очевидные при внешнем осмотре:

Признаки неисправностей в логах:

- Вибрации — высокочастотные колебания показаний гироскопа или акселерометра
 - Проблемы с датчиками — резкие скачки или нереалистичные показания
 - Проблемы с двигателями — несоответствие между командой и фактическими оборотами
 - Проблемы с управлением — задержки или отсутствие реакции на команды
 - Проблемы с питанием — падение напряжения под нагрузкой, просадки при резких маневрах.

Таблица 11

Ключевые параметры логов для диагностики

Параметр	Нормальные значения	Признаки неисправности
Вибрации гироскопа	Менее 30-50 единиц	Пики более 100 единиц, регулярные колебания
Напряжение батареи	Плавное снижение в пределах допустимого диапазона	Резкие просадки, ступенчатое падение

Параметр	Нормальные значения	Признаки неисправности
Ток потребления	Стабильный при постоянном режиме полета	Внезапные скачки, нестабильность
Команды моторов	Согласованные изменения, соответствующие маневрам	Резкие скачки, насыщение (100%) на длительное время
GPS позиция	Плавные изменения, малая погрешность	Скачки позиции, увеличение погрешности
Барометрическая высота	Плавные изменения, соответствующие маневрам	Резкие скачки, несоответствие с GPS высотой

Окончание табл. 11

Рекомендуемая литература:

1. Гостев А.В. Технологические процессы технического обслуживания беспилотных ВС: учебно-методическое пособие / А.В. Гостев, Д.В. Богомолов, А.С. Чичерин. – М.: ИД Академии Жуковского, 2023. – 16 с.
2. Yasmina Bestaoui Sebbane. SMART AUTONOMOUS AIRCRAFT Flight Control and Planning for UAV. Université d'Evry, France.
3. Программное обеспечение беспилотных авиационных систем: настройка и обновление / Е.И. Николаев. – М.: Компьютерная литература, 2024. – 220 с.

Лекция 2.3: Инструменты и методы контроля технического состояния

2.3.1. Контрольно-измерительные приборы для диагностики БАС

Определение: Контрольно-измерительные приборы (КИП) — технические устройства, предназначенные для измерения физических величин и параметров, характеризующих техническое состояние БАС.

Контрольно-измерительные приборы для диагностики БАС классифицируются по типу измеряемых параметров и области применения:

Основные группы КИП для диагностики БАС:

1. Электроизмерительные приборы:

- Мультиметр (тестер) — универсальный прибор для измерения напряжения, силы тока, сопротивления и других электрических параметров
- Токовые клещи — прибор для измерения силы тока без разрыва цепи
- Измеритель мощности (ваттметр) — устройство для измерения потребляемой мощности
- Осциллограф — прибор для визуального наблюдения и измерения электрических сигналов
- Анализатор спектра — устройство для измерения спектрального состава сигнала.

2. Приборы для диагностики аккумуляторов:

- Тестер аккумуляторов — прибор для проверки напряжения, внутреннего сопротивления и емкости
- Балансир-тестер — устройство для проверки баланса отдельных ячеек аккумулятора
- Разрядное устройство — прибор для контролируемого разряда аккумуляторов и измерения емкости.

3. Приборы для диагностики механических систем:

- Виброметр — прибор для измерения вибраций
- Тахометр — устройство для измерения частоты вращения
- Стенд измерения тяги — комплекс для измерения тяги двигателей
- Балансировочный стенд — устройство для проверки и коррекции балансировки пропеллеров.

4. Приборы для диагностики радиосистем:

- Анализатор спектра — прибор для контроля радиочастотного спектра и поиска помех
- Измеритель уровня сигнала — устройство для оценки мощности и качества радиосигнала

– Тестер дальности связи — комплекс для определения максимальной дальности устойчивой связи.

5. Программно-аппаратные средства диагностики:

– Программаторы и отладчики — устройства для программирования и диагностики электронных компонентов

– Анализаторы логических сигналов — приборы для контроля цифровых сигналов

– USB-анализаторы протоколов — устройства для мониторинга обмена данными.

Таблица 12

Основные параметры и методы их измерения

Параметр	Прибор для измерения	Диапазон измерений	Точность
Напряжение аккумулятора	Мультиметр, тестер аккумуляторов	0-50В	±0.1В
Ток потребления	Токовые клещи, ваттметр	0-100А	±0.5А
Сопротивление обмоток двигателя	Мультиметр	0-100 Ом	±0.1 Ом
Обороты двигателя	Тахометр	0-30000 об/мин	±100 об/мин
Вибрации	Виброметр, акселерометр	0-100 Гц	±5%
Тяга двигателя	Тяговый стенд	0-10 кг	±50г
Уровень радиосигнала	Измеритель уровня сигнала	-120 до -20 дБм	±2 дБм
Емкость аккумулятора	Разрядное устройство	0-10000 мАч	±5%

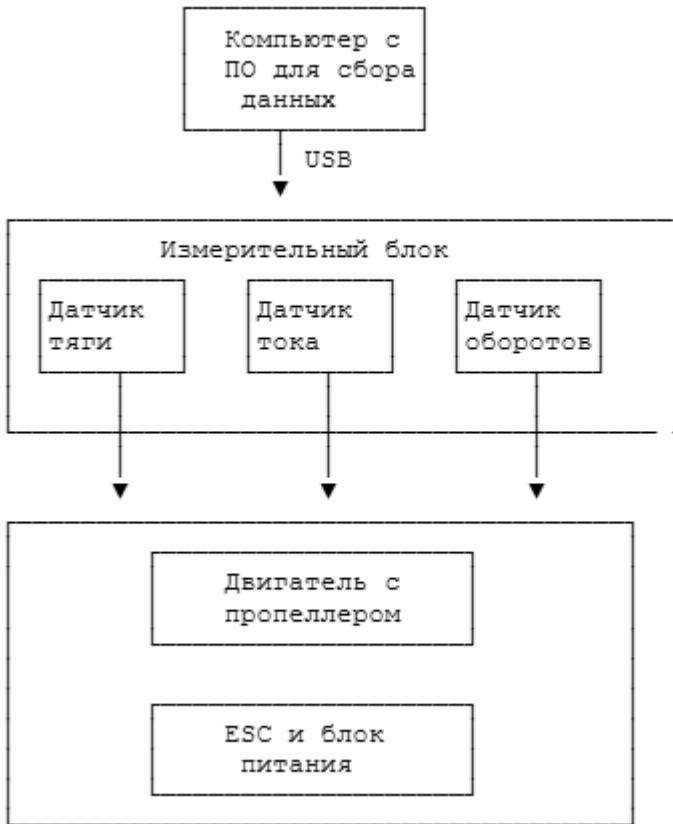


Рис. 11. Стенд для измерения тяги и параметров двигателей

2.3.2. Методы неразрушающего контроля

Определение: Неразрушающий контроль — совокупность методов и средств, позволяющих проводить контроль материалов и изделий без нарушения их целостности и ухудшения эксплуатационных свойств.

Применение методов неразрушающего контроля в диагностике БАС обусловлено необходимостью выявления скрытых дефектов без повреждения дорогостоящих компонентов:

Основные методы неразрушающего контроля для БАС:

1. Визуально-оптический контроль:

- Осмотр с использованием увеличительных приборов
- Применение эндоскопов для осмотра труднодоступных мест
- Использование специального освещения (УФ, поляризованный свет).

2. Ультразвуковой контроль:

- Определение внутренних дефектов в материалах
- Измерение толщины материалов
- Оценка качества соединений.

3. Термовой (термографический) контроль:

- Обнаружение перегревающихся элементов

- Выявление зон повышенного трения
- Контроль равномерности нагрева компонентов.

4. Вихретоковый контроль:

- Обнаружение поверхностных дефектов в проводящих материалах
- Контроль толщины покрытий
- Оценка качества проводящих элементов.

5. Радиографический контроль (рентген):

- Выявление внутренних дефектов в компонентах
- Контроль пайки и сварки
- Проверка целостности сложных механических узлов.

Каждый из методов неразрушающего контроля имеет свои специфические преимущества и ограничения:

Преимущества неразрушающего контроля:

- Сохранение целостности и работоспособности БАС
- Возможность периодического применения
- Высокая точность и информативность
- Обнаружение скрытых дефектов, не выявляемых другими методами.

Ограничения неразрушающего контроля:

- Необходимость специального оборудования
- Требования к квалификации персонала
- Ограниченная применимость для некоторых материалов.

Таблица 13

Применение методов неразрушающего контроля для различных компонентов
БАС

Метод контроля	Применение	Выявляемые дефекты	Преимущества
Визуально-оптический	Рама, пропеллеры, корпусные детали	Трешины, сколы, деформации, коррозия	Простота, доступность, не требует сложного оборудования
Ультразвуковой	Силовые элементы рамы, соединения	Внутренние дефекты, расслоения в композитах	Высокая чувствительность, возможность определения глубины дефекта

Метод контроля	Применение	Выявляемые дефекты	Преимущества
Термографический	Электронные компоненты, двигатели, ESC	Перегрев, короткие замыкания, неисправные элементы	Быстрота, наглядность, возможность диагностики под нагрузкой
Вихретоковый	Алюминиевые и другие металлические детали	Микротрешины, усталостные повреждения	Высокая чувствительность к поверхностным дефектам
Радиографический	Сложные узлы, печатные платы	Скрытые дефекты пайки, внутренние обрывы	Высокая информативность, возможность обнаружения скрытых дефектов

Окончание табл. 13

2.3.3. Функциональный контроль систем БАС

Определение: Функциональный контроль — проверка работоспособности систем БАС путем проведения комплекса тестовых операций, имитирующих реальные условия эксплуатации или отдельные режимы работы.

Функциональный контроль систем БАС подразделяется на несколько категорий в зависимости от условий проведения и объема проверок:

Основные виды функционального контроля:

1. **Наземные функциональные проверки:**

- Проверка силовой установки — тестирование двигателей, ESC, системы питания
- Проверка системы управления — тестирование приемника, сервоприводов, полетного контроллера
- Проверка навигационных систем — тестирование GPS, компаса, барометра
- Проверка дополнительного оборудования — тестирование камер, подвесов, систем сброса.

2. **Полетные функциональные проверки:**

- Проверка стабилизации — оценка удержания положения и реакции на управление

– Проверка маневренности — выполнение типовых маневров и оценка реакции

– Проверка режимов полета — тестирование автоматических режимов (удержание позиции, возврат домой и т.д.)

– Проверка дальности связи — оценка устойчивости связи на различных расстояниях.

3. Комплексные функциональные проверки:

– Симуляция нештатных ситуаций — проверка реакции на потерю связи, низкий заряд и т.д.

– Стресстесты — работа в предельных режимах для оценки запаса надежности

– Длительные испытания — проверка стабильности работы во времени.

Методика проведения функциональных проверок требует соблюдения определенной последовательности для обеспечения полноты и достоверности результатов:

Методика проведения функциональных проверок:

1. Предполетные проверки:

– Проверка механической целостности (рама, крепления, пропеллеры)

– Контроль уровня заряда и состояния аккумуляторов

– Проверка правильности работы всех датчиков

– Тестирование управления двигателями

– Проверка каналов связи и телеметрии.

2. Полетные проверки:

– Контроль стабильности висения

– Проверка отклика на команды управления

– Тестирование автоматических режимов полета

– Контроль работы систем навигации

– Оценка энергопотребления и времени полета.

3. Послеполетные проверки:

– Анализ логов и телеметрии

– Контроль температуры компонентов

– Проверка механических элементов на наличие повреждений

– Оценка расхода заряда аккумулятора.

Таблица 14

Параметры функционального контроля основных систем БАС

Система	Контролируемые параметры	Методы проверки	Критерии исправности
Силовая установка	Обороты двигателей, потребляемый ток, вибрации, температура	Тестовый запуск, измерение параметров, анализ звука	Равномерное вращение, отсутствие посторонних шумов, синхронные обороты всех двигателей
Система управления	Отклик на команды, скорость реакции, точность позиционирования	Проверка всех каналов управления, тестовые маневры	Четкая и быстрая реакция на команды, отсутствие задержек и самопроизвольных движений
Система навигации	Точность позиционирования, стабильность удержания, работа компаса	Проверка захвата спутников, калибровка, тест удержания позиции	Быстрый захват спутников, точность определения координат в пределах 2-3 м
Система связи	Дальность связи, устойчивость сигнала, качество видеопередачи	Тест дальности, проверка при наличии помех	Устойчивая связь на заявленной дистанции, отсутствие помех в видеосигнале
Аккумуляторная система	Напряжение под нагрузкой, температура, время работы	Мониторинг параметров в полете, оценка времени полета	Стабильное напряжение, отсутствие перегрева, время полета согласно спецификации

Окончание табл. 14

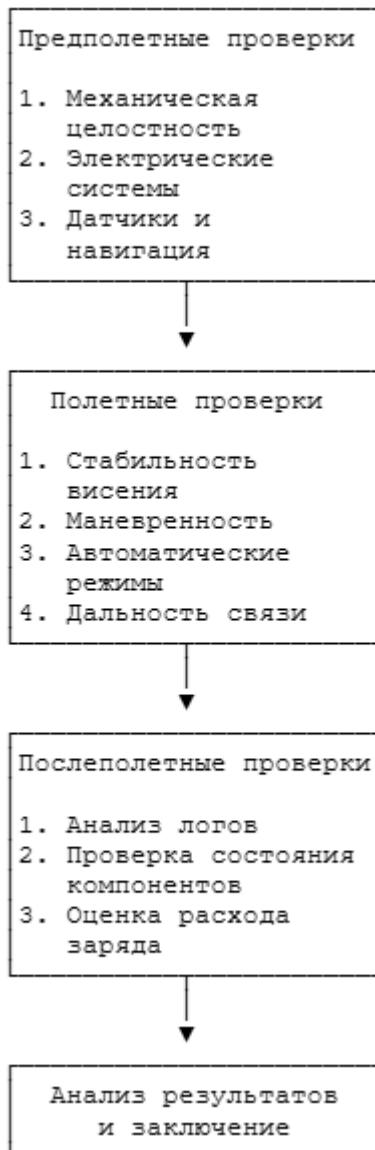


Рис. 12. Схема комплексного функционального контроля БАС

Рекомендуемая литература:

1. Гостев А.В. Технологические процессы технического обслуживания беспилотных ВС: учебно-методическое пособие / А.В. Гостев, Д.В. Богомолов, А.С. Чичерин. – М.: ИД Академии Жуковского, 2023. – 16 с.
2. Беспилотные летательные аппараты: основы устройства и функционирования / [П.П. Афанасьев и др.]; под ред. И.С. Голубева, И.К. Туркина – 2-е изд., перераб. И доп. – Москва: МАИ, 2008. – 654 с.
3. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М., Адамовский В.В., Красноперов Р.А. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. – Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с.

Практика по теме 2

Практическое занятие 2.1: Диагностика технического состояния БАС

Цель занятия

Приобретение практических навыков диагностики технического состояния мультироторной БАС с использованием различных методов и инструментов.

Описание занятия

Данное практическое занятие направлено на формирование у студентов комплексных навыков проведения диагностических работ на реальном оборудовании. В ходе занятия студенты освоят методики визуального осмотра, инструментальной диагностики, программной проверки систем БАС и анализа полученных данных. Особое внимание уделяется практическому применению контрольно-измерительных приборов и интерпретации результатов измерений для формирования обоснованных выводов о техническом состоянии беспилотной авиационной системы.

Оборудование и материалы

1. Мультироторная БАС или компоненты с внесенными контролируемыми неисправностями
2. Контрольно-измерительные приборы.
 - Мультиметр (цифровой, с автоматической и ручной регулировкой диапазонов)
 - Токовые клещи
 - Ваттметр для измерения мощности
 - Осциллограф (желательно цифровой)
 - Инфракрасный термометр или тепловизор.
3. Инструменты.
 - Набор отверток и шестигранных ключей
 - Пинцеты и бокорезы
 - Паяльная станция
 - Лупа или USB-микроскоп.
4. Компьютер с установленным специализированным ПО
5. Комплект запасных частей для БАС
6. Антистатические средства защиты (браслет, коврик).

Программное обеспечение

1. Mission Planner, QgroundControl или Betaflight Configurator

2. BLHeli Suite или BLHeli_32 Suite
3. Программное обеспечение для анализа логов полета
4. Драйверы для подключения полетных контроллеров
5. Диагностическое ПО для работы с GPS и другими датчиками.

Задание 1: Внешний осмотр и проверка механической части БАС (1 час)

Описание задания: Первоначальное задание направлено на освоение методики визуального осмотра БАС и выявление механических повреждений. Студенты изучат признаки типичных неисправностей механических компонентов, научатся систематически осматривать все элементы конструкции и документировать обнаруженные дефекты. Особое внимание уделяется проверке состояния рамы, пропеллеров, двигателей и взлетно-посадочных устройств.

1. Провести визуальный осмотр рамы, выявить.
 - Трешины, деформации, сколы материала
 - Ослабленные или отсутствующие крепежные элементы
 - Следы контакта с препятствиями или падений.
2. Проверить состояние пропеллеров.
 - Наличие трещин, сколов или деформаций
 - Правильность установки (направление вращения)
 - Балансировка пропеллеров.
3. Осмотреть двигатели.
 - Проверить легкость и равномерность вращения
 - Выявить люфт вала или шумы при вращении
 - Определить наличие деформаций корпуса или крепления.
4. Проверить взлетно-посадочные устройства.
 - Целостность стоек и демпфирующих элементов
 - Надежность крепления к раме.

Задание 2: Диагностика электрических систем БАС (2 часа)

Описание задания: Данное задание посвящено освоению методов инструментальной диагностики электрических систем БАС. Студенты изучат принципы работы с контрольно-измерительными приборами, освоят методики измерения основных электрических параметров и научатся интерпретировать полученные результаты для выявления неисправностей в системах питания, управления двигателями и электронных компонентах.

1. Проверить систему питания.
 - Измерить напряжение аккумуляторной батареи
 - Проверить состояние разъемов и силовых проводов

– Измерить внутреннее сопротивление аккумулятора (при наличии специального тестера).

2. Диагностика двигателей и ESC.

– Измерить сопротивление обмоток двигателей

– Проверить подключение двигателей к ESC

– Провести тестовый запуск двигателей с контролем потребляемого тока

– Выявить аномальный нагрев или шум при работе.

3. Проверка полетного контроллера и периферийных устройств.

– Измерить напряжение питания полетного контроллера

– Проверить целостность сигнальных проводов

– Протестировать работоспособность всех подключенных датчиков

– Проверить правильность ориентации полетного контроллера.

4. Диагностика системы связи.

– Проверить целостность антенн

– Измерить уровень сигнала в различных положениях

– Протестировать дальность устойчивой связи.

Задание 3: Программная диагностика БАС (2 часа)

Описание задания: Третье задание направлено на изучение методов программной диагностики БАС с использованием специализированного программного обеспечения. Студенты освоят процедуры подключения БАС к компьютеру, чтения параметров полетного контроллера, анализа настроек и состояния различных подсистем. Особое внимание уделяется работе с логами полета и интерпретации диагностической информации.

1. Подключение БАС к компьютеру и диагностика через специализированное ПО.

– Чтение параметров полетного контроллера

– Проверка версии прошивки

– Диагностика датчиков (гироскоп, акселерометр, барометр, GPS).

2. Анализ настроек полетного контроллера.

– Проверка правильности настройки типа рамы и моторов

– Анализ PID-параметров

– Проверка настройки функций безопасности (Failsafe).

3. Анализ логов полета (при наличии).

– Выявление аномалий в работе двигателей

– Анализ вибраций

– Проверка реакции на команды управления

- Анализ работы системы позиционирования.
- 4. Диагностика ESC через программный интерфейс.
 - Чтение параметров работы ESC
 - Проверка настроек ESC
 - Анализ ошибок и сбоев.

Задание 4: Формирование заключения о техническом состоянии БАС (1 час)

Описание задания: Заключительное задание направлено на систематизацию полученных в ходе диагностики данных и формирование обоснованного заключения о техническом состоянии БАС. Студенты научатся классифицировать выявленные неисправности по степени критичности, составлять рекомендации по их устранению и оформлять техническую документацию в соответствии с установленными требованиями.

1. Составление перечня выявленных неисправностей с указанием.
 - Описания неисправности
 - Степени критичности
 - Предполагаемой причины
 - Рекомендаций по устранению.
2. Оценка общего технического состояния БАС.
 - Допуск к полетам или запрет эксплуатации
 - Необходимость проведения ремонтных работ
 - Рекомендации по дальнейшей эксплуатации.
3. Оформление технической документации.
 - Заполнение чек-листа технического состояния
 - Внесение записей в журнал технического обслуживания
 - Составление заявки на запасные части (при необходимости).

Контрольные вопросы:

1. Какие основные этапы включает в себя комплексная диагностика БАС?
2. Какие параметры и характеристики проверяются при диагностике силовой установки?
3. Как выявить проблемы с балансировкой пропеллеров?
4. Каким образом можно диагностировать неисправность ESC?
5. Какие признаки указывают на проблемы с датчиками полетного контроллера?

6. Какие параметры необходимо контролировать при анализе логов полета?
7. Как проверить работоспособность системы GPS?
8. Какие неисправности можно выявить при визуальном осмотре БАС?
9. Какие электрические параметры измеряются при диагностике системы питания?
10. Как определить неисправность двигателя без его разборки?

Критерии оценки

- Правильность и полнота проведения диагностических процедур
- Корректность использования контрольно-измерительных приборов
- Точность выявления и описания неисправностей
- Обоснованность выводов о техническом состоянии БАС
- Качество оформления технической документации
- Соблюдение правил техники безопасности.

Практическое занятие 2.2: Анализ логов полета и выявление неисправностей

Цель занятия: приобретение практических навыков анализа полетных логов для выявления неисправностей и аномалий в работе мультироторной БАС.

Практическое занятие посвящено изучению современных методов анализа полетных данных как основного инструмента диагностики скрытых неисправностей БАС. Студенты освоят работу с различными программными средствами анализа логов, изучат характерные признаки типовых неисправностей в телеметрических данных и научатся формировать обоснованные выводы о причинах возникновения проблем в работе беспилотных систем. Особое внимание уделяется практическим навыкам сбора, обработки и интерпретации полетной информации.

Оборудование и материалы

1. Компьютер с установленным специализированным ПО для анализа логов
2. Набор полетных логов БАС с различными типами неисправностей
3. Мультироторная БАС для практического тестирования
4. Карта памяти или другой носитель для записи логов

5. Проектор или интерактивная доска для демонстрации материалов.

Программное обеспечение

1. Mission Planner Log Viewer
2. QgroundControl Log Analysis
3. FlightPlot или UAV Log Viewer
4. Python с библиотеками для анализа логов (pymavlink, matplotlib)
5. Специализированные утилиты для анализа логов конкретных полетных контроллеров
6. Табличный процессор (Excel, LibreOffice Calc) для обработки данных.

Задание 1: Изучение структуры полетных логов и инструментов анализа

Описание задания: Вводное задание направлено на ознакомление студентов с различными форматами полетных логов и программными инструментами их анализа. Студенты изучат структуру данных, содержащихся в логах различных типов полетных контроллеров, освоят основные возможности программного обеспечения для анализа и научатся настраивать интерфейс для эффективной работы с большими объемами телеметрической информации.

1. Ознакомление с основными типами полетных логов.

- Логи в формате MAVLink (.bin, .log)
- Логи Betaflight/Cleanflight (.txt, .bfl)
- Логи DJ (.DAT, .txt)
- CSV-логи и другие форматы.

2. Изучение структуры данных в логах.

- Временные метки
- Показания датчиков (гироскоп, акселерометр, барометр)
- Команды двигателям
- Координаты и параметры навигации
- Напряжение и токи потребления
- Статусы и ошибки систем.

3. Обзор программных инструментов для анализа логов.

- Демонстрация интерфейса и возможностей
- Настройка отображения графиков
- Фильтрация и поиск данных
- Экспорт и конвертация данных.

Задание 2: Анализ типовых проблем по логам полета

Описание задания: Основное практическое задание предусматривает детальный анализ реальных полетных логов с различными типами неисправностей. Студенты научатся распознавать характерные признаки проблем в работе различных систем БАС, устанавливать причинно-следственные связи между параметрами и формировать диагностические заключения на основе анализа телеметрических данных.

1. Анализ логов с признаками проблем вибрации.
 - Определение характеристик вибрации (частота, амплитуда)
 - Выявление источника вибрации (двигатель, пропеллер, ESC)
 - Оценка влияния вибрации на работу датчиков и систем.
2. Анализ логов с проблемами системы питания.
 - Выявление просадок напряжения при маневрах
 - Анализ разряда аккумулятора во время полета
 - Определение аномального потребления тока.
3. Анализ логов с проблемами навигационных систем.
 - Выявление проблем с GPS-позиционированием
 - Определение ошибок барометра
 - Анализ работы компаса и его калибровки.
4. Анализ логов с проблемами управления и стабилизации.
 - Выявление проблем с PID-регулированием
 - Анализ реакции на команды управления
 - Определение проблем с работой датчиков.

Задание 3: Практический сбор и анализ логов

Описание задания: Данное задание предполагает самостоятельный сбор телеметрических данных в ходе выполнения тестовых полетов с искусственно внесенными неисправностями. Студенты освоят процедуры настройки системы сбора данных, проведения контролируемых испытаний и последующего анализа полученной информации для подтверждения диагностических гипотез.

1. Настройка записи логов на мультироторной БАС.
 - Включение записи в настройках полетного контроллера
 - Выбор параметров для записи
 - Настройка частоты записи.
2. Выполнение тестовых полетов с внесенными контролируемыми неисправностями.
 - Полет с несбалансированным пропеллером

- Полет с искусственно созданными помехами для GPS
 - Полет с имитацией проблем питания.
3. Загрузка и анализ полученных логов.
- Выявление признаков внесенных неисправностей
 - Сравнение с эталонными логами нормальной работы
 - Определение характеристик и параметров неисправностей.

Задание 4: Подготовка отчета об анализе логов

Описание задания: Заключительное задание направлено на систематизацию полученных знаний и навыков в форме методических рекомендаций и отчетных документов. Студенты разработают собственные методики анализа логов для конкретных типов БАС, создадут шаблоны отчетности и сформулируют практические рекомендации по настройке и эксплуатации беспилотных систем на основе анализа полетных данных.

1. Составление методики анализа логов полета для конкретного типа БАС.

- Определение ключевых параметров для мониторинга
- Описание признаков типичных неисправностей
- Алгоритм поиска причин неисправностей по логам.

2. Создание шаблона отчета о техническом состоянии БАС на основе анализа логов.

- Структура отчета
- Графическое представление данных
- Выводы и рекомендации.

3. Составление рекомендаций по настройке БАС на основе анализа логов.

- Корректировка PID-параметров
- Настройка фильтров
- Рекомендации по балансировке и устранению вибраций.

Контрольные вопросы:

1. Какие типы данных содержатся в полетных логах мультироторных БАС?
2. Каким образом можно определить проблемы с вибрацией по данным логов?
3. Как выявить проблемы с питанием по записям телеметрии?

4. Какие параметры указывают на неисправность или некорректную работу датчиков?
5. Как определить проблемы с навигационной системой по логам полета?
6. Какие инструменты используются для анализа логов различных типов полетных контроллеров?
7. Как настроить запись логов для максимально информативной диагностики?
8. Какие признаки в логах указывают на необходимость балансировки пропеллеров?
9. Как по логам определить необходимость настройки PID-регулятора?
10. Какие параметры необходимо анализировать для оценки качества полета БАС?

Критерии оценки

- Точность интерпретации данных полетных логов
- Правильность выявления неисправностей по логам
- Корректность настройки системы сбора логов
- Качество подготовленного отчета и рекомендаций
- Обоснованность выводов о причинах неисправностей
- Полнота и структурированность анализа.

Практическое занятие 2.3: Использование контрольно-измерительных приборов для диагностики БАС

Цель занятия: приобретение практических навыков работы с контрольно-измерительными приборами для диагностики технического состояния компонентов БАС.

Практическое занятие направлено на формирование профессиональных компетенций в области инструментальной диагностики беспилотных авиационных систем. Студенты освоят методы работы с современными контрольно-измерительными приборами, изучат специфику их применения для различных типов измерений и научатся интерпретировать полученные результаты для принятия обоснованных решений о техническом состоянии БАС. Особое внимание уделяется практическим аспектам проведения измерений, калибровке приборов и обеспечению точности результатов.

Оборудование и материалы

1. Контрольно-измерительные приборы.

– Цифровой мультиметр с функцией измерения напряжения, тока, сопротивления, емкости

– Токовые клещи для бесконтактного измерения тока

– Осциллограф (цифровой)

– Измеритель мощности (ваттметр) для измерения потребляемой мощности

– Тестер аккумуляторных батарей с функцией измерения внутреннего сопротивления

– Виброметр или смартфон с приложением для измерения вибраций

– Инфракрасный термометр или тепловизор

– Тахометр для измерения оборотов двигателей.

2. Тестируемое оборудование.

– Комплект электродвигателей разных типоразмеров

– Регуляторы оборотов (ESC) различных типов

– Аккумуляторные батареи (включая образцы с контролируемыми дефектами)

– Полетные контроллеры

– Платы распределения питания

– Пропеллеры (в том числе с дефектами).

3. Вспомогательное оборудование.

– Источники питания (лабораторные блоки питания)

– Нагрузочные резисторы разной мощности

– Соединительные провода и разъемы

– Стенд для тестирования тяги двигателей

– Приспособления для фиксации компонентов.

4. Инструменты.

– Паяльная станция

– Набор отверток и ключей

– Бокорезы, пинцеты, стриппер.

Программное обеспечение

1. Программы для работы с осциллографом и анализа сигналов

2. BLHeli Suite или BLHeli_32 Suite для работы с ESC

3. Специализированное ПО для анализа данных с приборов

4. Утилиты для калибровки и настройки измерительных приборов.

Задание 1: Измерение электрических параметров компонентов БАС (2 часа)

Описание задания: Первое задание посвящено освоению методов электрических измерений основных компонентов БАС. Студенты изучат принципы работы с различными измерительными приборами, освоят методики измерения напряжения, тока, сопротивления и других электрических параметров. Особое внимание уделяется правильному подключению приборов, выбору диапазонов измерений и интерпретации полученных результатов для оценки технического состояния компонентов.

1. Измерение параметров аккумуляторных батарей.
 - Измерение напряжения разомкнутой цепи
 - Измерение напряжения под нагрузкой
 - Определение внутреннего сопротивления
 - Измерение тока разряда при различных режимах
 - Построение кривой разряда.
2. Диагностика электродвигателей.
 - Измерение сопротивления обмоток
 - Проверка изоляции между обмотками и корпусом
 - Измерение потребляемого тока на различных оборотах
 - Тестирование двигателей под нагрузкой
 - Измерение эффективности (КПД) двигателя.
3. Проверка регуляторов оборотов (ESC).
 - Измерение входного и выходного напряжения
 - Проверка сигнальных линий осциллографом
 - Измерение пульсаций выходного напряжения
 - Определение эффективности преобразования энергии.
4. Диагностика полетных контроллеров и периферийных устройств.
 - Измерение напряжений питания различных узлов
 - Проверка целостности сигнальных линий
 - Измерение параметров выходных сигналов управления.

Задание 2: Измерение механических параметров компонентов БАС (2 часа)

Описание задания: Второе задание направлено на изучение методов измерения механических параметров БАС, включая вибрационные характеристики, тяговые показатели и температурные режимы работы компонентов. Студенты освоят работу с специализированными приборами для

измерения вибраций, научатся проводить тяговые испытания двигателей и анализировать тепловые характеристики работающего оборудования.

1. Измерение вибрационных характеристик.

- Настройка виброметра и выбор режимов измерения
- Измерение вибраций двигателей на различных оборотах
- Измерение вибраций рамы при работе двигателей
- Анализ частотных характеристик вибраций
- Сравнение вибраций при использовании различных пропеллеров.

2. Тестирование тяговых характеристик двигателей.

- Настройка стенда для измерения тяги
- Калибровка измерительной системы
- Измерение тяги при различных оборотах
- Построение кривых зависимости тяги от мощности
- Сравнение эффективности различных комбинаций двигатель-пропеллер.

3. Измерение температурных режимов.

- Использование инфракрасного термометра для контроля нагрева
- Измерение температуры двигателей при различных нагрузках
- Контроль температуры ESC и аккумуляторов
- Анализ распределения тепла и выявление горячих точек.

Задание 3: Комплексная диагностика с использованием приборов (1.5 часа)

Описание задания: Третье задание предполагает проведение комплексной диагностики реальных неисправностей БАС с использованием различных измерительных приборов. Студенты применяют полученные знания для решения практических диагностических задач, научатся выбирать оптимальные методы измерений для конкретных случаев и формировать обоснованные заключения о причинах неисправностей на основе комплексного анализа измеренных параметров.

1. Диагностика проблемы с нестабильной работой двигателя.

- Измерение сопротивления обмоток
- Анализ сигналов управления осциллографом
- Измерение тока потребления
- Контроль температуры во время работы
- Измерение вибраций и шумов.

2. Диагностика проблемы с питанием БАС.

- Анализ параметров аккумулятора

- Измерение падения напряжения на силовых линиях
- Проверка работоспособности платы распределения питания
- Измерение нагрева силовых компонентов.

3. Комплексная проверка силовой установки.

- Одновременное измерение тока, напряжения, мощности и тяги
- Расчет КПД системы
- Определение оптимальных режимов работы.

Задание 4: Оформление результатов измерений и составление диагностического отчета (0.5 часа)

Описание задания: Заключительное задание направлено на формирование навыков обработки и представления результатов измерений в форме диагностических отчетов. Студенты научатся систематизировать полученные данные, проводить их статистическую обработку, создавать информативные графики и диаграммы, а также формулировать обоснованные выводы и рекомендации по результатам проведенной диагностики.

1. Обработка результатов измерений.

- Систематизация полученных данных
- Построение графиков и диаграмм
- Статистическая обработка результатов.

2. Составление диагностического отчета.

- Описание использованных методик измерений
- Представление полученных результатов
- Выявление отклонений от нормативных значений
- Формулирование выводов о техническом состоянии
- Рекомендации по устранению выявленных проблем.

Контрольные вопросы:

1. Какие основные электрические параметры измеряются при диагностике БАС?
2. Как правильно измерить сопротивление обмоток бесколлекторного двигателя?
3. Какие параметры измеряются осциллографом при диагностике ESC?
4. Как определить внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи?

5. Какие методы используются для измерения вибраций двигателей?
6. Как измерить тяговые характеристики двигателя с пропеллером?
7. Какие параметры указывают на неисправность регулятора оборотов?
8. Как влияет температура на работоспособность компонентов БАС?
9. Какие измерения необходимо провести для диагностики системы питания?
10. Как правильно интерпретировать результаты измерений и выявлять отклонения?

Критерии оценки

- Правильность использования измерительных приборов
- Точность и корректность измерений
- Обоснованность выбора методов измерения
- Качество обработки и представления результатов
- Точность диагностики неисправностей на основе измерений
- Соблюдение техники безопасности при работе с оборудованием.

ТЕМА 3: ТЕКУЩИЙ И КОНТРОЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС

Лекция 3.1: Технология выполнения текущего ремонта БАС

3.1.1. Общие принципы текущего ремонта

Определение: Текущий ремонт БАС — комплекс мероприятий, направленных на устранение возникших неисправностей, восстановление работоспособности систем и возвращение БАС в эксплуатацию. Текущий ремонт выполняется при возникновении неисправностей без существенного изменения конструкции и характеристик БАС.

Основные задачи текущего ремонта определяются необходимостью поддержания БАС в исправном состоянии и обеспечения безопасности полетов:

Цели текущего ремонта:

1. Восстановление работоспособности отдельных компонентов и систем
2. Предотвращение развития неисправностей и повреждений
3. Продление срока службы БАС
4. Поддержание заданного уровня надежности и безопасности.

Методология текущего ремонта основывается на принципах минимального вмешательства в конструкцию и максимального сохранения проектных характеристик БАС:

Основные принципы текущего ремонта:

1. Минимальное вмешательство — ремонт ограничивается заменой или восстановлением только неисправных компонентов
2. Сохранение характеристик — после ремонта должны сохраняться проектные характеристики БАС
3. Технологичность — использование стандартных методов и инструментов для ремонта
4. Контролируемость — все ремонтные работы должны допускать контроль качества их выполнения
5. Документированность — все этапы ремонта должны фиксироваться в технической документации.

Различие между видами обслуживания и ремонта БАС определяется объемом работ, периодичностью выполнения и влиянием на летные характеристики:

Отличия текущего ремонта от технического обслуживания и капитального ремонта:

- Техническое обслуживание — плановые работы для поддержания исправности
- Текущий ремонт — внеплановые работы по устранению возникших неисправностей
- Капитальный ремонт — комплексное восстановление ресурса с заменой большого числа компонентов.

Таблица 15
Сравнение видов ремонта и технического обслуживания

Критерий	Техническое обслуживание	Текущий ремонт	Капитальный ремонт
Периодичность	Регулярно по графику	По мере необходимости	После выработки ресурса
Объем работ	Небольшой, профилактический	Средний, по устранению конкретных неисправностей	Большой, комплексное восстановление
Требуемая квалификация	Базовая	Средняя	Высокая
Необходимость специального оборудования	Минимальная	Средняя	Высокая
Влияние на летные характеристики	Не изменяет	Восстанавливает исходные	Может улучшать

3.1.2. Технология выполнения текущего ремонта основных компонентов БАС

Стандартизированная последовательность выполнения текущего ремонта обеспечивает качество работ и минимизирует риски повреждения компонентов:

Общая последовательность выполнения текущего ремонта:

1. Диагностика и локализация неисправности
2. Подготовка к ремонту (инструменты, запчасти, документация)
3. Демонтаж неисправного компонента
4. Ремонт или замена компонента

5. Монтаж восстановленного/нового компонента
6. Проверка функционирования и тестирование
7. Оформление документации.

Технология ремонта рамы и механических компонентов:

Ремонт рамы БАС требует особого внимания к сохранению прочностных характеристик и геометрии конструкции:

1. Ремонт трещин и повреждений рамы:

Материалы и инструменты:

- Эпоксидная смола для композитных рам
- Клей цианоакрилатный для пластиковых деталей
- Припой и флюс для металлических элементов
- Наждачная бумага разной зернистости
- Армирующие материалы (стеклоткань, карбоновая ткань).

Технология ремонта трещин в композитной раме:

- Очистка и обезжикивание поврежденной области
- Расширение трещины для лучшего проникновения смолы
- Подготовка армирующего материала нужного размера
- Нанесение эпоксидной смолы
- Наложение армирующего материала
- Пропитка армирующего материала смолой
- Удаление излишков смолы и пузырьков воздуха
- Полимеризация смолы (обычно 24 часа)
- Шлифовка и финишная обработка.

2. Ремонт и замена стоек шасси:

Материалы и инструменты:

- Запасные стойки
- Крепежные элементы (винты, гайки)
- Отвертки, ключи
- Демпфирующие материалы.

Технология замены:

- Демонтаж поврежденной стойки
- Проверка мест крепления на раме
- Установка новой стойки
- Регулировка высоты и угла наклона
- Проверка устойчивости БАС на поверхности.

3. Ремонт защитных элементов и кожухов:

Материалы и инструменты:

- Пластиковые пластины
- Термоклей
- Винты и гайки
- Нож для пластика, ножницы.

Технология ремонта:

6. Демонтаж поврежденного элемента
7. Выкройка заплатки из аналогичного материала
8. Подгонка размеров и формы
9. Крепление заплатки (винтами или kleem)
10. Проверка прочности и функциональности.

Ремонт электронных компонентов требует специальных навыков работы с электронными схемами и паяльным оборудованием:

Технология ремонта электронных компонентов:

4. Ремонт проводки и соединений:

Материалы и инструменты:

- Провода разных сечений и цветов
- Разъемы различных типов
- Термоусадочная трубка
- Паяльная станция
- Набор инструментов для зачистки проводов.

Технология ремонта:

- Выявление поврежденного участка
- Отключение от источников питания
- Зачистка поврежденных проводов
- Пайка с соблюдением полярности
- Изоляция соединения термоусадочной трубкой
- Проверка соединения тестером.

5. Замена регуляторов ESC:

Материалы и инструменты:

- Запасные ESC соответствующих характеристик
- Паяльная станция
- Припой, флюс
- Термоусадочная трубка
- Стяжки для крепления.

Технология замены:

- Отключение всех соединений
- Демонтаж неисправного ESC
- Проверка совместимости нового ESC
- Монтаж нового ESC на раму
- Пайка силовых проводов
- Подключение сигнальных проводов
- Программирование и настройка ESC.

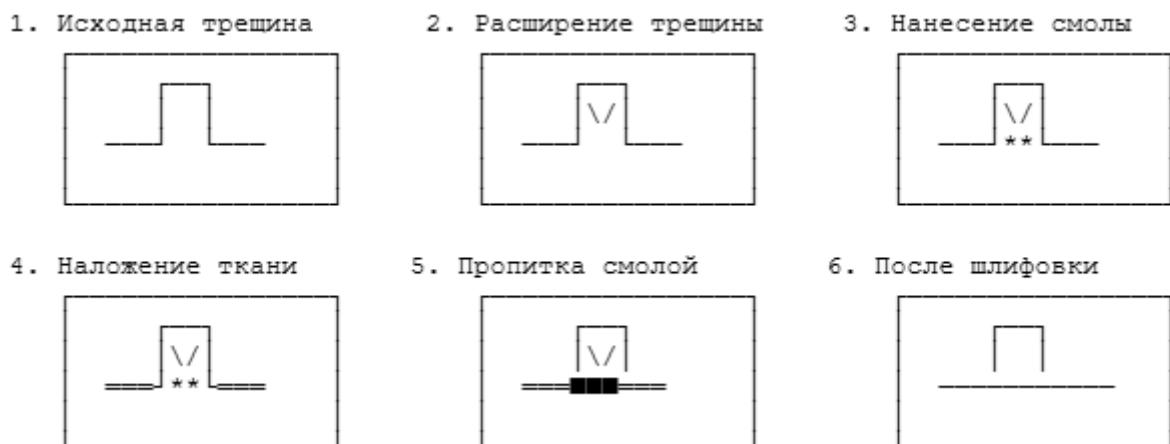


Рис. 13. Последовательность ремонта трещины в композитной раме

3.1.3. Ремонт и замена двигателей и пропеллеров

Ремонт силовой установки является одним из наиболее ответственных видов работ, поскольку от качества его выполнения зависит безопасность полетов:

Ремонт и замена электродвигателей:

Диагностика неисправностей двигателей должна предшествовать любым ремонтным работам для точного определения объема необходимых работ:

1. Диагностика неисправностей двигателей:
 - Повышенный шум или вибрация
 - Неравномерное вращение
 - Перегрев при работе
 - Обрыв обмоток или короткое замыкание
 - Люфт или заклинивание вала.
2. Материалы и инструменты для ремонта двигателей:
 - Запасные двигатели соответствующих характеристик
 - Подшипники для замены
 - Паяльная станция
 - Приспособления для демонтажа и монтажа подшипников

- Специальные ключи для разборки двигателей
- Контрольно-измерительные приборы.

Технология замены двигателя:

1. Отключение электрических соединений
2. Демонтаж пропеллера
3. Откручивание крепежных винтов
4. Снятие двигателя с луча рамы
5. Проверка крепежных элементов
6. Установка нового двигателя
7. Затяжка крепежных винтов с рекомендованным усилием
8. Подключение электрических соединений
9. Проверка направления вращения
10. Установка и закрепление пропеллера.

Технология ремонта двигателя (замена подшипников):

1. Разборка двигателя (снятие крышек, стопорных колец)
2. Извлечение ротора
3. Демонтаж старых подшипников
4. Очистка посадочных мест
5. Установка новых подшипников
6. Смазка подшипников (при необходимости)
7. Сборка двигателя
8. Проверка легкости вращения ротора
9. Тестирование двигателя.

Таблица 16

Типичные неисправности двигателей и способы их устранения

Неисправность	Возможные причины	Способ устранения
Двигатель не вращается	Обрыв в обмотках, неисправность ESC, обрыв проводов	Проверка проводки, замена двигателя или ESC
Повышенные вибрации	Повреждение подшипников, дисбаланс ротора	Замена подшипников, балансировка ротора
Нагрев двигателя	Перегрузка, заклинивание подшипников	Проверка соответствия пропеллера, замена подшипников

Неисправность	Возможные причины	Способ устранения
Посторонние звуки	Попадание посторонних предметов, износ подшипников	Разборка и очистка двигателя, замена подшипников
Нестабильные обороты	Неисправность ESC, обрыв одной из фаз	Замена ESC, проверка соединений

Окончание табл. 16

Работа с пропеллерами требует особого внимания к балансировке и правильному направлению вращения:

Ремонт и замена пропеллеров:

1. Диагностика состояния пропеллеров:
 - Видимые трещины или сколы
 - Деформация лопастей
 - Нарушение балансировки
 - Ослабление крепления к валу двигателя.
2. Материалы и инструменты для работы с пропеллерами:
 - Запасные пропеллеры соответствующего размера и шага
 - Балансировочный стенд
 - Клей для ремонта (для несущественных повреждений)
 - Наждачная бумага мелкой зернистости
 - Специальные ключи для крепления пропеллеров.
3. Технология замены пропеллеров:
 1. Демонтаж поврежденного пропеллера
 2. Проверка адаптера и крепежных элементов
 3. Подбор соответствующего пропеллера (размер, шаг, направление вращения)
 4. Балансировка пропеллера (при необходимости)
 5. Установка пропеллера на вал двигателя
 6. Закрепление пропеллера с соблюдением требуемого усилия
 7. Проверка свободного вращения и отсутствия люфтов.
4. Балансировка пропеллеров:
 1. Установка пропеллера на балансировочный стенд
 2. Определение более тяжелой стороны
 3. Шлифовка тяжелой стороны для снятия материала
 4. Повторная проверка баланса
 5. Повторение процедуры до достижения баланса.

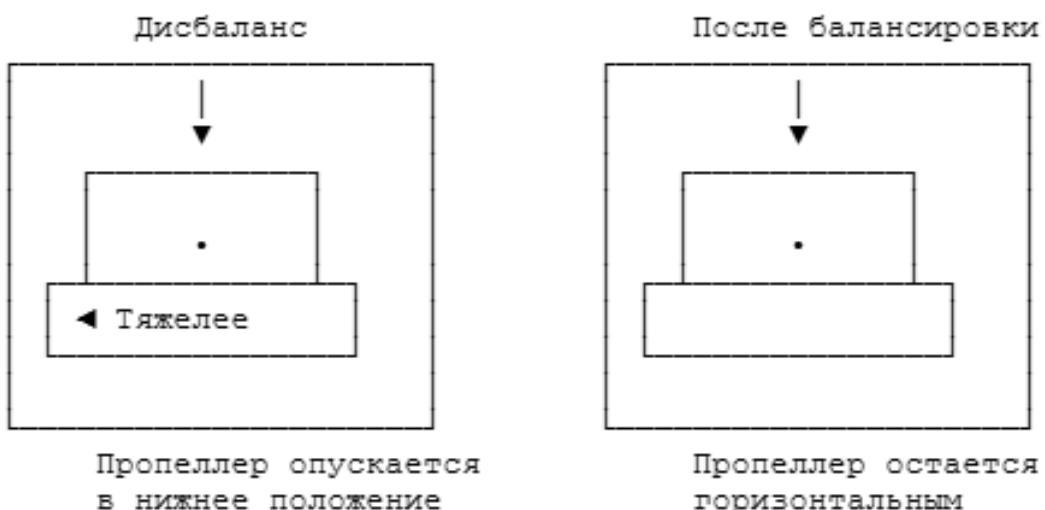


Рис. 14. Процесс балансировки пропеллера

Рекомендуемая литература:

1. Гостев А.В. Технологические процессы технического обслуживания беспилотных ВС: учебно-методическое пособие / А.В. Гостев, Д.В. Богомолов, А.С. Чичерин. – М.: ИД Академии Жуковского, 2023. – 16 с.
2. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Пер. С англ. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 312 с.
3. Беспилотные летательные аппараты: основы устройства и функционирования / [П.П. Афанасьев и др.]; под ред. И.С. Голубева, И.К. Туркина – 2-е изд., перераб. И доп. – Москва: МАИ, 2008. – 654 с.

Лекция 3.2: Технология контрольно-восстановительного ремонта

3.2.1. Особенности контрольно-восстановительного ремонта

Определение: Контрольно-восстановительный ремонт (КВР) — комплекс ремонтно-восстановительных работ, направленных на устранение существенных повреждений и неисправностей БАС, возникших в результате аварий, интенсивной эксплуатации или длительного хранения, с целью полного восстановления функциональности и летной годности.

Контрольно-восстановительный ремонт отличается от текущего ремонта по масштабу выполняемых работ и требованиям к квалификации исполнителей:

Отличия контрольно-восстановительного ремонта от текущего ремонта:

1. Большой объем и сложность работ
2. Необходимость комплексной диагностики всех систем
3. Замена или восстановление большого количества компонентов
4. Обязательное тестирование всех систем после ремонта
5. Необходимость дополнительной калибровки и настройки.

Показания к проведению контрольно-восстановительного ремонта определяются характером и объемом повреждений БАС:

Основания для проведения КВР:

- Аварийная посадка или столкновение с препятствиями
- Существенное ухудшение летных характеристик
- Выработка ресурса ключевых компонентов
- Длительное хранение без эксплуатации
- Воздействие неблагоприятных факторов (влага, экстремальные температуры).

Технологический процесс контрольно-восстановительного ремонта включает в себя последовательность взаимосвязанных этапов:

Этапы контрольно-восстановительного ремонта:

1. Комплексная диагностика технического состояния
2. Составление дефектной ведомости
3. Разборка БАС и сортировка компонентов
4. Ремонт или замена поврежденных компонентов
5. Сборка БАС с соблюдением технологических требований
6. Комплексное тестирование всех систем
7. Настройка и калибровка
8. Контрольные полеты
9. Оформление документации.

Таблица 17

Сравнение текущего и контрольно-восстановительного ремонта

Критерий	Текущий ремонт	Контрольно-восстановительный ремонт
Объем работ	Устранение отдельных неисправностей	Комплексное восстановление работоспособности
Степень разборки	Частичная	Полная или глубокая
Требуемая документация	Минимальная	Полный комплект технической документации
Требования к квалификации	Средняя	Высокая
Необходимость последующих испытаний	Функциональная проверка	Полный цикл контрольных полетов
Срок выполнения	Короткий	Длительный

3.2.2. Технология восстановления рамы и механических компонентов

Диагностика повреждений рамы должна предшествовать началу восстановительных работ и определять их объем:

Диагностика повреждений рамы:

- Визуальный осмотр на наличие трещин, деформаций, сколов
- Проверка геометрии рамы (симметрия, углы между лучами)
- Проверка жесткости конструкции
- Оценка состояния мест крепления компонентов
- Определение степени повреждения (ремонтопригодность).

Для качественного восстановления рамы требуются специализированные материалы и инструменты:

Материалы и инструменты для восстановления рамы:

- Эпоксидная смола для композитных рам
- Армирующие материалы (углеткань, стеклоткань)
- Отвердители и ускорители полимеризации
- Пластиковые и металлические накладки для усиления
- Крепежные элементы (винты, гайки, шайбы)
- Струбцины и зажимы для фиксации
- Нагревательные элементы для ускорения полимеризации

– Шлифовальные материалы.

Технологический процесс восстановления композитной рамы требует строгого соблюдения последовательности операций:

Восстановление при серьезных повреждениях:

1. Разборка БАС, снятие всех компонентов с рамы
2. Очистка поврежденных участков
3. Удаление поврежденных фрагментов
4. Подготовка поверхностей для соединения (зачистка, обезжиривание)
5. Подготовка армирующих элементов (выкройка ткани, накладок)
6. Смешивание эпоксидной смолы с отвердителем
7. Нанесение смолы на соединяемые поверхности
8. Укладка армирующих материалов с пропиткой смолой
9. Фиксация деталей в правильном положении
10. Полимеризация (24-48 часов)
11. Механическая обработка восстановленных участков
12. Финишная отделка и покраска.

3. Усиление ослабленных участков рамы:

1. Идентификация проблемных зон (точки концентрации напряжений)
2. Подготовка поверхностей (зачистка, обезжиривание)
3. Подготовка накладок из композитных материалов
4. Нанесение эпоксидной смолы
5. Установка усиливающих накладок
6. Полимеризация
7. Финишная обработка.

Восстановление лучей рамы и крепежных элементов может потребовать как полной замены, так и частичного ремонта:

Восстановление лучей рамы и крепежных элементов:

1. Оценка степени повреждения лучей
2. При значительных повреждениях — полная замена лучей.
 - Отсоединение поврежденного луча от центральной пластины
 - Подготовка нового луча соответствующей длины и сечения
 - Присоединение нового луча с соблюдением геометрии.
3. При незначительных повреждениях — ремонт существующих лучей.

- Выпрямление погнутых участков
 - Усиление ослабленных зон дополнительными слоями композита.
4. Восстановление крепежных элементов.
- Замена поврежденных или потерянных винтов, гаек, шайб
 - Восстановление резьбовых соединений
 - Применение резьбовых вставок при необходимости.

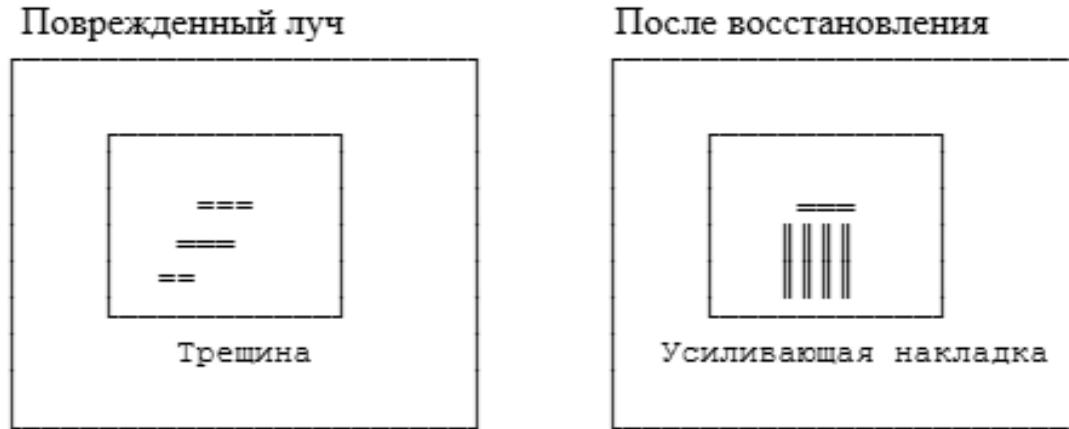


Рис. 15. Схема усиления поврежденного луча рамы

3.2.3. Восстановление электронных компонентов и системы управления

Диагностика повреждений электронных систем требует применения специального оборудования и знания электронных схем:

Диагностика повреждений электронных систем:

- Визуальный осмотр плат и компонентов на наличие повреждений
- Проверка электрических соединений
- Тестирование работоспособности отдельных модулей
- Диагностика с помощью специализированного ПО
- Анализ логов для выявления причин неисправности.

Для восстановления электронных компонентов требуется специализированные материалы и оборудование:

Материалы и инструменты для восстановления электроники:

- Паяльная станция с регулировкой температуры
- Термовоздушная паяльная станция для SMD-компонентов
- Набор припоев и флюсов
- Измерительные приборы (мультиметр, осциллограф)

- Запасные электронные компоненты (микросхемы, конденсаторы, резисторы)
- Монтажные провода различного сечения
- Разъемы и коннекторы
- Изоляционные материалы (термоусадка, изолента).

Технология восстановления полетного контроллера и периферийных устройств:

1. Восстановление полетного контроллера:

При незначительных повреждениях:

1. Диагностика неисправных компонентов
2. Демонтаж поврежденных элементов
3. Монтаж новых компонентов с соблюдением технологии пайки
4. Проверка работоспособности и прошивка.

При серьезных повреждениях:

1. Полная замена полетного контроллера
2. Восстановление настроек из резервной копии (при наличии)
3. Полная настройка и калибровка.

2. Восстановление системы связи:

1. Диагностика приемника и передатчика
2. Проверка антенн и кабелей
3. Замена поврежденных компонентов
4. Настройка соответствия частот и протоколов
5. Проверка дальности и качества связи.

3. Восстановление системы распределения питания:

1. Проверка платы распределения питания
2. Диагностика конденсаторов, стабилизаторов, защитных устройств
3. Замена поврежденных компонентов
4. Восстановление силовых соединений
5. Проверка напряжений и защиты от перегрузки.

Типовые неисправности электронных компонентов и методы их устранения

Неисправность	Признаки	Метод устранения
Повреждение силовых цепей	Перегрев, обрыв дорожек, короткое замыкание	Восстановление дорожек, замена поврежденных компонентов
Выход из строя микроконтроллера	Отсутствие инициализации, нетипичное поведение	Замена полетного контроллера или микроконтроллера
Повреждение датчиков	Некорректные показания, отсутствие данных	Замена отдельных датчиков или IMU целиком
Проблемы с интерфейсными разъемами	Неустойчивое соединение, потеря данных	Перепайка разъемов, восстановление соединений
Повреждение антенн	Снижение дальности связи, потеря сигнала	Замена антенн, восстановление коаксиальных кабелей
Сбои в программном обеспечении	Зависания, неадекватная реакция на команды	Перепрошивка, восстановление параметров

Контроль качества восстановительных работ обеспечивается многоуровневой системой проверок:

Контроль качества восстановительных работ:

1. Визуальный контроль:
 - Проверка качества пайки
 - Отсутствие замыканий и непропаев
 - Правильное расположение компонентов.
2. Электрический контроль:
 - Проверка целостности цепей
 - Измерение напряжений в контрольных точках
 - Контроль потребляемого тока.
3. Функциональный контроль.
 - Тестирование работы отдельных подсистем
 - Комплексная проверка всего устройства

– Стress-тестирование в экстремальных режимах.

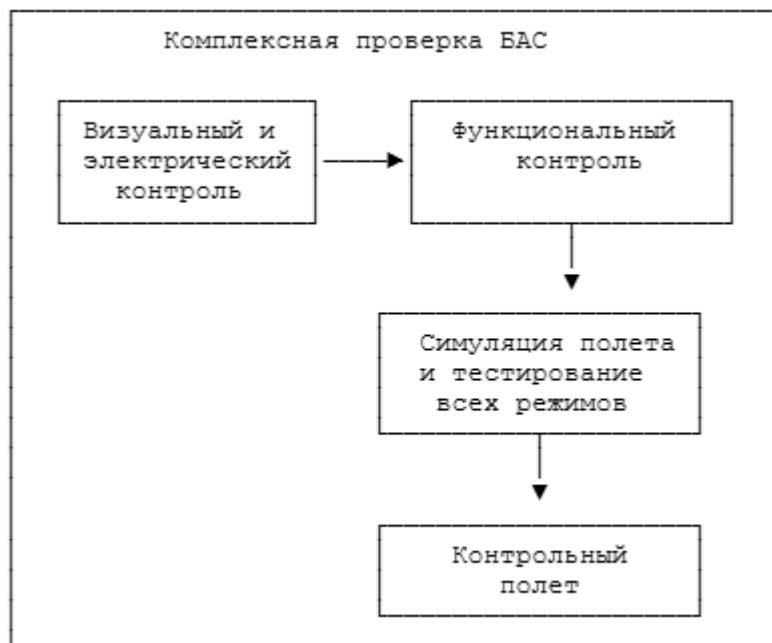


Рис. 16. Схема проверки электронных компонентов после восстановления

Рекомендуемая литература:

1. Гостев А.В. Технологические процессы технического обслуживания беспилотных ВС: учебно-методическое пособие / А.В. Гостев, Д.В. Богомолов, А.С. Чичерин. – М.: ИД Академии Жуковского, 2023. – 16 с.
2. Программное обеспечение беспилотных авиационных систем: настройка и обновление / Е.И. Николаев. - М.: Компьютерная литература, 2024. - 220 с.
3. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М., Адамовский В.В., Красноперов Р.А. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. - Уфа: ФОТОН, 2014. - 217 с.

Лекция 3.3: Ремонт и восстановление систем энергообеспечения и связи

3.3.1. Ремонт и восстановление систем энергообеспечения

Система энергообеспечения БАС является критически важной для безопасности полетов, поэтому ее диагностика и ремонт требуют особого внимания:

Диагностика неисправностей системы энергообеспечения:

- Проверка напряжения аккумуляторных батарей
- Измерение внутреннего сопротивления ячеек
- Контроль баланса напряжений ячеек
- Проверка емкости аккумулятора
- Диагностика платы защиты и балансировки (BMS)
- Проверка разъемов и силовых соединений
- Диагностика стабилизаторов напряжения.

Классификация неисправностей системы энергообеспечения позволяет определить оптимальную стратегию ремонта:

Типовые неисправности системы энергообеспечения:

1. Аккумуляторные батареи.
 - Потеря емкости
 - Разбалансировка ячеек
 - Внутреннее короткое замыкание
 - Вздутие или деформация корпуса
 - Повреждение разъемов и проводов.
2. Система распределения питания.
 - Повреждение силовых цепей
 - Выход из строя стабилизаторов напряжения
 - Неисправности в системе защиты от перегрузки
 - Повреждение плат распределения питания.

Технология ремонта и восстановления системы энергообеспечения:

1. Восстановление аккумуляторных батарей:
 - При незначительных повреждениях:
 1. Проверка напряжения каждой ячейки
 2. Балансировка ячеек специализированным зарядным устройством
 3. Восстановление разъемов и проводов
 4. Проверка емкости и разрядных характеристик.

- При серьезных повреждениях.
5. Полная замена аккумуляторной батареи
 6. Утилизация поврежденной батареи в соответствии с требованиями безопасности.
2. Восстановление системы распределения питания:
1. Диагностика платы распределения питания
 2. Замена поврежденных компонентов.
 - Силовых ключей и транзисторов
 - Конденсаторов фильтрации
 - Стабилизаторов напряжения
 - Датчиков тока и напряжения.
 3. Восстановление силовых соединений и разъемов
 4. Проверка защитных функций (от перегрузки, короткого замыкания).

Для качественного ремонта системы энергообеспечения требуются специализированные материалы и инструменты:

Материалы и инструменты для ремонта системы энергообеспечения:

- Паяльная станция для работы с силовыми компонентами
- Термовоздушная паяльная станция
- Набор силовых разъемов (XT60, XT90, EC3, EC5, T-Plug)
- Силовые провода различного сечения
- Термоусадочная трубка
- Измерительные приборы (мультиметр, ваттметр, анализатор батарей)
- Запасные электронные компоненты
- Тестер аккумуляторных батарей.

Работа с литий-полимерными аккумуляторами требует строгого соблюдения мер безопасности:

Меры безопасности при работе с литий-полимерными аккумуляторами:

1. Не допускать короткого замыкания выводов
2. Не допускать перегрева выше 60°C
3. Не разбирать аккумуляторы
4. Работать в защитных перчатках и очках
5. Иметь средства пожаротушения для литиевых батарей
6. Не допускать глубокого разряда (ниже 3.0В на ячейку)
7. Не допускать перезаряда (выше 4.2В на ячейку).

Таблица 19

Диагностика неисправностей аккумуляторных батарей

Симптом	Возможная причина	Метод устраниния
Быстрая потеря заряда	Потеря емкости из-за старения, внутреннее сопротивление	Замена аккумулятора
Неравномерное напряжение ячеек	Разбалансировка ячеек	Балансировка специализированным зарядным устройством
Вздутие аккумулятора	Внутреннее короткое замыкание, перезаряд	Замена и утилизация аккумулятора
Нагрев при зарядке/разрядке	Повышенное [FF1] внутреннее сопротивление, перегрузка	Снижение токов заряда/разряда или замена
Повреждение разъемов	Механическое повреждение, перегрев	Замена разъемов

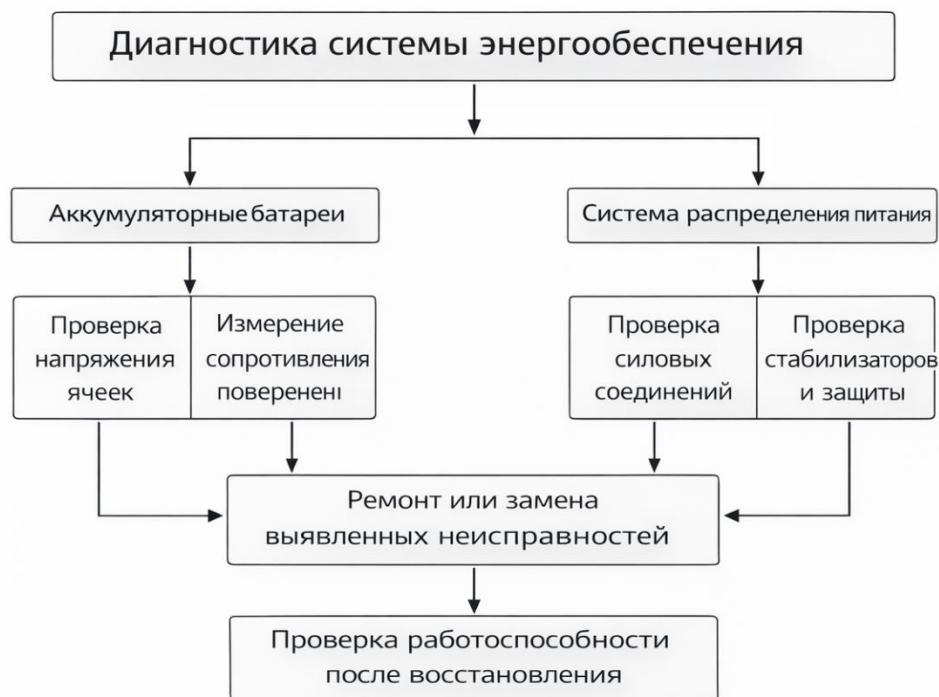


Рис. 17. Схема диагностики и восстановления системы энергообеспечения

3.3.2. Ремонт и восстановление систем связи

Диагностика неисправностей систем связи включает в себя проверку всех компонентов радиосистем БАС:

Диагностика неисправностей систем связи:

- Проверка качества и уровня сигнала
- Контроль дальности устойчивой связи
- Проверка работы антенн и фидеров
- 4. Диагностика приемников и передатчиков
 - Контроль работы модулей телеметрии
 - Проверка видеопередатчиков и приемников.

Систематизация типичных неисправностей позволяет эффективно планировать ремонтные работы:

Типовые неисправности систем связи:

1. Система управления.

- Повреждение антенны приемника
- Нарушение настройки частот и каналов
- Выход из строя элементов приемника
- Повреждение соединительных кабелей.

2. Система телеметрии.

- Неисправность модуля передачи данных
- Повреждение антенны телеметрии
- Нарушение протокола передачи данных
- Сбои в программном обеспечении.

3. Система видеопередачи.

- Выход из строя видеопередатчика
- Повреждение видеокамеры
- Проблемы с питанием системы
- Неправильная настройка каналов.

Методы восстановления систем связи учитывают специфику радиочастотного оборудования:

Технология ремонта и восстановления систем связи:

Восстановление системы управления:

1. Диагностика приемника и проверка его работоспособности;
2. Проверка и восстановление антенны:
 - Измерение характеристик антенны;
 - Ремонт или замена поврежденных элементов;

- Обеспечение правильного расположения антенн;
 - 3. Проверка и восстановление соединительных кабелей:
 1. Поиск обрывов и коротких замыканий
 2. Замена поврежденных кабелей
 3. Восстановление разъемов и соединений.
 - 4. Настройка и проверка системы.
 - 5. Программирование приемника
 - 6. Проверка соответствия каналов управления
 - 7. Тестирование дальности и устойчивости связи.
- Восстановление системы телеметрии:
- 8. Диагностика модуля телеметрии.
 - Проверка электрических параметров
 - Тестирование передачи данных
 - Проверка соответствия протоколов.
 - 9. Ремонт или замена модуля телеметрии
 - 10. Восстановление антенны телеметрии
 - 11. Настройка и тестирование.
 - Программирование параметров передачи
 - Настройка скорости и формата данных
 - Проверка дальности передачи телеметрии.
 - 12. Восстановление системы видеопередачи:
 - 13. Диагностика видеокамеры и передатчика.
 - Проверка качества изображения
 - Измерение выходной мощности передатчика
 - Контроль питания системы.
 - 14. Ремонт или замена неисправных компонентов
 - 15. Выбор оптимального канала и мощности
 - 16. Проверка качества и дальности передачи
 - 17. Устранение помех и наводок.

Для качественного ремонта систем связи требуется специализированное оборудование:

Материалы и инструменты для ремонта систем связи:

- Паяльная станция с регулировкой температуры
- Измерительные приборы (мультиметр, анализатор спектра)
- Антенны различных типов и частотных диапазонов
- Коаксиальные кабели и разъемы
- Экранирующие материалы

- Программаторы для настройки приемников и передатчиков
- Специализированное ПО для диагностики систем связи.

Таблица 20

Диагностика и устранение неисправностей системы связи

Неисправность	Признаки	Метод устранения
Малая дальность связи	Потеря управления на небольшом расстоянии	Проверка и замена антенн, устранение помех
Неустойчивая связь	Периодическая потеря связи, «phantomные» команды	Поиск и устранение источников помех, замена приемника
Отсутствие телеметрии	Нет данных на наземной станции	Проверка модуля телеметрии, восстановление соединений
Помехи в видеосигнале	Шумы, полосы, пропадание изображения	Смена канала передачи, экранирование кабелей, устранение источников помех
Искажение видеосигнала	Нечеткое изображение, искажение цветов	Проверка питания камеры и передатчика, замена видеокамеры
Задержка в управлении	Запаздывание реакции на команды	Проверка настроек приемника, исключение помех

3.3.3. Методы проверки и тестирования после ремонта

Комплексная проверка и тестирование после ремонта обеспечивают возвращение БАС к безопасной эксплуатации:

Основные этапы проверки и тестирования после ремонта:

1. Проверка механической целостности и правильности сборки
2. Контроль электрических параметров всех систем
3. Функциональное тестирование отдельных узлов
4. Комплексное тестирование в статическом режиме
5. Динамическое тестирование в различных режимах



Рис. 18. Типовая схема расположения антенн на БАС

Методология проверки отремонтированных компонентов включает в себя многоуровневый контроль:

Методы проверки отремонтированных компонентов:

1. Проверка механической части:

- Контроль геометрии рамы
- Проверка балансировки пропеллеров
- Тестирование прочности отремонтированных узлов
- Контроль вибраций двигателей.

2. Проверка электрической части:

- Измерение напряжений во всех ключевых точках
- Контроль потребляемого тока в различных режимах
- Проверка работы защитных устройств
- Термография для выявления перегревающихся элементов.

3. Проверка системы управления:

- Тестирование всех каналов управления
- Проверка реакции на команды
- Контроль стабилизации в различных режимах
- Тестирование аварийных режимов (Failsafe).

4. Проверка систем связи:

- Тестирование дальности и надежности радиоуправления
- Контроль качества и дальности передачи телеметрии
- Проверка качества и дальности видеопередачи
- Тестирование работы в условиях радиопомех.

Программа контрольных полетов после ремонта предусматривает поэтапное увеличение сложности испытаний:

Контрольные полеты после ремонта:

- Первый этап — висение на малой высоте:
- Контроль стабильности
- Оценка вибраций
- Проверка адекватности реакции на команды
- Мониторинг температуры компонентов.
- Второй этап — полет на малой высоте с простыми маневрами:
- Проверка управляемости
- Оценка точности позиционирования
- Контроль работы навигационных систем.
- Третий этап — полноценный тестовый полет.
- Тестирование всех режимов полета
- Проверка системы возврата (RTL)
- Контроль времени полета и энергопотребления
- Оценка работы всех подсистем.

Таблица 21

Контрольный лист проверки БАС после ремонта

Система	Параметры для проверки	Критерии исправности
Рама	Отсутствие трещин, люфтов, деформаций	Жесткая конструкция без видимых повреждений

Система	Параметры для проверки	Критерии исправности
Двигатели	Равномерность вращения, отсутствие посторонних шумов	Плавное вращение, отсутствие вибраций и нагрева
ESC	Отсутствие нагрева, правильная реакция на команды	Нормальная температура, плавное управление
Полетный контроллер	Правильная инициализация, работа всех датчиков	Стабильные показания датчиков, корректная ориентация
Система питания	Стабильность напряжения, отсутствие нагрева	Напряжение в пределах нормы, нормальная температура компонентов
Система управления	Правильная реакция на все команды	Четкая, без задержек реакция на управление
Система связи	Дальность и качество связи	Устойчивая связь на заявленной дистанции
Аккумуляторы	Напряжение, баланс ячеек, нагрев под нагрузкой	Равномерный заряд ячеек, отсутствие перегрева

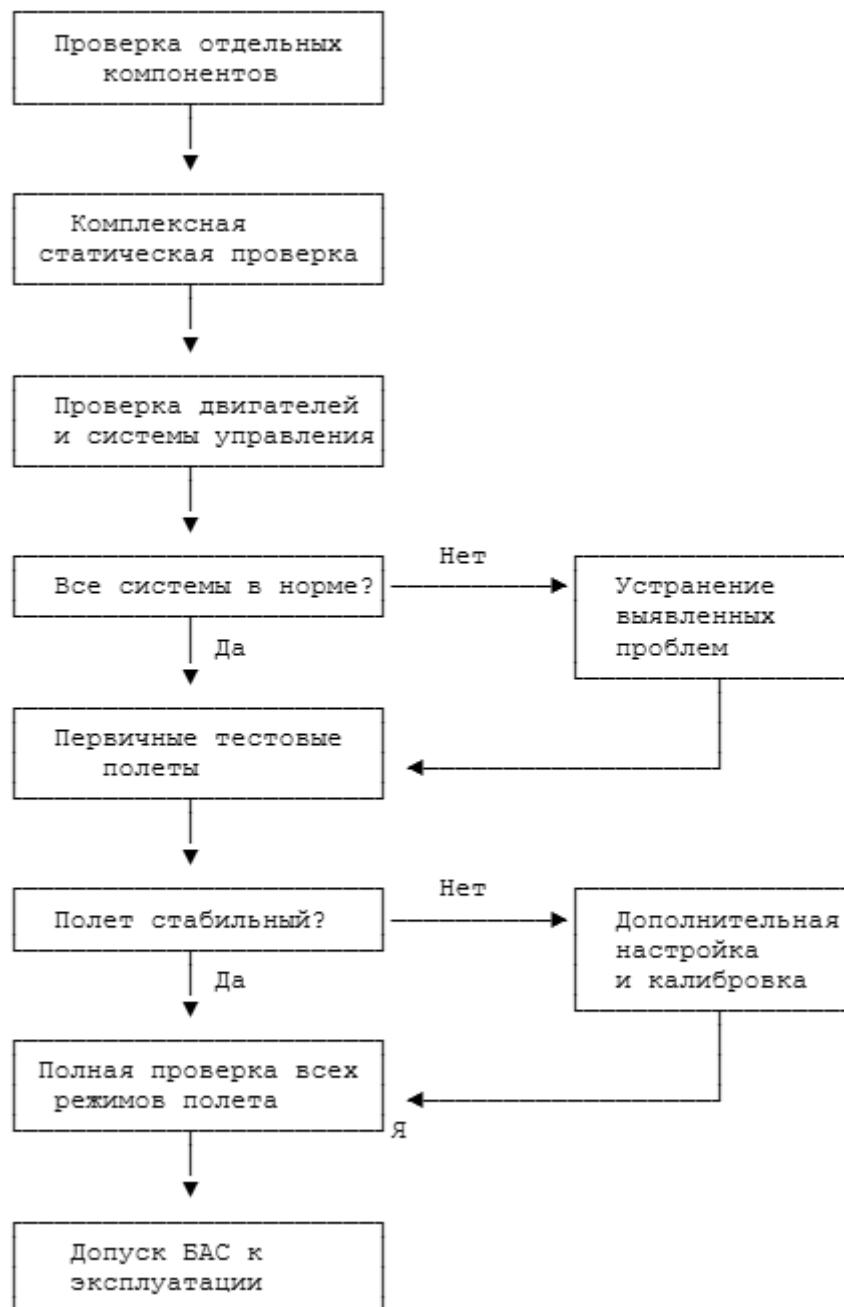


Рис. 19. Алгоритм тестирования БАС после ремонта

Рекомендуемая литература:

1. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Пер. с англ. - М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. - 312 с.
2. Программное обеспечение беспилотных авиационных систем: настройка и обновление / Е.И. Николаев. - М.: Компьютерная литература, 2024. - 220 с.
3. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М., Адамовский В.В., Красноперов Р.А. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. - Уфа: ФОТОН, 2014. - 217 с.

Практика по теме 3

Практическое занятие 3.1

Выполнение текущего ремонта элементов БАС

Цель занятия

Приобретение практических навыков по выполнению текущего ремонта основных элементов мультироторной БАС.

Описание занятия

Данное практическое занятие направлено на формирование у студентов профессиональных компетенций в области выполнения ремонтных работ на компонентах беспилотных авиационных систем. В ходе занятия студенты освоят технологии ремонта различных элементов БАС, начиная от механических компонентов и заканчивая сложными электронными системами. Особое внимание уделяется соблюдению технологических процессов, использованию специализированных инструментов и материалов, а также контролю качества выполненных работ.

Оборудование и материалы

1. Мультироторная БАС или отдельные компоненты с контролируемыми неисправностями

2. Инструменты для ремонта.

- Набор отверток (Phillips, плоские, TORX)
- Набор шестигранных ключей
- Паяльная станция с регулировкой температуры
- Термофен
- Бокорезы, пинцеты, стриппер
- Мультиметр
- Термоклеевой пистолет.

3. Материалы.

- Эпоксидная смола и отвердитель
- Углеткань и стеклоткань
- Провода различного сечения
- Термоусадочная трубка разных диаметров
- Припой, флюс
- Разъемы (силовые, сигнальные)
- Крепежные элементы (винты, гайки, шайбы)
- Пластиковые стяжки.

4. Запасные части.

- Двигатели
- ESC
- Пропеллеры
- Элементы рамы
- Антенны.

5. Средства защиты.

- Защитные очки
- Перчатки
- Антистатический браслет
- Огнеупорный коврик.

Программное обеспечение

1. Mission Planner, QGroundControl или Betaflight Configurator
2. BLHeli Suite или BLHeli_32 Suite
3. Драйверы для подключения полетных контроллеров
4. Программное обеспечение для проверки и тестирования

компонентов.

Задание 1: Ремонт механических компонентов БАС

Описание задания: Первое задание направлено на освоение технологий ремонта механических повреждений БАС. Студенты изучат методы восстановления композитных материалов, освоят техники склеивания и армирования поврежденных участков рамы. В процессе выполнения задания особое внимание уделяется подготовке поверхностей, правильному смешиванию компонентов эпоксидной смолы и соблюдению технологии полимеризации. Студенты также освоят методы замены поврежденных элементов конструкции и восстановления крепежных соединений.

1. Восстановление повреждений рамы.
 - Диагностика трещин и повреждений
 - Подготовка поверхности (зачистка, обезжиривание)
 - Приготовление эпоксидной смолы
 - Нанесение смолы и армирующего материала
 - Фиксация и выдержка до полимеризации
 - Шлифовка и финишная обработка.
2. Замена поврежденных элементов рамы.
 - Демонтаж поврежденного элемента
 - Подбор и подготовка нового элемента

- Установка и фиксация нового элемента
 - Проверка геометрии и прочности соединения.
3. Восстановление крепежных элементов.
- Замена поврежденных винтов и гаек
 - Восстановление резьбовых соединений
 - Фиксация соединений с применением резьбовых фиксаторов.

Задание 2: Ремонт силовой установки

Описание задания: Второе задание посвящено ремонту и замене компонентов силовой установки БАС. Студенты освают процедуры демонтажа и установки электродвигателей, изучат методы диагностики неисправностей силовой установки и научатся правильно подключать электрические соединения. Особое внимание уделяется программированию и настройке регуляторов оборотов, а также проверке направления вращения двигателей. В рамках задания студенты также освают технику балансировки пропеллеров.

1. Замена двигателя.

- Отсоединение электрических соединений
- Демонтаж поврежденного двигателя
- Монтаж нового двигателя на луч рамы
- Подключение электрических соединений
- Проверка направления вращения
- Тестирование работы двигателя.

2. Замена и балансировка пропеллеров.

- Демонтаж поврежденного пропеллера
- Подбор соответствующего нового пропеллера
- Статическая балансировка пропеллера
- Монтаж и фиксация пропеллера на валу двигателя.

3. Ремонт регулятора оборотов (ESC).

- Диагностика неисправности
- Демонтаж неисправного ESC
- Монтаж нового ESC
- Пайка силовых и сигнальных проводов
- Изоляция соединений
- Программирование и настройка нового ESC
- Проверка работоспособности.

Задание 3: Ремонт электронных компонентов и проводки (1.5 часа)

Описание задания: Третье задание направлено на освоение методов ремонта электронных компонентов и восстановления электрических соединений. Студенты изучат технологии пайки различных типов соединений, освоят методы замены разъемов и восстановления поврежденной проводки. Особое внимание уделяется соблюдению полярности при пайке, правильному использованию изоляционных материалов и проверке качества электрических соединений. В рамках задания также рассматриваются вопросы восстановления антенн систем связи.

1. Восстановление электрических соединений.

- Диагностика повреждений проводки
- Пайка разорванных соединений
- Замена поврежденных проводов
- Изоляция соединений термоусадочной трубкой
- Фиксация проводов на раме.

2. Ремонт или замена разъемов.

- Демонтаж поврежденных разъемов
- Подготовка новых разъемов
- Пайка с соблюдением полярности
- Изоляция и механическая защита.

3. Восстановление антенн систем связи.

- Диагностика повреждений антенн
- Замена поврежденных антенн
- Правильное расположение и фиксация
- Проверка качества сигнала.

Задание 4: Проверка отремонтированных элементов и тестирование

Описание задания: Заключительное задание направлено на формирование навыков контроля качества выполненных ремонтных работ и оформления технической документации. Студенты освоят методы визуального контроля, электрических измерений и функционального тестирования отремонтированных компонентов. Особое внимание уделяется проверке работоспособности БАС в различных режимах и оценке качества выполненного ремонта. В рамках задания студенты также изучат требования к ведению технической документации по ремонтным работам.

1. Визуальный контроль качества ремонта.

- Проверка всех соединений

- Контроль надежности крепления компонентов
- Оценка качества пайки.

2. Электрические измерения.

- Проверка отсутствия коротких замыканий
- Измерение сопротивления цепей
- Контроль напряжений в ключевых точках.

3. Функциональное тестирование.

- Подключение к компьютеру
- Проверка работы двигателей
- Тестирование каналов управления
- Проверка системы связи.

4. Оформление документации по выполненному ремонту.

- Заполнение журнала учета ремонтных работ
- Составление отчета о проведенном ремонте
- Формирование рекомендаций по дальнейшей эксплуатации.

Контрольные вопросы:

1. Какие основные этапы включает в себя текущий ремонт БАС?
2. Какие материалы используются для восстановления рамы из композитных материалов?
3. Какие меры предосторожности необходимо соблюдать при пайке электронных компонентов?
4. Как правильно выполнить замену двигателя с сохранением направления вращения?
5. Какие параметры проверяются при замене регулятора оборотов (ESC)?
6. Как выполняется балансировка пропеллеров и почему это важно?
7. Какие методы используются для восстановления поврежденных соединений проводов?
8. Какие типы разъемов применяются в силовых и сигнальных цепях БАС?
9. Каким образом проверяется работоспособность отремонтированной БАС?
10. Какие записи необходимо вести при выполнении ремонтных работ?

Критерии оценки

- Правильность выбора методов ремонта;

- Качество выполнения ремонтных работ;
- Соблюдение технологии ремонта;
- Правильность использования инструментов и материалов;
- Функциональность отремонтированных компонентов;
- Соблюдение правил техники безопасности;
- Полнота и правильность оформления документации.

Практическое занятие 3.2: Выполнение контрольно-восстановительного ремонта БАС

Цель занятия

Приобретение практических навыков выполнения комплексного контрольно-восстановительного ремонта мультироторной БАС после серьезных повреждений.

Описание занятия

Практическое занятие представляет собой комплексную работу по восстановлению БАС после значительных повреждений, имитирующих реальные аварийные ситуации. Студенты освоят полный цикл контрольно-восстановительного ремонта, начиная от диагностики повреждений и составления плана работ до финального тестирования восстановленной системы. В процессе выполнения задания особое внимание уделяется системному подходу к ремонту, взаимосвязи различных компонентов БАС и обеспечению высокого качества восстановительных работ. Студенты также освоят процедуры контрольных испытаний и приемки БАС после ремонта.

Оборудование и материалы

1. Поврежденная мультироторная БАС (после имитации аварии)
2. Инструменты.
 - Полный набор отверток и ключей
 - Паяльная станция с регулируемой температурой
 - Термовоздушная паяльная станция
 - Приспособления для демонтажа SMD-компонентов
 - Бокорезы, пинцеты, кусачки
 - Цифровой мультиметр
 - Осциллограф
 - Набор для ремонта композитных материалов
 - Измерительные инструменты (штангенциркуль, линейка)
 - Струбцины и зажимы.

3. Материалы.

- Эпоксидная смола и отвердитель
- Углеткань различной плотности
- Стеклоткань
- Припой различных типов
- Флюс
- Термоусадочная трубка
- Изоляционные материалы
- Монтажные провода различного сечения
- Клеи (цианоакрилатный, эпоксидный).

4. Запасные части.

- Комплект двигателей
- Комплект регуляторов ESC
- Полетный контроллер
- Система распределения питания
- Приемник управления
- Модуль телеметрии
- Рама или элементы рамы
- Крепежные элементы
- Пропеллеры.

5. Средства защиты.

- Защитные очки
- Перчатки
- Респиратор
- Огнеупорный коврик.

Программное обеспечение

1. Mission Planner, QGroundControl или Betaflight Configurator
2. BLHeli Suite или BLHeli_32 Suite
3. Программное обеспечение для анализа логов полета
4. Специализированное ПО для диагностики компонентов
5. Драйверы для подключения полетного контроллера
6. CAD-программа для проектирования деталей (при необходимости).

Задание 1: Комплексная диагностика и составление плана ремонта (1 час)

Описание задания: Первое задание направлено на формирование навыков системного анализа технического состояния поврежденной БАС. Студенты изучат методы комплексной диагностики, включающей визуальный осмотр, электрические измерения и программную диагностику. Особое внимание уделяется документированию всех обнаруженных повреждений, оценке их взаимосвязи и определению оптимальной последовательности ремонтных работ. В рамках задания студенты освоят принципы составления дефектных ведомостей и планирования ремонтных работ с учетом имеющихся ресурсов.

1. Визуальный осмотр и документирование повреждений.
 - Фотографирование БАС со всех сторон
 - Составление перечня видимых повреждений
 - Оценка состояния рамы и механических компонентов.
2. Электрическая диагностика.
 - Проверка целостности проводки
 - Измерение сопротивления обмоток двигателей
 - Проверка электронных компонентов на наличие короткого замыкания
 - Диагностика аккумуляторной батареи.
3. Диагностика электронных компонентов.
 - Подключение к компьютеру (если возможно)
 - Считывание данных с полетного контроллера
 - Анализ логов последнего полета.
4. Составление плана ремонта.
 - Определение компонентов, требующих замены
 - Определение компонентов, подлежащих ремонту
 - Составление последовательности работ
 - Расчет необходимых материалов и запчастей.

Задание 2: Восстановление рамы и механических компонентов (1.5 часа)

Описание задания: Второе задание посвящено освоению технологий восстановления механических компонентов БАС после серьезных повреждений. Студенты изучат методы полной разборки поврежденной конструкции, оценки состояния отдельных компонентов и принятия решений о возможности их восстановления. Особое внимание уделяется технологиям ремонта композитных материалов, включая склеивание трещин, усиление ослабленных участков и полную замену поврежденных элементов. Студенты также освоят методы контроля качества восстановительных работ.

1. Полная разборка БАС.

- Демонтаж всех компонентов с рамы
- Сортировка и оценка состояния каждого компонента
- Очистка деталей от загрязнений и остатков клея.

2. Ремонт рамы.

- Выравнивание деформированных элементов
- Склейивание трещин и разломов
- Усиление ослабленных участков дополнительными слоями композита
- Замена не подлежащих восстановлению элементов.

3. Восстановление крепежных элементов.

- Замена поврежденных винтов, гаек, шайб
- Восстановление резьбовых соединений
- Усиление мест креплений.

Задание 3: Ремонт и замена электронных компонентов (1.5 часа)

Описание задания: Третье задание направлено на освоение методов восстановления сложных электронных систем БАС. Студенты изучат процедуры замены полетных контроллеров, систем распределения питания и других электронных компонентов. Особое внимание уделяется правильному подключению всех интерфейсов, соблюдению полярности при пайке силовых цепей и восстановлению системы управления. В рамках задания студенты также освоят процедуры программирования и настройки замененных компонентов.

1. Восстановление системы питания.

- Замена поврежденной платы распределения питания
- Пайка силовых проводов с соблюдением полярности
- Установка защитных элементов (предохранителей, диодов).

2. Замена или ремонт полетного контроллера.

- Демонтаж поврежденного контроллера
- Установка нового контроллера с правильной ориентацией
- Подключение всех периферийных устройств.

3. Восстановление системы управления.

- Замена поврежденного приемника
- Настройка соответствия каналов управления
- Проверка работоспособности всех каналов.

4. Восстановление системы телеметрии.

- Установка модуля телеметрии
- Подключение к полетному контроллеру

- Настройка параметров передачи данных.

Задание 4: Восстановление силовой установки (1 час)

Описание задания: Четвертое задание посвящено восстановлению силовой установки БАС, включая замену двигателей, регуляторов оборотов и пропеллеров. Студенты изучат критерии оценки состояния компонентов силовой установки и методы их замены. Особое внимание уделяется правильному подключению двигателей к регуляторам, программированию ESC и обеспечению правильного направления вращения всех двигателей. В рамках задания студенты также освают процедуры балансировки пропеллеров и проверки синхронности работы силовой установки.

1. Замена двигателей.

- Установка новых двигателей на лучи рамы
- Правильное подключение к ESC с учетом направления вращения
- Фиксация проводов.

2. Замена регуляторов оборотов.

- Монтаж ESC на раму
- Подключение силовых проводов
- Подключение сигнальных проводов к полетному контроллеру
- Программирование и настройка ESC.

3. Установка и балансировка пропеллеров.

- Подбор пропеллеров соответствующего размера и направления
- Статическая балансировка
- Установка на двигатели с соблюдением направления вращения.

Задание 5: Сборка, настройка и тестирование (1 час)

Описание задания: Заключительное задание направлено на финальную сборку восстановленной БАС, ее настройку и комплексное тестирование. Студенты освают процедуры окончательной сборки с проверкой всех соединений, калибровки датчиков полетного контроллера и настройки параметров полета. Особое внимание уделяется проведению комплексных функциональных тестов, имитирующих реальные условия эксплуатации. В рамках задания студенты также изучат требования к оформлению документации по контрольно-восстановительному ремонту.

1. Окончательная сборка БАС.

- Проверка правильности всех соединений
- Фиксация проводов и кабелей

- Установка защитных элементов.
2. Настройка и калибровка.
- Подключение к компьютеру
 - Прошивка или обновление ПО полетного контроллера
 - Калибровка акселерометра и гироскопа
 - Калибровка компаса
 - Настройка PID-регулятора
 - Настройка режимов полета и функций безопасности.

3. Комплексное тестирование.

 - Проверка реакции на команды управления
 - Тестирование всех двигателей
 - Проверка систем связи и телеметрии
 - Тестирование аварийных режимов (Failsafe).

4. Оформление документации.

 - Составление подробного отчета о выполненных работах
 - Заполнение формуляра БАС
 - Подготовка рекомендаций по дальнейшей эксплуатации.

Контрольные вопросы:

1. Какие этапы включает в себя контрольно-восстановительный ремонт БАС?
2. Чем отличается контрольно-восстановительный ремонт от текущего ремонта?
3. Какие методы используются для усиления поврежденных элементов композитной рамы?
4. Как правильно проводить полную разборку поврежденной БАС?
5. Какие компоненты требуют обязательной замены после серьезной аварии БАС?
6. Каким образом проверяется геометрия рамы после восстановления?
7. Какие калибровки необходимо выполнить после замены полетного контроллера?
8. Как настроить направление вращения двигателей при полной замене силовой установки?
9. Какие тесты должны быть проведены перед первым полетом после восстановления?

10. Какую документацию необходимо оформить по результатам контрольно-восстановительного ремонта?

Критерии оценки

- Качество диагностики и правильность составления плана ремонта
- Правильность выбора методов восстановления компонентов
- Качество выполнения ремонтных работ
- Правильность сборки и настройки БАС
- Функциональность восстановленной БАС
- Соблюдение технологии выполнения работ
- Соблюдение правил техники безопасности
- Полнота и качество оформления документации.

ТЕМА 4: ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС

Лекция 4.1: ВИДЫ И РЕГЛАМЕНТЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ БАС

План лекции:

1. Основные понятия и определения технического обслуживания
2. Классификация видов технического обслуживания
3. Регламенты и нормативная база ТО
4. Система планово-предупредительного обслуживания
5. Документооборот при техническом обслуживании.

4.1.1 Основные понятия и определения

Техническое обслуживание (ТО) – комплекс операций или операция по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

Работоспособность – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Исправность – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Основные цели технического обслуживания:

1. Поддержание БАС в исправном и работоспособном состоянии
2. Обеспечение безопасности полетов
3. Предупреждение отказов и неисправностей
4. Увеличение ресурса и срока службы
5. Снижение эксплуатационных расходов.

СИСТЕМА ТО БАС		
ПЛАНИРОВАНИЕ	ВЫПОЛНЕНИЕ	КОНТРОЛЬ
<ul style="list-style-type: none">• Планы-графики• Ресурсы• Материалы	<ul style="list-style-type: none">• Операции ТО• Профилактика• Регулировки	<ul style="list-style-type: none">• Проверки• Испытания• Приемка

Рис. 20. Структура системы технического обслуживания:

4.1.2 Классификация видов технического обслуживания

По периодичности выполнения

1. Ежедневное техническое обслуживание (ETO)

Определение: Комплекс работ, выполняемых перед каждым полетом для обеспечения готовности БАС к выполнению полетного задания.

Состав работ ЕТО:

- Внешний осмотр БАС
- Проверка крепления компонентов
- Контроль заряда аккумуляторной батареи
- Проверка работоспособности органов управления
- Контроль функционирования бортовых систем.

Продолжительность: 10-15 минут

Исполнитель: Оператор БАС

2. Техническое обслуживание № 1 (ТО-1)

Определение: Плановое обслуживание, выполняемое через установленную наработку для поддержания исправности БАС.

Периодичность: после каждого 10 часов налета или 30 дней эксплуатации

Продолжительность: 1-2 часа

Исполнитель: Техник-наладчик БАС

3. Техническое обслуживание № 2 (ТО-2)

Определение: Углубленное плановое обслуживание с частичной разборкой и проверкой внутренних систем.

Периодичность: после каждого 50 часов налета или 6 месяцев эксплуатации

Продолжительность: 4-6 часов

Исполнитель: Бригада специалистов

Таблица 22

Сравнение видов планового ТО

Параметр	ETO	ТО-1	ТО-2
Периодичность	Каждый полет	10 ч / 30 дней	50 ч / 6 мес
Длительность	10-15 мин	1-2 часа	4-6 часов
Объем работ	Внешний осмотр	Проверка систем	Частичная разборка
Квалификация	Оператор	Техник	Специалист
Документация	Журнал полетов	Карта ТО-1	Карта ТО-2

По характеру выполняемых работ

1. Профилактическое ТО

- Предупреждение возникновения неисправностей
- Плановая замена расходных материалов
- Калибровка и настройка систем.

2. Корректирующее ТО

- Устранение выявленных неисправностей
- Регулировка и настройка после ремонта
- Восстановление эксплуатационных характеристик.

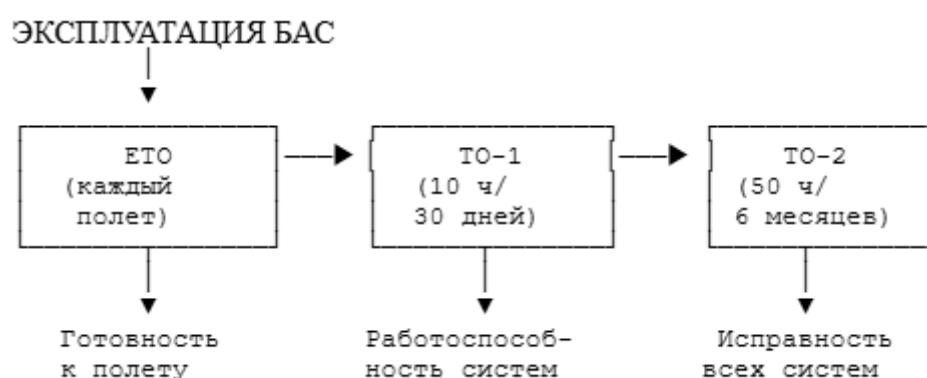


Рис. 21. Взаимосвязь видов ТО

4.1.3 Регламенты и нормативная база технического обслуживания

Нормативные документы

1. Федеральные документы:

- ФАП-128 «Техническое обслуживание»
- ФАП-373 «Требования к эксплуатации БАС»
- Приказы Минтранса России по БАС.

2. Отраслевые стандарты:

- ГОСТ Р 58880-2020 «Системы беспилотные авиационные»
- ГОСТ Р 58729-2019 «Эксплуатационная документация БАС»
- ОСТ 1 00013-85 «Техническое обслуживание авиационной техники».

3. Международные стандарты:

- ICAO Doc 10019 "Manual on RPAS"
- ASTM F3269-17 "Standard Practice for UAS"
- ISO 21384 серия стандартов по БАС.

Структура регламента технического обслуживания

Регламент ТО - документ, устанавливающий:

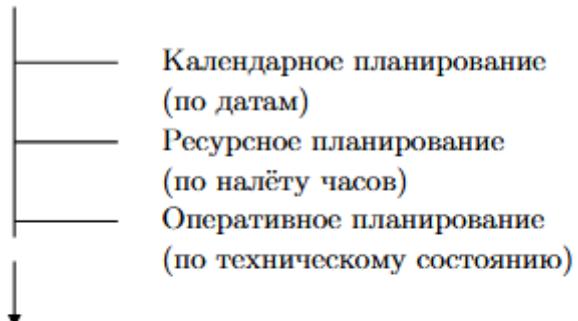
- Перечень работ для каждого вида ТО
- Периодичность выполнения
- Технологию выполнения операций
- Требования к квалификации исполнителей
- Необходимое оборудование и инструменты.

Таблица 23

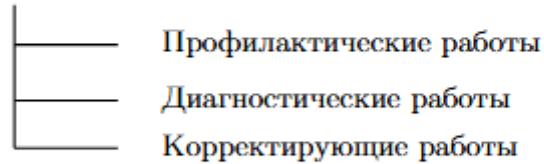
Структура регламента ТО БАС

Раздел	Содержание	Ответственный
1. Общие положения	Область применения, термины	Главный инженер
2. Виды и периодичность ТО	Календарные и ресурсные нормы	Служба ТО
3. Технология выполнения	Последовательность операций	Старший техник
4. Контроль качества	Методы проверки, критерии	ОТК
5. Документирование	Формы отчетности	Диспетчер ТО

ПЛАНИРОВАНИЕ ТО



ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ТО



КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

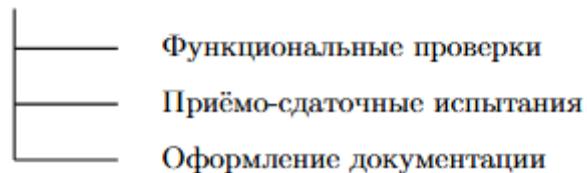


Рис. 22. Система планово-предупредительного обслуживания

4.1.4 Система планово-предупредительного обслуживания

Принципы построения системы ППО

1. Принцип плановости

- Все виды ТО выполняются по заранее составленному плану
- Планирование ведется на год, квартал, месяц
- Учитывается сезонность эксплуатации.

2. Принцип предупредительности

- Работы ТО выполняются до наступления предельного состояния
- Используются статистические данные по надежности
- Применяется техническое диагностирование.

3. Принцип комплексности

- Одновременное обслуживание всех систем БАС
- Координация различных видов ТО
- Учет взаимосвязи между системами

Таблица 24

Типовые межремонтные ресурсы элементов БАС

Элемент	Ресурс, часы	Критерий замены
Двигатели BLDC	200-500	Износ подшипников
Пропеллеры	50-100	Трещины, дисбаланс
ESC	300-800	Деградация транзисторов
Аккумуляторы LiPo	200-300 циклов	Потеря емкости >20%
Полетный контроллер	1000-2000	Отказ датчиков
Система подвеса	100-200	Люфт соединений

	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
БАС-01	TO-2			TO-1		TO-1	TO-2		TO-1		TO-1	
БАС-02		TO-1			TO-2		TO-1			TO-2		TO-1
БАС-03	TO-1			TO-2		TO-1		TO-1			TO-2	
...												
Итого		15	8	12	18	10	20	6	9	14	16	7
чел-ч												

Рис. 23. Пример годового плана ТО парка из 10 БАС

4.1.5 Документооборот при техническом обслуживании

Основные документы ТО

1. Планирующие документы:

- Годовой план-график ТО
- Месячные планы ТО
- Недельные задания.

2. Исполнительские документы:

- Карты технологического процесса ТО
- Технологические карты операций
- Инструкции по ТО отдельных систем.

3. Учетные документы:

- Журнал технического обслуживания
- Формуляр БАС
- Карточки учета работ.

4. Отчетные документы:

- Акты выполненных работ ТО
- Ведомости дефектов

- Отчеты о качестве ТО.

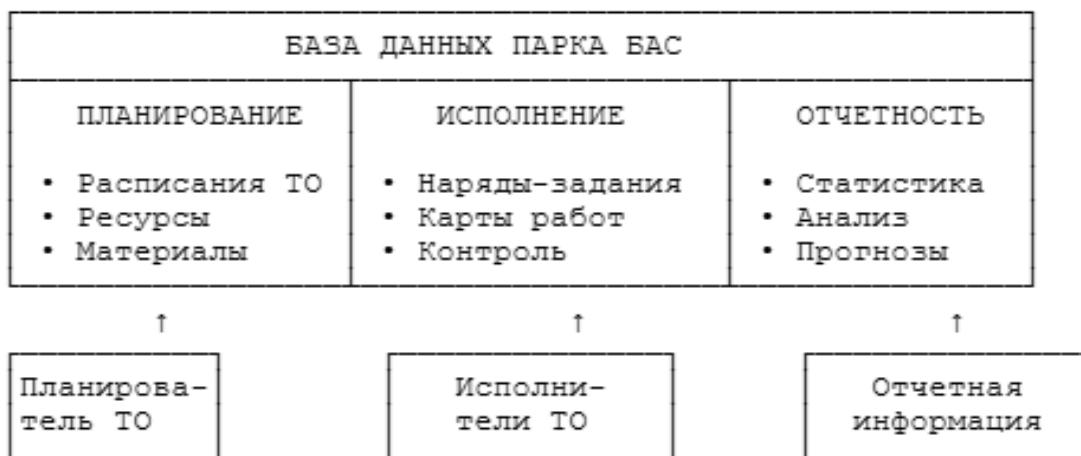


Рис. 24. Структура информационной системы ТО

Методы контроля:

1. Пооперационный контроль

- Проверка каждой выполненной операции
- Контроль соблюдения технологии
- Измерение параметров и характеристик.

2. Приемочный контроль

- Функциональные проверки систем
- Комплексные испытания БАС
- Оценка готовности к эксплуатации.

3. Выборочный контроль

- Статистические методы контроля
- Периодическая проверка качества работ
- Анализ рекламаций и отказов.

Таблица 25

Критерии оценки качества ТО

Показатель	Норматив	Метод контроля
Полнота выполнения операций	100%	Сплошной контроль
Соблюдение технологии	95%	Выборочный контроль

Качество выполнения работ	98%	Инструментальный контроль
Готовность к эксплуатации	100%	Функциональные испытания

Окончание табл. 25

Средства измерений при ТО:

- Универсальные (мультиметры, штангенциркули)
- Специальные (тестеры АКБ, анализаторы вибраций)
- Встроенные (датчики полетного контроллера).

Требования к поверке и калибровке:

- Поверка средств измерений - 1 раз в год
- Калибровка эталонов - 1 раз в 6 месяцев
- Ведение журналов поверки.

Лекция 4.2: Технология выполнения технического обслуживания и обслуживание взлетно-посадочных устройств

План лекции:

Общая технология выполнения технического обслуживания

1. Технологические карты и операционные инструкции
2. Конструкция и типы взлетно-посадочных устройств БАС
3. Технология обслуживания взлетно-посадочных устройств
4. Контроль технического состояния шасси.

4.2.1 Общая технология выполнения технического обслуживания

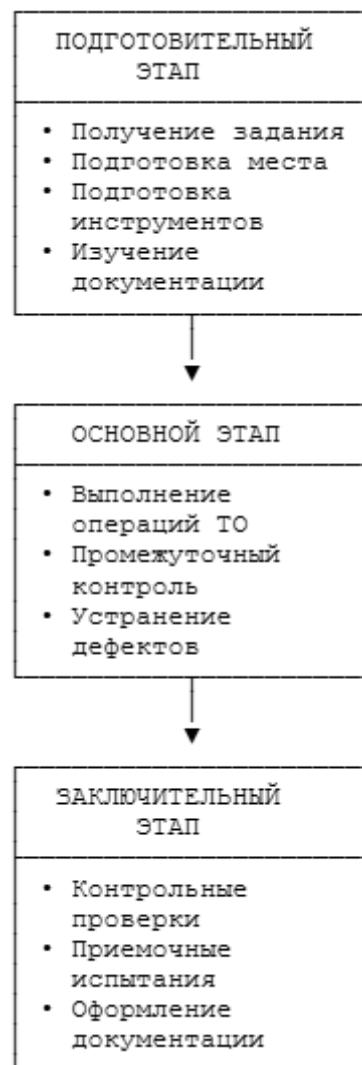


Рис. 25. Общая схема технологического процесса ТО

Технологический процесс ТО - совокупность операций, выполняемых в определенной последовательности для поддержания БАС в исправном состоянии.

Подготовительные операции

Организация рабочего места:

- Выбор помещения с соответствующим микроклиматом
- Обеспечение освещенности (не менее 500 лк)
- Подготовка антистатических покрытий
- Размещение противопожарных средств.

Подготовка БАС к обслуживанию:

- Отключение и извлечение аккумуляторных батарей
- Установка на обслуживающие подставки

- Обеспечение доступа ко всем узлам
- Заземление для работы с электроникой.

Таблица 26

Требования к рабочему месту для ТО БАС

Параметр	Норматив	Контроль
Температура	+18...+25°C	Термометр
Влажность	40-60%	Гигрометр
Освещенность	500-1000 лк	Люксметр
Чистота воздуха	Класс 8 ISO 14644	Счетчик частиц
Электростатика	<100 В	Электростатический вольтметр

Основные технологические операции:

Операции контроля:

- Внешний осмотр
- Измерительный контроль
- Функциональные проверки
- Диагностирование.

Операции обслуживания:

- Очистка и мойка
- Смазка трущихся пар
- Регулировка и настройка
- Замена расходных материалов.

Операции восстановления:

- Затяжка резьбовых соединений
- Устранение мелких дефектов
- Подтяжка соединений
- Восстановление покрытий.

4.2.2 Технологические карты и операционные инструкции

Структура технологической карты ТО

№п/п	Наименование операции	Время, мин	Инструменты	Исполнитель
1	Подготовка БАС к ТО	5	-	Техник
2	Внешний осмотр рамы	10	Лупа	Техник
3	Проверка двигателей	15	Тестер	Техник
4	Контроль пропеллеров	10	Баланс.	Техник
5	Проверка АКБ	20	Тестер	Техник
		АКБ		

Рис. 26. Пример фрагмента технологической карты ТО-1

Технологическая карта - документ, определяющий последовательность и методы выполнения операций ТО.

Операционные инструкции

Структура операционной инструкции:

Общая часть:

- Назначение операции
- Требования безопасности
- Необходимые инструменты и материалы.

Технологическая часть:

- Последовательность действий
- Контрольные параметры
- Критерии качества выполнения.

Контрольная часть:

- Методы проверки качества
- Оформление результатов.

Пример операционной инструкции: ИНСТРУКЦИЯ № ТО-001
«Проверка состояния двигателя по ТО-1»

ПОДГОТОВКА:

- Снять пропеллеры
- Подготовить мультиметр
- Обеспечить доступ к двигателям.

ВЫПОЛНЕНИЕ:

- Измерить сопротивление обмоток (норма: 0.5-2.0 Ом)
- Проверить легкость вращения ротора
- Контролировать отсутствие люфтов

– Прослушать шумы при вращении.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ:

- Сопротивление в норме - «Годен»
- Люфт >0.2 мм - «Требует ремонта»
- Посторонние шумы - «К замене».

4.2.3 Конструкция и типы взлетно-посадочных устройств БАС

Классификация взлетно-посадочных устройств

Взлетно-посадочное устройство (ВПУ) – часть конструкции БАС, предназначенная для взлета, посадки и стоянки на земной поверхности.

Таблица 27

Сравнение типов ВПУ

Тип ВПУ	Преимущества	Недостатки	Применение
Жесткие стойки	Простота, надежность	Аэродинамическое сопротивление	Мультикоптеры
Убираемое шасси	Аэродинамика	Сложность, вес	Самолетные БАС
Поплавковое	Посадка на воду	Большая масса	Морские операции
Лыжное	Зимние условия	Ограниченностя применения	Арктические БАС

Окончание табл. 27

Конструктивные элементы ВПУ

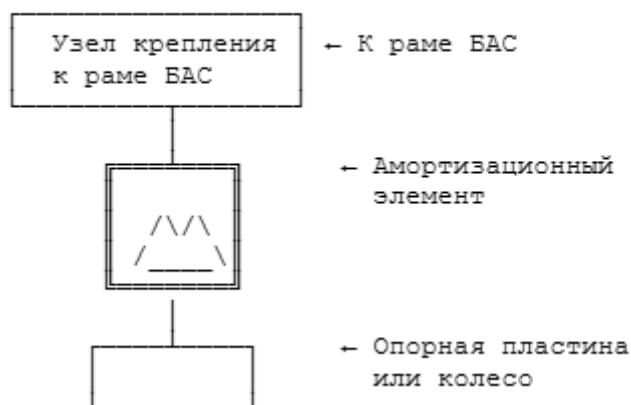


Рис. 27. Типовая конструкция стойки ВПУ

Основные элементы:

Крепежный узел

- Обеспечивает соединение с рамой БАС
- Воспринимает эксплуатационные нагрузки
- Материалы: алюминиевые сплавы, углепластик.

Амортизирующий элемент

- Резиновые втулки
- Пружинные элементы
- Пневматические амортизаторы.

Опорная часть

- Пластины различной формы
- Колеса (для самолетных БАС)
- Поплавки (для гидробАС).

Нагрузки на взлетно-посадочные устройства

Виды нагрузок:

Статические нагрузки

- Вес БАС в состоянии покоя
- Нагрузки от полезной нагрузки
- Ветровые нагрузки при стоянке.

Динамические нагрузки

- Ударные нагрузки при посадке
- Нагрузки при движении по неровной поверхности
- Вибрационные нагрузки от двигателей.

Расчет нагрузок:

Максимальная нагрузка при посадке:

$$P_{max} = n * G * (1 + Ky)$$

где:

- n – коэффициент безопасности (1.5-2.0)
- G – вес БАС (Н)
- Ky – коэффициент динамичности (1.2-1.8).

4.2.4 Технология обслуживания взлетно-посадочных устройств

Операции технического обслуживания ВПУ

1. При ежедневном техническом обслуживании (ЕТО):

- Визуальный осмотр:

- Отсутствие трещин и деформаций
- Состояние лакокрасочного покрытия
- Надежность крепления к раме
- Отсутствие коррозии.
- Функциональные проверки:
 - Устойчивость БАС на опорах
 - Отсутствие качания или люфтов
 - Работоспособность убираемого шасси (если есть).

2. При ТО-1

Детальный осмотр:

Последовательность осмотра стойки ВПУ:

1. Узел крепления к раме → проверка затяжки болтов
2. Стойка → отсутствие трещин и изгибов
3. Амортизатор → состояние резиновых элементов
5. Опорная часть → износ, повреждения
6. Защитные покрытия → целостность

Измерительный контроль:

- Геометрия установки (углы, размеры)
- Усилие затяжки крепежных элементов
- Жесткость амортизирующих элементов.

4. При ТО-2:

Частичная разборка:

- Снятие стоек с рамы БАС
- Разборка амортизирующих узлов
- Дефектация всех элементов.

Восстановительные работы:

- Замена изношенных резиновых элементов
- Восстановление защитных покрытий
- Замена крепежных элементов.

Технологические карты обслуживания ВПУ

Таблица 28

Технологическая карта ТО-1 стоек шасси

№	Операция	Инструмент	Время, мин	Норма/критерий
---	----------	------------	------------	----------------

1	Внешний осмотр	Лупа ×10	5	Отсутствие трещин
2	Проверка крепления	Динамометрический ключ	10	8-12 Н·м
3	Контроль геометрии	Угольник, линейка	15	±2 мм, ±1°
4	Проверка амортизаторов	Нагрузочное устройство	10	50-100 Н/мм
5	Очистка и смазка	Ветошь, смазка	5	-

Специальные операции

Регулировка геометрии шасси:

При неравномерном расположении БАС на опорах необходимо:

- Ослабить крепление регулируемых стоек
- С помощью уровня выставить горизонтальность
- Затянуть крепления с нормированным усилием.

Замена амортизирующих элементов:

Технология замены резиновых втулок:

1. Снятие стойки с БАС
2. Запрессовка старой втулки
3. Очистка посадочного места
4. Запрессовка новой втулки
5. Контроль правильности установки
6. Монтаж стойки на БАС

Восстановление защитных покрытий:

- Механическая очистка поврежденных мест
- Обезжикивание поверхности
- Грунтовка (при необходимости)
- Нанесение защитного покрытия
- Контроль качества покрытия.

4.2.5 Контроль технического состояния взлетно-посадочных устройств

Методы контроля:

Визуально-оптический контроль

Признаки неисправностей:

- Трешины в местах концентрации напряжений
- Коррозия металлических элементов
- Износ опорных поверхностей
- Повреждения амортизирующих элементов.

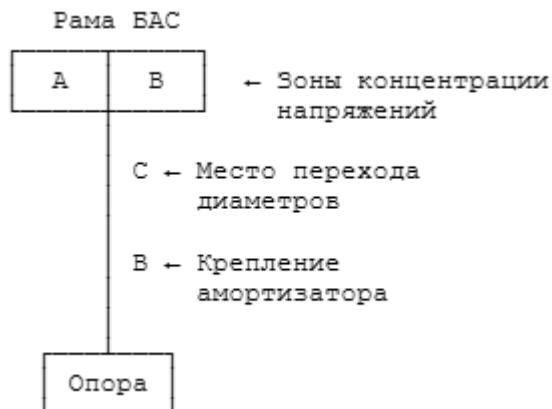


Рис. 28. Типичные места образования трещин в стойках ВПУ

Измерительный контроль:

Контролируемые параметры:

- Геометрические размеры
- Углы установки стоек
- Жесткость амортизаторов
- Моменты затяжки резьбовых соединений.

Таблица 29

Допуски на основные параметры ВПУ

Параметр	Номинал	Допуск	Метод контроля
Высота стойки	150 мм	± 5 мм	Штангенциркуль
Угол наклона	90°	$\pm 2^\circ$	Угломер
Момент затяжки	10 Н·м	± 2 Н·м	Динамометр
Жесткость	75 Н/мм	± 15 Н/мм	Нагружение

Функциональные испытания:

Испытание на статическую прочность:

- Нагружение стойки расчетной нагрузкой

- Выдержка под нагрузкой 60 секунд
- Контроль отсутствия остаточных деформаций.

Испытание амортизационных свойств:

- Приложение циклических нагрузок
- Измерение характеристик демпфирования
- Оценка работоспособности амортизаторов.

Дефектация и бракованные признаки

Критерии браковки ВПУ:

1. Недопустимые дефекты (категория «К замене»):

- Сквозные трещины любых размеров
- Остаточные деформации $>5\%$ от номинала
- Коррозионные повреждения $>30\%$ сечения
- Разрушение амортизирующих элементов.

2. Условно-допустимые дефекты (категория «Ограничено к эксплуатации»):

- Поверхностные трещины длиной <10 мм
- Местная коррозия $<10\%$ сечения
- Износ опорных поверхностей $<20\%$
- Ослабление резьбовых соединений.

3. Допустимые дефекты (категория «Годен»):

- Потертости лакокрасочного покрытия
- Незначительные вмятины глубиной <1 мм
- Равномерный износ в пределах допуска.

Ремонт взлетно-посадочных устройств

Виды ремонта ВПУ:

1. Восстановительный ремонт:

- Заварка трещин (для стальных деталей)
- Восстановление резьбы вставками
- Восстановление геометрии правкой.

2. Профилактический ремонт:

- Замена быстроизнашивающихся элементов
- Восстановление защитных покрытий
- Модернизация узлов крепления.

Практические задания:

Задание 1: Расчет нагрузки на стойку ВПУ

Дано:

- Масса БАС: 3.5 кг
- Количество стоек: 4
- Коэффициент динамичности: 1.5
- Коэффициент безопасности: 2.0.

Найти: Максимальная нагрузка на одну стойку

Решение:

$$P_{max} = (m * g * Ky * n) / N_{\text{стоец}}$$
$$P_{max} = (3.5 * 9.81 * 1.5 * 2.0) / 4 = 25.7 \text{ Н}$$

Задание 2: Составление технологической карты

Задание: Составить технологическую карту ТО-1 для убираемого шасси

Основные операции:

7. Проверка работы механизма уборки-выпуска
8. Контроль концевых выключателей
9. Смазка направляющих
10. Проверка герметичности гидросистемы
11. Функциональная проверка.

Контрольные вопросы:

1. Каковы основные этапы технологического процесса ТО?
2. Что включает в себя технологическая карта ТО?
3. Какие требования предъявляются к рабочему месту для ТО БАС?
4. Классифицируйте взлетно-посадочные устройства БАС
5. Какие нагрузки действуют на ВПУ при эксплуатации?
6. Опишите технологию проверки ВПУ при ТО-1
7. Какие методы применяются для контроля технического состояния ВПУ?
8. Перечислите критерии браковки элементов ВПУ
9. Какие виды ремонта применяются для восстановления ВПУ?
10. Как рассчитать максимальную нагрузку на стойку ВПУ?

Лекция 4.3: особенности технического обслуживания различных элементов БАС

План лекции:

1. Техническое обслуживание силовой установки
2. Обслуживание системы управления и навигации
3. Техническое обслуживание системы электропитания
4. Обслуживание корпуса и конструктивных элементов
5. Особенности ТО специального оборудования.

4.3.1 Техническое обслуживание силовой установки

Структура силовой установки БАС

Силовая установка включает:

- Электродвигатели (BLDC)
- Регуляторы скорости (ESC)
- Воздушные винты (пропеллеры)
- Система креплений.

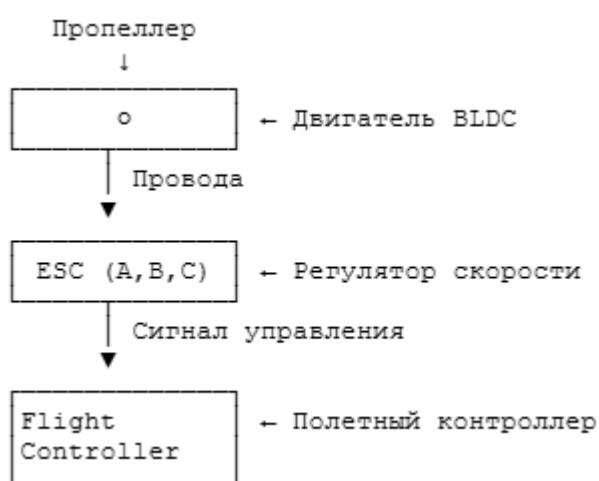


Рис. 29. Компоненты силовой установки

Техническое обслуживание электродвигателей

Ежедневное ТО (ETO):

Внешний осмотр:

- Целостность корпуса и крепления
- Отсутствие загрязнений и посторонних предметов
- Состояние проводов и разъемов
- Отсутствие следов перегрева.

Функциональная проверка:

- Легкость вращения ротора вручную
 - Отсутствие заеданий и люфтов
 - Равномерность хода при вращении.

ТО-1 электродвигателей:

Таблица 30

Технологическая карта ТО-1 двигателей

№	Операция	Инструмент	Норма	Время
1	Измерение сопротивления обмоток	Мультиметр	0.1-2.0 Ом	5 мин
2	Проверка сопротивления изоляции	Мегаомметр	>1 МОм	3 мин
3	Контроль люфта подшипников	Индикатор	<0.05 мм	5 мин
4	Проверка балансировки	Стенд	<0.1 г·см	10 мин
5	Очистка и смазка	Растворитель, смазка	-	7 мин

Диагностические параметры:

Измерение сопротивления обмоток:

Схема подключения мультиметра:



Hopma: R1 ≈ R2 ≈ R3 ($\pm 10\%$)

Разброс между фазами <0.1 Ом

ТО-2 электродвигателей:

Полная разборка и дефектация:

- Снятие ротора и статора
 - Контроль состояния подшипников
 - Проверка магнитов на сколы и трещины
 - Измерение воздушного зазора.

Восстановительные работы:

- Замена подшипников
- Балансировка ротора
- Восстановление обмоток (при необходимости)
- Сборка с контролем параметров.

Техническое обслуживание ESC

Электронный регулятор скорости (ESC) - устройство для управления бесколлекторными двигателями.

Проверки при ЕТО:

- Надежность крепления к раме
- Состояние разъемов и проводов
- Отсутствие следов перегрева
- Работоспособность светодиодной индикации.

Диагностика при ТО-1:

Таблица 31

Параметры диагностики ESC

Параметр	Норма	Метод измерения
Входное напряжение	14.8-25.2 В	Мультиметр
Выходное напряжение	0-Uвх	Осциллограф
Ток покоя	<50 мА	Токовые клещи
Температура корпуса	<70°C	Термометр
Частота ШИМ	8-32 кГц	Частотомер

Программная диагностика ESC:

Подключение через USB-программатор:

ESC → USB-Link → Компьютер → BLHeli Suite

Проверяемые параметры:

- Версия прошивки
- Настройки тайминга
- История ошибок
- Статистика работы

Калибровка ESC:

Процедура калибровки диапазона ШИМ:

1. Подключить ESC к приемнику
2. Установить максимальный газ на передатчике

3. Подать питание на ESC (звуковой сигнал)
4. Установить минимальный газ (подтверждающий сигнал)
5. Проверить плавность управления.

Техническое обслуживание пропеллеров

Ежедневный контроль:

- Отсутствие трещин и сколов
- Правильность установки (направление вращения)
- Надежность крепления
- Отсутствие деформаций.

Проверка балансировки:



Рис. 30. Схема балансировочного стенда:

Методы балансировки:

- Удаление материала с тяжелой стороны
- Добавление балансировочных грузиков
- Контроль после каждой коррекции.

Таблица 32

Критерии оценки состояния пропеллеров

Дефект	Допустимо	Ограничено	К замене
Сколы на кромке	<1 мм	1-3 мм	>3 мм
Трещины	Нет	Поверхностные <5 мм	Сквозные
Дисбаланс	<0.1 г·см	0.1-0.5 г·см	>0.5 г·см
Деформация	Нет	<2° угла	>2° угла

4.3.2 Обслуживание системы управления и навигации

Система управления включает:

- Полетный контроллер (Flight Controller)
- Инерциальный измерительный блок (IMU)
- Приемник радиоуправления
- GPS/ГЛОНАСС модуль
- Барометрический датчик
- Магнитометр (компас).

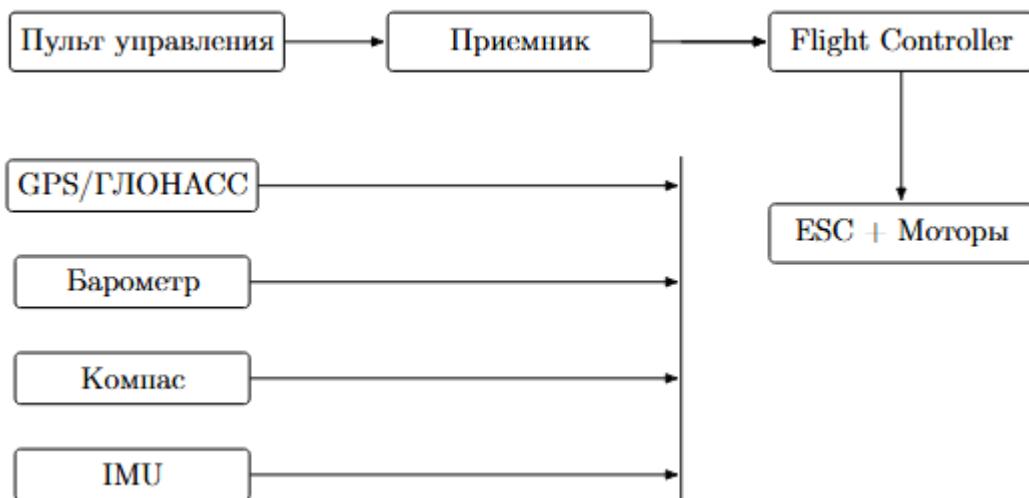


Рис. 31. Структурная схема системы управления

Техническое обслуживание полетного контроллера

Проверки при ЕТО:

- Индикация статуса (светодиоды)
- Качество GPS-сигнала
- Инициализация датчиков
- Отклик на команды управления.

Диагностика при ТО-1:

Программная диагностика через GCS:

Параметры для контроля:

- Версия прошивки
- Статус датчиков IMU
- Качество GPS (HDOP, количество спутников)
- Калибровка компаса
- Настройки PID-регуляторов
- Журнал ошибок.

Аппаратная диагностика:

- Напряжение питания контроллера
- Температура процессора
- Целостность разъемов и проводов
- Качество антенных соединений.

Калибровка датчиков

Процедура калибровки IMU:

1. Размещение БАС на ровной горизонтальной поверхности
2. Запуск процедуры калибровки акселерометра
3. Поочередные повороты на каждую грань (6 положений)
4. Сохранение калибровочных данных
5. Проверка стабильности показаний.

Калибровка компаса:

Процедура «восьмерки»:

1. Поднять БАС на 1 м от земли
2. Медленно вращать в горизонтальной плоскости (360°)
3. Наклонить на 45° и повторить вращение
4. Перевернуть и повторить процедуру
6. Проверить отклонение $<5^\circ$

Обслуживание навигационной системы

GPS/ГЛОНАСС модуль.

Таблица 33

Параметры GPS для контроля

Параметр	Норма	Критерий качества
Количество спутников	>6	Хорошо >8
HDOP	<2.0	Отлично <1.0
Время захвата	<60 сек	Быстро <30 сек
Точность	<3 м	Высокая <1 м

Барометрический датчик:

- Калибровка на уровне моря
- Проверка линейности в диапазоне высот
- Контроль температурной компенсации

- Защита от влаги и загрязнений.

Система радиоуправления:

Тестирование каналов (типичные значения ШИМ):

1. Газ (Throttle): 1000-2000 мкс
2. Элероны (Roll): 1000-2000 мкс
3. Руль высоты (Pitch): 1000-2000 мкс
4. Руль направления (Yaw): 1000-2000 мкс
5. Переключатели режимов: дискретные значения.

4.3.3 Техническое обслуживание системы электропитания

Компоненты системы электропитания

Система электропитания включает:

- Основные аккумуляторные батареи
- Плату распределения питания (PDB)
- Стабилизаторы напряжения (BEC)
- Датчики напряжения и тока
- Силовые разъемы и кабели.

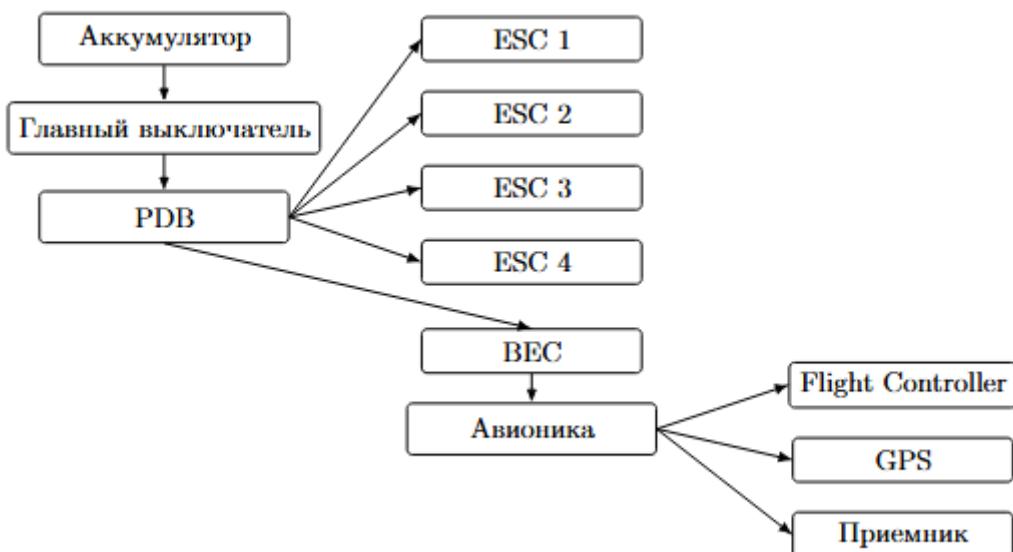


Рис. 32. Схема системы электропитания

Техническое обслуживание аккумуляторов

Ежедневные проверки:

- Внешний осмотр на отсутствие повреждений
- Измерение общего напряжения
- Контроль температуры батареи

- Проверка надежности разъемов.

Таблица 34

Диагностические параметры АКБ

Параметр	Норма LiPo 4S	Метод контроля
Напряжение общее	14.8-16.8 В	Мультиметр
Напряжение ячейки	3.7-4.2 В	Баланс-тестер
Внутреннее сопротивление	<10 мОм	IR-тестер
Разброс напряжений ячеек	<50 мВ	Баланс-тестер
Емкость	>80% номинала	Разрядное устройство

Процедура проверки баланса ячеек:

Подключение баланс-коннектора:

БАС – Тестер

Баланс – Разъем

Разъем – JST-XH

Контроль показаний:

Cell 1: 4.15V

Cell 2: 4.13V

Cell 3: 4.16V

Cell 4: 4.14V

Delta: 30mV (норма <50mV)

Восстановительное обслуживание АКБ:

- Балансировочная зарядка
- Цикл разряда-заряда для восстановления емкости
- Замена разъемов при повреждении
- Упаковка при вздутии или повреждении.

Обслуживание системы распределения питания

Плата распределения питания (PDB):

Контролируемые параметры:

- Целостность токопроводящих дорожек
- Надежность пайки соединений
- Температура силовых элементов при нагрузке
- Работоспособность встроенных ВЕС.

Таблица 35

Сечения проводов для различных токов

Ток нагрузки	Сечение провода	Тип разъема
До 30А	2.5 мм ² (14 AWG)	XT30
30-60А	4.0 мм ² (12 AWG)	XT60
60-90А	6.0 мм ² (10 AWG)	XT90
Свыше 90А	10 мм ² (8 AWG)	AS150

Проверка качества соединений:

- Визуальный контроль пайки
- Измерение сопротивления соединений
- Термовизионный контроль под нагрузкой
- Проверка надежности фиксации разъемов.

4.3.4 Обслуживание корпуса и конструктивных элементов

Конструкция рамы БАС

Типы конструкций рам:

1. Цельнолитые рамы (полимеры, композиты)
2. Сборные рамы (алюминий, углепластик)
3. Трубчатые конструкции (углепластиковые трубы)

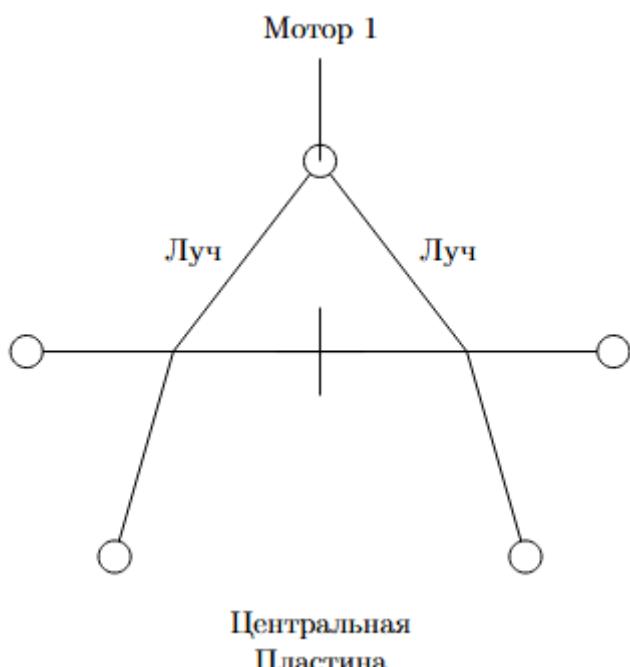


Рис. 33. Типовая X-образная рама квадрокоптера

Техническое обслуживание рамы

Ежедневные проверки:

- Визуальный осмотр на трещины и деформации
- Проверка затяжки резьбовых соединений
- Контроль геометрии (отсутствие перекосов)
- Состояние демпферов вибрации.

Детальная проверка при ТО-1:

Таблица 36

Контролируемые параметры рамы

Элемент	Контроль	Норма	Инструмент
Лучи рамы	Трещины, изгиб	Отсутствие	Лупа $\times 10$
Крепления моторов	Момент затяжки	8-12 Н·м	Динамометр
Центральная пластина	Деформация	<1 мм	Линейка
Демпферы	Жесткость	50-100 Н/мм	Нагружение

Методы неразрушающего контроля:

Ультразвуковая дефектоскопия (для композитных рам):

- Выявление внутренних дефектов
- Контроль расслоений в композите
- Проверка качества склейки.

Магнитопорошковый контроль (для стальных элементов):

- Обнаружение поверхностных трещин
- Контроль сварных швов
- Выявление усталостных повреждений.

Ремонт конструктивных элементов

Ремонт композитных элементов:

Технология ремонта трещин:

Последовательность операций:

1. Очистка и обезжикивание
2. Разделка трещины (V-образная)
3. Подготовка заплатки из стеклоткани

4. Нанесение эпоксидной смолы
5. Наложение заплатки с пропиткой
6. Удаление пузырьков воздуха
7. Полимеризация (24 часа при 20°C)
8. Механическая обработка

Ремонт алюминиевых элементов:

- Заварка трещин аргонодуговой сваркой
- Восстановление резьбовых отверстий
- Правка деформированных элементов
- Защита от коррозии.

4.3.5 Особенности то специального оборудования

Фото-видео оборудование:

- Камеры и подвесы
- Системы стабилизации
- Устройства записи.

Измерительное оборудование:

- Лидарные сканеры
- Мультиспектральные камеры
- Тепловизоры.

Грузовое оборудование:

- Грузозахватные устройства
- Системы сброса
- Транспортные контейнеры.

Обслуживание подвесов камер

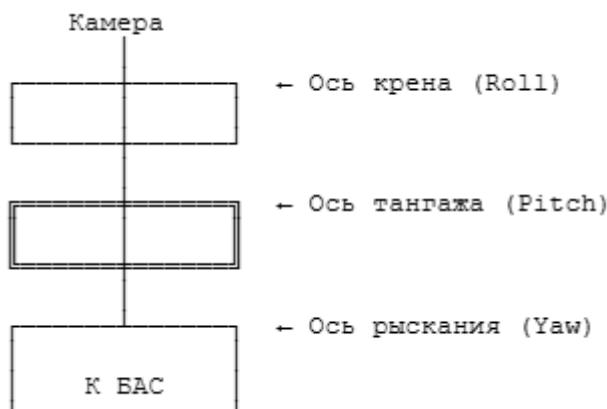


Рис. 34. Трехосевой стабилизированный подвес

Техническое обслуживание подвеса

Механическая часть:

- Смазка подшипников качения
- Проверка люфтов в соединениях
- Контроль балансировки камеры
- Калибровка углов поворота.

Электронная часть:

- Настройка параметров стабилизации
- Калибровка гироскопических датчиков
- Проверка моторов подвеса
- Диагностика контроллера подвеса.

Таблица 37

Параметры настройки подвеса

Параметр	Норма	Назначение
Stiffness	40-80	Жесткость стабилизации
Filter	5-15	Фильтрация вибраций
Speed	50-150	Скорость отработки
Deadband	2-10	Зона нечувствительности

Обслуживание лидарных систем

Компоненты лидарной системы:

- Лазерный излучатель
- Приемник отраженного сигнала
- Система сканирования
- Блок обработки данных.

Особенности ТО лидаров

Оптическая система:

- Очистка линз и зеркал
- Проверка юстировки
- Контроль мощности лазера
- Калибровка дальномера.

Механическая система:

- Смазка подшипников сканера
- Контроль точности позиционирования

- Проверка синхронизации
- Балансировка вращающихся частей.

Требования безопасности:

- Работа с лазерным излучением класса 1M-3R
- Использование защитных очков
- Контроль рассеянного излучения
- Соблюдение норм лазерной безопасности.

Обслуживание систем сброса грузов

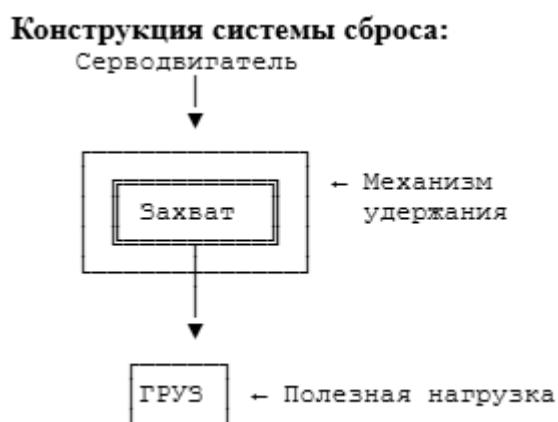


Рис. 35. Электромеханическая система сброса

Техническое обслуживание:

1. Механические проверки:

- Усилие срабатывания механизма
- Время срабатывания (<0.5 сек)
- Надежность удержания груза
- Отсутствие заеданий.

2. Электрические проверки:

- Ток потребления сервопривода
- Качество управляющих сигналов
- Работоспособность концевых выключателей
- Резервирование каналов управления.

Испытания системы сброса:

Программа испытаний:

1. Сброс номинального груза - 10 циклов
2. Сброс груза 1.5×номинал - 5 циклов
3. Проверка ложных срабатываний
4. Испытания в различных положениях БАС

5. Испытания при различных температурах

Практические задания:

Задание 1: Диагностика двигателя

Результаты измерений сопротивления обмоток BLDC:

- Фаза А-В: 0.85 Ом
- Фаза В-С: 0.90 Ом
- Фаза С-А: 0.88 Ом.

Оценка: Норма (разброс <10%, все значения в диапазоне 0.1-2.0 Ом)

Задание 2: Расчет времени ТО

Дано: БАС с 6 моторами, время проверки одного мотора - 5 мин

Время проверки всех моторов: $6 \times 5 = 30$ минут

Задание 3: Планирование замены расходников

Ресурсы компонентов:

- Пропеллеры: 50 часов
- Подшипники моторов: 200 часов
- Аккумуляторы: 300 циклов.

При налете 100 часов в год потребуется:

- Пропеллеры: 2 комплекта
- Подшипники: 0.5 комплекта (через 2 года)
- Аккумуляторы: зависит от интенсивности использования.

Контрольные вопросы:

1. Какие компоненты входят в силовую установку БАС?
2. Опишите процедуру диагностики электродвигателя BLDC
3. Как выполняется калибровка ESC?
4. Какие параметры контролируются при проверке пропеллеров?
5. Перечислите компоненты системы управления БАС
6. Как проводится калибровка IMU и компаса?
7. Какие параметры проверяются при диагностике аккумуляторов?
8. Опишите методы контроля конструктивных элементов рамы
9. Какие особенности имеет ТО специального оборудования?
10. Как рассчитать потребность в запасных частях?

Рекомендуемая литература:

Основная:

1. ФАП-128 «Техническое обслуживание и ремонт авиационной техники»
2. ГОСТ Р 58880-2020 «Системы беспилотные авиационные»
3. Техническая эксплуатация летательных аппаратов / Под ред. Б.В. Зубкова. - М.: Транспорт, 1990.

Дополнительная:

1. Руководства по эксплуатации конкретных моделей БАС (DJI, Freefly, etc.)
2. Справочник по техническому обслуживанию авиационной техники. - М.: Воздушный транспорт, 2018
3. ASTM F3364-19 "Standard Practice for UAS Maintenance"

Нормативные документы:

1. ФАП-373 «Требования к эксплуатантам БАС гражданского назначения»
4. ОСТ 1 00013-85 «Техническое обслуживание авиационной техники»
5. ICAO Doc 10019 "Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)"

Интернет-ресурсы:

6. Официальный сайт Росавиации (favt.ru)
7. Техническая документация производителей БАС
8. Специализированные форумы и базы знаний по БАС

Практика по теме 4

Задание 4.1: Составление плана ТО-1

Условие: БАС DJI Matrice 300 RTK, налет 8 часов за месяц

Требуется: Составить перечень работ ТО-1

Решение:

1. Внешний осмотр и очистка корпуса
2. Проверка крепления двигателей
3. Контроль состояния пропеллеров
4. Проверка аккумуляторной системы
5. Калибровка компаса и IMU
6. Обновление ПО (при необходимости)
7. Функциональные проверки всех систем.

Задание 4.2: Расчет трудозатрат на ТО

Дано:

- Парк: 5 БАС
- Интенсивность: 20 ч/мес на БАС
- Нормы времени: ТО-1 = 2 ч, ТО-2 = 6 ч.

Найти: Месячная трудоемкость ТО

Решение:

- ТО-1: $5 \text{ БАС} \times 2 \text{ раза/мес} \times 2 \text{ ч} = 20 \text{ чел-ч}$
- ТО-2: $1 \text{ БАС} \times 1 \text{ раз/мес} \times 6 \text{ ч} = 6 \text{ чел-ч}$
- Итого: 26 чел-ч/мес.

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение технического обслуживания БАС
2. Перечислите основные виды планового ТО
3. Какие документы регламентируют ТО БАС в РФ?
4. В чем заключается принцип предупредительности ТО?
5. Какие документы составляют основу планирования ТО?
6. Как осуществляется контроль качества ТО?
7. Какие ресурсные показатели используются для планирования ?

ТЕМА 5: ОБСЛУЖИВАНИЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ И НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Лекция 5.1: Типы аккумуляторных батарей, применяемых в БАС

План лекции:

1. Основные типы аккумуляторных технологий
2. Литий-полимерные (LiPo) аккумуляторы
3. Литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы
4. Специализированные типы аккумуляторов
5. Сравнительный анализ и области применения.

5.1.1 Основы аккумуляторных технологий

Аккумуляторная батарея - химический источник тока многоразового действия, основанный на обратимости внутренних химических процессов, что обеспечивает его многократное циклическое использование для накопления энергии и автономного электропитания.

Основные характеристики аккумуляторов:

Электрические параметры:

- Емкость (C) - количество электричества, отдаваемое аккумулятором при разряде от полного заряда до допустимого минимума ($\text{mA}\cdot\text{ч}$)
- Номинальное напряжение ($U_{\text{ном}}$) - среднее напряжение при нормальном разряде (В)
- Энергия (W) - произведение емкости на напряжение ($\text{Вт}\cdot\text{ч}$).

Эксплуатационные параметры:[FF2]

- C-rate - скорость заряда/разряда, выраженная в долях емкости ($1\text{C} = \text{разряд за 1 час}$)

Циклический ресурс - количество циклов заряда-разряда до снижения емкости на 20%

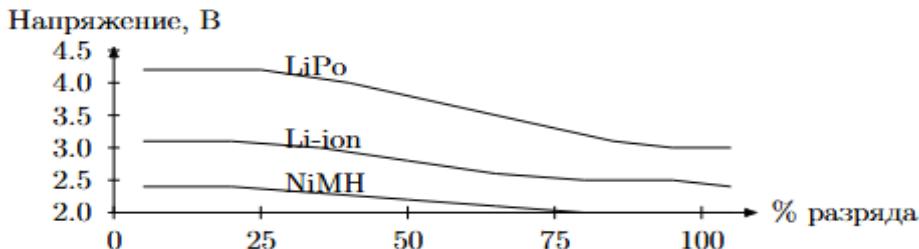


Рис. 36. Сравнение разрядных характеристик различных типов АКБ

Саморазряд - потеря заряда при хранении без нагрузки (%/месяц).

Принципы работы литиевых аккумуляторов

Электрохимические процессы:

При разряде:

- Анод: $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + e^-$
- Катод: $\text{Li}^+ + e^- + \text{CoO}_2 \rightarrow \text{LiCoO}_2$.

При заряде: Обратная реакция

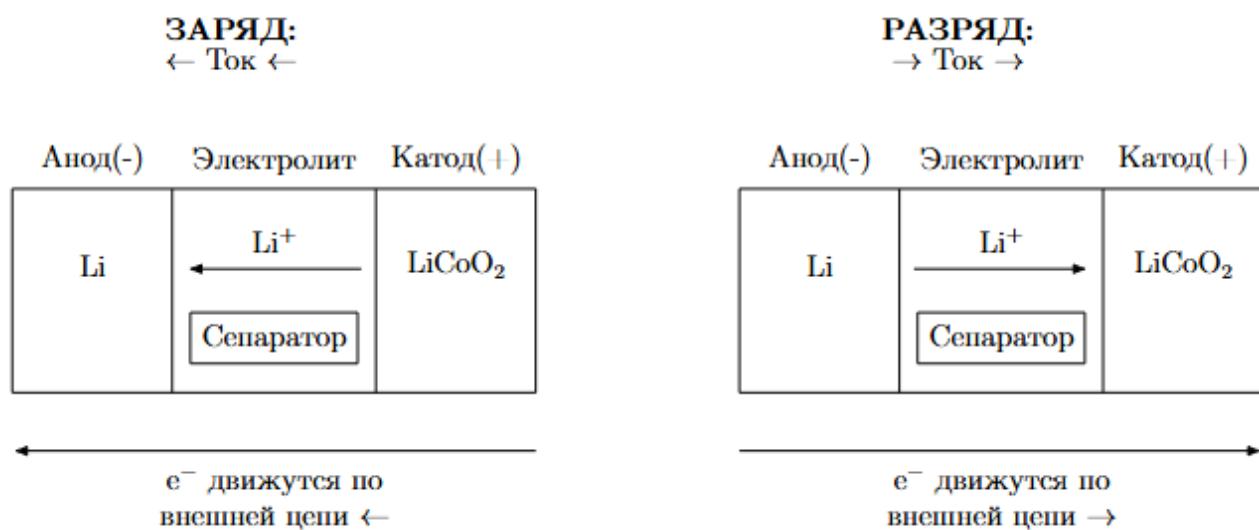


Рис. 37. Принцип работы литиевого аккумулятора:

Основные материалы электродов:

Таблица 38

Материалы электродов литиевых аккумуляторов

Катодный материал	Формула	Напряжение, В	Удельная энергия, Вт·ч/кг
Кобальт лития	LiCoO ₂	3.7	150-200
Марганец лития	LiMn ₂ O ₄	3.7	100-150
Железо-фосфат лития	LiFePO ₄	3.2	90-120
Никель-кобальт-алюминий	LiNiCoAlO ₂	3.7	200-260

5.1.2 Литий-полимерные (LiPo) аккумуляторы

Определение: LiPo аккумулятор - разновидность литий-ионного аккумулятора, в которой в качестве электролита используется полимерная композиция.

Конструктивные особенности:

- Мягкий алюминированный корпус
- Полимерный гелевый электролит
- Отсутствие металлического корпуса
- Плоская форм-фактор.

Преимущества LiPo для БАС:

1. Высокая удельная энергия - 150-200 Вт·ч/кг
2. Высокий ток разряда - до 50C для гоночных моделей
3. Низкий вес - на 20-30% легче Li-ion аналогов
4. Гибкость форм-фактора - возможность изготовления любой формы
5. Низкое внутреннее сопротивление - 1-5 мОм на ячейку.

Недостатки:

1. Низкий циклический ресурс - 200-300 циклов
2. Чувствительность к перезаряду - риск возгорания
3. Деградация при хранении - потеря емкости 20% в год
4. Узкий температурный диапазон зарядки - 0...+45°C.

Маркировка LiPo аккумуляторов

TATTU R-LINE 1550mAh 14.8V 95C 4S1P

TATTU – производитель, R-LINE – серия (гоночная), 1550mAh – емкость, 14.8V – номинальное напряжение ($4 \times 3.7\text{V}$), 95C – максимальный ток разряда, 4S1P – конфигурация (4 серии, 1 параллель)

Стандартные конфигурации:

- 3S - 11.1В (мини-дроны)
- 4S - 14.8В (средние БАС)
- 6S - 22.2В (большие БАС)
- 12S - 44.4В (профессиональные БАС).

Расчет максимального тока разряда:

$$L_{max} = C * C_{rate} = 1.55 \text{ Aч} * 95\text{C} = 147.25 \text{ A}$$

Конструктивные варианты LiPo

Стандартные мягкие батареи:

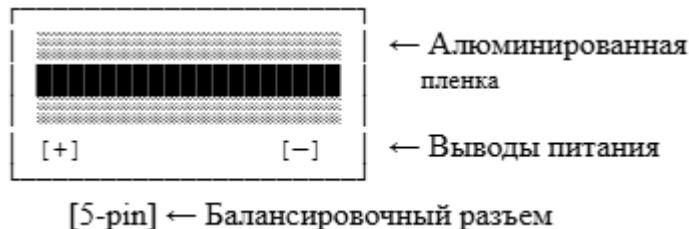


Рис. 38. Схема устройства стандартной мягкой батареи

Твердокорпусные (Hardcase) батареи:

- Пластиковый или карбоновый корпус
- Повышенная защита от повреждений
- Стандартизованные размеры
- Встроенные системы защиты.

Интеллектуальные батареи:

- Встроенная BMS (Battery Management System)
- Автоматический контроль заряда и разряда
- Защита от перегрева и переразряда
- Беспроводной мониторинг состояния.

Специальные типы LiPo

LiHV (High Voltage) аккумуляторы:

- Максимальное напряжение заряда: 4.35В на ячейку
- Увеличенная емкость на 10-15%
- Требуют специальных зарядных устройств.

Графеновые LiPo:

- Добавки графена в электроды
- Повышенная теплопроводность
- Увеличенный ресурс (до 500 циклов)
- Более быстрая зарядка.

5.1.3 Литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы

Определение: Li-ion аккумулятор - тип электрохимического источника тока, в котором носителем заряда является ион лития, перемещающийся между отрицательным и положительным электродами.

Конструктивные особенности:

- Жесткий металлический или пластиковый корпус
- Жидкий органический электролит

- Встроенные системы защиты (PCB)
- Стандартные типоразмеры (18650, 21700, 26650).

Таблица 39

Сравнение форм-факторов Li-ion аккумуляторов

Типоразмер	Диаметр×Длина, мм	Типичная емкость, мАч	Макс. ток, А
18650	18×65	2500-3500	10-20
21700	21×70	4000-5000	15-30
26650	26×65	5000-6000	20-40
32650	32×65	6000-7000	30-60

Преимущества Li-ion для БАС

Высокий циклический ресурс:

- 500-1000 циклов до снижения емкости на 20%
- Более стабильная деградация
- Экономическая эффективность для коммерческого использования.

Безопасность:

- Встроенные системы защиты (PCB/BMS)
- Металлический корпус предотвращает механические повреждения
- Меньший риск теплового разгона.

Стабильность параметров:

- Низкий саморазряд (2-5% в месяц)
- Стабильное напряжение при разряде
- Менее критичны к температурным условиям.

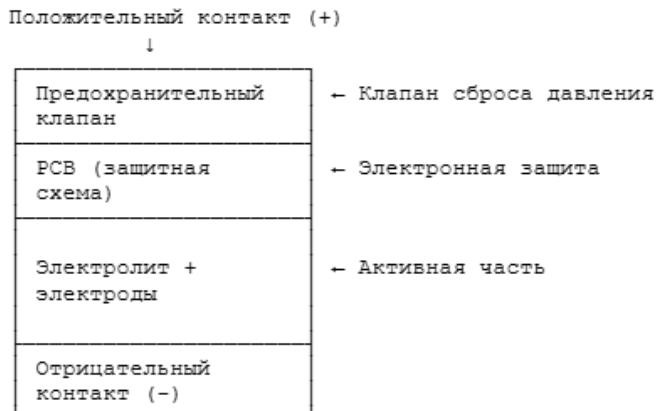
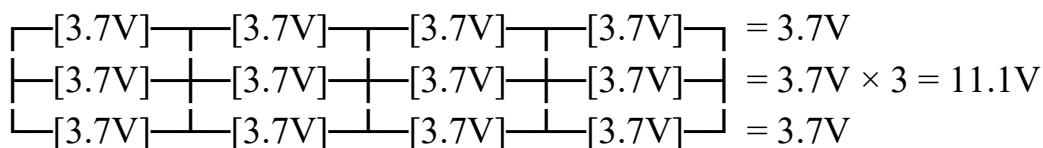


Рис. 39. Конструкция Li-ion аккумулятора 18650

Сборки Li-ion для БАС

Параллельное соединение (увеличение емкости):

3S4P сборка (3 серии, 4 параллели):



Емкость: $4 \times$ номинальная емкость элемента

Последовательное соединение (увеличение напряжения):

$$- 3S = 3 \times 3.7V = 11.1V$$

$$- 6S = 6 \times 3.7V = 22.2V$$

$$- 12S = 12 \times 3.7V = 44.4V.$$

BMS (Battery Management System)

Таблица 40

Основные функции систем управления батареями

Функция	Назначение	Параметры
Балансировка ячеек	Выравнивание напряжений	<50 мВ разброс
Защита от перезаряда	Отключение при 4.2В/ячейку	Точность ± 50 мВ
Защита от переразряда	Отключение при 2.5В/ячейку	Гистерезис 100 мВ
Защита от перегрева	Отключение при $+60^{\circ}C$	NTC-датчики
Ограничение тока	Защита от КЗ	Время отклика <1 мс



Рис. 40. Схема BMS для многоэлементной батареи

5.1.4 Специализированные типы аккумуляторов

Литий-железо-фосфатные (LiFePO₄) аккумуляторы

Определение: LiFePO₄ - тип литий-ионного аккумулятора с катодом из фосфата железа-лития, обеспечивающий повышенную безопасность и стабильность.

Преимущества LiFePO₄:

- Высокая термическая стабильность (до +200°C)
- Отсутствие риска теплового разгона
- Долгий срок службы (2000+ циклов)
- Экологическая безопасность.

Недостатки:

- Низкое напряжение (3.2В против 3.7В)
- Меньшая удельная энергия
- Большие габариты и вес.

Применение в БАС:

- Стационарные системы мониторинга
- БАС для работы в агрессивных средах
- Системы, требующие высокой надежности.

Топливные элементы

Определение: Топливный элемент - электрохимическое устройство, преобразующее химическую энергию топлива непосредственно в электрическую энергию.

Типы топливных элементов для БАС:

1. Водородные топливные элементы:

- Время работы: до 2-4 часов
- Удельная энергия: 300-500 Вт·ч/кг
- Время заправки: 2-5 минут.

2. Метанольные топливные элементы:

- Простота заправки
- Работа при отрицательных температурах
- Меньшая удельная мощность.

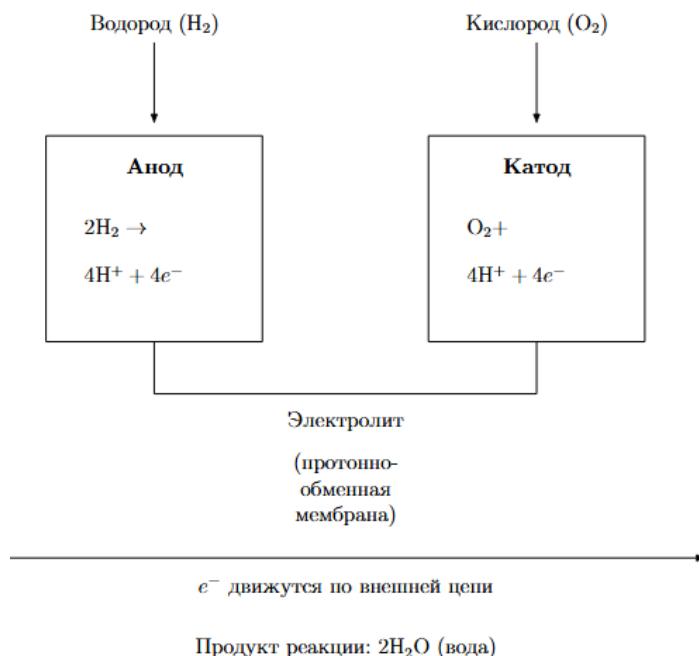


Рис. 41. Принцип работы водородного топливного элемента:

Гибридная энергосистема - комбинация различных типов источников энергии для оптимизации энергообеспечения БАС.

Типичные комбинации:

1. LiPo + топливный элемент - основное питание от ТЭ, LiPo для пиковых нагрузок
2. LiPo + солнечные панели - продление времени полета
3. LiPo + суперконденсаторы - быстрая отдача энергии при маневрах.

Таблица 41

Сравнение энергосистем БАС

Тип системы	Время полета	Время заправки/зарядки	Сложность	Стоимость
LiPo	20-30 мин	30-60 мин	Низкая	Низкая
Li-ion	30-45 мин	60-120 мин	Низкая	Средняя
Топливный элемент	120-240 мин	5-10 мин	Высокая	Высокая
Гибридная	60-180 мин	15-45 мин	Очень высокая	Очень высокая

Окончание табл. 41

Контрольные вопросы:

1. Объясните принцип работы литиевого аккумулятора
2. В чем основные отличия LiPo от Li-ion аккумуляторов?
3. Что означает маркировка "4S2P 5000mAh 30C"?
4. Какие функции выполняет BMS в многоэлементной батарее?
5. Почему LiFePO4 аккумуляторы считаются более безопасными?
6. Каковы преимущества топливных элементов для БАС?
7. Как рассчитать максимальный ток разряда LiPo батареи?
8. Какие материалы используются для катодов литиевых аккумуляторов?
9. В каких случаях применяют гибридные энергосистемы?
10. Как конфигурация ячеек влияет на характеристики батареи?

Лекция 5.2: правила эксплуатации и обслуживания аккумуляторных батарей

План лекции:

1. Общие принципы эксплуатации аккумуляторных батарей
2. Технология зарядки различных типов АКБ
3. Диагностика технического состояния АКБ
4. Техническое обслуживание и профилактика
5. Признаки неисправностей и методы их устранения.

5.2.1 Общие принципы эксплуатации АКБ

Жизненный цикл аккумуляторной батареи включает следующие этапы:

1. Входной контроль при получении
2. Подготовка к первому использованию
3. Эксплуатация с регулярным ТО
4. Контроль деградации параметров
5. Списание и утилизация.

Основные правила эксплуатации

1. Температурные ограничения:

Таблица 42

Температурные режимы эксплуатации АКБ

Режим	LiPo	Li-ion	LiFePO4
Разряд	-20...+60°C	-10...+50°C	-30...+60°C
Заряд	0...+45°C	0...+40°C	0...+45°C
Хранение	-10...+25°C	-20...+25°C	-20...+35°C

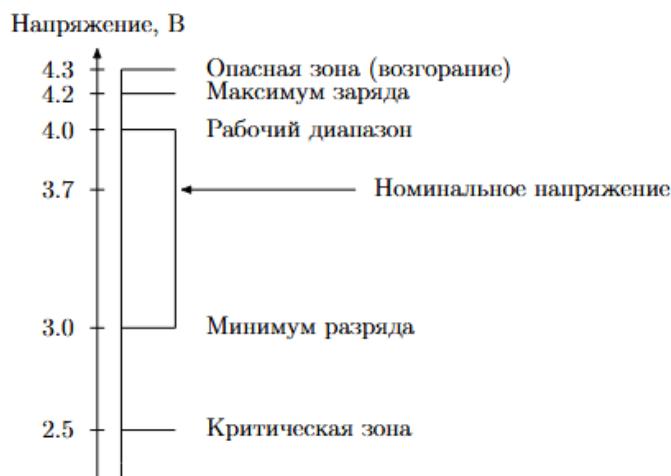


Рис. 42. Характеристические напряжения LiPo элемента:

Токовые ограничения:

- Заряд: обычно 1С, максимум 3С для специальных АКБ
- Разряд: 5-50С в зависимости от типа
- Пиковые токи: до 100С кратковременно (<10 сек).

Подготовка новых аккумуляторов

Входной контроль:

- Внешний осмотр корпуса
- Измерение напряжения ячеек
- Проверка сопротивления изоляции
- Контроль комплектности.

Первичная зарядка:

- Балансировочная зарядка током 0.5С
- Контроль температуры
- Проверка времени зарядки
- Измерение фактической емкости.

Обкатка:

- 3-5 полных циклов заряда-разряда
- Контроль стабилизации параметров
- Проверка баланса ячеек

- Измерение внутреннего сопротивления.

5.2.2 Технология зарядки аккумуляторных батарей

Алгоритмы зарядки литиевых АКБ

Основной алгоритм СС-СВ:

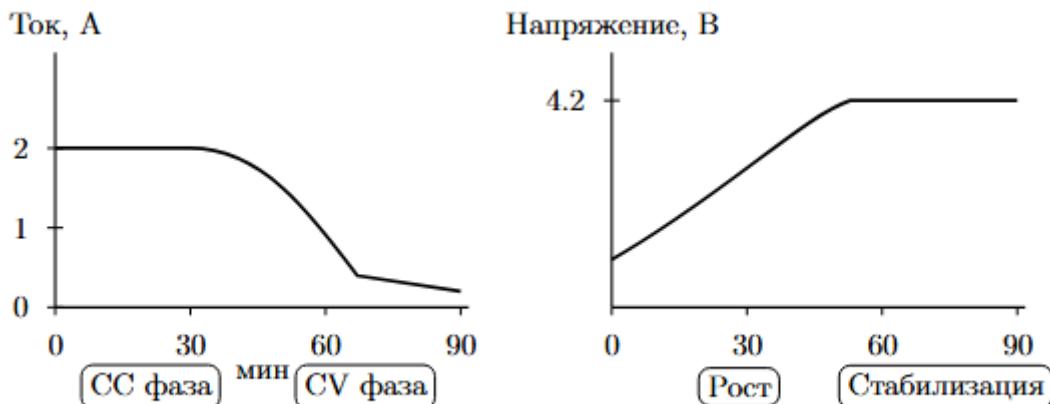


Рис. 43. Профиль зарядки литиевой батареи

Фазы зарядки

СС (Constant Current) - фаза постоянного тока:

- Ток зарядки: 0.5-2.0С (в зависимости от типа АКБ)
- Напряжение растет от 3.0В до 4.2В на ячейку
- Время: 60-80% от общего времени зарядки.

СВ (Constant Voltage) - фаза постоянного напряжения:

- Напряжение: 4.2В на ячейку (± 0.05 В)
- Ток постепенно снижается
- Окончание при токе 0.05-0.1С.

Балансировочная зарядка

Определение: Балансировочная зарядка - процесс выравнивания напряжений отдельных ячеек в многоэлементной батарее.

Методы балансировки

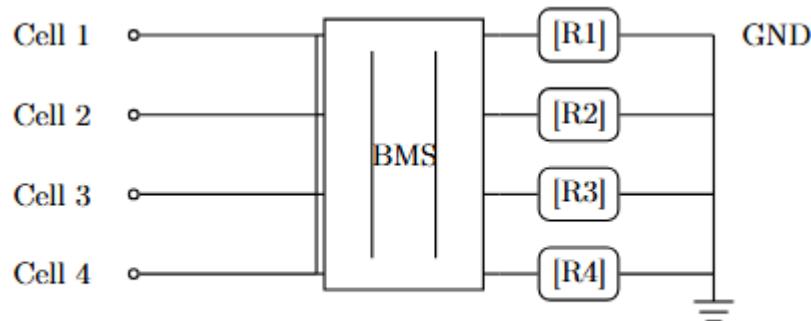
Пассивная балансировка:

- Разряд перезаряженных ячеек через резисторы
- Простота реализации
- Потеря энергии в виде тепла.

Активная балансировка:

- Перекачка энергии между ячейками
- Высокая эффективность

- Сложность схемотехники.



Ключи включаются при $U_{cell} > 4.15 \text{ V}$

Рис. 44. Схема пассивной балансировки

Типы зарядных устройств

Простые зарядники:

- Фиксированные параметры зарядки
- Только основной разъем питания
- Отсутствие балансировки.

Балансировочные зарядники

- Индивидуальный контроль ячеек
- Автоматическая балансировка
- Программируемые параметры.

Профессиональные зарядные станции:

- Многоканальность (4-8 каналов)
- Встроенные БП мощностью 1-3 кВт
- Функции регенерации энергии.

Таблица 43

Характеристики зарядных устройств

Модель	Каналы	Мощность	Поддерживаемые типы	Цена
ISDT Q6 Pro	1	300Вт	LiPo/Li-ion/LiFe	\$100
Junsi iCharger X6	2	800Вт	Все типы	\$300
Hyperion EOS1420i	4	1400Вт	LiPo/Li-ion	\$800

5.2.3 Диагностика технического состояния АКБ

Визуальная диагностика:

- Вздутие корпуса
- Повреждения оболочки
- Состояние разъемов
- Следы перегрева или коррозии.

Электрическая диагностика:

Основные параметры для контроля

Внутреннее сопротивление (IR):

Метод измерения DC:

1. Измерить напряжение разомкнутой цепи (U_0)
2. Подключить нагрузку ($R_{\text{нагр}} = 1 \text{ Ом}$)
3. Измерить напряжение под нагрузкой (U_1)
4. Рассчитать ток: $I = U_1/R_{\text{нагр}}$
5. Вычислить IR: $IR = (U_0 - U_1)/I$

Нормы внутреннего сопротивления:

- LiPo новый: 1-3 мОм на ячейку
- LiPo критический: $>10 \text{ мОм}$ на ячейку
- Li-ion новый: 5-20 мОм на ячейку.

3. Функциональная диагностика:

Тест разрядной емкости:

Процедура:

1. Полная зарядка до 4.2В/ячейку
2. Отдых 30 минут
3. Разряд постоянным током 1С до 3.0В/ячейку
4. Измерение отданной емкости
5. Сравнение с номинальной емкостью

Критерии оценки состояния:

- Емкость $>80\%$ номинала – «Годен»
- Емкость 60-80% номинала – «Ограниченно годен»
- Емкость $<60\%$ номинала – «Не годен».

Автоматизированные системы диагностики

Современные тестеры АКБ:

Таблица 44

Возможности профессиональных тестеров

Функция	ISDT BG-8S	Opus BT-C3100	SkyRC MC3000
Измерение IR	✓	✓	✓
Тест емкости	✓	✓	✓
Балансировка	✓	-	✓
Цикловые тесты	-	✓	✓
База данных	✓	-	✓
Мониторинг температуры	✓	✓	✓

Автоматизированный цикл диагностики:

1. Подключение батареи к тестеру
2. Автоматическое определение конфигурации (3S, 4S, etc.)
3. Измерение начальных параметров
4. Выполнение программируемых тестов
5. Анализ результатов и формирование отчета
6. Рекомендации по дальнейшей эксплуатации.

5.2.4 Техническое обслуживание и профилактика АКБ

Ежедневное ТО (перед каждым использованием)

Контрольный список:

- Внешний осмотр корпуса
- Проверка разъемов и проводов
- Измерение общего напряжения
- Контроль баланса ячеек (если есть индикатор)
- Проверка температуры батареи
- Контроль надежности крепления.

Критерии допуска к работе:

- Отсутствие видимых повреждений
- Напряжение в рабочем диапазоне
- Температура в норме (+15...+35°C)
- Разброс ячеек <100 мВ.

Периодическое ТО (еженедельно или после 10 циклов)

Таблица 45

Программа периодического ТО АКБ

№	Операция	Норматив	Инструмент	Время
1	Измерение напряжения ячеек	3.7 ± 0.2 В	Мультиметр	5 мин
2	Проверка внутреннего сопротивления	<5 мОм	IR-тестер	10 мин
3	Балансировочная зарядка	Разброс <20 мВ	Баланс-зарядник	60 мин
4	Контроль температуры под нагрузкой	$<50^{\circ}\text{C}$	Тепловизор	15 мин
5	Проверка разъемов	Сопротивление <1 мОм	Мультиметр	5 мин

Процедуры профилактического обслуживания

1. Балансировочная зарядка:

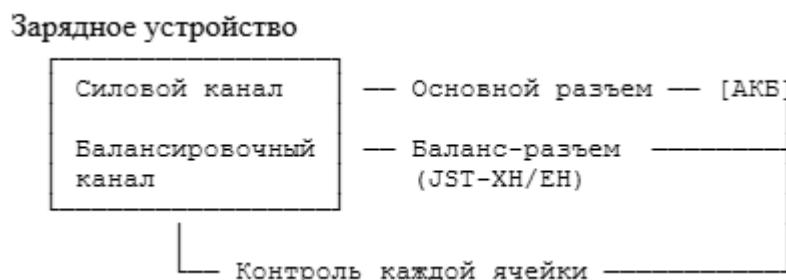


Рис. 45. Схема подключения для балансировочной зарядки

Параметры балансировочной зарядки:

- Ток основной зарядки: 0.5-2.0С
- Ток балансировки: 100-500 мА на ячейку
- Точность поддержания напряжения: ± 0.01 В
- Максимальная разность ячеек: 10 мВ.

Кондиционирование батарей

Цикл глубокого разряда-заряда:

- Программа кондиционирования:

 1. Полная зарядка до 4.2В/ячейку

2. Отдых 2 часа для стабилизации
3. Разряд током 1С до 3.0В/ячейку
4. Отдых 1 час
5. Повторная полная зарядка
6. Измерение восстановленной емкости
 - Эффекты кондиционирования:
1. Восстановление емкости на 5-10%
2. Улучшение баланса ячеек
3. Калибровка встроенной BMS
4. Выявление деградирующих ячеек.

Мониторинг параметров в реальном времени

Телеметрия аккумуляторных систем:

Таблица 46

Параметры мониторинга АКБ в полете

Параметр	Частота обновления	Критические значения
Напряжение общее	10 Гц	<14.0В для 4S
Напряжение ячеек	1 Гц	<3.3В любая ячейка
Ток разряда	10 Гц	>80% от макс.
Температура	0.1 Гц	>50°C
Оставшийся заряд	1 Гц	<20%

Системы интеллектуального мониторинга:

- DJI Intelligent Battery System
- Tattu Smart Battery
- Gens Ace Intelligent Battery.

5.2.5 Признаки неисправностей и методы устранения

Таблица 47

Диагностика электрических неисправностей: Методы восстановления АКБ

Неисправность	Признаки	Причины	Устранение
Потеря емкости	Короткое время работы	Естественное старение	Замена АКБ
Разбаланс ячеек	Разность >200 мВ	Неравномерная деградация	Балансировка или замена
Высокое IR	Падение напряжения под нагрузкой	Деградация электролита	Замена АКБ
Саморазряд	Быстрая потеря заряда при хранении	Внутренние утечки	Замена АКБ

Восстановление глубоко разряженных батарей

Осторожный заряд малым током:

– Алгоритм восстановления:

1. Проверка напряжения (если <2.5В/ячейку - осторожно)
2. Заряд микротоком 0.1С до 3.0В/ячейку
3. Отдых 2 часа для стабилизации
4. Проверка отсутствия нагрева
5. Переход к нормальной зарядке
6. Контрольная проверка емкости

Таблица 48

Процедура принудительной балансировки

Ячейки	Действие	Цель
4.18В	-0.1В	4.08В
4.05В	+0.1В	4.08В
4.20В	-0.15В	4.08В

Ячейки	Действие	Цель
4.12В	+0.05В	4.08В

Окончание табл. 48

Ремонт разъемов и проводов:

- Замена поврежденных разъемов
- Восстановление обрывов в балансировочных проводах
- Усиление мест пайки
- Изоляция восстановленных соединений.

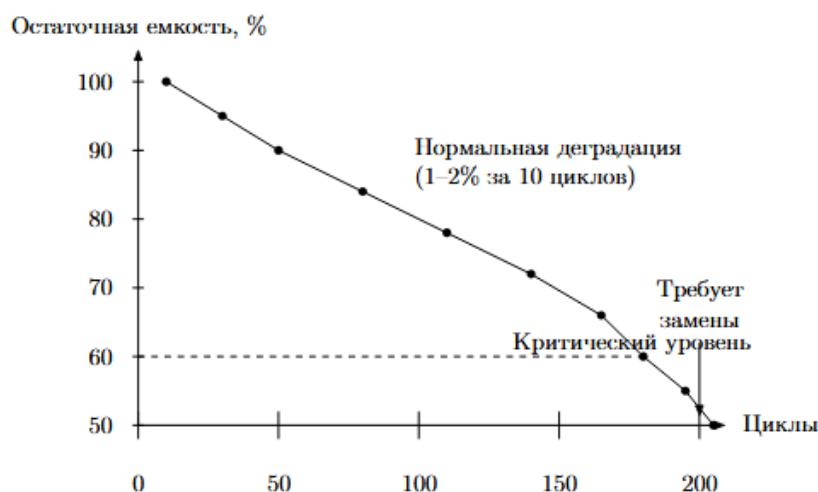


Рис. 46. График деградации емкости во времени

Математическая модель деградации:

$$C(n) = C_0 \times e^{-\alpha n}$$

где:

- $C(n)$ - емкость после n циклов
- C_0 - начальная емкость
- α - коэффициент деградации (0.001-0.005)
- n - количество циклов.

Практические задания:

Задание 1: Расчет параметров зарядки

Дано:

- LiPo 4S 5000mAh 30C
- Зарядный ток: 1C.

Найти:

1. Ток зарядки: $I = 5000\text{mAh} \times 1\text{C} = 5\text{A}$
2. Время зарядки: $t \approx 1.2 \times C/I = 1.2 \text{ часа}$
3. Максимальный ток разряда: $I_{\max} = 5000\text{mAh} \times 30\text{C} = 150\text{A}$.

Задание 2: Оценка состояния по IR

Измеренное внутреннее сопротивление ячеек:

- Cell 1: 3.2 мОм
- Cell 2: 3.8 мОм
- Cell 3: 7.5 мОм ← Деградирующая ячейка
- Cell 4: 3.5 мОм.

Заключение: требуется замена (Cell 3 превышает норму)

Контрольные вопросы:

1. Объясните принцип работы алгоритма CC-CV зарядки
2. Что такое C-rate и как он влияет на время зарядки?
3. Какие методы балансировки ячеек существуют?
4. Как измерить внутреннее сопротивление аккумулятора?
5. Какие параметры контролируются при диагностике АКБ?
6. Опишите процедуру кондиционирования батарей
7. Какие признаки указывают на необходимость замены АКБ?
8. Как выполняется восстановление глубоко разряженных батарей?
9. Что такое предиктивная диагностика АКБ?
10. Какие параметры мониторятся в полете?

Лекция 5.3: наземные источники электропитания

План лекции:

1. Классификация наземных источников питания
2. Стационарные зарядные станции
3. Мобильные источники питания
4. Альтернативные источники энергии
5. Системы управления питанием.

5.3.1 Классификация наземных источников питания

Наземный источник электропитания - техническое устройство или система устройств, предназначенная для обеспечения электрической энергией систем БАС при наземных операциях, зарядке аккумуляторов и проведении технического обслуживания.

Классификация по принципу действия

Сетевые источники питания:

- Подключение к промышленной сети 220В/380В
- Преобразование в требуемые напряжения
- Высокая мощность и стабильность.

Автономные источники питания:

- Генераторы (бензиновые, дизельные, газовые)
- Аккумуляторные системы большой емкости
- Топливные элементы.

Возобновляемые источники:

- Солнечные электростанции
- Ветровые установки
- Гибридные системы.

Таблица 49

Сравнение типов наземных источников питания

Тип источника	Мощность	Автономность	Мобильность	Стоимость
Сетевой БП	0.5-10 кВт	Неограничен ная	Низкая	Низкая
Генератор	1-50 кВт	4-12 часов	Средняя	Средняя
Power Station	0.5-5 кВт	2-8 часов	Высокая	Высокая

Тип источника	Мощность	Автономность	Мобильность	Стоимость
Солнечная станция	0.1-5 кВт	Дневные часы	Низкая	Высокая

Окончание таб. 49

Требования к источникам питания для БАС

Основные технические требования

Качество электроэнергии:

- Стабильность напряжения: $\pm 5\%$
- Коэффициент пульсаций: $< 5\%$
- Частота (для АС): 50 ± 1 Гц
- Коэффициент нелинейных искажений: $< 3\%$.

Защитные функции:

- Защита от короткого замыкания
- Защита от перегрузки
- Тепловая защита
- Защита от обратной полярности.

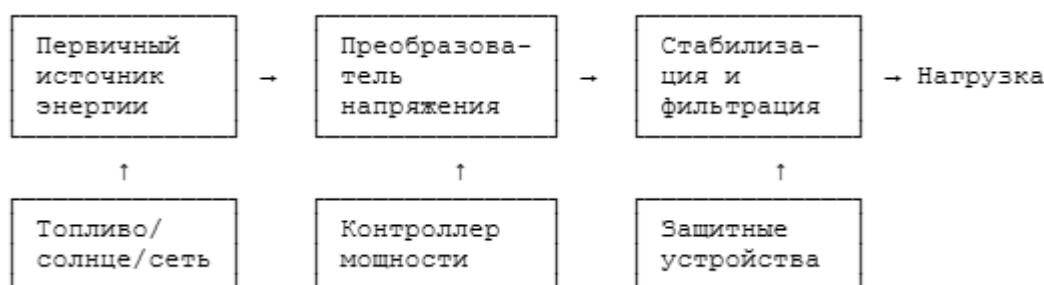


Рис. 47. Структурная схема источника питания для БАС

5.3.2 Стационарные зарядные станции

Определение: Стационарная зарядная станция - стационарный комплекс оборудования для одновременной зарядки множества аккумуляторов БАС с автоматизированным контролем процесса.

Компоненты зарядной станции

Силовая часть:

- Трансформатор питания
- Выпрямительные блоки
- Стабилизаторы напряжения
- Системы охлаждения.

Контрольно-измерительная часть:

- Датчики напряжения и тока

- Температурные датчики
- Системы мониторинга.

Управляющая часть:

- Микропроцессорные контроллеры
- Пользовательский интерфейс
- Системы связи и мониторинга.

Технические характеристики

Таблица 50

Характеристики профессиональных зарядных станций

Модель	Каналы	Мощность	Типы АКБ	Особенности
SkyRC Q200 Quattro	4	4×200Вт	LiPo/Li-ion/NiMH	Встроенный БП
iSDT P30	8	8×300Вт	Все типы	Модульная система
Hyperion EOS1420i	4	1400Вт	LiPo/Li-ion	Регенерация энергии

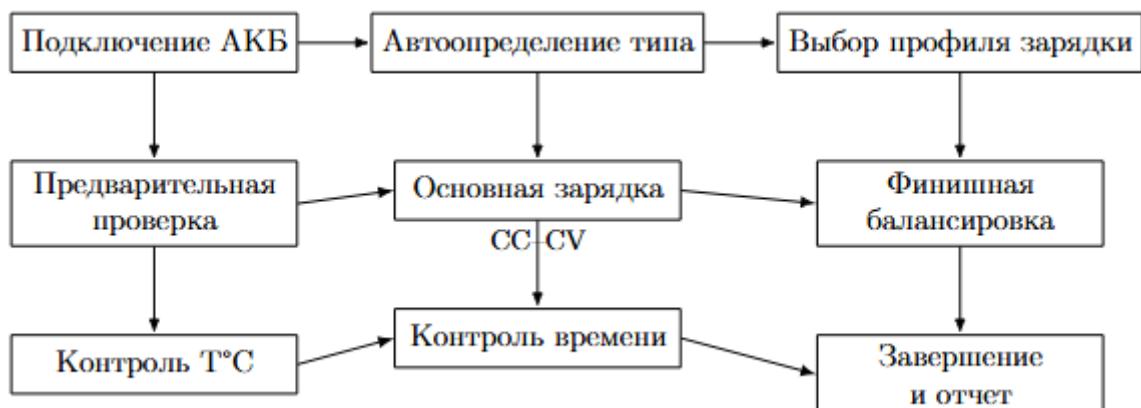


Рис. 48. Алгоритм автоматической зарядки

Системы управления зарядкой

Локальное управление:

- ЖК-дисплей с меню
- Энкодер для навигации
- Кнопки быстрого доступа
- Звуковая сигнализация.

Удаленное управление:

- Wi-Fi/Ethernet подключение
- Веб-интерфейс
- Мобильные приложения
- SCADA-системы для промышленного применения.

5.3.3 Мобильные источники питания

Портативные зарядные устройства

Power Bank для БАС:

Требования к портативным зарядникам:

- Емкость: 50-300 Вт·ч
- Выходная мощность: 100-500 Вт
- Поддержка быстрой зарядки
- Множественные выходы.

Таблица 51

Популярные модели портативных зарядников

Модель	Емкость	Мощность	Выходы	Вес
DJI Battery Station	162 Вт·ч	100Вт	4×USB-C	1.9 кг
EcoFlow River 2 Max	512 Вт·ч	500Вт	AC/DC/USB	6.1 кг
Goal Zero Yeti 400	396 Вт·ч	400Вт	AC/DC/USB	7.7 кг

Классификация генераторов для БАС

По типу двигателя:

- Бензиновые (2-тактные, 4-тактные)
- Дизельные (для длительной работы)
- Газовые (пропан, природный газ).

По технологии генератора:

- Синхронные с постоянными магнитами
- Асинхронные с конденсаторным возбуждением
- Инверторные (чистая синусоида).

Преимущества инверторных генераторов:

- Стабильная частота при переменных оборотах
- Низкий уровень гармоник (<3%)
- Экономичность (на 20-40% меньше расход топлива)

- Низкий уровень шума.
- Солнечные электростанции

Компоненты солнечной электростанции

Солнечные панели:

- Монокристаллические: КПД 20-22%
- Поликристаллические: КПД 15-17%
- Аморфные: КПД 6-8%, работа в пасмурную погоду.

Контроллер заряда:

- PWM-контроллеры (простые)
- MPPT-контроллеры (эффективность на 30% выше).

Буферная аккумуляторная система:

- Свинцово-кислотные (дешевые, тяжелые)
- LiFePO4 (дорогие, легкие, долговечные).

Таблица 52

Расчет солнечной электростанции

Параметр	Малая (500Вт)	Средняя (1500Вт)	Большая (3000Вт)
Панели	4×125Вт	6×250Вт	12×250Вт
Контроллер	MPPT 40A	MPPT 80A	MPPT 150A
АКБ буферные	200A·ч	400A·ч	800A·ч
Инвертор	1000Вт	2000Вт	3000Вт

5.3.4 Системы управления питанием

Интеллектуальные системы распределения питания

Smart Power Distribution:

Функции умного распределения:

- Приоритизация нагрузок
- Ограничение тока по каналам
- Мониторинг энергопотребления
- Автоматическое переключение источников.

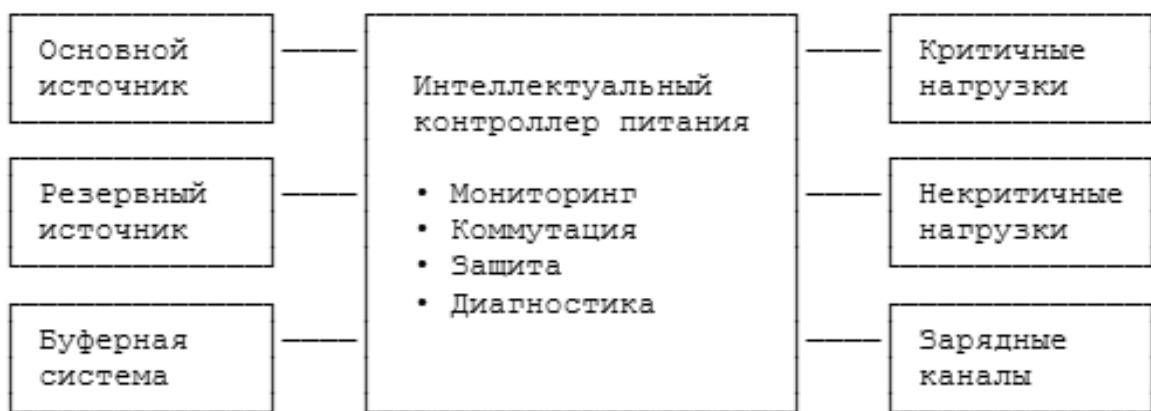


Рис. 49. Схема интеллектуальной системы питания

Протоколы связи и мониторинга

Промышленные протоколы:

- Modbus RTU/TCP для SCADA-систем
- CAN Bus для автомобильных приложений
- Ethernet для TCP/IP сетей.

IoT протоколы:

- MQTT для облачного мониторинга
- LoRaWAN для дальней связи
- Wi-Fi/Bluetooth для местного управления

Пример данных телеметрии энергосистемы:

JSON-структура данных:

```

{
  "timestamp": "2024-10-02T15:30:00Z",
  "power_sources": [
    {
      "id": "main_generator",
      "type": "diesel_gen",
      "power": 2.5,
      "voltage": 230.5,
      "current": 10.87,
      "fuel_level": 85,
      "temperature": 78.5,
      "runtime": 145
    }
  ]
}

```

```
"battery_bank": {  
    "total_capacity": 500,  
    "remaining": 87.3,  
    "voltage": 48.2,  
    "current": -15.3,  
    "cells": [3.42, 3.41, 3.43, 3.40]  
}  
}
```

Контрольные вопросы:

1. Какие типы наземных источников питания применяются для БАС?
2. В чем преимущества инверторных генераторов?
3. Как работает MPPT контроллер в солнечной электростанции?
4. Какие функции выполняет интеллектуальная система питания?
5. Какие требования предъявляются к качеству электроэнергии для зарядки АКБ?
6. Опишите принцип работы буферных систем питания
7. Какие протоколы используются для мониторинга энергосистем?
8. Как рассчитать необходимую мощность зарядной станции?
9. В чем особенности эксплуатации генераторов в полевых условиях?
10. Какие преимущества дает гибридизация источников питания?

Лекция 5.4: Безопасность при работе с аккумуляторными батареями

План лекции:

1. Основные опасности при работе с АКБ;
2. Требования охраны труда и промышленной безопасности;
3. Средства индивидуальной и коллективной защиты;
4. Действия при аварийных ситуациях;
5. Экологические аспекты.

5.4.1 Основные опасности при работе с литиевыми АКБ

Тепловой разгон (Thermal Runaway) - неконтролируемая экзотермическая реакция в аккумуляторе, приводящая к выделению большого количества тепла, токсичных газов и возможному возгоранию.

Механизм теплового разгона



Рис. 50. Развитие теплового разгона

Причины теплового разгона:

1. Механические повреждения - проколы, сжатие, удары
2. Электрические нарушения - перезаряд, переразряд, КЗ
3. Тепловые воздействия - перегрев выше +60°C
4. Производственные дефекты - металлические включения, дефекты сепаратора.

Токсичные продукты разложения

При разложении литиевых АКБ выделяются:

Таблица 53
Опасные вещества при разложении LiPo

Вещество	Формула	ПДК, мг/м ³	Опасность
Фтороводород	HF	0.5	Сильная кислота, ожоги
Угарный газ	CO	20	Удушье, отравление
Фосген	COCl ₂	0.5	Боевое отравляющее вещество
Диоксид углерода	CO ₂	9000	Удушье в замкнутых пространствах

Классификация рисков

По степени тяжести последствий

Легкие повреждения:

- Кожные ожоги I степени
- Раздражение слизистых
- Временная потеря трудоспособности.

Тяжелые повреждения:

- Химические ожоги II-III степени
- Отравление токсичными газами
- Длительная нетрудоспособность.

Критические последствия:

- Пожар в помещении/транспорте
- Групповые поражения
- Материальный ущерб.

5.4.2 Требования охраны труда

Нормативная база

Основные документы по безопасности

Федеральные нормы:

- ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность»
- ГОСТ 12.1.005-88 «Воздух рабочей зоны»
- СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы».

Отраслевые требования:

- ПОТ РМ-016-2001 «Правила по охране труда на автомобильном транспорте»
- ГОСТ Р 58152-2018 «Аккумуляторы литиевые».

Таблица 54

Требования к помещениям для работы с АКБ

Параметр	Норматив	Контроль
Температура	+18...+25°C	Термометр
Влажность	40-60%	Гигрометр
Воздухообмен	5-10 крат/час	Анемометр
Освещенность	300-500 лк	Люксметр
Заземление	<4 Ом	Мегаомметр

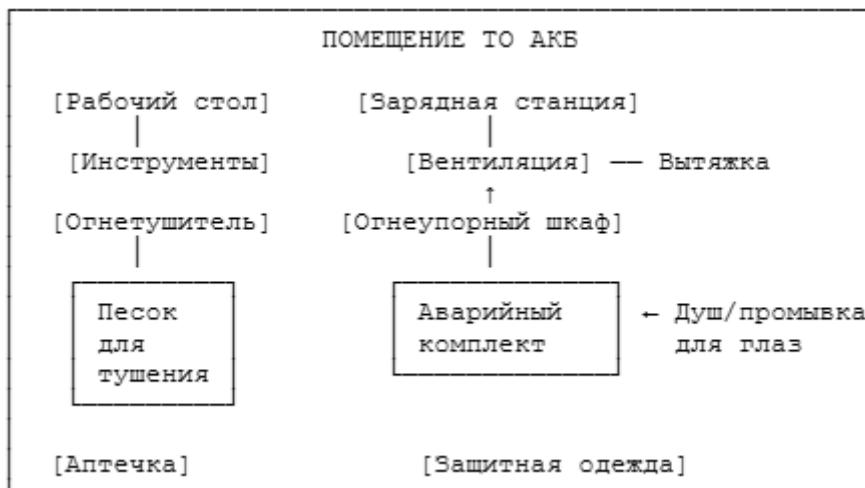


Рис. 51. Планировка помещения для работы с АКБ

Средства индивидуальной защиты

Обязательные СИЗ

Защита органов зрения:

- Защитные очки с боковой защитой
- Щитки для лица при работе с поврежденными АКБ
- Стекла с защитой от УФ-излучения.

Защита органов дыхания:

- Респираторы с фильтрами А2Р3
- Противогазы для аварийных работ
- Самоспасатели для эвакуации.

Защита кожи:

- Нитриловые перчатки (устойчивы к электролитам)
- Защитная одежда из негорючих материалов
- Обувь с диэлектрической подошвой.

Таблица 54

Нормы обеспечения СИЗ

СИЗ	Срок носки	Количество на работника
Очки защитные	1 год	2 шт
Перчатки нитриловые	1 месяц	10 пар
Респиратор	6 месяцев	2 шт
Халат х/б	12 месяцев	2 шт

5.4.3 Действия при аварийных ситуациях

Классификация аварийных ситуаций

Тепловое повреждение АКБ без возгорания:

- Вздутие корпуса
- Выделение дыма
- Нагрев выше +80°C
- Характерный запах.

Возгорание АКБ:

- Открытое пламя
- Интенсивное дымовыделение
- Выброс расплавленного материала
- Распространение огня на соседние объекты.

Алгоритмы действий



Рис. 52 Алгоритм действий при перегреве АКБ

Средства пожаротушения

Запрещенные средства:

- Вода (проводит ток, усугубляет горение лития)
- Пенные составы
- Углекислотные огнетушители (малоэффективны).

Рекомендуемые средства:

1. Сухой песок:

- Объем: не менее 50 л на рабочее место
- Фракция: 0.5-2 мм
- Хранение в металлических ящиках.

2. Специальные составы:

- Порошок класса D для металлов
- F-500 (охлаждающий агент)
- AVD (Aqueous Vermiculite Dispersion).

Таблица 56

Эффективность средств тушения литиевых АКБ

Средство тушения	Эффективность	Время тушения	Особенности применения
Сухой песок	Высокая	30-60 сек	Изолирует кислород, поглощает тепло
Порошок класса D	Очень высокая	10-30 сек	Специально для металлов
F-500	Высокая	15-45 сек	Охлаждение и изоляция
Вода	Низкая	5-10 мин	Только для охлаждения, не тушения

Первая помощь

При химических ожогах фтороводородом:

1. Немедленное удаление пострадавшего из зоны поражения
2. Промывание пораженных участков проточной водой (15-20 мин)
3. Обработка 2.5% раствором глюконата кальция
4. Наложение стерильной повязки
5. Немедленная эвакуация в медучреждение.
6. При отравлении парами:
7. Вынести пострадавшего на свежий воздух
8. Обеспечить покой и тепло
9. При потере сознания - искусственное дыхание
10. Не давать питье и лекарства
11. Вызвать скорую помощь.

Лекция 5.5: Хранение и транспортировка аккумуляторных батарей

План лекции:

1. Требования к хранению различных типов АКБ
2. Подготовка АКБ к длительному хранению
3. Правила транспортировки АКБ
4. Утилизация отработанных аккумуляторов
5. Экологические требования.

5.5.1 Требования к хранению АКБ

Определение: Хранение АКБ - содержание аккумуляторов в условиях, обеспечивающих сохранение их потребительских свойств и безопасность в течение установленного срока.

Кратковременное хранение (до 30 дней):

- Рабочий заряд 40-60%
- Комнатная температура
- Стандартные меры безопасности.

Сезонное хранение (1-6 месяцев):

- Специальная подготовка АКБ
- Контролируемые условия среды
- Периодический контроль состояния.

Длительное хранение (более 6 месяцев):

- Консервация АКБ
- Климатическое оборудование
- Регулярное техническое обслуживание.

Таблица 57

Оптимальные условия хранения для различных типов АКБ

Тип АКБ	Температура	Влажность	Заряд для хранения	Проверки
LiPo	+10...+25°C	45-65%	40-60% (3.8В/яч)	Раз в месяц
Li-ion	0...+25°C	<75%	40%	Раз в 3 месяца
LiFePO4	-10...+35°C	<80%	50-70%	Раз в 6 месяцев



Рис. 53. Конструкция огнеупорного контейнера

Огнеупорные контейнеры:

- Огнестойкость: 60-120 минут
- Герметичность при нормальных условиях
- Клапаны сброса давления
- Внутренние датчики температуры и дыма.

Климатические шкафы:

- Поддержание температуры $\pm 1^{\circ}\text{C}$
- Контроль влажности $\pm 5\%$
- Циркуляция воздуха
- Система сигнализации отклонений.

Подготовка к сезонному хранению

1. Предварительная подготовка:

- Полная диагностика состояния АКБ
- Очистка корпуса и разъемов
- Фотофиксация состояния
- Маркировка и инвентаризация.

Установка напряжения хранения;

2. Размещение в хранилище:

- Размещение в огнеупорных контейнерах
- Установка датчиков мониторинга

- Маркировка с указанием даты консервации
- Внесение в журнал хранения.



Рис. 54. Установка напряжения хранения

5.5.2 Правила транспортировки АКБ

Нормативные требования

Классификация по ДОПОГ/ADR:

- Литиевые батареи: UN 3480 (отдельно), UN 3481 (в устройстве)
- Класс опасности: 9 (прочие опасные вещества)
- Группа упаковки: II.

Таблица 58

Ограничения при транспортировке

Вид транспорта	Максимальная масса нетто	Требования к упаковке
Автомобильный	35 кг	UN-сертифицированная
Железнодорожный	35 кг	Специальная маркировка
Морской	35 кг	Декларация опасного груза
Авиационный	5 кг (пассажирские), 35 кг (грузовые)	IATA DGR

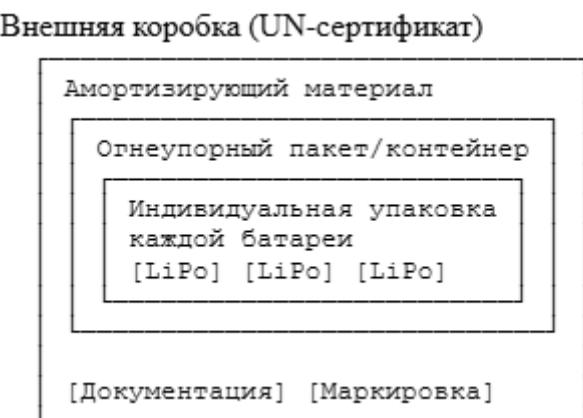


Рис. 55. Правильная упаковка LiPo для транспортировки

Требования к индивидуальной упаковке:

- Каждая батарея в отдельной упаковке
- Изоляция контактов изолентой
- Защита от механических повреждений
- Маркировка типа и состояния батареи.

Маркировка опасных грузов

Обязательные элементы маркировки:

1. Номер ООН: UN 3480 или UN 3481
2. Надлежащее отгружочное наименование
3. Знаки опасности класса 9
4. Стрелки «вверх» при необходимости
5. Контактная информация отправителя.

5.5.3 Утилизация отработанных аккумуляторов

Экологические аспекты

Опасные компоненты АКБ:

- Соли лития (LiPF_6 , LiClO_4)
- Органические растворители (ЭК, ДМК)
- Тяжелые металлы (Co, Ni, Mn)
- Фтороорганические соединения.

Технология утилизации

Процесс переработки литиевых АКБ:

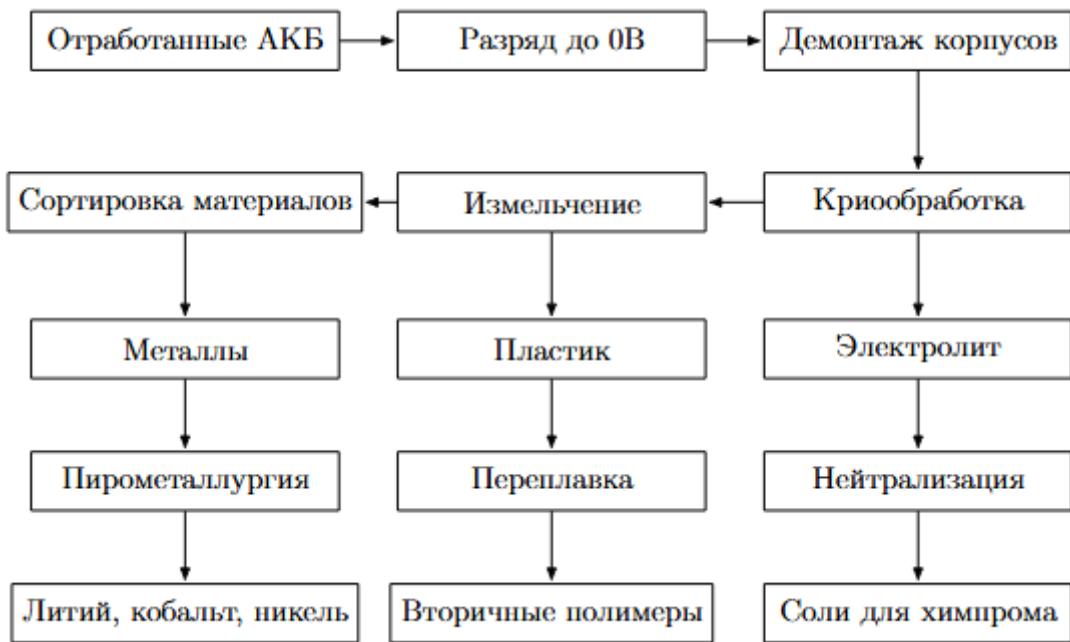


Рис. 56. Схема утилизации

Методы извлечения ценных металлов

Пирометаллургический метод:

- Сжигание при +1000°C
- Извлечение металлов из шлака
- КПД извлечения: Co-95%, Ni-95%, Li-80%.

Гидрометаллургический метод:

- Растворение в кислотах
- Селективное осаждение металлов
- Более экологичный процесс.

Таблица 59

Экономика утилизации (на 1 кг АКБ)

Металл	Содержание, г	Стоимость, руб	Выручка, руб
Литий	70	300/кг	21
Кобальт	120	4000/кг	480
Никель	80	1500/кг	120
Медь	100	500/кг	50
Итого			671

Требования законодательства

Федеральный закон № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»:

- Лицензирование деятельности по утилизации
- Ведение государственного кадастра отходов
- Экологический сбор с производителей.

Административная ответственность:

- Нарушение правил обращения с опасными отходами
- Штрафы: граждане - 1-2 тыс. руб., ЮЛ - 100-250 тыс. руб.

Практические задания:

Задание 1: Расчет условий хранения

Исходные данные:

- Помещение: 20 м²
- Количество АКБ: 50 штук по 5000 мАч
- Период хранения: 6 месяцев.

Требования:

1. Площадь контейнеров: $50 \times 0.02 \text{ м}^2 = 1 \text{ м}^2$
2. Объем вентиляции: $20 \times 5 = 100 \text{ м}^3/\text{час}$
3. Количество огнетушащего песка: $50 \times 0.5 \text{ кг} = 25 \text{ кг.}$

Задание 2: Планирование утилизации

Парк АКБ на списание:

- 20 шт LiPo 6S 10000mAh (общий вес 40 кг)
- Содержание кобальта: 4.8 кг
- Стоимость утилизации: 200 руб/кг.

Экономический эффект:

- Затраты на утилизацию: $40 \times 200 = 8000 \text{ руб}$
- Выручка от кобальта: $4.8 \times 4000 = 19200 \text{ руб}$
- Чистая прибыль: 11200 руб.

Контрольные вопросы:

1. Какие опасности возникают при тепловом разгоне литиевых АКБ?
2. Какие СИЗ обязательны при работе с поврежденными АКБ?
3. Как правильно потушить возгорание литиевой батареи?
4. Какие условия необходимы для длительного хранения LiPo?
5. Какие требования к транспортировке литиевых АКБ?

6. Как подготовить АКБ к сезонному хранению?
 7. Какие документы требуются для утилизации АКБ?
 8. Опишите процесс переработки литиевых аккумуляторов
 9. Какая ответственность предусмотрена за нарушение правил обращения с АКБ?
10. Как оказать первую помощь при химических ожогах от электролита?

Рекомендуемая литература:

Основная литература:

1. ГОСТ Р 58152-2018 «Аккумуляторы литиевые. Требования безопасности»
2. ГОСТ Р МЭК 62660-1-2015 «Аккумуляторы литий-ионные для применения в электрических дорожных транспортных средствах»
3. ФЗ-89 «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998.

Техническая документация:

4. Buchmann I. Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers. - 4th Edition, Cadex Electronics, 2016
5. UN Manual of Tests and Criteria. Part III, subsection 38.3 - Lithium Battery Tests
6. IATA Dangerous Goods Regulations (DGR) - Latest Edition

Отраслевые стандарты:

1. IEEE 1725-2011 "Standard for Rechargeable Batteries for Mobile Phones"
2. IEC 62133-2012 "Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements"
3. ASTM F3364-19 "Standard Practice for Unmanned Aircraft Systems (UAS) – Maintenance"

Интернет-ресурсы:

7. Battery University (batteryuniversity.com) – образовательный ресурс по аккумуляторным технологиям
8. Официальная документация производителей (DJI, Tattu, Gens Ace)
9. Сайт Росавиации (favr.ru) - нормативные документы по БАС
10. NFPA 855 "Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems" (nfpa.org)

ТЕМА 6: УСТАНОВКА И НАСТРОЙКА СЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Лекция 6.1: Виды съемного оборудования для мультироторных БАС

План лекции:

1. Классификация полезных нагрузок БАС
2. Фото- и видеооборудование
3. Измерительное и научное оборудование
4. Грузовые и специализированные системы
5. Интерфейсы и стандарты подключения.

6.1.1 Классификация полезных нагрузок БАС

Полезная нагрузка (Payload) – любое оборудование, устанавливаемое на БАС дополнительно к базовым системам, необходимым для полета, и предназначенное для выполнения целевых задач.

Основные принципы классификации полезных нагрузок:

По функциональному назначению:

- Наблюдательное оборудование
- Измерительные системы
- Грузовые платформы
- Специализированное оборудование.

По способу интеграции:

- Внешние подвесные системы
- Встроенное оборудование
- Модульные сменные блоки.

По степени автоматизации:

- Пассивные (только фиксация данных)
- Активные (управляемые в полете)
- Интеллектуальные (автономное принятие решений).

Таблица 60

Классификация полезных нагрузок по массе и энергопотреблению

Категория	Масса	Энергопотребление	Примеры оборудования
Легкие	<500г	<10Вт	Компактные камеры, датчики
Средние	0,5-2кг	10-50Вт	Профессиональные камеры, лидары

Категория	Масса	Энергопотребление	Примеры оборудования
Тяжелые	2-10кг	50-200Вт	Научное оборудование
Сверхтяжелые	>10кг	>200Вт	Промышленные системы

Окончание табл.60

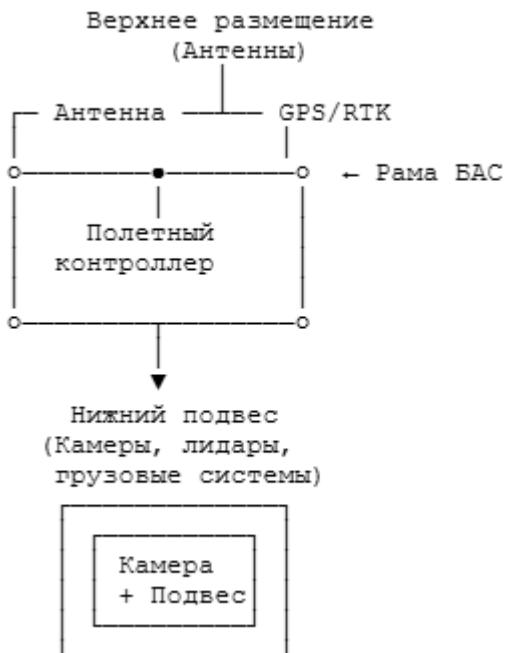


Рис. 57. Размещение различных типов нагрузок на БАС

6.1.2 Фото- и видеооборудование

Классификация камерного оборудования

Потребительские камеры:

- Action-камеры (GoPro Hero, DJI Action)
- Компактные цифровые камеры
- Встроенные камеры БАС.

Профессиональные камеры:

- Беззеркальные системы (Sony α7, Canon EOS R)
- Зеркальные фотоаппараты (Canon 5D, Nikon D850)
- Профессиональные видеокамеры.

Специализированные системы:

- Тепловизионные камеры
- Мультиспектральные системы
- Гиперспектральные сканеры.

Таблица 61

Характеристики популярных камер для БАС

Модель	Масса	Разрешение	Видео	Интерфейс	Цена
GoPro Hero 12	154г	27Мп	5.3K/60p	USB-C	\$400
Sony α7R V	723г	61Мп	8K/25p	HDMI/USB	\$3900
FLIR Vue TZ20	644г	640×512	30p	Ethernet	\$6000
MicaSense RedEdge-MX	280г	1.2Мп×5	-	Ethernet	\$5000

Стабилизированные подвесы

Определение: Стабилизированный подвес (gimbal) - многоосевая механическая система с сервоприводами и гироскопической стабилизацией, обеспечивающая компенсацию угловых движений носителя для получения стабильного изображения.

Типы подвесов по количеству осей

Одноосевые (Roll):

- Компенсация только крена
- Простота конструкции
- Низкая стоимость.

Двухосевые (Roll + Pitch):

- Компенсация крена и тангла
- Остается влияние рыскания
- Средняя сложность.

Трехосевые (Roll + Pitch + Yaw):

- Полная стабилизация
- Независимость от движений БАС
- Максимальное качество съемки.

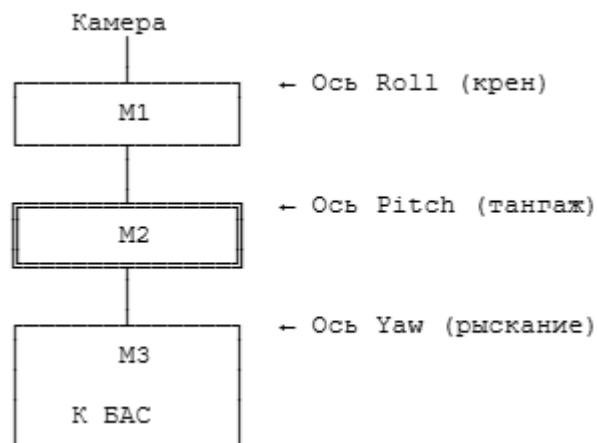


Рис. 58. Конструкция трехосевого подвеса

Системы управления подвесами

Алгоритмы стабилизации

PID-регулирование:

- Пропорциональная составляющая (P)
- Интегральная составляющая (I)
- Дифференциальная составляющая (D).

Фильтрация сигналов:

- Фильтры низких частот для подавления вибраций
- Калмановская фильтрация для оценки состояния
- Комплементарные фильтры.

Таблица 62

Параметры настройки подвеса

Параметр	Диапазон	Назначение	Рекомендуемое значение
Stiffness	0-255	Жесткость удержания позиции	80-120
Stability	0-255	Подавление колебаний	15-35
Speed	0-255	Скорость отработки команд	80-150
Smoothness	0-255	Плавность движений	20-50
Deadband	0-20°	Зона нечувствительности	2-5°

6.1.3 Измерительное и научное оборудование

Лазерные сканирующие системы (LiDAR)

Определение: LiDAR (Light Detection and Ranging) - активная система дистанционного зондирования, использующая лазерное излучение для измерения расстояний до объектов и создания трехмерных карт местности.

Принцип работы:

1. Излучение лазерного импульса
2. Отражение от объекта
3. Регистрация отраженного сигнала
4. Расчет расстояния: $R = (c \times \Delta t) / 2$.

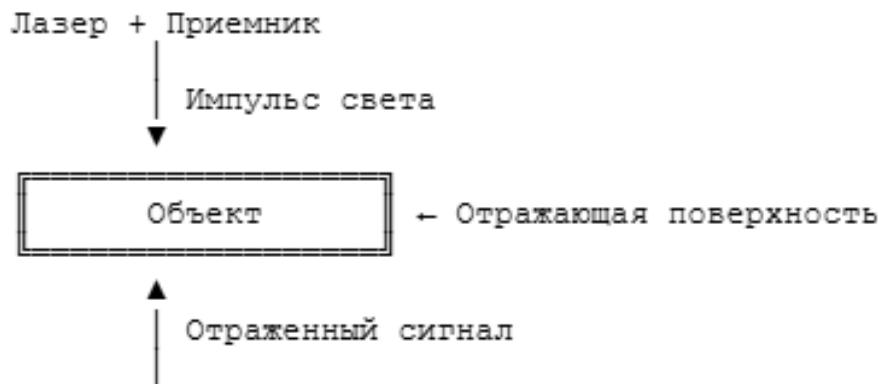


Рис. 59. Принцип работы LiDAR системы

Время полета: $\Delta t = 2R/c$

Основные характеристики LiDAR систем:

Таблица 63

Сравнение LiDAR систем для БАС

Модель	Дальность	Точность	Частота	Масса	Цена
Velodyne Puck LITE	100м	±3см	300к точек/сек	590г	\$4000
Livox Mid-70	90м	±2см	100к точек/сек	760г	\$2700
YellowScan Mapper+	80м	±5см	200к точек/сек	1.6кг	\$12000

Мультиспектральные системы

Определение: Мультиспектральная камера - устройство для регистрации изображений в нескольких узких спектральных диапазонах одновременно.

Спектральные диапазоны:

- Видимый свет: 400-700 нм
- Ближний ИК: 700-1000 нм
- SWIR: 1000-2500 нм
- LWIR: 8000-14000 нм.

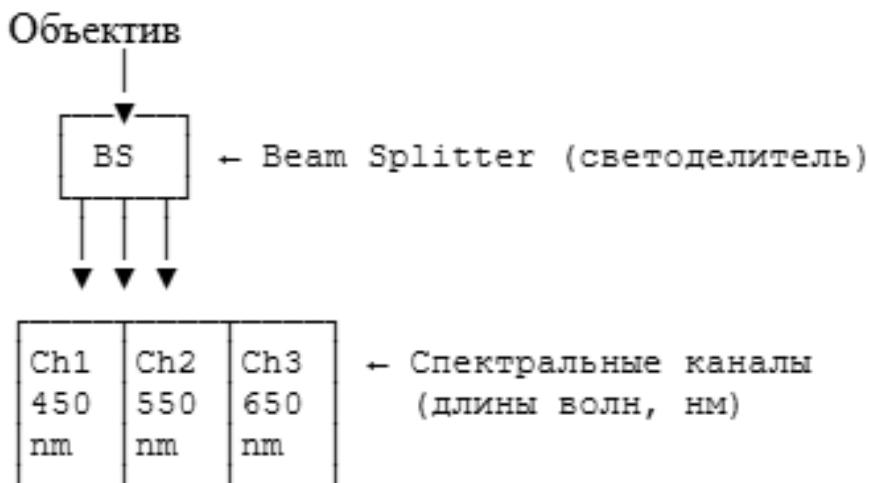


Рис. 60. Структура мультиспектральной системы

Применение мультиспектральных систем:

- Сельское хозяйство (мониторинг посевов)
- Экология (контроль загрязнений)
- Геология (поиск полезных ископаемых)
- Лесное хозяйство (оценка состояния лесов).

Тепловизионные системы

Принцип работы тепловизора:

- Регистрация инфракрасного излучения объектов
- Преобразование в видимое изображение
- Измерение температурных полей.

Характеристики тепловизионных систем:

Таблица 64

Параметры тепловизоров для БАС

Параметр	FLIR Vue Pro R	Zenmuse XT2	Workswell WIRIS Pro
Разрешение	640×512	640×512	1024×768

Спектральный диапазон	7,5-13,5 мкм	7,5-13,5 мкм	7,5-14 мкм
Температурная чувствительность	<50 мК	<50 мК	<40 мК
Диапазон температур	-40...+550°C	-25...+135°C	-40...+550°C
Масса	640г	588г	800г

Окончание табл.64

6.1.4 Грузовые и специализированные системы

Грузовые платформы

Определение: Грузовая платформа - механическое устройство для размещения, крепления и транспортировки различных грузов с помощью БАС.

Типы грузовых систем

Простые грузовые крюки:

- Максимальная нагрузка: 1-5 кг
- Ручное крепление груза
- Отсутствие дистанционного управления.

Управляемые системы сброса:

- Электромеханические замки
- Дистанционное управление сбросом
- Индикация состояния захвата.

Роботизированные манипуляторы:

- Многостепенные системы
- Обратная связь по усилию
- Точное позиционирование.



Рис. 61. Конструкция управляемой системы сброса

Таблица 65

Параметры грузовых систем различных производителей

Модель	Грузоподъемность	Время срабатывания	Тип управления	Масса системы
Flytec Release System	2 кг	<0.5 сек	PWM/CAN	85г
UAV Factory Gripper	5 кг	<1 сек	CAN/MAVLink	350г
Aerones Heavy Lift	50 кг	<2 сек	Dedicated link	3.5кг

Специализированное оборудование

Системы отбора проб:

- Воздушные пробоотборники
- Системы отбора воды
- Почвенные буры.

Радиоэлектронные системы:

- Радиопеленгаторы
- Системы радиоэлектронной борьбы

- Ретрансляторы связи.

Медицинские системы:

- Автоматические дефибрилляторы
- Системы доставки лекарств
- Контейнеры для биоматериалов.

6.1.5 Интерфейсы и стандарты подключения

Механические интерфейсы

Стандартизованные системы крепления:

DJI SkyPort:

- Стандарт для платформ DJI Matrice
- Максимальная нагрузка: 2.7 кг
- Встроенное питание и передача данных.

Freefly MōVI Ring:

- Универсальная система крепления
- Быстросъемные элементы
- Поддержка камер до 7 кг.

Custom интерфейсы:

- Разрабатываются под конкретные задачи
- Учитывают особенности оборудования
- Могут включать дополнительные функции.

Верхняя часть БАС

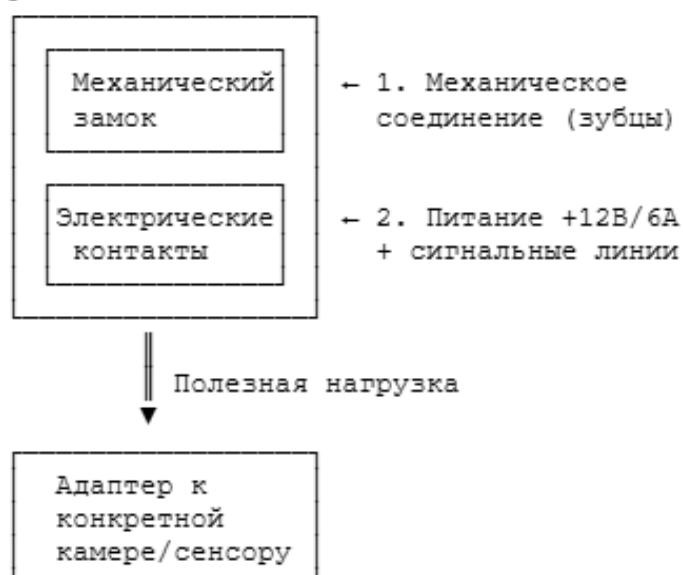


Рис. 62. Стандартный интерфейс DJI SkyPort 2.0

Электрические интерфейсы

Стандарты питания полезных нагрузок:

Таблица 66

Стандартные напряжения питания

Тип оборудования	Напряжение	Ток	Разъем
Экшн-камеры	5В	1-2А	USB-C
Профессиональные камеры	12В	2-5А	Hirose/Lemo
Лидарные системы	12-24В	3-8А	Военный круглый
Тепловизоры	12В	1-3А	M12/Hirose
Научные приборы	5-48В	По ТЗ	Специальные

Протоколы передачи данных

Цифровые интерфейсы

Последовательные интерфейсы:

- UART/RS-232: простые датчики
- RS-485: промышленные системы
- CAN Bus: автомобильные стандарты.

Сетевые интерфейсы:

- Ethernet: высокоскоростная передача данных
- USB: универсальные устройства
- Wi-Fi: беспроводная связь.

Специализированные протоколы:

- MAVLink: для интеграции с полетным контроллером
- DJI SDK: для оборудования DJI
- ArduPilot API: для систем на базе ArduPilot.

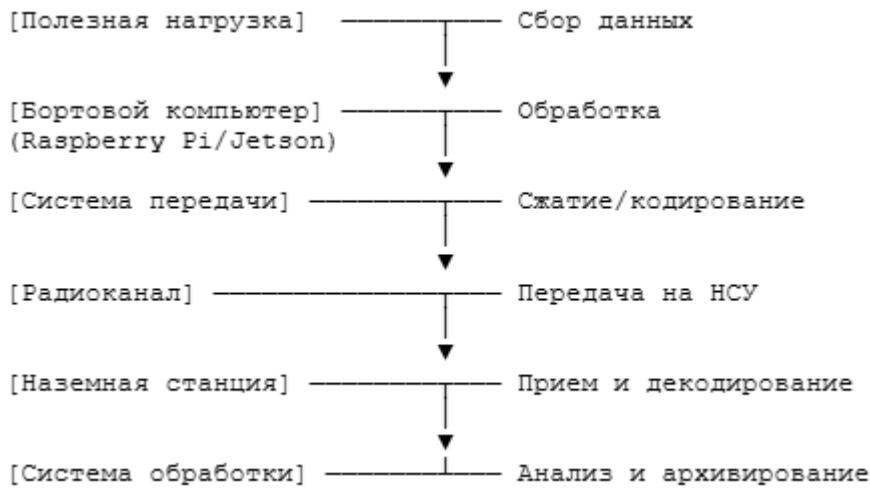


Рис. 63. Архитектура передачи данных полезной нагрузки

Практические задания:

Задание 1: Выбор оборудования для задач аэрофотосъемки

Техническое задание:

- Площадь съемки: 100 га
- Разрешение на местности: 2 см/пиксель
- Высота полета: 120 м
- Требования к перекрытию: 80%/60%.

Расчет параметров камеры:

1. Размер пикселя на местности: GSD = 2 см
2. Фокусное расстояние: $f = (H \times p) / GSD = (120 \times 4.2\text{мкм}) / 0.02\text{м} = 25.2 \text{мм}$
3. Требуемое разрешение матрицы: >20 Мп.

Рекомендуемые камеры:

- Sony α7R V (61 Мп, 35мм объектив)
- Canon EOS R5 (45 Мп, 24мм объектив).

Задание 2: Расчет энергопотребления полезной нагрузки

Оборудование:

- LiDAR Velodyne Puck LITE: 8Вт
- Камера Sony α7R V: 7Вт
- Бортовой компьютер Jetson: 15Вт
- Система передачи данных: 5Вт.

Общее потребление: $8 + 7 + 15 + 5 = 35 \text{ Вт}$

Дополнительное время полета: При батарее 400 Вт·ч и потреблении 35 Вт:
 $\Delta t = 400/35 = 11.4$ часа теоретически

Контрольные вопросы:

1. Как классифицируются полезные нагрузки БАС?
2. Какие типы стабилизированных подвесов существуют?
3. Объясните принцип работы LiDAR системы
4. Какие спектральные диапазоны используют мультиспектральные камеры?
5. Что такое DJI SkyPort и каковы его возможности?
6. Какие протоколы используются для передачи данных от полезной нагрузки?
7. Как рассчитать требуемые характеристики камеры для аэрофотосъемки?
8. Какие типы грузовых систем применяются в БАС?
9. В чем особенности тепловизионных систем для БАС?
10. Как оценить энергопотребление комплексной полезной нагрузки.

Лекция 6.2: Порядок установки и снятия съемного оборудования

План лекции:

1. Подготовительные операции
2. Технология механического крепления
3. Подключение электрических систем
4. Проверка правильности установки
5. Процедуры демонтажа оборудования.

6.2.1 Подготовительные операции

Планирование установки начинается с анализа технических требований и ограничений как со стороны БАС, так и со стороны устанавливаемого оборудования.

Анализ совместимости

Механическая совместимость:

- Габариты и масса оборудования
- Доступные точки крепления на БАС
- Требуемые интерфейсы крепления
- Центр масс комбинированной системы.

Электрическая совместимость:

- Напряжения и токи питания
- Доступная мощность от БАС
- Интерфейсы передачи данных
- Электромагнитная совместимость.

Программная совместимость:

- Поддержка протоколов полетным контроллером
- Доступность драйверов и SDK.



Рис. 64. Алгоритм анализа совместимости

Изменение центра тяжести

Новая позиция ЦТ:

$$X_{\text{ЦТ}_{\text{новый}}} = (m_{\text{БАС}} * X_{\text{ЦТ}_{\text{БАС}}} + m_{\text{ПН}} * X_{\text{ПН}}) / (m_{\text{БАС}} + m_{\text{ПН}})$$

$$Y_{\text{ЦТ}_{\text{новый}}} = (m_{\text{БАС}} * Y_{\text{ЦТ}_{\text{БАС}}} + m_{\text{ПН}} * Y_{\text{ПН}}) / (m_{\text{БАС}} + m_{\text{ПН}})$$

$$Z_{\text{ЦТ}_{\text{новый}}} = (m_{\text{БАС}} * Z_{\text{ЦТ}_{\text{БАС}}} + m_{\text{ПН}} * Z_{\text{ПН}}) / (m_{\text{БАС}} + m_{\text{ПН}})$$

Момент инерции:

Изменение моментов инерции относительно осей влияет на динамику управления БАС.

Таблица 67

Влияние полезных нагрузок на летные характеристики

Параметр	Без нагрузки	С камерой 500г	С лидаром 1.5кг
Максимальная скорость	15 м/с	12 м/с	8 м/с
Время полета	25 мин	20 мин	12 мин
Максимальный ветер	12 м/с	10 м/с	8 м/с
Точность позиционирования	±0.5 м	±0.8 м	±1.2 м

Требования к рабочему месту

Физические условия:

- Ровная поверхность для размещения БАС

- Достаточное освещение (не менее 500 лк)
- Отсутствие вибраций и сквозняков
- Доступ к электропитанию.

Инструменты и оборудование:

- Набор монтажных инструментов
- Измерительные приборы
- Подъемные и удерживающие приспособления
- Антистатические принадлежности.

Техническая документация:

- Руководство по установке оборудования
- Схемы подключений и интерфейсов
- Спецификации совместимости
- Чертежи и 3D-модели.

6.2.2 Технология механического крепления

Резьбовые соединения:

- Метрические резьбы M3, M4, M5
- Дюймовые резьбы 1/4", 3/8"-16
- Использование фиксаторов резьбы
- Контроль момента затяжки.

Быстроразъемные соединения:

- Байонетные замки
- Кулачковые зажимы
- Магнитные системы
- Пневматические захваты.

Клеевые соединения:

- Структурные клеи
- Анаэробные герметики
- Двусторонние скотчи
- Термоклеи.

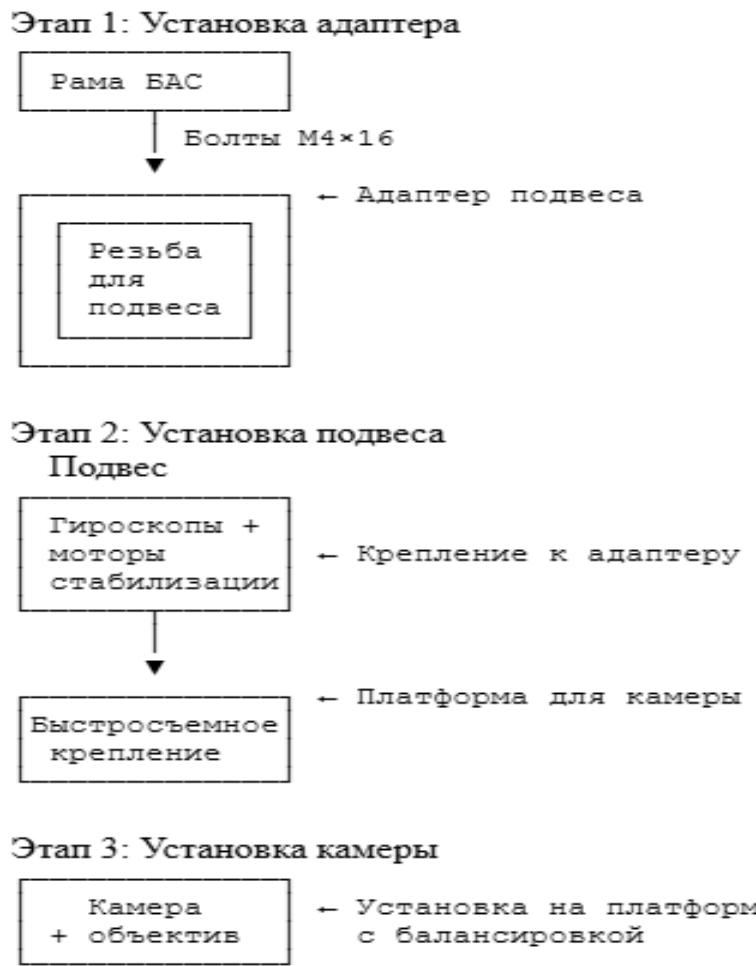


Рис. 65. Последовательность механического монтажа подвеса

Технология сборки

Последовательность операций механического монтажа

Подготовка компонентов:

- Проверка комплектности крепежных элементов
- Очистка посадочных поверхностей
- Нанесение фиксаторов резьбы (при необходимости).

Предварительная сборка:

- Наживление всех болтов без затяжки
- Проверка правильности взаимного расположения
- Контроль отсутствия перекосов и зажимов.

Окончательная затяжка:

- Затяжка болтов в определенной последовательности
- Использование динамометрических ключей
- Контроль равномерности затяжки.

Таблица 68

Моменты затяжки резьбовых соединений

Размер резьбы	Материал	Момент затяжки	Фиксатор
M3	Сталь	1.5-2.0 Н·м	Loctite 243
M4	Алюминий	3.0-4.0 Н·м	Loctite 243
M5	Сталь	5.5-7.0 Н·м	Loctite 243
1/4"-20	Углепластик	2.5-3.5 Н·м	Не применять

Специальные приспособления

Балансировочные стенды:

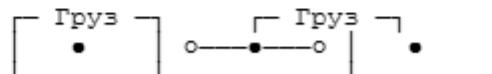
- Определение фактического ЦТ
- Подбор компенсирующих грузов
- Проверка устойчивости.

Юстировочные приспособления:

- Точное позиционирование камер
- Выставление углов и направлений
- Калибровка систем наведения.



Корректировка балансировочными грузами:



Компенсация переднего смещения

Компенсация заднего смещения

Рис. 66. Балансировочный стенд для БАС

6.2.3 Подключение электрических систем

Системы электропитания

Стабилизаторы напряжения

Требования к DC-DC преобразователям:

Таблица 69

Характеристики стабилизаторов для полезных нагрузок

Параметр	Требование	Обоснование
Стабильность выходного напряжения	$\pm 2\%$	Чувствительность электроники
Пульсации	<50 мВ	Качество питания камер
КПД	>90%	Минимизация потерь и нагрева
Входной диапазон	12-26В	Работа при разряде АКБ
Защита от КЗ	<1 сек	Безопасность системы
Температурный диапазон	-40...+85°C	Условия эксплуатации

Принципы трассировки кабелей

Силовые кабели:

- Минимальная длина для снижения потерь
- Сечение в соответствии с током нагрузки
- Защита от механических повреждений
- Экранирование при необходимости.

Сигнальные кабели:

- Экранированные витые пары
- Раздельная трассировка от силовых кабелей
- Применение разделительных шин
- Заземление экранов в одной точке.

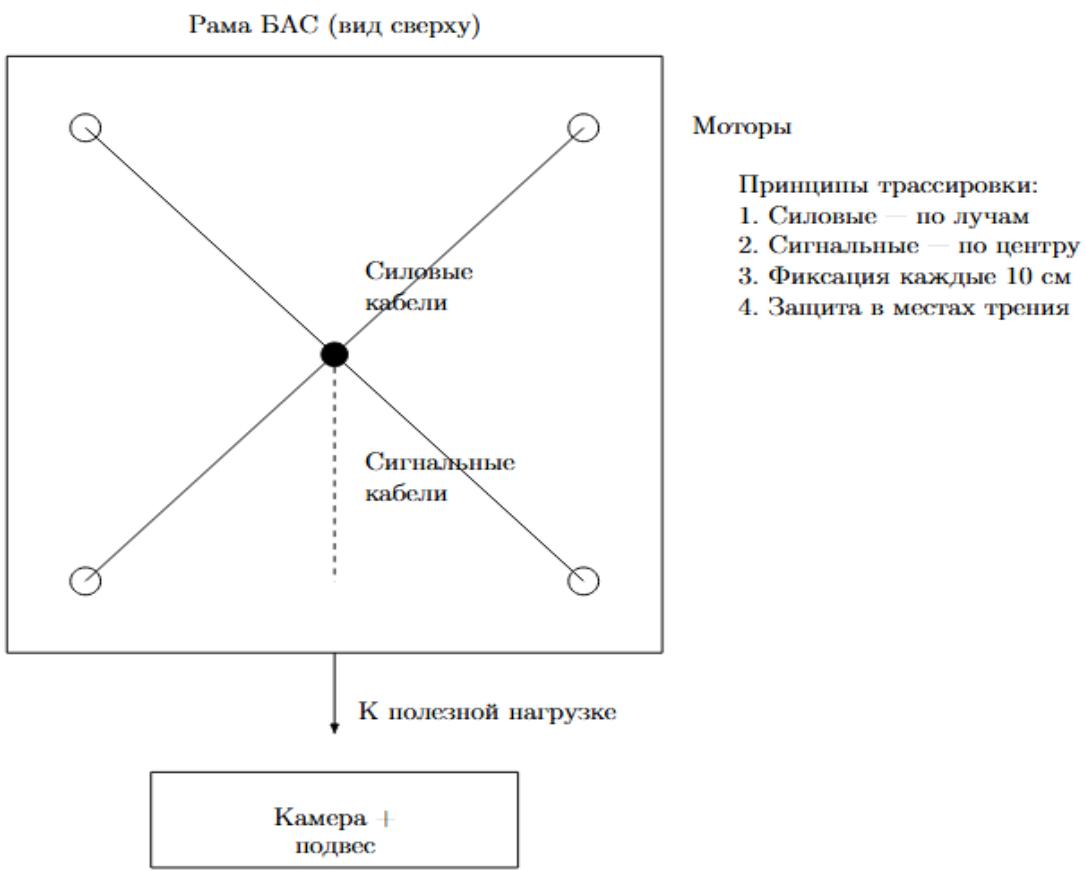


Рис. 67. Правильная трассировка кабелей на БАС

Материалы крепежа

Нержавеющая сталь (A2, A4):

- Высокая прочность
- Коррозионная стойкость
- Стандартная резьба.

Титановые сплавы:

- Максимальная удельная прочность
- Немагнитность
- Высокая стоимость.

Углепластиковый крепеж:

- Минимальный вес
- Диэлектрические свойства
- Ограниченная прочность.

Таблица 70

Прочностные характеристики крепежа

Материал	Предел прочности	Удельный вес	Применение
Сталь А4	700-900 МПа	7.9 г/см ³	Силовое крепление
Титан ВТ1-0	400-550 МПа	4.5 г/см ³	Облегченный крепеж
Углепластик	300-400 МПа	1.6 г/см ³	Несиловые элементы

6.2.4 Процедуры демонтажа оборудования

Подготовка к демонтажу

Предварительные операции:

1. Отключение всех источников питания
2. Разрядка конденсаторов в системах высокого напряжения
3. Документирование текущего состояния
4. Подготовка упаковки для снятого оборудования.

Общий принцип: Демонтаж выполняется в порядке, обратном монтажу.

Особенности демонтажа различного оборудования

Камеры и подвесы:

- Аккуратное обращение с оптикой
- Защита от статического электричества
- Сохранение настроек и калибровок.

Лидарные системы:

- Защита от ударов и вибраций при снятии
- Контроль юстировки оптических элементов
- Сохранение калибровочных данных.

Измерительное оборудование:

- Соблюдение условий хранения датчиков
- Защита от влаги и загрязнений
- Выполнение процедур консервации.

Проверка после демонтажа

Контроль БАС после снятия оборудования:

1. Проверка отсутствия повреждений мест крепления
2. Очистка от загрязнений и остатков клея
3. Восстановление базовой конфигурации
4. Проверка центровки без полезной нагрузки
5. Тестовый полет для подтверждения исправности.

Практические задания:

Задание 1: Расчет крепежных соединений

- Масса подвеса с камерой: 1.2 кг
- Перегрузка при маневрах: 3g
- Коэффициент безопасности: 2.0.

Расчетная нагрузка на крепеж:

$$F = m \times g \times n_{\text{маневр}} \times k_{\text{безоп}} = 1.2 \times 9.81 \times 3 \times 2 = 70.6 \text{ Н}$$

Выбор болтов: M4 из стали A4 (допустимая нагрузка ~120 Н) – подходит

Задание 2: Выбор сечения кабеля питания

Исходные данные:

- Мощность полезной нагрузки: 60 Вт
- Напряжение питания: 12 В
- Длина кабеля: 1.5 м
- Допустимое падение напряжения: 5%.

Расчет:

1. Ток нагрузки: $I = P/U = 60/12 = 5 \text{ А}$
2. Сопротивление кабеля: $R = \Delta U/I = (12 \times 0.05)/5 = 0.12 \text{ Ом}$
3. Требуемое сечение: $S = \rho \times l/R = 0.0175 \times 3 / 0.12 = 0.44 \text{ мм}^2$
4. Выбор: 0.75 мм^2 (стандартное сечение с запасом).

Контрольные вопросы:

1. Какие факторы учитываются при анализе совместимости оборудования?
2. Как рассчитать изменение центра тяжести после установки полезной нагрузки?

3. Какие инструменты требуются для механического монтажа?
 4. Опишите технологию установки резьбовых соединений
 5. Какие моменты затяжки применяются для болтов различных размеров?
 6. Как выбрать правильное сечение кабеля питания?
 7. Какие принципы соблюдаются при трассировке кабелей?
 8. Опишите процедуру подключения сигнальных линий
 9. В какой последовательности выполняется демонтаж оборудования?
10. Какие проверки проводятся после демонтажа полезной нагрузки?

Лекция 6.3: Настройка и калибровка съемного оборудования

План лекции:

1. Общие принципы настройки полезных нагрузок
2. Калибровка камерного оборудования
3. Настройка измерительных систем
4. Калибровка подвесов и стабилизаторов
5. Интеграция с полетным контроллером.

6.3.1 Общие принципы настройки полезных нагрузок

Калибровка оборудования - процесс определения и коррекции систематических погрешностей измерительных и исполнительных систем с целью обеспечения требуемой точности их работы.

Виды калибровок

Геометрическая калибровка:

- Определение пространственной ориентации
- Измерение смещений центров
- Коррекция углов установки.

Радиометрическая калибровка:

- Коррекция чувствительности сенсоров
- Компенсация температурного дрейфа
- Нормировка сигналов.

Временная калибровка:

- Синхронизация различных систем
- Компенсация задержек
- Привязка к единому времени.

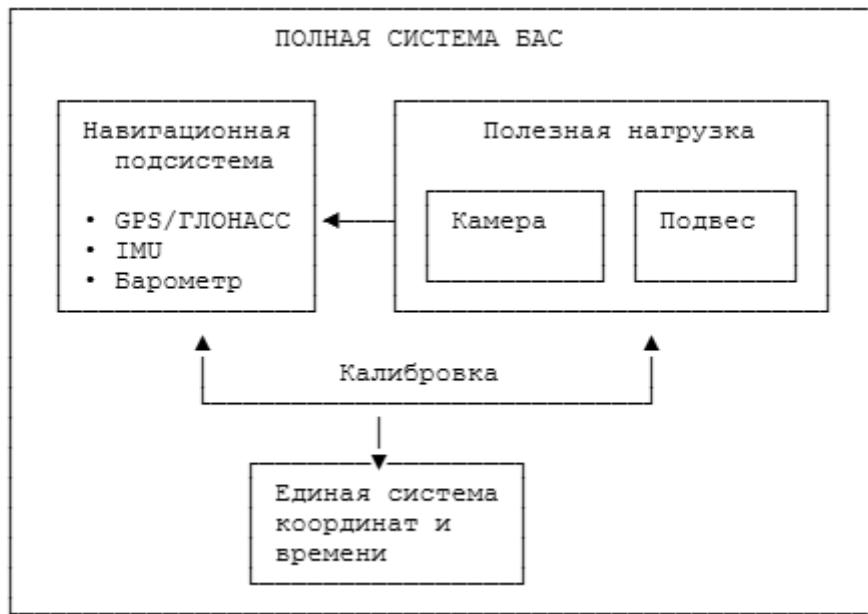


Рис. 68. Иерархия калибровок в системе БАС

Метрологические аспекты

Основные метрологические характеристики:

1. Точность - степень близости результата измерения к истинному значению
2. Прецизионность - степень близости независимых результатов измерений
3. Воспроизводимость - прецизионность в условиях воспроизведимости
4. Стабильность - способность сохранять метрологические характеристики

Источники погрешностей:

- Систематические погрешности (bias)
- Случайные погрешности (noise)
- Температурный дрейф
- Нелинейность характеристик
- Взаимные влияния каналов.

6.3.2 Калибровка камерного оборудования

Геометрическая калибровка камер

Модель камеры-обскуры:



Рис. 69. Геометрическая модель камеры

Параметры внутреннего ориентирования:

- Главное расстояние (f)
- Координаты главной точки (x_0, y_0)
- Коэффициенты дисторсии $(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$.

Математическая модель дисторсии:

$$\begin{aligned} x' &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y' &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy \end{aligned}$$

где $r^2 = x^2 + y^2$

Технология калибровки с использованием калибровочной мишени

Подготовка калибровочной мишени:

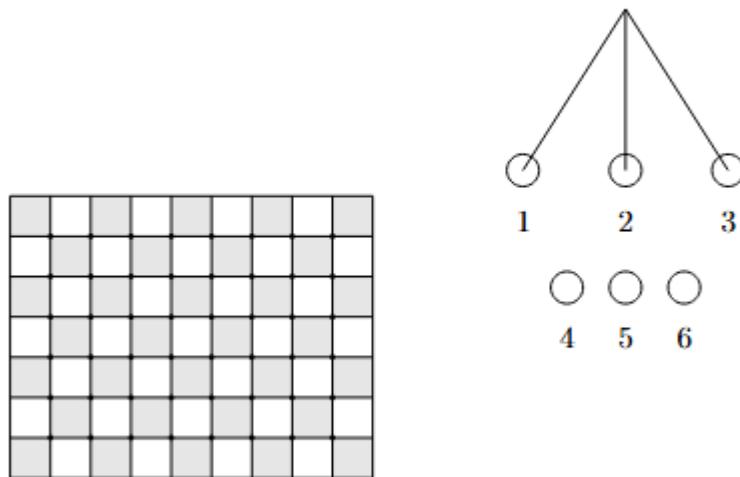
- Плоская доска с шахматным узором
- Размер клеток: зависит от фокусного расстояния
- Точность изготовления: ± 0.1 мм
- Контрастность изображения.

Съемка калибровочной последовательности:

- 15-20 кадров с различных ракурсов
- Покрытие всего поля зрения камеры
- Различные расстояния до мишени

- Фокусировка на бесконечность.

Калибровочная мишень: Позиции камеры:



$$8 \times 6 = 48 \text{ угла}$$

Рис. 70. Схема съемки для калибровки

Обработка результатов:

- Автоматическое обнаружение углов шахматной доски
- Решение системы уравнений методом наименьших квадратов
- Оценка качества калибровки ($\text{RMS error} < 1$ пиксель)
- Сохранение калибровочных параметров.

Радиометрическая калибровка

Цель: Обеспечение количественной оценки яркостных характеристик объектов.

Методы радиометрической калибровки

Калибровка по эталонным мишениям:

- Использование мишеней с известной отражательной способностью
- Серые карты (18% отражение)
- Цветовые шкалы (X-Rite ColorChecker).

Калибровка по солнечному освещению:

- Учет параметров солнечной радиации
- Коррекция атмосферного влияния
- Использование пиранометров.

Таблица 70

Эталонные мишени для радиометрической калибровки

Тип мишени	Отражение	Размер	Точность	Применение
Серая карта 18%	18%	20×25 см	±2%	Общая калибровка
Белая мишень	99%	50×50 см	±1%	Калибровка яркости
Спектральная мишень	Переменное	30×20 см	±3%	Мультиспектральные системы

6.3.3 Настройка измерительных систем

Калибровка лидарных систем

Основные виды калибровок лидаров

Дальномерная калибровка:

- Использование эталонных расстояний
- Коррекция систематических ошибок дальности
- Компенсация температурного дрейфа.

Угловая калибровка:

- Определение точности углового позиционирования
- Коррекция механических неточностей
- Синхронизация угловых энкодеров.

Процедура дальномерной калибровки:

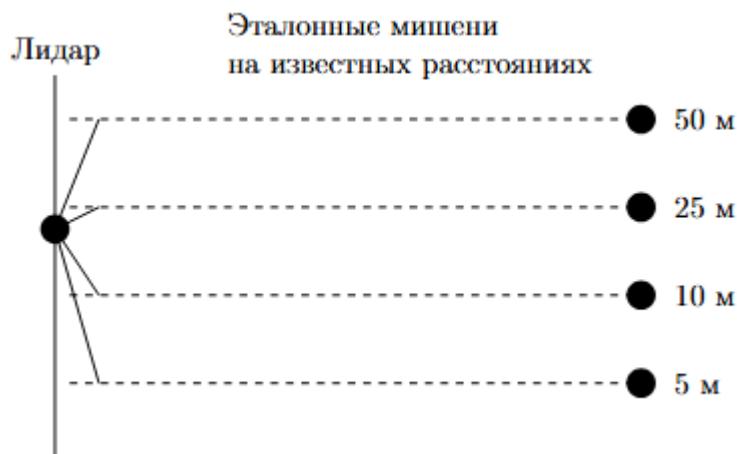


Рис. 71. Схема калибровки лидара по дальности

Калибровочная зависимость:

$$R_{\text{истинная}} = a * R_{\text{измеренная}} + b + c + T^0$$

Точность калибровки:

- Стандартное отклонение: <2 см
- Линейность: >99.5%
- Стабильность: <1 см за 24 часа.

Калибровка мультиспектральных камер

Спектральная калибровка

Определение спектральных характеристик фильтров:

- Использование монохроматора
- Измерение функции пропускания
- Определение центральных длин волн и полуширины.

Калибровка чувствительности каналов:

- Съемка эталонных спектральных мишней
- Нормировка откликов каналов
- Построение калибровочных кривых.

Таблица 71

Спектральные каналы мультиспектральной камеры Parrot Sequoia

Канал	Центральная длина волны, нм	Полуширина, нм	Назначение
Green	550	40	Хлорофилл
Red	660	40	Фотосинтез
Red Edge	735	10	Стресс растений
NIR	790	40	Биомасса

Влияние температуры на измерительное оборудование

Термоэлектрические эффекты:

- Изменение чувствительности сенсоров
- Темновой ток в матрицах камер
- Дрейф усилителей и АЦП.

Механические изменения:

- Тепловые деформации корпусов
- Изменения фокусного расстояния
- Подвижки юстировочных элементов.

6.3.4 Калибровка подвесов и стабилизаторов

Механическая калибровка подвеса

Балансировка камеры на подвесе:

Цель: обеспечить равенство моментов относительно всех осей вращения для минимизации нагрузки на приводные моторы.

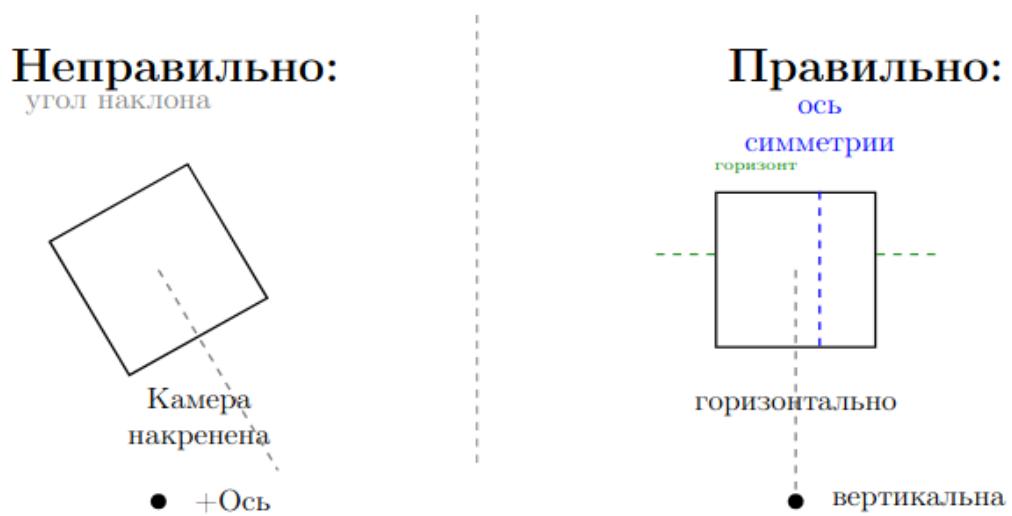


Рис. 72. Балансировка по оси Roll (крен)

Метод: Перемещение камеры по горизонтальным направляющим до достижения равновесия.

Балансировка по оси Pitch (тангаж):

- Перемещение камеры вперед-назад
- Достижение горизонтального положения
- Фиксация в найденном положении.

Балансировка по оси Yaw (рыскание):

- Минимизация момента относительно вертикальной оси
- Обеспечение легкого поворота подвеса
- Отсутствие предпочтительных положений.

Электронная калибровка подвеса

Калибровка гироскопов подвеса:

1. Размещение подвеса в неподвижном состоянии
2. Запуск процедуры калибровки
3. Автоматическое определение нулевых точек
4. Сохранение калибровочных коэффициентов
5. Проверка стабильности показаний.

Таблица 73

Параметры настройки контроллеров подвеса

Параметр	Начальное значение	Диапазон регулировки	Влияние на работу
P (пропорциональный)	50	10-100	Быстродействие
I (интегральный)	20	0-50	Точность удержания
D (дифференциальный)	10	0-30	Устойчивость
Filter	15	5-50	Подавление вибраций

Методика настройки PID:

1. Установить все параметры в минимальные значения
2. Постепенно увеличивать P до появления колебаний
3. Уменьшить P на 20-30%
4. Добавить I для точности удержания
5. Добавить D для подавления колебаний
6. Настроить фильтр для подавления вибраций

Системы Target Tracking

Калибровка алгоритмов распознавания:

- Обучение на эталонных объектах
- Настройка параметров детекции
- Оптимизация быстродействия.

Калибровка системы наведения:

- Точность позиционирования
- Скорость слежения
- Прогнозирование движения цели.

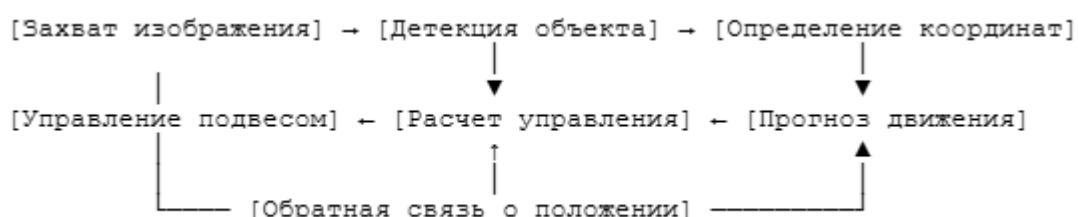


Рис. 73. Алгоритм автоматического слежения

6.3.5 Интеграция с полетным контроллером

Протоколы интеграции

MAVLink протокол:

Основные сообщения для управления полезной нагрузкой:

- CAMERA_INFORMATION - информация о камере
- CAMERA_SETTINGS - настройки съемки
- CAMERA_CAPTURE_STATUS - статус захвата
- GIMBAL_MANAGER_INFORMATION - информация о подвесе
- GIMBAL_MANAGER_STATUS - состояние подвеса.

Настройка каналов управления

Распределение каналов RC для управления полезной нагрузкой:

Таблица 74

Типовое назначение каналов

Канал	Функция	Диапазон ШИМ	Примечания
6	Gimbal Pitch	1000-2000 мкс	Наклон камеры
7	Gimbal Yaw	1000-2000 мкс	Поворот камеры
8	Camera Trigger	1000/2000 мкс	Спуск затвора
9	Camera Mode	1000-2000 мкс	Режимы камеры
10	Zoom	1000-2000 мкс	Зум объектива

Автономные режимы работы

Автоматическая съемка по маршруту:

- Привязка точек съемки к GPS-координатам
- Автоматическая ориентация камеры
- Контроль качества изображений.

Интеллектуальные режимы слежения:

- Object Tracking - слежение за объектами
- ActiveTrack - интеллектуальное следование
- Point of Interest - облет точек интереса.

Практические задания:

Задание 1: Калибровка камеры для фотограмметрии

Исходные данные:

- Камера Sony α7R V с объективом 35 мм
- Матрица 35.7×23.8 мм, 9504×6336 пикселей

– Требуемая точность: <0.5 пикселя RMS.

Этапы выполнения:

1. Подготовка калибровочной мишени 10×7 углов
2. Съемка 20 кадров с различных ракурсов
3. Обработка в ПО (OpenCV, Agisoft Lens)
4. Получение параметров калибровки
5. Валидация на контрольных измерениях.

Задание 2: Настройка параметров подвеса

Проблема: Подвес DJI Zenmuse X7 выдает нестабильное изображение

Диагностика:

1. Проверка механической балансировки
2. Анализ параметров PID
3. Проверка крепления к БАС
4. Контроль вибраций от моторов БАС.

Решение:

1. Перебалансировка камеры
2. Снижение Р-коэффициента с 80 до 60
3. Увеличение Filter с 15 до 25
4. Установка виброизоляторов.

Контрольные вопросы:

1. Какие виды калибровок применяются для полезных нагрузок?
2. Опишите процедуру геометрической калибровки камеры
3. Что такое дисторсия объектива и как она корректируется?
4. Как выполняется радиометрическая калибровка?
5. Какие параметры настраиваются в PID-регуляторе подвеса?
6. Опишите процедуру балансировки камеры на трехосевом подвесе
7. Как калибруется дальномер лидарной системы?
8. Какие сообщения MAVLink используются для управления камерой?
9. Как настроить каналы RC для управления подвесом?
10. Что такое Point of Interest и как он реализуется?

Лекция 6.4: Балансировка бас и проверка функционирования установленного оборудования

План лекции:

1. Теория балансировки БАС с полезной нагрузкой
2. Методы определения и коррекции центра тяжести
3. Влияние дисбаланса на управляемость
4. Проверка функционирования оборудования
5. Тестовые полеты и контрольные испытания.

6.4.1 Теория балансировки бас с полезной нагрузкой

Центр тяжести (ЦТ) - точка приложения равнодействующей сил тяжести всех элементов системы.

Центр давления - точка приложения равнодействующей аэродинамических сил.

Влияние положения ЦТ на характеристики БАС

Продольная балансировка:

- Смещение ЦТ вперед: БАС стремится к пикированию
- Смещение ЦТ назад: БАС стремится к кабрированию
- Оптимальное положение: на геометрической оси БАС.

Поперечная балансировка:

- Смещение ЦТ влево: накрен влево
- Смещение ЦТ вправо: накрен вправо
- Влияние на эффективность управления.

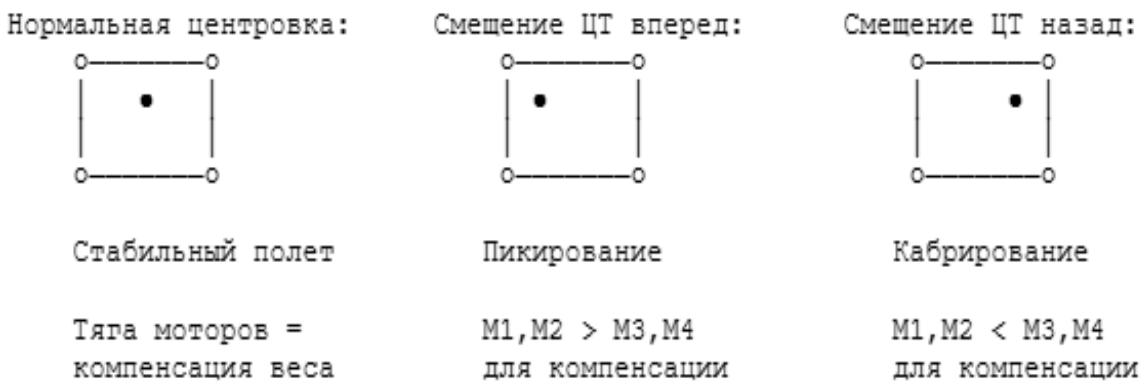


Рис. 74. Влияние смещения ЦТ на поведение БАС

Математический расчет центра тяжести
Метод моментов для n компонентов:

Координаты общего ЦТ :

$$X_{\text{ЦТ}} = \frac{\sum (m_i * X_i)}{\sum m_i}$$

$$Y_{\text{ЦТ}} = \frac{\sum (m_i * Y_i)}{\sum m_i}$$

$$Z_{\text{ЦТ}} = \frac{\sum (m_i * Z_i)}{\sum m_i}$$

где:

- m_i - масса i -го компонента
- X, Y, Z – координаты.

Пример расчета для квадрокоптера с камерой:

Таблица 75

Данные для расчета ЦТ

Компонент	Масса, г	X, мм	Y, мм	Z, мм
Рама	250	0	0	0
Моторы (4×65г)	260	±150	±150	0
АКБ	400	0	0	-30
ПК	80	0	0	+15
Камера+подвес	350	0	0	-80

Расчет:

$$Z = (250 \times 0 + 260 \times 0 + 400 \times (-30) + 80 \times 15 + 350 \times (-80)) / 1340$$

$$Z = (0 + 0 - 12000 + 1200 - 28000) / 1340 = -29.0 \text{ мм}$$

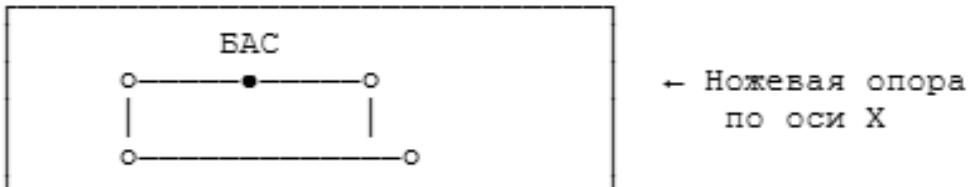
Результат: ЦТ смещен вниз на 29 мм от плоскости моторов.

6.4.2 Методы определения и коррекции центра тяжести

Экспериментальное определение ЦТ

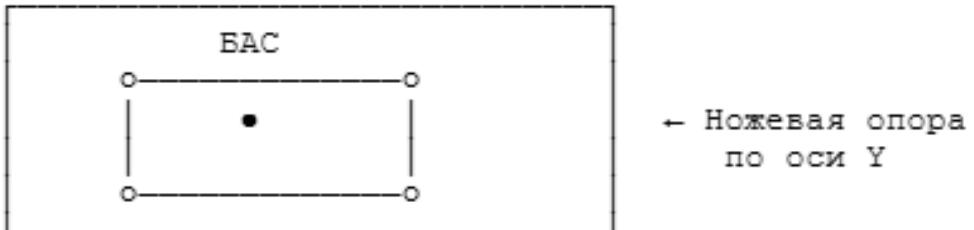
Метод балансировочной призмы:

Этап 1: Балансировка по оси X



▲
Точка равновесия → X_цт

Этап 2: Балансировка по оси Y



▲
Точка равновесия → Y_цт

Рис. 75. Определение ЦТ с помощью призмы

Метод подвешивания:

- Подвешивание БАС в двух точках
- Построение вертикальных линий
- Пересечение линий дает положение ЦТ.

Методы коррекции центра тяжести

Перемещение существующих компонентов:

- Изменение положения аккумулятора
- Смещение полезной нагрузки
- Перенос вспомогательного оборудования.

Установка балансировочных грузов:

Типы балансировочных грузов:

- Свинцовые пластины (высокая плотность)
- Стальные грузики (средняя плотность)
- Вольфрамовые грузы (максимальная плотность)

Таблица 76

Характеристики балансировочных материалов

Материал	Плотность, г/см ³	Преимущества	Недостатки
Свинец	11.3	Дешевый, легко обрабатывается	Токсичность
Сталь	7.8	Немагнитная нержавеющая сталь	Больший объем
Вольфрам	19.3	Максимальная плотность	Высокая стоимость
Латунь	8.5	Немагнитность, коррозионная стойкость	Средняя плотность

Конструктивные изменения:

- Удлинение лучей рамы
- Изменение формы кронштейнов
- Применение переменного сечения элементов.

Расчет балансировочных грузов

Формула для расчета требуемого груза:

$$\Delta X = X_{ym_{mpeb}} - X_{ym_{fakm}}$$

Масса балансировочного груза:

$$m_{груза} = (m_{общая} * |\Delta X|) / L_{плеча}, \text{ где } L_{плеча}$$

– расстояние от текущего ЦТ до места установки груза

Пример расчета:

Дано:

- Общая масса БАС: 2.5 кг
- Текущее смещение ЦТ: +15 мм (вперед)
- Расстояние до места установки груза: 200 мм (назад).

Решение:

$$m_{груза} = (2.5 \times 0.015) / 0.2 = 0.1875 \text{ кг} = 188 \text{ г}$$

6.4.3 Влияние дисбаланса на управляемость

Динамические эффекты дисбаланса

Статический дисбаланс:

- Постоянное отклонение от нейтрального положения
- Необходимость триммирования управления

- Снижение точности автоматических режимов.

Динамический дисбаланс:

- Неодинаковые моменты инерции по осям
- Различное время реакции на управление
- Связанность управления по осям.

Математическое описание влияния дисбаланса:

Уравнение моментов для квадрокоптера:

$$J_{xx} * \dot{\omega}_x = 1 * (T_2 + T_4 - T_1 - T_3) + M_{дисбаланс\ x}$$

$$J_{yy} * \dot{\omega}_y = 1 * (T_3 + T_4 - T_1 - T_2) + M_{дисбаланс\ x}$$

$$J_{zz} * \dot{\omega}_z = 1 * \Sigma(M_{реактивный\ i})$$

где $M_{реактивный\ i}$ – дополнительный момент от смещения ЦТ

Компенсация дисбаланса в полетном контроллере

Программная компенсация:

Таблица 77

Параметры компенсации дисбаланса в ArduCopter

Параметр	Назначение	Диапазон	Единицы
TRIM_PITCH	Компенсация тангажа	$\pm 10^\circ$	Градусы
TRIM_ROLL	Компенсация крена	$\pm 10^\circ$	Градусы
MOT_THST_HOVER	Базовый газ для висения	0.1-0.8	Доли
PSC_ACC_XY_FILTER	Фильтр акселерометра	2-20	Гц

Автоматическая настройка компенсации:

Алгоритм AutoTune:

1. [Стабильное висение] → [Измерение отклонений]
2. [Автоматические возмущения] → [Анализ реакции]
3. [Расчет оптимальных параметров] → [Применение настроек]
4. [Проверка стабильности] → [Сохранение результатов]

6.4.4 Проверка функционирования оборудования

Статические испытания

Предполетная проверка оборудования включает

Проверка механических систем:

- Отсутствие люфтов и заеданий
- Плавность работы подвижных элементов
- Правильность срабатывания замков и защелок
- Надежность крепления всех компонентов.

Проверка электрических систем:

- Контроль напряжений питания
- Проверка целостности сигнальных линий
- Измерение токов потребления
- Контроль заземления и экранирования.

Проверка программных систем:

- Инициализация всех подсистем
- Связь с полетным контроллером
- Отклик на команды управления
- Проверка автоматических режимов.

Контрольный список проверок камеры

Оптическая система:

- Четкость изображения по всему полю
- Отсутствие виньетирования
- Правильная цветопередача
- Стабильность автофокуса.

Система записи:

- Скорость записи на карту памяти
- Качество сжатия видео
- Синхронизация аудио (если есть)
- Надежность сохранения файлов.

Система управления:

- Отклик на команды с пульта
- Работа автоматических режимов
- Точность позиционирования подвеса
- Качество стабилизации.

Таблица 78

Критерии качества съемочных систем

Параметр	Норма	Метод проверки
Резкость по центру	>80 линий/мм	Тест-мишень
Резкость по краям	>60 линий/мм	Тест-мишень
Виньетирование	<20%	Съемка равномерного поля
Стабилизация	<0.1° RMS	Анализ записи при вибрации
Время отклика	<200 мс	Измерение задержки команд

Окончание табл. 78

6.4.2 Динамические испытания

Наземные динамические тесты

Тестирование подвеса на вибростенде:



Рис. 76. Схема испытаний на вибростенде

Программа вибрационных испытаний:

- Частотный диапазон: 5-100 Гц
- Амплитуда: 0.1-2.0 g
- Типы сигналов: синусоидальный, белый шум, ступенчатый.

Тестирование систем автоматического управления:

Испытание системы слежения:

Тестовая программа Target Tracking:

1. [Статическая цель] → Точность наведения
2. [Медленно движущаяся цель] → Плавность слежения
3. [Быстрая цель] → Быстродействие
4. [Маневрирующая цель] → Алгоритмы предсказания

5. [Цель с препятствиями] → Устойчивость детекции

Полетные испытания

Этапность полетных испытаний:

Этап 1: Базовые полетные характеристики

- Висение на месте (проверка стабильности)
- Медленные перемещения в горизонтальной плоскости
- Подъем и снижение с малой скоростью
- Плавные повороты вокруг вертикальной оси.

Этап 2: Расширенные маневры

- Полет на повышенных скоростях
- Резкие изменения направления
- Полет при боковом ветре
- Испытания на различных высотах.

Этап 3: Тестирование полезной нагрузки

- Съемка тестовых объектов
- Проверка качества стабилизации
- Испытания автоматических режимов
- Длительные испытания на выносливость.

Таблица 79

Программа полетных испытаний

Режим испытаний	Длительность	Контролируемые параметры
Статическое висение	5 мин	Стабильность положения, вибрации
Медленный полет	10 мин	Управляемость, энергопотребление
Динамические маневры	5 мин	Отклик на управление
Автоматические режимы	15 мин	Точность навигации, работа ПН
Предельные режимы	5 мин	Устойчивость, резервы управления

Параметры стабильности:

- RMS отклонения по осям

- Максимальные девиации
- Частотный анализ колебаний.

Параметры управляемости:

- Время отклика на команды
- Точность отработки заданий
- Запасы управления.

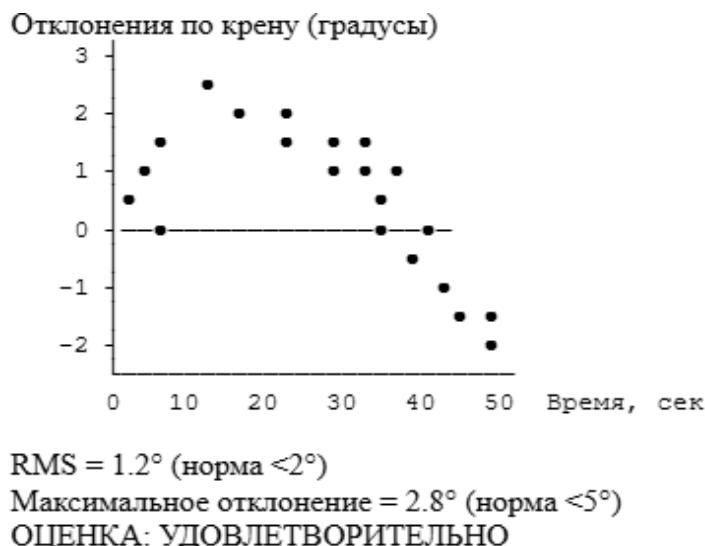


Рис. 77. Пример анализа качества стабилизации

6.4.3 Документирование результатов

Структура протокола испытаний установленного оборудования

Общая информация:

- Дата и время испытаний
- Состав испытательной комиссии
- Условия проведения (погода, место)
- Техническое состояние БАС.

Результаты статических испытаний:

- Проверка установки и крепления
- Электрические параметры
- Функциональные проверки систем.

Результаты динамических испытаний:

- Данные полетных испытаний
- Анализ телеметрии
- Оценка качества работы ПН.

Заключение и рекомендации:

- Соответствие техническим требованиям

- Выявленные ограничения
- Рекомендации по эксплуатации.

Приемочные испытания

Критерии приемки установленного оборудования:

Таблица 80

Нормативы для приемки полезных нагрузок

Тип оборудования	Основные критерии	Метод контроля
Фотокамеры	Резкость >70 лин/мм, стабилизация $<0.2^\circ$	Съемка тест-мишени
Видеокамеры	Стабилизация $<0.1^\circ$, отсутствие смазы	Анализ записи
Лидары	Точность ± 2 см, покрытие $>90\%$	Сравнение с эталоном
Тепловизоры	NETD <50 мК, калибровка $\pm 2^\circ\text{C}$	Эталонные источники

Ограничения, выявленные при испытаниях

Метеорологические ограничения:

- Максимальная скорость ветра
- Температурный диапазон
- Ограничения по осадкам
- Видимость и освещенность.

Летные ограничения:

- Максимальная скорость полета
- Ограничения по маневренности
- Максимальная высота полета
- Время непрерывной работы.

Функциональные ограничения:

- Точность измерений в различных условиях
- Качество съемки при различных режимах
- Надежность передачи данных
- Совместимость с различными режимами полета.

Практические задания:

Задание 1: Расчет смещения ЦТ при установке лидара

Исходные данные:

- Масса БАС без ПН: 3.2 кг
- Масса лидара Velodyne Puck: 0.83 кг
- Установка: снизу, смещение -150 мм по Z.

Расчет нового положения ЦТ:

$$Z_{\text{ЦТ новый}} = (3.2 \times 0 + 0.83 \times (-150)) / (3.2 + 0.83) = -30.8 \text{ мм}$$

Вывод: ЦТ сместится вниз на 31 мм

Задание 2: Подбор балансировочного груза

Условие: Необходимо скомпенсировать смещение ЦТ вперед на 25 мм

- Общая масса: 4.5 кг
- Место установки груза: 300 мм назад от ЦТ.

Расчет массы груза:

$$m = (4.5 \times 0.025) / 0.3 = 0.375 \text{ кг} = 375 \text{ г}$$

Задание 3: Анализ качества стабилизации

Данные испытаний подвеса:

- RMS отклонение по pitch: 0.08°
- RMS отклонение по roll: 0.12°
- Максимальное отклонение: 0.3°.

Оценка: Отлично (норма RMS <0.2°, макс. <0.5°)

Контрольные вопросы:

1. Как влияет смещение центра тяжести на управляемость БАС?
2. Какими методами можно определить фактическое положение ЦТ?
3. Как рассчитать массу балансировочного груза?
4. - Какие виды дисбаланса влияют на динамику БАС?
5. - Опишите методы компенсации дисбаланса в полетном контроллере;
6. - Какие параметры контролируются при функциональных испытаниях?
7. - Как проводятся вибрационные испытания подвесов?
8. - Какие критерии используются для приемки установленного оборудования?
9. - Какие ограничения могут быть выявлены при испытаниях?
10. - Как анализируются результаты полетных испытаний;

Рекомендуемая литература:

Основная литература:

1. - ГОСТ Р 58880-2020 «Системы беспилотные авиационные.

Общие требования»;

2. - RTCA DO-178C "Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification"

3. - Руководство по летной эксплуатации конкретных моделей БАС;

4. Техническая документация:

5. DJI Payload SDK Documentation - <https://developer.dji.com/payload-sdk/>

6. ArduPilot Documentation - Camera and Gimbal Setup - <https://ardupilot.org>

7. PX4 User Guide - Payloads and Cameras - <https://docs.px4.io>

Стандарты и нормы:

1. ASTM F3322-18 "Standard Specification for Small Unmanned Aircraft System (sUAS) Parachutes"

2. ISO 21384-3:2019 "Unmanned aircraft systems – Part 3: Operational procedures"

3. STANAG 4671 "Unmanned Aircraft Systems Airworthiness Requirements (USAR)"

Специализированная литература:

1. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. - Cambridge University Press, 2003

2. Kraus K. Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans. - Walter de Gruyter, 2007

3. Vosselman G., Maas H.G. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. - Whittles Publishing, 2010

4. Интернет-ресурсы:

4. OpenCV Documentation - Camera Calibration - <https://docs.opencv.org>

5. Agisoft Knowledge Base - <https://agisoft.freshdesk.com>

6. FLIR Technical Documentation - <https://flir.com/support-center>

ТЕМА 7: ОБНОВЛЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КАЛИБРОВКА БАС

Лекция 7.1: Программное обеспечение мультироторных БАС

План лекции:

- Архитектура программного обеспечения БАС;
- Типы и классификация ПО для БАС;
- Операционные системы реального времени;
- Полетные стеки и их особенности;
- Наземное программное обеспечение;

7.1.1 Архитектура программного обеспечения БАС

Программное обеспечение БАС - комплекс взаимосвязанных программных модулей, обеспечивающих управление полетом, навигацию, контроль систем и выполнение целевых задач беспилотной авиационной системы.

Многоуровневая архитектура ПО

Программное обеспечение БАС организовано по принципу многоуровневой архитектуры, где каждый уровень выполняет определенные функции и взаимодействует с соседними уровнями через стандартизованные интерфейсы:

Таблица 80
Уровни программного обеспечения БАС

Уровень	Компоненты	Основные функции	Время отклика
Аппаратный (HAL)	Драйверы датчиков, интерфейсы	Низкоуровневый доступ к аппаратуре	<1 мс
Системный	RTOS, планировщик задач	Управление ресурсами, многозадачность	1-10 мс
Промежуточный	Библиотеки, протоколы связи	Абстракция аппаратуры, коммуникации	10-100 мс
Прикладной	Полетные алгоритмы, навигация	Управление полетом, автопилот	100-1000 мс

Уровень	Компоненты	Основные функции	Время отклика
Пользовательский	Интерфейсы, миссии	Планирование задач, мониторинг	>1 сек

Окончание табл.80

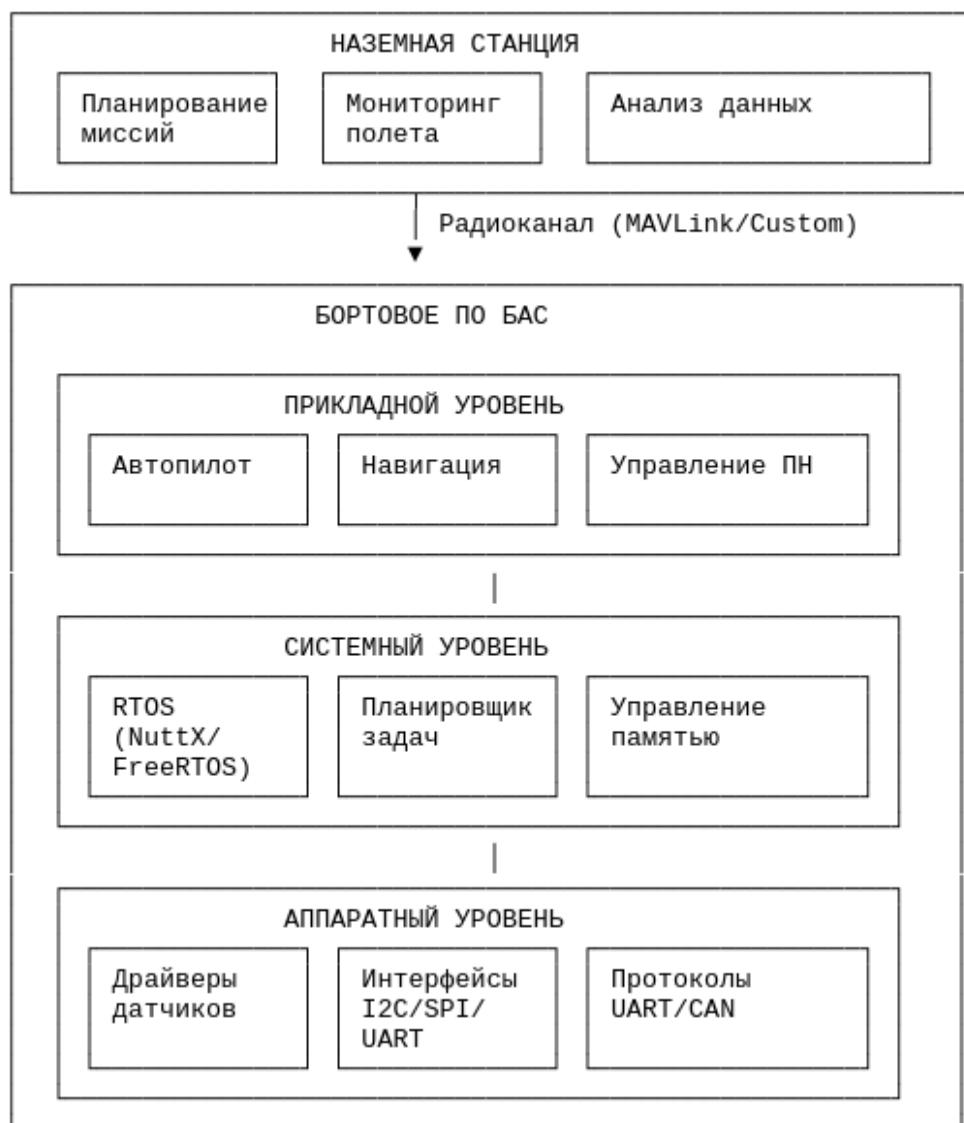


Рис. 78. ПО по мультироторной БАС

Принципы работы в реальном времени

Операционная система реального времени (RTOS) обеспечивает:

- Детерминированность выполнения задач;
- Управление приоритетами;
- Межзадачное взаимодействие;
- Обработку прерываний;

Требования к временным характеристикам:

- Жесткие ограничения (Hard Real-Time): <1 мс для управления двигателями;
- Мягкие ограничения (Soft Real-Time): <100 мс для навигации;
- Циклические задачи: 100-1000 Гц для стабилизации;

7.1.2 Типы и классификация по для БАС

Классификация по назначению

Программное обеспечение БАС классифицируется по функциональному назначению и месту выполнения

Бортовое ПО (Firmware):

- Полетные контроллеры;
- Регуляторы ESC;
- Интеллектуальные датчики;
- Системы полезной нагрузки;

Наземное ПО (Ground Control Software):

- Станции управления полетом;
- Планировщики миссий;
- Системы анализа данных;
- Симуляторы и тренажеры;

Полетный стек (Flight Stack) - программный комплекс, реализующий алгоритмы управления полетом, навигации и взаимодействия с бортовыми системами.

Таблица 82

Сравнение популярных полетных стеков

Полетный стек	Разработчик	Лицензия	Поддерживаемые платформы	Особенности
ArduPilot	ArduPilot Team	GPL v3	Pixhawk, CubePilot, множество	Модульность, большое сообщество
PX4	PX4 Team	BSD	Pixhawk, Qualcomm Flight Pro	Современная архитектура

Полетный стек	Разработчик	Лицензия	Поддерживаемые платформы	Особенности
Betaflight	Betaflight Team	GPL v3	STM32 F4/F7/H7	Оптимизация для гонок
INAV	INAV Team	GPL v3	STM32 F4/F7/H7	Навигационные возможности
DJI Firmware	DJI	Проприетарная	DJI контроллеры	Коммерческая надежность

Окончание табл. 82

ArduPilot - детальный анализ

ArduCopter - модуль для мультироторных БАС:

Основные подсистемы ArduCopter:

- AC_AttitudeControl - контроль углового положения;
- AC_PosControl - позиционное управление;
- AP_Motors - управление двигателями;
- AP_Navigation - навигационные алгоритмы;
- AP_Mission - выполнение миссий.

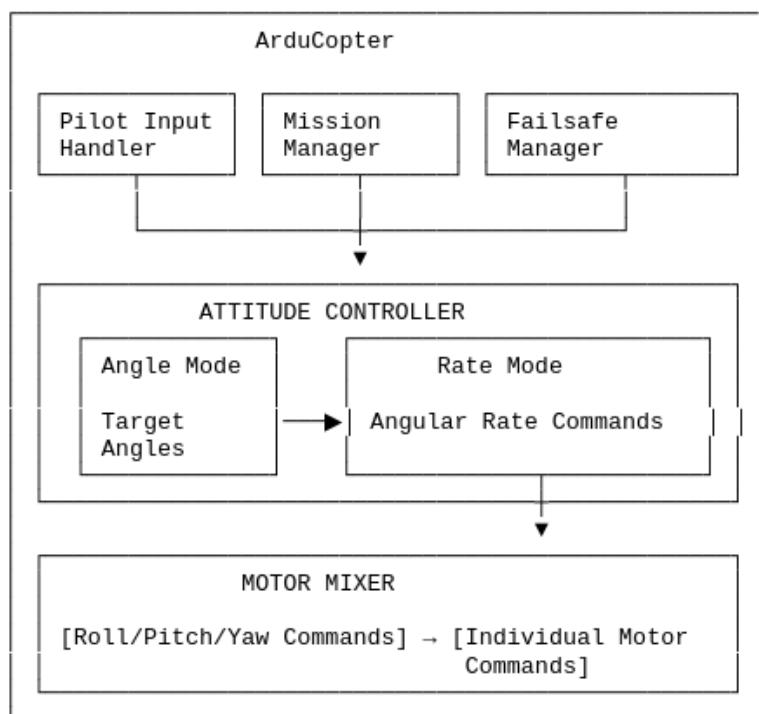


Рис. 79. Структура ArduCopter

PX4 Flight Stack

- Особенности архитектуры PX4;
- Модульная структура uORB;
- Разделение на аппаратно-зависимые и независимые части;
- Поддержка ROS 2 из коробки;
- Встроенные системы машинного обучения;

Основные модули PX4:

- commander - координатор состояний;
- navigator - навигация высокого уровня;
- mc_pos_control - позиционное управление мультикоптерами;
- mc_att_control - угловое управление;
- mixer - микширование команд управления;

7.1.3 Системы связи и протоколы

MAVLink протокол

Определение: MAVLink (Micro Air Vehicle Link) - легкий протокол связи для беспилотных систем, обеспечивающий обмен сообщениями между компонентами БАС и наземными станциями.

Структура сообщения MAVLink 2.0:

STX (1b)	LEN (1b)	INK (1b)	CMP (1b)	SEQ (1b)	SYS (1b)	MSGID (3b)	PAYLOAD (0-255B)	CRC (2b)
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	---------------	---------------------	-------------

STX - стартовый байт (0xFD)

LEN - длина полезной нагрузки

INC - флаги несовместимости

CMP - флаги совместимости

SEQ - номер последовательности

SYS - ID системы

MSGID - идентификатор сообщения

PAYLOAD - полезная нагрузка

CRC - контрольная сумма

Основные группы сообщений MAVLink:

Таблица 83

Классификация сообщений MAVLink

Группа	ID диапазон	Назначение	Примеры
Heartbeat	0	Индикация состояния	HEARTBEAT
System	1-99	Системная информация	SYS_STATUS, PARAM_VALUE
Navigation	100-199	Навигация и позиционирование	GLOBAL_POSITION_INT, GPS_RAW_INT
Mission	200-299	Управление миссиями	MISSION_ITEM, MISSION_REQUEST
Gimbal/Camera	300-399	Управление подвесами и камерами	GIMBAL_MANAGER_STATUS

Архитектура распределенных систем

Компонентная модель БАС:

Каждый компонент БАС имеет уникальные идентификаторы:

- System ID - идентификатор физической системы (БАС);
- Component ID - идентификатор компонента в системе;

Типовые Component ID:

- 1: Автопилот (полетный контроллер);
- 100: Камера;
- 140: Подвес;
- 190: Система управления полезной нагрузкой;

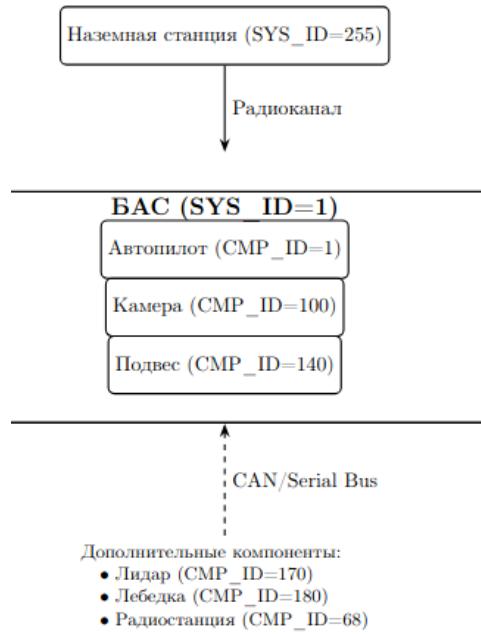


Рис. 81. Топология сети MAVLink

7.1.4 Операционные системы реального времени

NuttX - основная RTOS для полетных контроллеров

NuttX - открытая операционная система реального времени, оптимизированная для встраиваемых систем с ограниченными ресурсами.

Основные характеристики NuttX:

- POSIX-совместимость;
- Модульная архитектура;
- Поддержка множества архитектур процессоров;
- Детерминированный планировщик задач;

Планировщик задач:

- Round-Robin для задач одинакового приоритета;
- Preemptive для задач разного приоритета;
- Приоритеты: 0 (минимальный) - 255 (максимальный);

Таблица 84

Типовые приоритеты задач в полетном контроллере

Задача	Приоритет	Период, мс	Назначение
Attitude Control	250	2.5	Стабилизация углового положения
Motor Output	240	4	Вывод команд на двигатели
Rate Control	235	4	Управление угловыми скоростями
Position Control	220	20	Позиционное управление
Navigation	200	50	Выполнение миссий
Telemetry	180	100	Передача телеметрии
Logging	150	200	Запись логов

Flash-память (программный код):

- Размер: 1-8 МБ;
- Распределение: ядро RTOS (30%), полетный стек (60%), драйверы (10%);
- Оптимизация: компиляция с флагами Os;

RAM-память (данные и стек):

- Размер: 256 КБ - 2 МБ;
- Распределение: стеки задач, буферы данных, динамическая память;
- Контроль утечек и переполнений;

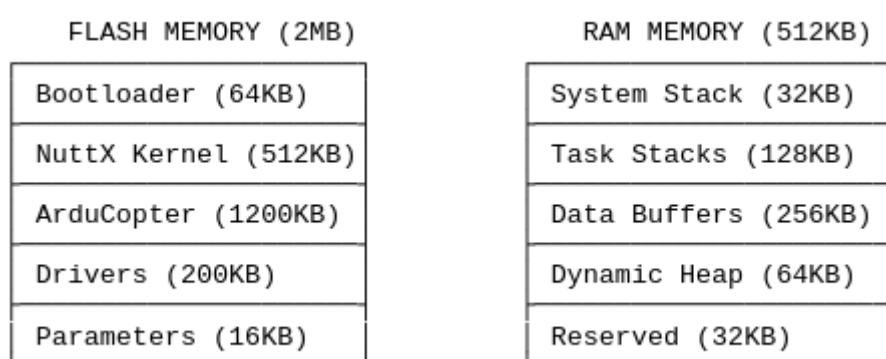


Рис. 82. Карта использования памяти

7.1.5 Наземное программное обеспечение Ground Control Stations (GCS)

Определение: Ground Control Station - программно-аппаратный комплекс для планирования миссий, контроля полета и анализа данных БАС с наземной позиции.

Основные функции GCS:

- Планирование и загрузка миссий в БАС;
- Мониторинг телеметрии в реальном времени;
- Управление полезной нагрузкой;
- Анализ полетных данных;
- Настройка параметров БАС;

Сравнение популярных GCS:

Таблица 85

Характеристики основных наземных станций

GCS	Платформа	Поддержка	Особенности	Сложность
Mission Planner	Windows	ArduPilot	Полный функционал	Высокая
QGroundControl	Cross-platform	PX4/ArduPilot	Современный UI	Средняя
DJI Pilot	Android/iOS	DJI Aircraft	Коммерческие функции	Низкая
UgCS	Cross-platform	Универсальная	Корпоративные функции	Высокая

Mission Planner - подробный анализ

Основные модули Mission Planner:

Flight Data:

- HUD (Head-Up Display) с основными параметрами полета;
- Карта с треком полета и телеметрией;
- Графики параметров в реальном времени;
- Система аварийных сигнализаций;

Flight Plan:

- Графический планировщик миссий;
- Расчет времени полета и энергопотребления;
- Анализ ограничений и запретных зон;
- Симуляция выполнения миссии;

Config/Tuning:

- Настройка всех параметров БАС;
- Калибровка датчиков;
- Настройка PID-регуляторов;
- Конфигурация дополнительного оборудования;

7.1.6 Интеграция программных компонентов

Middleware и межпроцессное взаимодействие

uORB (Micro Object Request Broker) - система межпроцессного взаимодействия в PX4:

- Принципы работы uORB:
- Публикация-подписка (publish-subscribe);
- Типизированные сообщения;
- Буферизация данных;
- Приоритизация сообщений;

Пример определения топика uORB:

```
// Определение структуры сообщения
struct vehicle_attitude_s {
    uint64_t timestamp;           // микросекунды с загрузки
    float rollspeed;             // угловая скорость по крену
(rad/c)
    float pitchspeed;            // угловая скорость по тангажу
(rad/c)
    float yawspeed;              // угловая скорость по рысканию
(rad/c)
    float q[4];                  // кватернион ориентации
};

// Публикация данных
orb_advert_t attitude_pub = 
orb_advertise(ORB_ID(vehicle_attitude), &att);

// Подписка на данные
int attitude_sub = orb_subscribe(ORB_ID(vehicle_attitude));
orb_copy(ORB_ID(vehicle_attitude), attitude_sub, &att);
```

Система параметров

Параметры (Parameters) - конфигурационные значения, определяющие поведение различных подсистем БАС.

Классификация параметров:

По области действия:

- Глобальные (влияют на всю систему);
- Модульные (специфичны для модуля);
- Локальные (используются в конкретной функции);

По типу данных:

- Целочисленные (int32);
- Вещественные (float);
- Перечисления (enum);

Таблица 86

Основные группы параметров ArduCopter

Группа	Префикс	Количество	Назначение
Attitude Control	ATC_	~30	PID коэффициенты углового управления
Position Control	PSC_	~25	Параметры позиционного управления
Battery	BATT_	~40	Мониторинг и защита батарей
Radio	RC_	~20	Настройки радиоуправления
GPS	GPS_	~15	Конфигурация навигационных систем
Motors	MOT_	~25	Настройки двигателей и микширования

Системы логирования

- Цели логирования:
- Отладка алгоритмов управления;
- Анализ причин инцидентов;
- Оптимизация настроек;
- Сбор статистики эксплуатации;

Формат логов DataFlash:

Структура лога:

Message ID (4 bytes)	Timestamp (4 bytes)	Data Fields (Variable)
-------------------------	------------------------	---------------------------

Пример записи IMU:

IMU, TimeMS, GyrX, GyrY, GyrZ, AccX, AccY, AccZ, ErrG, ErrA, Temp
IMU, 12354, -0.02, 0.15, 0.08, 0.05, -9.78, 0.12, 0, 0, 28.5

Практические задания:

Задание 1: Анализ структуры MAVLink сообщения

Дано: Нех-дамп MAVLink пакета:

FD 1C 00 00 00 01 01 00 00 00 1E 00 00 00 E8 03 00 00 88 13 00 00 64 00 2C
01 00 00 00 00 34 4B

Разбор пакета:

- STX: FD (MAVLink 2.0);
- LEN: 1C (28 байт данных);
- SYS: 01 (система №1);
- MSG_ID: 1E (ATTITUDE = 30);

Задание 2: Расчет требований к производительности

Требования:

- Частота управления: 400 Гц;
- Время обработки IMU: 0.5 мс;
- Время расчета управления: 1.5 мс;
- Запас производительности: 30%;

Минимальная частота процессора:

$$f = 1/(2.5 \text{ мс} \times 0.7) = 571 \text{ МГц}$$

Контрольные вопросы:

1. Опишите многоуровневую архитектуру ПО БАС;
2. В чем отличия ArduPilot от PX4?
3. Какие функции выполняет RTOS в полетном контроллере?
4. Объясните принцип работы протокола MAVLink;
5. Что такое Uorb и как он работает?
6. Какие основные модули входят в состав ArduCopter?
7. Как организована система параметров в полетных контроллерах?
8. Какие данные записываются в полетные логи?
9. Опишите назначение основных экранов Mission Planner;
10. Как рассчитать требования к производительности процессора;

Лекция 7.2: Порядок обновления программного обеспечения

План лекции:

- Подготовка к обновлению ПО;
- Методы и инструменты обновления;
- Процедуры безопасного обновления;
- Восстановление после сбоев;
- Верификация и тестирование;

7.2.1 Подготовка к обновлению программного обеспечения

Обновление ПО БАС - процесс замены текущей версии программного обеспечения на более новую версию с целью устранения ошибок, добавления функциональности или повышения безопасности.

Причины обновления ПО:

Критические причины:

- Исправление критических ошибок безопасности;
- Устранение ошибок, влияющих на управляемость;
- Соответствие новым нормативным требованиям;
- Поддержка нового оборудования;

Рекомендуемые причины:

- Улучшение алгоритмов управления;
- Добавление новых функций;
- Оптимизация энергопотребления;
- Улучшение пользовательского интерфейса;

Необязательные причины:

- Косметические изменения интерфейса;
- Экспериментальные функции;
- Незначительные оптимизации;

Таблица 87

Матрица принятия решений об обновлении

Тип изменений	Критичность	Рекомендация	Условия
Security fixes	Высокая	Обязательно	Немедленно
Bug fixes	Средняя	Рекомендуется	После тестирования
New features	Низкая	По необходимости	В плановом порядке
Experimental	Минимальная	Не рекомендуется	Только для разработки

Предварительная подготовка

Сбор информации:

- Текущая версия ПО и дата установки;
- История предыдущих обновлений;
- Конфигурация оборудования;
- Особые настройки и модификации;

Анализ совместимости:

- Поддержка текущего оборудования;
- Совместимость параметров;
- Требования к версиям GCS;
- Зависимости от других компонентов;

Планирование процесса:

- Выбор времени обновления (минимизация рисков);
- Подготовка резервного оборудования;
- Назначение ответственных лиц;
- План отката при проблемах;

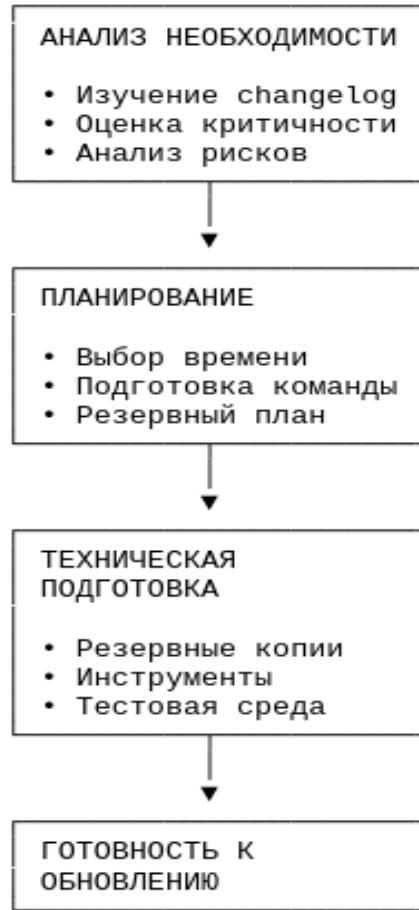


Рис. 83. Процесс подготовки к обновлению

7.2.2 Методы и инструменты обновления

Способы загрузки прошивки

USB-подключение:

- Прямое подключение к полетному контроллеру;
- Высокая скорость передачи (до 12 Мбит/с);
- Надежность соединения;
- Возможность низкоуровневой диагностики;

Беспроводное обновление (OTA - Over The Air):

- Обновление через радиоканал;
- Удобство для труднодоступных БАС;
- Ограниченнная скорость передачи;
- Риски прерывания процесса;

Обновление через SD-карту:

- Автономное обновление при загрузке;
- Медленная скорость загрузки;
- Риск повреждения файлов;

Таблица 88

Сравнение методов обновления

Метод	Скорость	Надежность	Удобство	Применение
USB	Очень высокая	Очень высокая	Средняя	Основной метод
Wi-Fi OTA	Средняя	Средняя	Высокая	Полевые условия
Radio OTA	Низкая	Низкая	Высокая	Удаленные БАС
SD-карта	Низкая	Высокая	Низкая	Автономные системы

Инструменты обновления

Официальные инструменты:

Mission Planner (для ArduPilot):

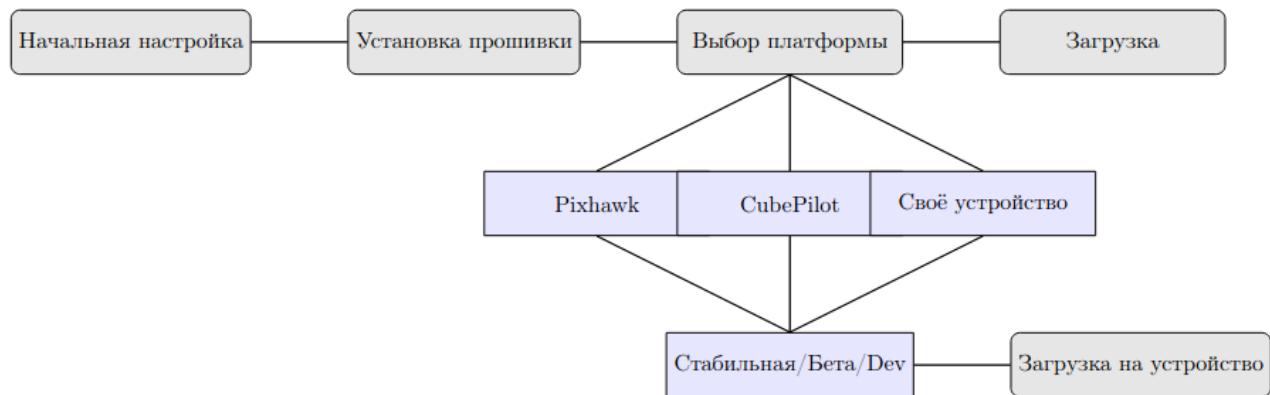


Рис. 84. Процедура обновления в Mission Planner

QGroundControl (для PX4):

- Автоматическое определение типа контроллера;
- Загрузка прошивки с серверов PX4;
- Встроенная верификация целостности;
- Автоматический откат при сбоях;

Командная строка и скрипты:

PX4 Firmware Update через командную строку:

```
# Установка инструментов
pip install pyserial
```

```
# Загрузка прошивки  
python px_uploader.py --port COM3 px4fmu-v5_default.px4  
  
# Проверка успешности  
px4_io status
```

Специализированные программаторы:

- ST-Link для STM32 процессоров;
- J-Link для ARM Cortex;
- Black Magic Probe для отладки;

Процедуры создания резервных копий

Backup полетного контроллера включает:

Резервная копия прошивки:

```
# Чтение прошивки через OpenOCD  
openocd -f pixhawk.cfg -c "init; reset halt; \  
flash read_bank 0 firmware_backup.bin; exit"
```

Сохранение параметров:

- Экспорт всех параметров в файл.param;
- Запись пользовательских настроек;
- Сохранение калибровочных данных;
- Архивирование логов полетов;

```
BACKUP_FOLDER_YYYYMMDD/
  └── firmware/
      ├── current_firmware.px4
      ├── bootloader.bin
      └── version_info.txt
  └── parameters/
      ├── all_parameters.param
      ├── custom_settings.param
      └── calibration_data.param
  └── logs/
      ├── flight_logs/
      └── system_logs/
  └── documentation/
      ├── configuration.md
      ├── modification_log.md
      └── hardware_info.txt
  └── tools/
      ├── update_scripts/
      └── recovery_tools/
```

Рис. 85. Структура полной резервной копии БАС

7.2.3 Процедуры безопасного обновления

Пошаговая процедура обновления

Детализированный алгоритм безопасного обновления:

Этап 1: Предварительные проверки

Проверка состояния полетного контроллера:

- Отсутствие аппаратных ошибок;
- Стабильная работа текущей прошивки;
- Нормальное состояние flash-памяти;

Проверка инструментов обновления:

- Актуальная версия GCS;
- Исправность USB-кабеля;
- Стабильность соединения;

Подготовка рабочей среды:

- Отключение антивирусов;
- Закрытие других приложений;
- Стабильное питание компьютера;

Этап 2: Создание резервных копий

- Экспорт текущих параметров;
 - Сохранение пользовательских настроек;
 - Архивирование логов полетов;
 - Документирование текущей конфигурации;
- Этап 3: Загрузка новой прошивки

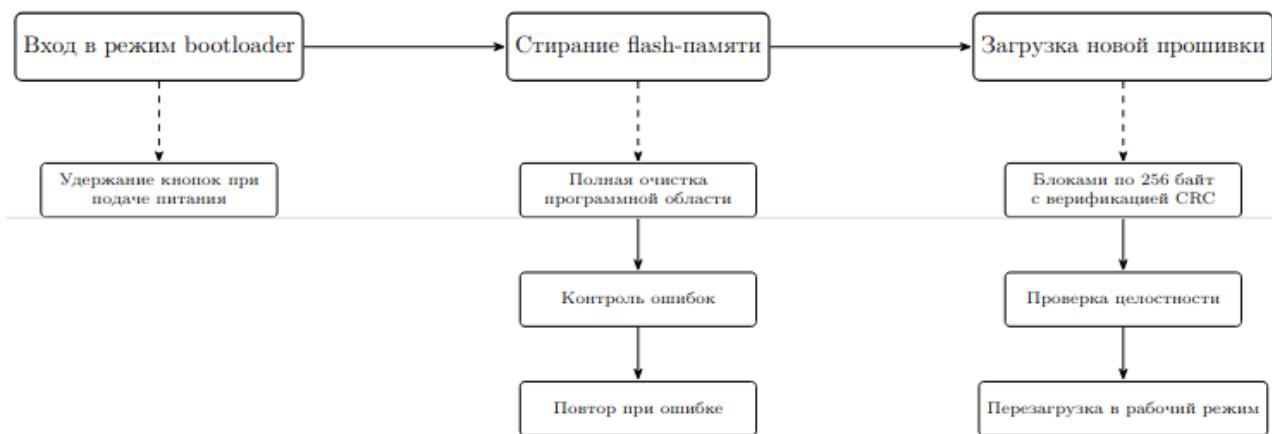


Рис. 86. Процесс загрузки прошивки

Этап 4: Первичная настройка

- Загрузка базовых параметров;
- Выбор типа БАС (квадрокоптер, гексакоптер, etc.);
- Настройка выходов на ESC;
- Базовая конфигурация датчиков;

Контроль целостности данных

Методы верификации:

Контрольные суммы (CRC/MD5/SHA):

```

// Пример проверки CRC32
uint32_t calculated_crc = crc32(firmware_data, firmware_size);
if (calculated_crc != expected_crc) {
    error("Firmware corrupted!");
    return FLASH_ERROR;
}
  
```

Цифровые подписи:

- Проверка подлинности прошивки;
- Защита от модификации;
- Гарантия источника (издателя);

Поэтапная верификация:

- Проверка каждого блока при загрузке;
- Верификация после полной загрузки;
- Функциональная проверка после запуска;

Обработка ошибок

Типичные ошибки при обновлении:

Таблица 89

Ошибки обновления и методы устранения

Ошибка	Причина	Решение
"Bootloader not found"	Неправильный режим контроллера	Повторный вход в bootloader
"Flash write error"	Аппаратная неисправность	Проверка питания, замена контроллера
"CRC mismatch"	Поврежденный файл прошивки	Повторная загрузка файла
"Upload timeout"	Проблемы с USB/кабелем	Замена кабеля, проверка портов
"Version mismatch"	Несовместимость версий	Проверка совместимости

7.2.4 Восстановление после сбоев

Аварийное восстановление (Unbrick)

Определение: Unbrick - процедура восстановления работоспособности полетного контроллера после неудачного обновления прошивки или других критических сбоев.

Уровни восстановления

Мягкое восстановление (Soft Recovery):

- Повторная загрузка через стандартные средства;
- Сброс параметров к заводским настройкам;
- Принудительный вход в режим bootloader;

Аппаратное восстановление (Hard Recovery):

- Использование программаторов (ST-Link, J-Link);
- Прямое программирование flash-памяти;

– Восстановление bootloader;

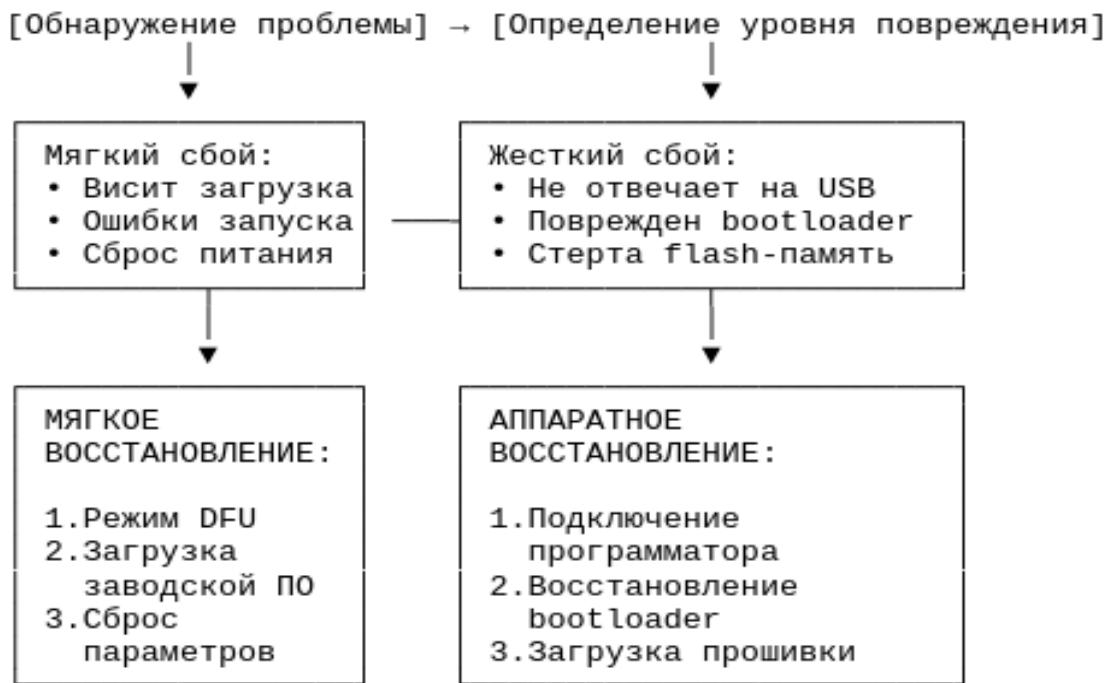


Рис. 87. Алгоритм аварийного восстановления

Использование программаторов

ST-Link программатор для контроллеров на STM32:

ST-Link V3:

3.3V	_____
SWDIO	_____
SWCLK	_____
GND	_____
NRST	_____

Pixhawk Debug Port:

VCC (pin 1)
SWDIO (2)
SWCLK (3)
GND (4)
NRST (5)

Рис. 88. Подключение ST-Link к полетному контроллеру

Команды OpenOCD для восстановления:

```
# Подключение к контроллеру
openocd -f interface/stlink-v3.cfg -f target/stm32f7x.cfg

# Стирание и программирование
> halt
```

```
> flash erase_sector 0 0 last
> flash write_image erase bootloader.bin 0x08000000
> flash write_image erase firmware.bin 0x08010000
> reset run
> exit
```

Верификация восстановления

Проверки после восстановления:

Базовые функции:

- Успешная загрузка ПО;
- Инициализация всех датчиков;
- Отклик на команды GCS;
- Корректное отображение телеметрии;

Функциональные проверки:

- Калибровка основных датчиков;
- Проверка управления двигателями;
- Тестирование режимов полета;
- Верификация системы безопасности;

7.2.5 Массовое обновление парка БАС

Автоматизация процессов обновления для эксплуатантов с большим парком БАС критична автоматизация процедур обновления:

Компоненты системы массового обновления

Центральный сервер управления:

- База данных парка БАС;
- Репозиторий прошивок;
- Система мониторинга процессов;
- Журналирование всех операций;

Клиентские станции:

- Автоматизированное ПО обновления;
- Множественные USB-порты;
- Системы идентификации БАС;

- Локальное тестирование;

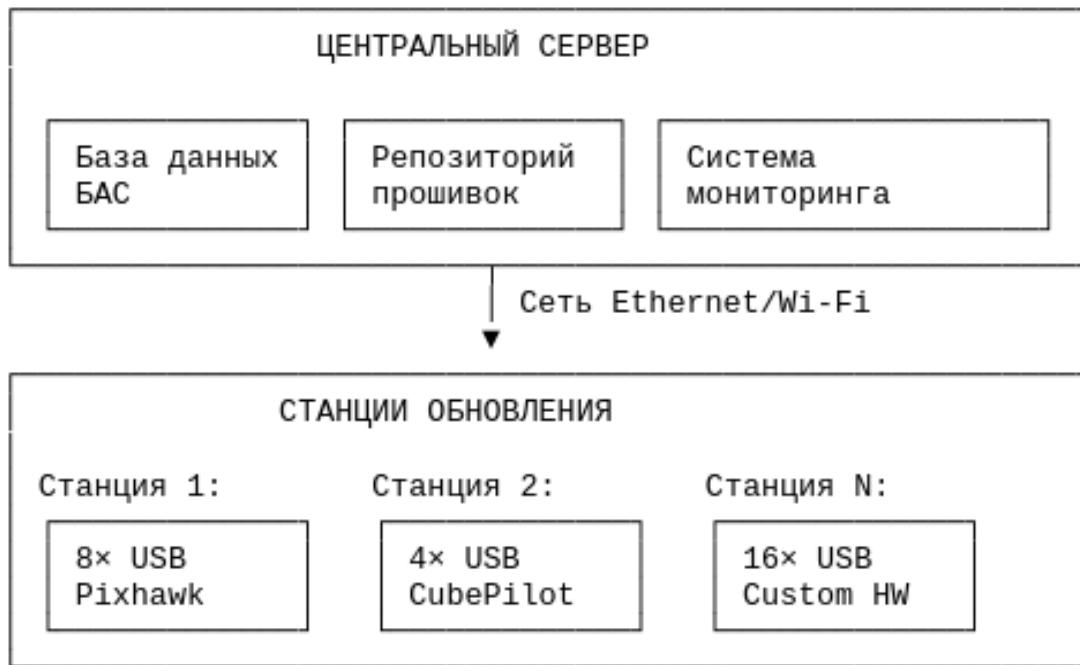


Рис. 89. Архитектура системы массового обновления

Система контроля версий для конфигураций БАС

Базовые конфигурации:

- Стандартные настройки для типов БАС;
- Проверенные параметры;
- Документированные изменения;

Пользовательские модификации:

- Адаптация под специфические задачи;
- Оптимизация под конкретное оборудование;
- Учет особенностей эксплуатации;

Версионность изменений:

- Git-репозиторий конфигураций;
- Теггинг стабильных версий;
- Ветвление для экспериментов;

Пример структуры репозитория конфигураций:

```
configs/
  base/
    quadcopter_default.param
    hexacopter_default.param
    octocopter_default.param
  mission_specific/
    survey_mapping.param
    inspection.param
    cargo_delivery.param
  hardware_specific/
    pixhawk4/
      cubepilot_orange/
        custom_autopilot/
  experimental/
    advanced_pid.param
    ml_navigation.param
```

Рис. 90. Пример структуры репозитория конфигураций

Практические задания:

Задание 1: Планирование обновления парка БАС

Исходные данные:

- Парк: 20 БАС различных типов;
- Текущие версии: ArduCopter 4.2.3 (15 шт), 4.1.5 (5 шт);
- Доступна новая версия: ArduCopter 4.3.1;
- Время обновления: 30 мин на БАС;

План работ:

- Обновление в тестовой среде - 2 часа;
- Подготовка резервных копий - 4 часа;
- Обновление основного парка - 10 часов;
- Проверка и тестирование - 6 часов;
- Общее время: 22 часа;

Задание 2: Расчет пропускной способности канала ОТА

Условия:

- Размер прошивки: 1.5 МБ;
- Скорость радиоканала: 57600 бод;
- Коэффициент полезной нагрузки: 0.8;

Расчет времени загрузки:

$$\text{Эффективная скорость} = 57600 \times 0.8 / 8 = 5760 \text{ байт/с}$$

$$\text{Время загрузки} = (1.5 \times 1024 \times 1024) / 5760 = 273 \text{ сек} \approx 4.5 \text{ минуты}$$

Контрольные вопросы:

1. Опишите многоуровневую архитектуру ПО БАС;
2. Какие факторы влияют на решение об обновлении ПО?
3. Какие методы загрузки прошивки существуют?
4. Опишите процедуру создания резервной копии;
5. Что включает в себя мягкое восстановление контроллера?
6. Как использовать ST-Link для аварийного восстановления?
7. Какие проверки выполняются после обновления?
8. Как организовать массовое обновление парка БАС?
9. Какие методы контроля целостности применяются?
10. Как управлять версиями конфигураций БАС?

Лекция 7.3: Методы калибровки датчиков и систем БАС

План лекции:

1. Теоретические основы калибровки датчиков;
2. Калибровка инерциальных датчиков (IMU);
3. Калибровка магнитометрических систем;
4. Калибровка барометрических датчиков;
5. Калибровка навигационных систем;

7.3.1 Теоретические основы калибровки датчиков

Калибровка датчика - процесс определения зависимости между показаниями датчика и истинными значениями измеряемой величины с целью минимизации систематических погрешностей.

Основные типы погрешностей

Систематические погрешности:

- Смещение нуля (bias/offset);
- Погрешность масштабного коэффициента (scale factor);
- Нелинейность характеристики преобразования;
- Температурный дрейф;

Случайные погрешности:

- Шум измерений (белый шум);
- Дрейф во времени;
- Внешние помехи;

Математическая модель датчика:

$$y_{\text{измеренное}} = K * (x_{\text{истинное}} + b) + n(t) + f(T)$$

где:

К — масштабный коэффициент

b — смещение нуля (bias)

n(t) — случайный шум

f(T) — температурная погрешность

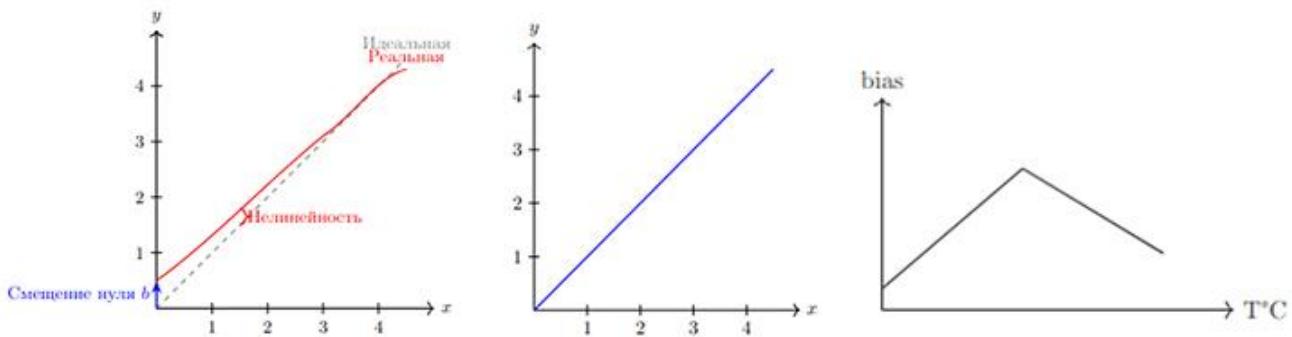


Рис. 91. Характеристики погрешностей датчиков

Основные этапы калибровки:

Подготовка эталонных условий:

- Контролируемая температура;
- Отсутствие вибраций и помех;
- Известные опорные значения;
- Стабильное положение датчика;

Сбор калибровочных данных:

- Множественные измерения в различных положениях;
- Покрытие всего рабочего диапазона;
- Статистическая обработка данных;

Вычисление калибровочных коэффициентов:

- Метод наименьших квадратов;
- Регрессионный анализ;
- Оценка качества калибровки;

Применение и верификация:

- Сохранение коэффициентов в энергонезависимую память;
- Проверка на независимых данных;
- Долговременный мониторинг стабильности;

7.3.2 Калибровка инерциальных датчиков (IMU)

Инерциальный измерительный блок (IMU) содержит:

- Трехосевой гироскоп (измерение угловых скоростей);
- Трехосевой акселерометр (измерение ускорений);

- Иногда: трехосевой магнитометр;
- Калибровка акселерометра

Цель: Определение и компенсация смещений нуля и масштабных коэффициентов по всем трем осям.

Модель акселерометра:

$$a_{\text{калиброванное}} = K * (a_{\text{сырое}} - b)$$

где:

K = диагональная матрица масштабов [K_x, K_y, K_z]

b = вектор смещений [b_x, b_y, b_z]

Процедура 6-позиционной калибровки:

Положение 1: +X вверх Положение 2: -X вверх

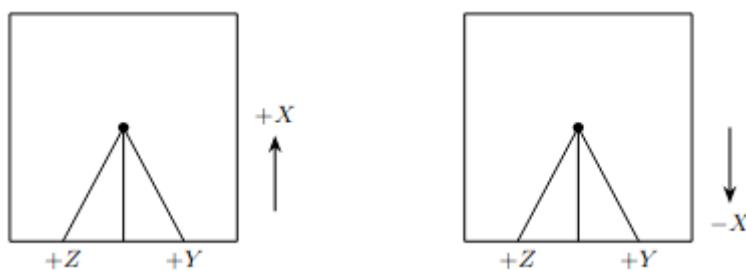


Рис. 92. Процедура 6-позиционной калибровки

Положение 3: +Y вверх Положение 4: -Y вверх

Положение 5: +Z вверх Положение 6: -Z вверх

В каждом положении один из векторов
должен показывать $\pm 9.81 \text{ м/с}^2$

Математическое решение калибровки:

Система уравнений для каждой оси:

Для оси X:

$$a_{x_1} = K_x * (raw_{x_1} - bx) = +9.81 \text{ (положение +X вверх)}$$

$$a_{x_2} = K_x * (raw_{x_2} - bx) = -9.81 \text{ (положение +X вверх)}$$

Решение:

$$K_x = 19.62 / (raw_{x_1} - raw_{x_2})$$

$$bx = (raw_{x_1} + raw_{x_2}) / 2$$

Качество калибровки оценивается по:

- RMS ошибка $< 0.1 \text{ м/с}^2$;
- Модуль вектора в покое $= 9.81 \pm 0.05 \text{ м/с}^2$;

– Стабильность во времени;

Калибровка гироскопа

Цель: Определение и компенсация смещения нуля (дрейфа) гироскопов.

Процедура калибровки

- Неподвижное положение БАС на 5-10 минут;
- Сбор данных с частотой 100-1000 Гц;
- Усреднение для определения bias;
- Проверка стабильности bias;

Температурная калибровка:

- Измерение bias при различных температурах;
- Построение температурной зависимости;
- Сохранение коэффициентов компенсации;

Алгоритм статической калибровки:

```
// Псевдокод калибровки гироскопа
float gyro_bias[3] = {0, 0, 0};
int samples = 1000;

for (int i = 0; i < samples; i++) {
    read_gyro_raw(&gyro_raw);

    gyro_bias[0] += gyro_raw[0];
    gyro_bias[1] += gyro_raw[1];
    gyro_bias[2] += gyro_raw[2];

    delay(10); // 100 Гц
}

// Усреднение
gyro_bias[0] /= samples;
gyro_bias[1] /= samples;
gyro_bias[2] /= samples;

// Применение калибровки
gyro_calibrated[i] = gyro_raw[i] - gyro_bias[i];
```

Таблица 90

Нормативы качества калибровки IMU

Параметр	Норма	Метод проверки
RMS шум акселерометра	<0.01 м/с ²	Статистический анализ
Дрейф гироскопа	<0.1°/час	Долговременная стабильность
Смещение после калибровки	<0.02 м/с ² (акс), <0.1°/с (гир)	Сравнение с эталоном
Температурный дрейф	<0.001/°C	Термокамера

7.3.3 Калибровка магнитометрических систем

Магнитометр (компас) - датчик для измерения направления и величины магнитного поля Земли, используемый для определения курсового угла БАС.

Искажения магнитного поля

Источники искажений:

Жесткое железо (Hard Iron):

- Постоянные магниты в конструкции БАС;
- Намагниченные стальные детали;
- Постоянные токи в проводниках;

Мягкое железо (Soft Iron):

- Ферромагнитные материалы в переменных полях;
- Индуктивные элементы;
- Экранирующие корпуса;

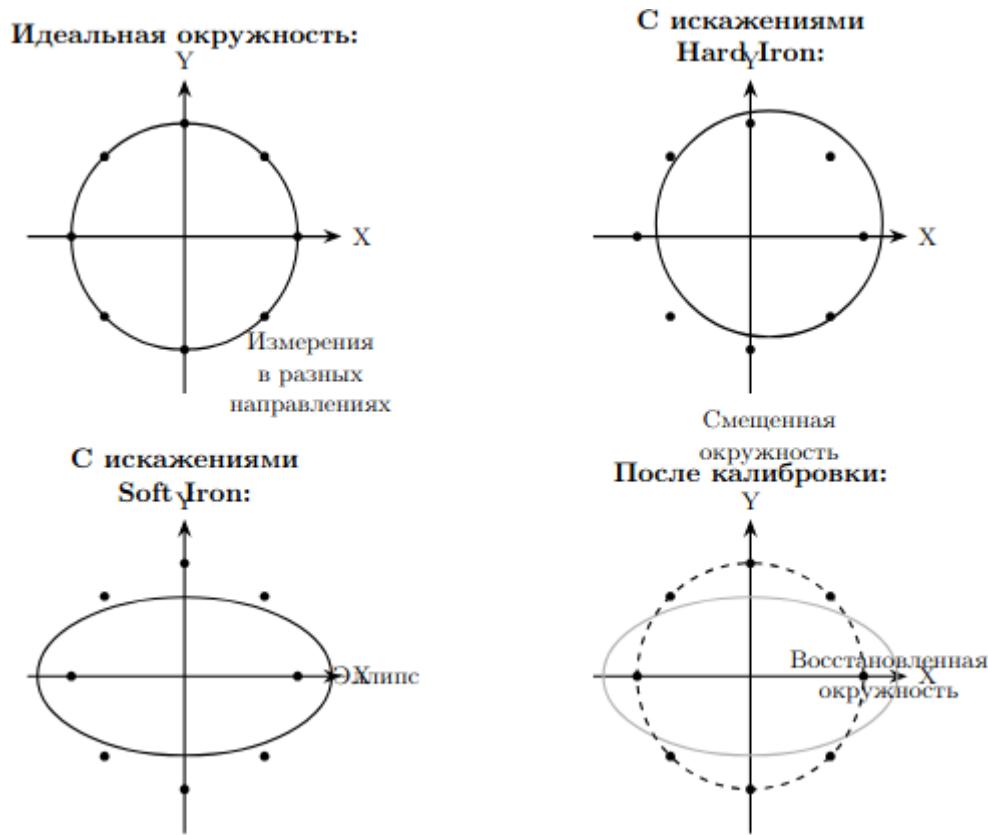


Рис. 93. Влияние искажений на показания магнитометра

Процедура калибровки компаса

Метод эллипсоидной аппроксимации

Сбор данных калибровки:

- Медленное вращение БАС во всех направлениях;
- Покрытие всей сферы ориентаций;
- Не менее 300-500 точек измерений;
- Равномерное распределение по направлениям;

Математическая обработка

Модель коррекции:

$$B_{\text{истинное}} = A * (B_{\text{измеренное}} - b)$$

где:

A — матрица компенсации Soft Iron (3×3)

b — вектор компенсации Hard Iron (3×1)

Алгоритм решения:

Минимизация функционала

$$J = \sum (|A * (B_i - b)| - |B_{\text{земли}}|)^2$$

Итеративное решение методом Ньютона-Гаусса

или алгоритмом Левенберга-Марквардта

Программная реализация в ArduPilot:

Таблица 91

Параметры калибровки компаса в ArduPilot

Параметр	Назначение	Типичное значение
COMPASS_OFS_X/Y/Z	Смещение Hard Iron	±200 единиц
COMPASS_DIA_X/Y/Z	Диагональ матрицы Soft Iron	0,8-1,2
COMPASS_ODI_X/Y/Z	Недиагональные элементы	±0,2
COMPASS_LEARN	Автообучение в полете	0-3

Критерии успешной калибровки:

Статистические показатели:

- Фитнесс калибровки: >95%;
- RMS ошибка: <50 единиц;
- Равномерность покрытия сферы: >80%;

Функциональные проверки:

- Сравнение с известными направлениями;
- Проверка в различных местах;
- Стабильность показаний во времени;

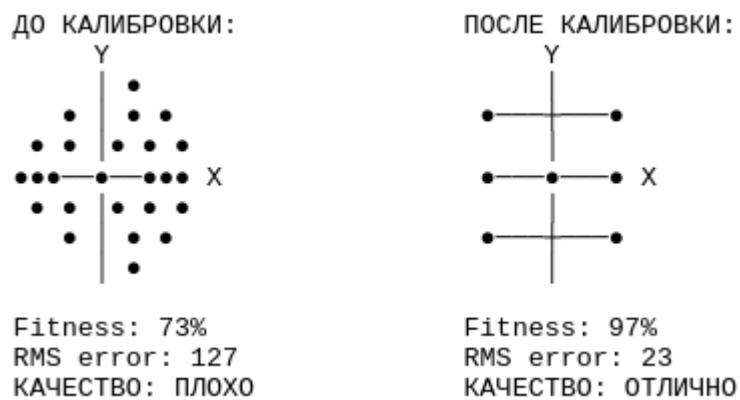


Рис. 94. Визуализация качества калибровки компаса

7.3.4 Калибровка барометрических датчиков

Барометрический датчик измеряет атмосферное давление для определения высоты полета БАС.

Принцип барометрического высотомера

Барометрическая формула:

$$h = (T_0/L) * ((P_0 / P)^{(R*L/g * M)} - 1)$$

где:

h – высота над уровнем моря, м

T₀ – температура на уровне моря, К (288.15)

L – градиент температуры, К/м (0.0065)

P₀ – давление на уровне моря, Па (101325)

P – текущее давление, Па

R – газовая постоянная, Дж/(моль×К) (8.314)

g – ускорение свободного падения, м/с² (9.81)

M – молярная масса воздуха, кг/моль (0.029)

Упрощенная формула для малых высот:

$$h \approx 44330 \times (1 - (P/P_0)^{0.1903})$$

Калибровка барометра

Процедура калибровки:

Калибровка уровня моря:

- Установка БАС на известной высоте;
- Измерение текущего атмосферного давления;
- Расчет приведенного давления для уровня моря;
- Сохранение базового давления;

Температурная компенсация:

- Измерения при различных температурах;
- Определение температурного коэффициента;
- Коррекция показаний в реальном времени;

Известная высота GPS: $h_{GPS} = 245$ м

Измеренное давление: P = 97500 Па

Расчет давления уровня моря:

$$P_0 = P / (1 - h_{GPS} / 44330)^{5.2555}$$
$$P_0 = 97500 / (1 - 245/44330)^{5.2555} = 100850 \text{ Па}$$

Сохранение в параметр BARO_GND_PRESS = 100850

Источники ошибок барометра:

- Температурный дрейф: ±1 м на 10°C;
- Изменения погоды: ±10 м за час;

- Динамические эффекты: ± 2 м при маневрах;
- Высотная зависимость: нелинейность;

Таблица 92

Параметры калибровки барометра

Параметр	Назначение	Типичное значение
BARO_GND_PRESS	Давление уровня моря	95000-105000 Па
BARO_TEMP_COMP	Температурная компенсация	± 50 Па/ $^{\circ}$ С
BARO_ALT_OFFSET	Смещение высоты	0 м
EK2_ALT_NOISE	Шум высоты для фильтра Калмана	0,1-1,0 м

7.3.5 Калибровка навигационных систем

GPS/GNSS калибровка

Современные GNSS приемники требуют минимальной калибровки благодаря:

- Заводской калибровке антенн;
- Автоматической компенсации ошибок;
- Дифференциальным методам;

Основные настройки GNSS

Выбор созвездий спутников:

- GPS (США);
- ГЛОНАСС (Россия);
- Galileo (ЕС);
- BeiDou (Китай);

Настройка точности:

- SBAS (WAAS/EGNOS) - точность ~ 1 м;
- RTK - точность ~ 2 см;
- PPK - точность ~ 1 см (постобработка);

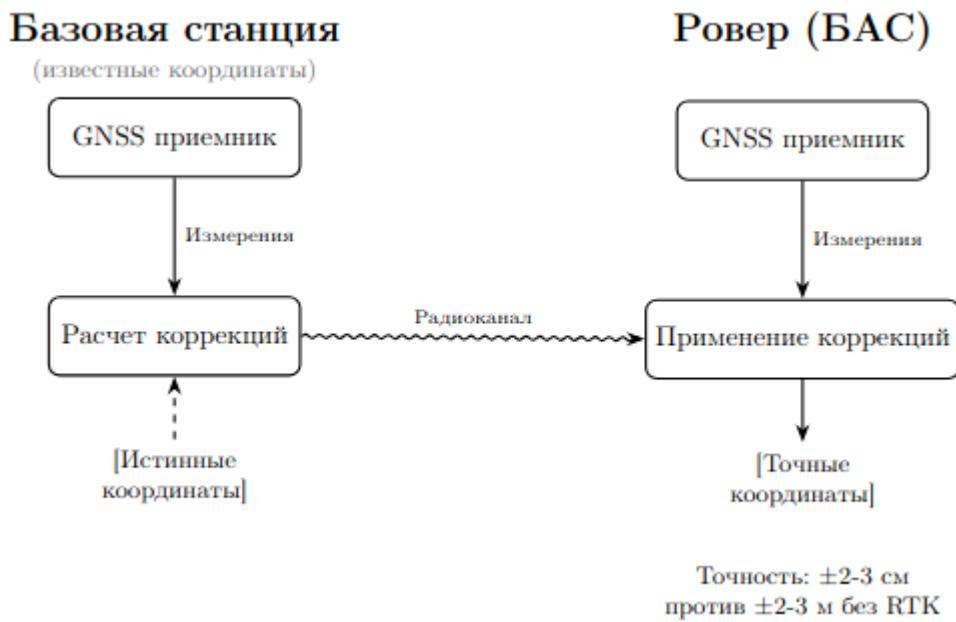


Рис. 95. Схема RTK коррекций

Интегрированная навигация

Комплексирование различных источников навигационной информации:

Фильтр Калмана для комплексирования:

- GPS – абсолютное позиционирование;
- IMU – относительное позиционирование;
- Барометр – высота;
- Компас – курс;
- Оптические датчики – локальное позиционирование;

Расширенный фильтр Калмана (EKF):

Вектор состояния системы:

$$X = [x, y, z, vx, vy, vz, qw, qx, qy, qz, bax, bay, baz, bgx, bgy, bgz]$$

где:

x, y, z – координаты

vx, vy, vz – скорости

qw, qx, qy, qz – кватернион ориентации

bax, bay, baz – смещения акселерометра

bgx, bgy, bgz – смещения гироскопа

Процедура настройки EKF:

Таблица 93

Основные параметры настройки EKF2

Параметр	Назначение	Типичное значение
EKF2_GPS_POS_X/Y/Z	Смещение GPS антенны	±20 см
EKF2_ACC_NOISE	Шум акселерометра	0.35 м/с ²
EKF2_GYR_NOISE	Шум гироскопа	0.015 рад/с
EKF2_MAG_NOISE	Шум магнитометра	0.05 Гаусс
EKF2_BARO_NOISE	Шум барометра	2.0 м

Практические задания:

Задание 1: Анализ качества калибровки IMU

Данные калибровки акселерометра:

Положение +X: raw = [2048, 45, -23]

Положение -X: raw = [-2010, 42, -20]

Положение +Y: raw = [43, 2052, -25]

Положение -Y: raw = [38, -2015, -22]

Положение +Z: raw = [41, -21, 2055]

Положение -Z: raw = [39, -24, -2018]

Расчет калибровочных коэффициентов:

$$K_x = 19.62 / (2048 - (-2010)) = 0.00484$$

$$b_x = (2048 + (-2010)) / 2 = 19$$

$$K_y = 19.62 / (2052 - (-2015)) = 0.00483$$

$$b_y = (2052 + (-2015)) / 2 = 18.5$$

$$K_z = 19.62 / (2055 - (-2018)) = 0.00482$$

$$b_z = (2055 + (-2018)) / 2 = 18.5$$

Задание 2: Оценка дрейфа гироскопа

Данные 10-минутного теста покоя:

– Начальные показания: [0.02, -0.01, 0.03] °/с;

– Конечные показания: [0.05, -0.02, 0.04] °/с;

– Температура изменилась с 25°C до 28°C;

Расчет дрейфа:

$$\text{Дрейф} = |\text{Конечные} - \text{Начальные}| / \text{Время}$$

X: $|0.05 - 0.02| / 10 \text{ мин} = 0.003 \text{ }^{\circ}/\text{с/мин} = 0.18 \text{ }^{\circ}/\text{час}$

Y: $|-0.02 - (-0.01)| / 10 \text{ мин} = 0.001 \text{ }^{\circ}/\text{с/мин} = 0.06 \text{ }^{\circ}/\text{час}$

Z: $|0.04 - 0.03| / 10 \text{ мин} = 0.001 \text{ }^{\circ}/\text{с/мин} = 0.06 \text{ }^{\circ}/\text{час}$

ОЦЕНКА: Дрейф в норме ($<0.1 \text{ }^{\circ}/\text{час}$)

Контрольные вопросы:

Какие типы погрешностей характерны для датчиков БАС?

1. Опишите процедуру 6-позиционной калибровки акселерометра;
2. Как выполняется статическая калибровка гироскопа?
3. Что такое Hard Iron и Soft Iron искажения магнитного поля?
4. Какие методы используются для калибровки компаса?
5. Как работает барометрический высотомер?
6. Что такое EKF и для чего он используется?
7. Какие параметры влияют на точность навигации?
8. Как проверить качество калибровки датчиков?
9. Какие факторы влияют на стабильность показаний датчиков?

Лекция 7.4: Цифровые технологии и настройка параметров полетного контроллера

План лекции:

1. Современные цифровые технологии в БАС;
2. Автоматизированные системы калибровки;
3. Машинное обучение в настройке параметров;
4. Облачные технологии и удаленное управление;
5. Настройка PID-регуляторов и системы управления;

7.4.1 Современные цифровые технологии в БАС

Цифровая трансформация в области БАС включает применение современных информационных технологий для повышения эффективности, безопасности и автономности беспилотных систем.

Применение ИИ в БАС

Компьютерное зрение:

- Автоматическое обнаружение объектов;
- Распознавание образов;
- Трекинг движущихся целей;
- Анализ состояния инфраструктуры;

Планирование траекторий:

- Оптимизация маршрутов;
- Обход препятствий;
- Адаптация к изменяющимся условиям;
- Энергоэффективное планирование;

Предиктивное обслуживание:

- Прогнозирование отказов компонентов;
- Оптимизация графиков ТО;
- Анализ деградации системы;
- Рекомендации по замене компонентов;

Таблица 94

Области применения ИИ в БАС

Область	Технология	Применение	Выигрыш
Управление полетом	Reinforcement Learning	Адаптивное управление	±15% эффективности
Обработка изображений	CNN/YOLO	Детекция объектов	95%+ точность
Навигация	SLAM	Бесспутниковая навигация	Полеты в помещениях
Предиктивная диагностика	Time Series ML	Прогноз отказов	-30% внеплановых ТО

Определение: Edge Computing - вычислительная парадигма, при которой обработка данных происходит локально на борту БАС, а не в удаленных облачных серверах.

Преимущества Edge Computing:

- Минимальная задержка обработки (< 10 мс);
- Независимость от качества связи;
- Снижение объема передаваемых данных;
- Повышение автономности системы;



Рис. 96. Архитектура Edge Computing в БАС

Цифровые двойники БАС

Digital Twin - виртуальная модель БАС, синхронизированная с реальным объектом и используемая для симуляции, анализа и оптимизации.

Компоненты цифрового двойника:

- Геометрическая модель - 3D CAD модель конструкции;
- Физическая модель - математическое описание динамики;
- Данные телеметрии - реальные данные с борта БАС;
- Алгоритмы анализа - ИИ для обработки данных;

Применение цифровых двойников:

- Виртуальное тестирование новых конфигураций;
- Анализ причин инцидентов;
- Оптимизация параметров управления;
- Предсказание поведения в различных условиях;

7.4.2 Автоматизированные системы калибровки

Автокалибровка в полете

In-Flight Calibration - процесс автоматической калибровки датчиков во время полета с использованием избыточной информации от различных источников.

Алгоритм автокалибровки акселерометра:

Детекция периодов постоянного ускорения:

Критерии выбора участков для калибровки:

- $|a_{\text{измеренное}}| \approx 9.81 \text{ м/с}^2$ (в пределах $\pm 5\%$)
- Стабильность измерений > 3 секунд
- Различные ориентации БАС
- Отсутствие резких маневров

Накопление данных калибровки:

- Сбор измерений в различных ориентациях;
- Фильтрация выбросов и помех;
- Статистическая обработка данных;
- Проверка качества аппроксимации;

Обновление калибровочных коэффициентов:

- Расчет новых коэффициентов;
- Постепенное обновление (плавная адаптация);
- Контроль качества новой калибровки;
- Откат при ухудшении показателей;

Машинное обучение для оптимизации параметров

Автоматическая настройка PID-регуляторов:

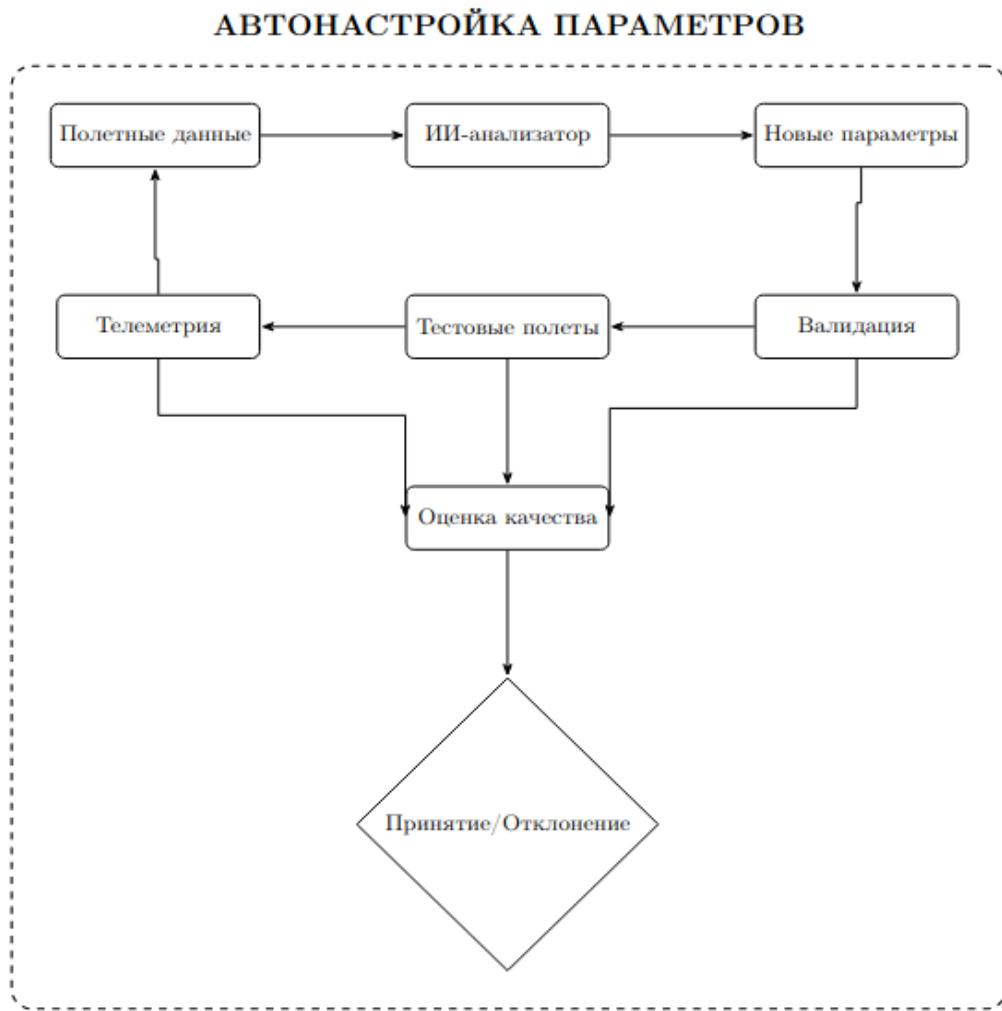


Рис. 97. Система автоматической настройки параметров

AutoTune алгоритм в ArduCopter:

Принцип работы:

- Активация режима автонастойки;
- Автоматическое выполнение тестовых маневров;
- Анализ реакции БАС на управляющие воздействия;
- Расчет оптимальных PID коэффициентов;
- Применение и тестирование новых настроек;

Тестовые сигналы AutoTune:

- Ступенчатые воздействия по углам;
- Синусоидальные колебания различных частот;
- Импульсные возмущения;
- Комбинированные сигналы;

7.4.3 Облачные технологии и удаленное управление

Облачные платформы для БАС

Современные облачные решения обеспечивают:

- Централизованное управление флотом БАС;
- Хранение и анализ больших объемов данных;
- Машинное обучение на основе агрегированных данных;
- Удаленную диагностику и обновление ПО;

Таблица 95

Сравнение облачных платформ для БАС

Платформа	Разработчик	Возможности	Стоимость
DJI FlightHub 2	DJI	Управление флотом DJI	\$99/мес за 10 БАС
UgCS Cloud	SPH Engineering	Универсальная платформа	€50/мес за БАС
Drone Deploy	DroneDeploy	Картографические миссии	\$299/мес
AirData UAV	AirData	Анализ логов и аналитика	\$19/мес за 5 БАС

Архитектура облачных решений

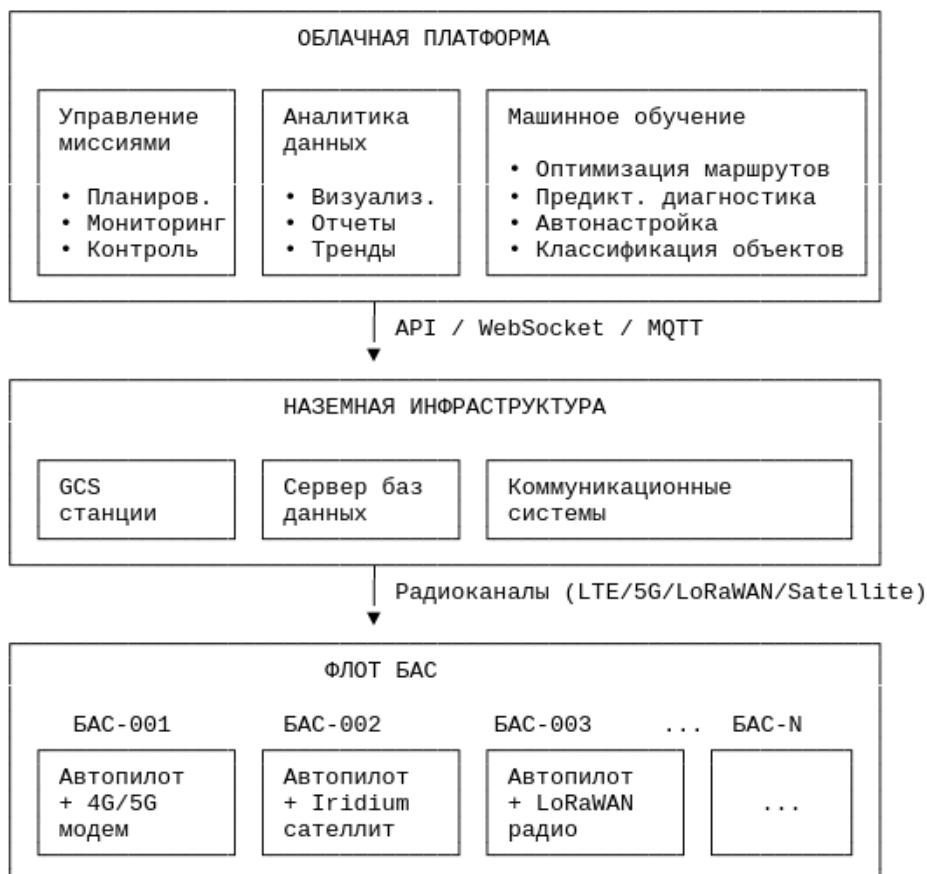


Рис. 98. Облачная система БАС

Цифровые технологии калибровки

Компьютерное зрение для калибровки:

- Автоматическое обнаружение калибровочных мишеней;
- Точное определение опорных точек;
- Компенсация искажений изображения;
- Автоматический расчет параметров;

Виртуальная и дополненная реальность:

- VR-симуляторы для обучения операторов;
- AR-интерфейсы для технического обслуживания;
- Виртуальное тестирование настроек;
- Интерактивная диагностика;

Интернет вещей (IoT) в БАС

IoT компоненты:

- Умные датчики с встроенной обработкой;
- Беспроводные сенсорные сети;

- Системы удаленного мониторинга;
- Автономные системы принятия решений;

Таблица 96

Сравнение IoT протоколов

Протокол	Дальность	Энергопотребление	Скорость	Применение
Wi-Fi	100 м	Высокое	150 Мбит/с	Наземные станции
Bluetooth LE	10 м	Очень низкое	2 Мбит/с	Датчики ближнего радиуса
LoRaWAN	15 км	Низкое	50 кбит/с	Удаленный мониторинг
NB-IoT	35 км	Низкое	250 кбит/с	Сотовая связь
Zigbee	100 м	Низкое	250 кбит/с	Сенсорные сети

7.4.4 Автоматизированные системы настройки

Адаптивные системы управления

Адаптивное управление - подход, при котором параметры регуляторов автоматически изменяются в зависимости от текущих условий полета и характеристик БАС.



Рис. 99. Схема адаптивного управления

Нейросетевые регуляторы

Применение нейронных сетей для управления БАС:

Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning):

- Агент (БАС) взаимодействует с средой;
- Получение награды за успешные действия;
- Оптимизация стратегии управления;
- Адаптация к новым условиям;

Сверточные нейронные сети для восприятия:

- Обработка изображений с камер;
- Обнаружение препятствий;
- Классификация объектов на земле;
- Навигация по визуальным ориентирам;

Архитектура нейросетевого регулятора:

```
# Пример архитектуры на TensorFlow
model = tf.keras.Sequential([
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu',
input_shape=(12,)),
    tf.keras.layers.Dense(64, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(32, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(4, activation='tanh') # 4 мотора
])

# Вход: [ax, ay, az, gx, gy, gz, roll, pitch, yaw, alt, vx, vy]
# Выход: [motor1, motor2, motor3, motor4] команды двигателям
```

7.4.5 Настройка pid-регуляторов и системы управления

Структура каскадных регуляторов

Система управления мультикоптером построена по каскадному принципу:

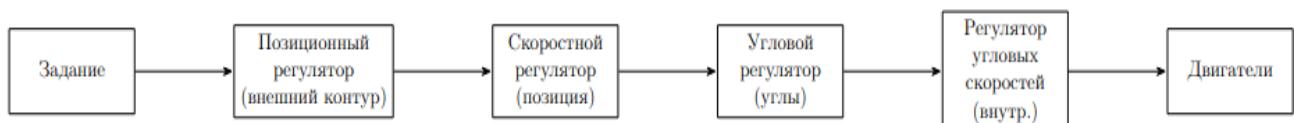


Рис. 100. Каскадная структура системы управления

Частоты работы различных контуров:

- Угловые скорости: 500-1000 Гц;
 - Углы (attitude): 100-250 Гц;
 - Позиция: 50-100 Гц;
 - Навигация: 10-50 Гц;
- Методы настройки PID-регуляторов

Метод Циглера-Никольса

Шаги настройки:

1. Установить $K_i = 0$, $K_d = 0$
2. Увеличивать K_p до появления устойчивых колебаний
3. Зафиксировать критические значения KP_{kp} и T_{kp}
4. Рассчитать коэффициенты:

$$K_p = 0.6 * KP_{kp}$$

$$K_i = 2 * K_p / T_{kp}$$

$$Kd = Kp * T_{kp} / 8$$

Метод модельной настройки:

Идентификация объекта управления:

- Подача тестовых сигналов;
- Анализ переходных характеристик;
- Построение математической модели;
- Синтез регулятора по модели;

Таблица 97

Типовые параметры PID для различных осей управления

Регулято р	Kp	Ki	Kd	Фильтр	Назначение
Rate Roll	0,13 5	0,09 0	0,003 6	20 Гц	Угловая скорость крена
Rate Pitch	0,13 5	0,09 0	0,003 6	20 Гц	Угловая скорость тангажа
Rate Yaw	0,18 0	0,01 8	0,000 0	20 Гц	Угловая скорость рыскания

Регулятор	K_p	K_i	K_d	Фильтр	Назначение
Angle Roll	4,5	0,0	0,0	-	Угол крена
Angle Pitch	4,5	0,0	0,0	-	Угол тангажа

Цифровые фильтры в системе управления

Фильтры низких частот (НЧ):

- Подавление высокочастотных помех;
- Сглаживание команд управления;
- Предотвращение насыщения приводов;

Режекторные фильтры (Notch):

- Подавление резонансных частот;
- Устранение вибраций от пропеллеров;
- Адаптивная настройка частоты;

Калмановские фильтры:

- Оптимальная фильтрация в присутствии шума;
- Комплексирование данных различных датчиков;
- Предсказание состояния системы;

Адаптивная настройка фильтров

Алгоритм FFT-анализа для автонастройки Notch-фильтров:

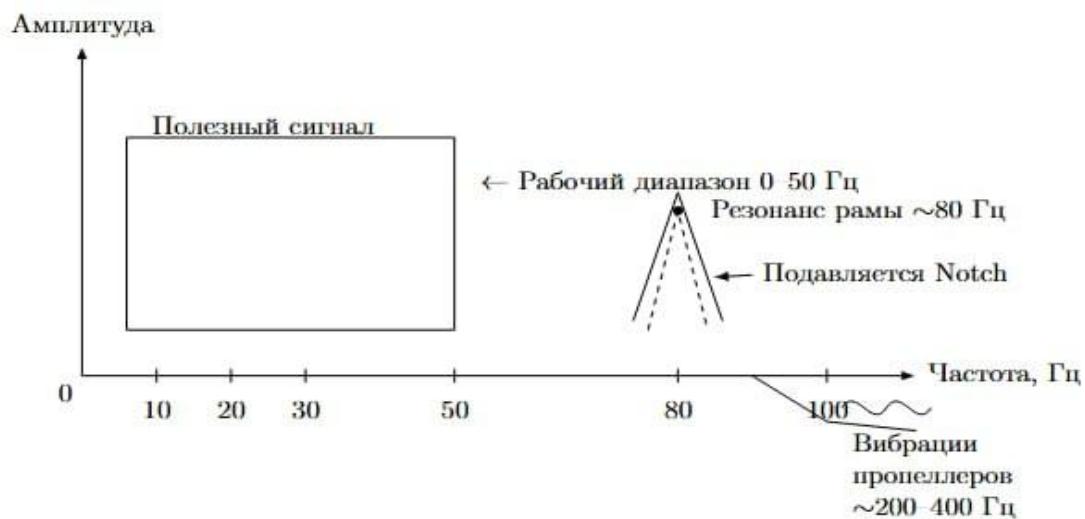


Рис. 101. Спектр вибраций и настройка фильтров

Сбор данных вибраций:

- Запись показаний гироскопов в полете;
- Частота дискретизации: 1-2 кГц;
- Продолжительность записи: 10-60 секунд;

Спектральный анализ:

```
# Пример FFT анализа
import numpy as np
import scipy.signal

# Применение оконной функции
windowed_data = gyro_data * np.hanning(len(gyro_data))

# Расчет спектра мощности
frequencies, psd = scipy.signal.welch(windowed_data, fs=1000)

# Поиск пиков
peaks, _ = scipy.signal.find_peaks(psd, height=threshold)
peak_frequencies = frequencies[peaks]
```

Автоматическая настройка:

- Определение доминирующих частот;
- Расчет параметров Notch-фильтров;
- Применение новых настроек;
- Контроль эффективности;

7.4.6 Системы самодиагностики и мониторинга

Встроенные системы диагностики

BIT (Built-In Test) - встроенная система самотестирования, выполняющая автоматическую проверку работоспособности систем БАС.

Уровни самодиагностики:

Power-On BIT (PBIT):

- Выполняется при включении питания;
- Проверка базовых функций процессора;
- Инициализация и тестирование датчиков;
- Верификация целостности ПО;

Continuous BIT (CBIT):

- Непрерывный мониторинг в процессе работы;
- Контроль параметров в реальном времени;
- Детекция отказов и деградации;
- Автоматическое переключение на резервные системы;

Initiated BIT (IBIT):

- Запуск по команде оператора;
- Углубленная диагностика всех систем;
- Измерение точных параметров;
- Калибровка и настройка;

Таблица 98

Программа встроенной самодиагностики

Система	PBIT	СВИТ	IBIT	Критерии исправности
Процессор	Тест памяти	Контроль загрузки CPU	Стресс-тест	<80% загрузки
IMU	Диапазон показаний	Шум и дрейф	Полная калибровка	Шум <0.01 м/с ²
GPS	Инициализация	Количество спутников	Точность позиции	HDOP <2.0
Моторы	Подвижность	Ток потребления	Тяговые характеристики	Ток <80% номинала
Связь	Подключение	Качество сигнала	Дальность связи	RSSI >-90 дБм

Алгоритмы прогнозирования отказов

Анализ трендов:

- Отслеживание деградации параметров;
- Построение прогностических моделей;
- Определение остаточного ресурса;

Детекция аномалий:

- Статистические методы;
- Методы машинного обучения;

- Нейросетевые детекторы;

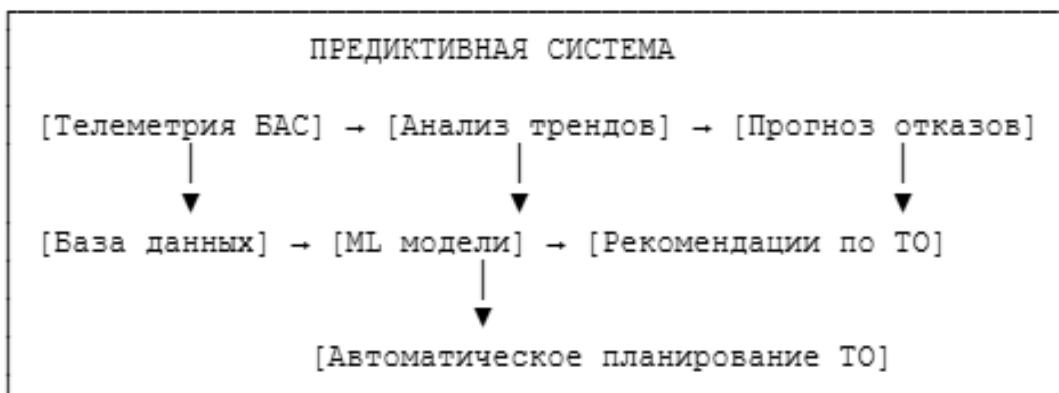


Рис. 102. Система предиктивного обслуживания

Примеры прогностических моделей:

- Остаточный ресурс подшипников двигателя
- Деградация емкости аккумуляторов
- Износ контактных групп
- Дрейф датчиков IMU

Практические задания:

Задание 1: Настройка Notch-фильтра

Данные спектрального анализа:

- Резонансная частота рамы: 85 Гц;
- Амплитуда пика: -20 дБ относительно полезного сигнала;
- Ширина пика: ±5 Гц;

Настройка фильтра:

`INS_NOTCH_ENABLE = 1`

`INS_NOTCH_FREQ = 85 # Центральная частота`

`INS_NOTCH_BW = 10 # Полоса заграждения`

`INS_NOTCH_ATT = 40 # Глубина подавления, дБ`

Задание 2: Анализ качества настройки PID

Результаты тестового полета:

- Заданный крен: 10°;
- Время переходного процесса: 0.8 сек;
- Перерегулирование: 15%;

– Установившаяся ошибка: 0.5° ;

Оценка и коррекция:

Проблема: Перерегулирование $>10\%$

Решение: Уменьшить K_p на 20% или увеличить K_d на 30%

До: $ATC_ANG_RLL_P = 4.5$

После: $ATC_ANG_RLL_P = 3.6$ (уменьшение K_p)

или: $ATC_RAT_RLL_D = 0.0036 \rightarrow 0.0047$ (увеличение K_d)

Контрольные вопросы:

1. Какие цифровые технологии применяются в современных БАС?
2. Как работает система автокалибровки в полете?
3. Что такое Edge Computing и каковы его преимущества для БАС?
4. Опишите принцип работы адаптивных систем управления;
5. Какие методы машинного обучения применяются в БАС?
6. Как работают облачные платформы для управления флотом БАС?
7. Что включает в себя встроенная система самодиагностики?
8. Как настраиваются Notch-фильтры для подавления вибраций?
9. Опишите каскадную структуру системы управления БАС;
10. Как работает предиктивная диагностика компонентов?

Рекомендуемая литература:

Основная литература:

- ГОСТ Р 58880-2020 «Системы беспилотные авиационные. Общие требования»;
- Beard R.W., McLain T.W. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. - Princeton University Press, 2012;
- Валаванис К., Вачевианос Дж. Справочник по беспилотным летательным аппаратам. - М.: Техносфера, 2015;

Техническая документация:

- ArduPilot Documentation – Complete Vehicle Setup - <https://ardupilot.org/copter/>;
- PX4 Autopilot User Guide - <https://docs.px4.io/main/en/>;
- Betaflight Configuration Manual - <https://betaflight.com/docs/>;
- Стандарты и спецификации:
- RTCA DO-178C "Software Considerations in Airborne Systems";
- ASTM F3269-17 "Standard Practice for UAS Flight Behavior"

– -ISO/IEC 15408 "Common Criteria for Information Technology Security Evaluation"

– Специализированная литература:

– LaValle S.M. Planning Algorithms. - Cambridge University Press, 2006;

– Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. - 2nd Edition, Springer, 2016;

– Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. - MIT Press, 2016;

Интернет-ресурсы:

– MAVLink Protocol Documentation - <https://mavlink.io/en/>;

– Dronecode Foundation - <https://www.dronecode.org/>;

– OpenCV Documentation - <https://docs.opencv.org/>;

– TensorFlow Documentation - https://www.tensorflow.org/api_docs;

ТЕМА 8: ВЕДЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ И ХРАНЕНИЕ БАС

Лекция 8.1: Система технической документации

Определение: Техническая документация БАС - комплекс документов, регламентирующих эксплуатацию и обслуживание системы.

Обязательные документы:

Таблица 99

Перечень технической документации

Тип документа	Назначение	Периодичность обновления
Формуляр	Учет наработки	После каждого ТО
Журнал ТО	Фиксация работ	При каждом обслуживании
Паспорт	Основные характеристики	При модификациях
Руководство по эксплуатации	Правила использования	При изменении регламентов

Практическое занятие 8.1: Работа с технической документацией

Цель: Формирование навыков ведения документации

Оборудование:

- Образцы формулляров;
- Электронные системы учета;
- Шаблоны отчетных документов;
- Нормативные материалы;

Практические задания:

- Заполнение формуляра;
- Внесение данных о наработке;
- Фиксация проведенного ТО;
- Учет замененных компонентов;
- Оформление актов;
- Составление акта выполненных работ;
- Фиксация выявленных неисправностей;
- Формулировка рекомендаций;
- Электронный учет;

- Ввод данных в специализированные системы;
- Формирование отчетов;
- Работа с базами данных;

Требования к оформлению:

- Четкость и однозначность формулировок;
- Полнота отражения информации;
- Своевременность внесения данных;
- Соответствие нормативным требованиям;

Лекция 8.2: Технологии хранения БАС

Определение: Хранение БАС - комплекс мер по сохранению эксплуатационных характеристик в межсезонный период или при длительном простое. Факторы, влияющие на сохранность представлены в таблице.

Таблица 100

Условия хранения

Компонент	Температура	Влажность	Другие требования
Корпус	+5...+30°C	<70%	Защита от УФ
Аккумуляторы	+10...+25°C	40-60%	Заряд 40-60%
Электроника	-10...+40°C	<75%	Антистатическая упаковка
Двигатели	-30...+50°C	<80%	Консервационная смазка

Методы консервации:

- Очистка от загрязнений;
- Нанесение защитных покрытий;
- Частичная разборка узлов;
- Упаковка в вакуумные пакеты;
- Регулярные контрольные осмотры;

Практическое занятие 8.2: Подготовка к хранению

Цель: Освоение технологий консервации оборудования

Оборудование:

- Чистящие составы;
- Консервационные материалы;
- Упаковочные решения;
- Климатические мониторы;

Этапы консервации:

- Предварительная подготовка;
- Полная очистка от загрязнений;
- Проверка состояния компонентов;
- Документирование дефектов;

- Обработка узлов;
 - Двигатели - консервационная смазка;
 - Подшипники - антисептические составы;
 - Разъемы - защитные заглушки;
 - Электроника - антистатическая упаковка;
 - Упаковка и размещение;
 - Выбор упаковочных материалов;
 - Контроль микроклимата;
 - Организация системы вентиляции;
 - Маркировка и учет;
- Контрольные мероприятия:
- Ежемесячная проверка состояния;
 - Контроль параметров микроклимата;
 - Периодическое проветривание;
 - Тестовые включения после длительного хранения;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное учебное пособие представляет собой комплексный курс подготовки техников-наладчиков мультироторных беспилотных авиационных систем, охватывающий все основные аспекты профессиональной деятельности — от конструкции и принципов работы БАС до сложных технологий диагностики, ремонта и настройки систем.

Программа курса построена по принципу последовательного усложнения материала: от изучения теоретических основ устройства мультироторных БАС к практическому освоению навыков диагностики, технического обслуживания и ремонта. Особое внимание уделено вопросам безопасности при работе с электронными системами и аккумуляторными батареями, правильному использованию контрольно-измерительного оборудования, что критически важно для формирования ответственного отношения к технической эксплуатации БАС.

Практическая направленность курса обеспечивается большим объемом практических занятий (88 часов из 144 часов программы), включающих работу с реальным оборудованием, выполнение диагностических процедур, проведение ремонтных работ, калибровку систем в условиях, максимально приближенных к реальной профессиональной деятельности. Студенты получают возможность работать с современными контрольно-измерительными приборами, осваивают технологии пайки электронных компонентов, изучают специализированное программное обеспечение для диагностики и настройки БАС.

Междисциплинарный подход к обучению позволяет сформировать у слушателей комплексное понимание всех аспектов технической эксплуатации БАС - конструктивных, электронных, программных, метрологических - что необходимо для успешной профессиональной деятельности в быстро развивающейся отрасли беспилотной авиации. Техник-наладчик должен не только владеть навыками ремонта, но и понимать принципы работы систем управления полетом, аэродинамические особенности мультироторных платформ, специфику интеграции полезных нагрузок.

Системный подход к обучению предполагает освоение не только практических навыков выполнения конкретных операций, но и понимание теоретических основ, что позволяет техническим специалистам самостоятельно анализировать сложные неисправности, принимать обоснованные решения при выборе методов ремонта, оптимизировать процедуры технического обслуживания с учетом специфики эксплуатации конкретных типов БАС.

Особое значение придается культуре ведения технической документации, системному учету наработки и ресурса компонентов, что обеспечивает прослеживаемость технического состояния БАС на всех этапах жизненного цикла и создает основу для планирования технического обслуживания, управления запасами, прогнозирования затрат на эксплуатацию.

Постоянное обновление технологий в области беспилотных авиационных систем, появление новых типов датчиков, систем управления, материалов и методов обработки данных требует от технических специалистов непрерывного профессионального развития. Данное пособие закладывает фундаментальные знания и навыки, на основе которых техники-наладчики смогут успешно адаптироваться к изменениям в отрасли, осваивать новое оборудование и технологии обслуживания.

Интеграция теоретических знаний с практическими навыками, использование современных методов диагностики и ремонта, применение актуальных нормативных требований делают выпускников данной программы востребованными специалистами на рынке труда. Они способны обеспечивать высокий уровень технической готовности БАС к выполнению полетных заданий, минимизировать время простоя оборудования, оптимизировать затраты на техническую эксплуатацию.

Авторы выражают надежду, что данное учебное пособие станет надежным помощником в освоении профессии техника-наладчика БАС и будет способствовать формированию высококвалифицированных кадров для динамично развивающейся отрасли беспилотной авиации.

Об авторах:

Кокунин Петр Анатольевич – директор Центра превосходства «НИЦ «Специальная робототехника и искусственный интеллект» Института вычислительной математики и информационных технологий КФУ, кандидат технических наук, доцент, специалист в области беспилотных авиационных систем и робототехники.

Чикрин Дмитрий Евгеньевич – директор Института искусственного интеллекта робототехники и системной инженерии КФУ, доктор технических наук, профессор кафедры анализа данных и технологий программирования Института вычислительной математики и информационных технологий, КФУ, специалист в области системного анализа, информационных технологий, систем управления и искусственного интеллекта.

Шиндор Ольга Владимировна – заместитель директора по научной работе Института искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии КФУ, кандидат технических наук, специалист в области информационных технологий и систем управления.

Егорчев Антон Александрович – директор Института вычислительной математики и информационных технологий КФУ, кандидат технических наук, доцент, специалист информационных технологий, систем виртуального моделирования.

*Электронное учебное издание
сетевого распространения*

**Кокунин Петр Анатольевич
Чикрин Дмитрий Евгеньевич
Шиндор Ольга Владимировна
Егорчев Антон Александрович**

**ТЕХНИК-НАЛАДЧИК МУЛЬТИРОТОРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ
АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Корректор **П.А. Ракчеева**

Компьютерная верстка **М.А. Ахметова**

Дизайн обложки **М.А. Ахметова**

Подписано к использованию 21.11.2025

Гарнитура «Times New Roman»

Издательства Казанского университета
420008, г. Казань, ул. Профессора Нужина, 1/37
тел. (843) 233-73-59, 233-73-28