

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

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

**Учебное пособие**



**Казань  
2025**

**УДК 629.735.7  
ББК 39.52я73  
О-77**

*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.Аксентьев  
(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 Оператор мультироторных беспилотных авиационных систем:  
учебное пособие / П.А.Кокунин, Д.Е.Чикрин, О.В.Шиндор – Казань: Изд-во  
Казан. ун-та, 2025. – 360 с.

**ISBN**

Данное пособие составлено в соответствии с современными требованиями к подготовке операторов беспилотных авиационных систем и является комплексным руководством по эксплуатации мультироторных БАС. Его специфика заключается в том, что в нем не только изложены теоретические основы аэродинамики, метеорологии и конструкции БАС, но и подробно рассмотрены практические аспекты планирования полетов, техники пилотирования, действий в нештатных ситуациях. Представлен обширный комплекс практических занятий, контрольных вопросов и реальных сценариев для отработки профессиональных навыков, охватывающих все этапы эксплуатации БАС Учебное пособие предназначено для слушателей курсов подготовки операторов БАС, студентов технических вузов, преподавателей и специалистов, применяющих беспилотные системы в профессиональной деятельности.

**УДК 629.735.7  
ББК 39.52я73**

**ISBN**

**© Издательство Казанского университета, 2025**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ТЕМА 1 НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ПОЛЕТОВ БАС .....	7
Лекция 1.1 Воздушное законодательство Российской Федерации.....	7
Лекция 1.2 Федеральные правила использования воздушного пространства и порядок получения разрешений .....	8
Лекция 1.3 Зоны ограничений и ответственность за нарушения.....	10
ТЕМА 2. ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ И МЕТЕОРОЛОГИИ ДЛЯ ПОЛЕТОВ БАС .....	18
Лекция 2.1 Основы аэродинамики мульти rotorных систем.....	18
Лекция 2.2 Аэродинамические эффекты и явления .....	30
Лекция 2.3 Практические аспекты проектирования.....	34
Лекция 2.4 Современные тенденции и перспективы развития .....	40
Лекция 2.5 Безопасность и регулирование.....	41
Лекция 2.6 Метеорологические условия и их влияние на полеты БАС .....	43
Лекция 2.7 Оценка метеорологической обстановки для полетов БАС .....	45
ТЕМА 3. КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС .....	55
Лекция 3.1 Основные узлы и системы мульти rotorных БАС .....	55
Лекция 3.2 Полезная нагрузка и специализированное оборудование.....	58
Лекция 3.3 Наземные станции управления и вспомогательное оборудование .....	60
Лекция 3.4 Эксплуатационные ограничения и характеристики .....	62
ТЕМА 4. ПЛАНИРОВАНИЕ ПОЛЕТОВ И ПОДГОТОВКА ПОЛЕТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ .....	70
Лекция 4.1 Основы планирования полетов БАС .....	70
Лекция 4.2 Картографические материалы и системы координат .....	72
Лекция 4.3 Программное обеспечение для планирования полетов .....	74
Лекция 4.4 Полетная документация и ее ведение.....	76
ТЕМА 5. ПОДГОТОВКА БАС К ПОЛЕТУ И ПРЕДПОЛЕТНЫЕ ПРОВЕРКИ	85
Лекция 5.1 Предполетная подготовка и проверка систем БАС .....	85
Лекция 5.2 Выбор и подготовка стартово-посадочной площадки .....	87
Лекция 5.3 Калибровка датчиков и настройка систем .....	89
ТЕМА 6. ТЕХНИКА ПИЛОТИРОВАНИЯ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС .....	100
Лекция 6.1 Основы управления мульти rotorными БАС.....	100
Лекция 6.2 Взлет, полет по маршруту и посадка.....	102
Лекция 6.3 Полеты в различных режимах и условиях .....	104

Лекция 6.4 Контроль параметров полета и системы мониторинга.....	106
<b>ТЕМА 7. ДЕЙСТВИЯ В НЕШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ .....</b>	<b>117</b>
Лекция 7.1 Классификация нештатных и аварийных ситуаций.....	117
Лекция 7.2 Отказы систем БАС и методы их диагностики .....	119
Лекция 7.3 Процедуры действий в критических ситуациях.....	120
Лекция 7.4 Поисково-спасательные операции и взаимодействие со службами .....	122
<b>ТЕМА 8. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ БАС .....</b>	<b>134</b>
Лекция 8.1 Виды авиационных работ, выполняемых с помощью БАС .....	134
Лекция 8.2 Технология аэрофотосъемки .....	136
Лекция 8.3 Мониторинг и инспекция с применением БАС.....	138
Лекция 8.4 Сельскохозяйственное применение БАС .....	140
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>149</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие беспилотных авиационных систем (БАС) в последние десятилетия характеризуется стремительным ростом их применения в различных сферах деятельности. От военных применений, где беспилотники впервые получили широкое распространение, технология перешла в гражданскую сферу, открыв новые возможности для решения задач в области картографии, мониторинга, инспекции, поисково-спасательных операций, сельского хозяйства и многих других областях.

Мультироторные БАС, благодаря способности к вертикальному взлету и посадке, зависанию в воздухе и высокой маневренности, стали наиболее популярным типом беспилотных систем для гражданского применения. Относительная простота управления, доступность технологий и снижение стоимости оборудования привели к массовому распространению этих систем среди профессиональных пользователей и энтузиастов.

Однако широкое распространение БАС поставило перед обществом и государством новые вызовы, связанные с обеспечением безопасности полетов, защитой частной жизни граждан, национальной безопасностью. Ответом на эти вызовы стало создание комплексной нормативно-правовой базы, регулирующей использование беспилотных систем, и системы подготовки квалифицированных операторов.

В Российской Федерации правовое регулирование деятельности БАС основывается на Воздушном кодексе РФ, Федеральных правилах использования воздушного пространства, специальных нормативных актах Росавиации и других ведомств. Система подготовки операторов БАС включает теоретическое и практическое обучение, сдачу квалификационных экзаменов, получение свидетельств внешнего пилота.

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

- слушатели курсов подготовки операторов БАС в учебных центрах и авиационных учебных заведениях;
- кандидаты на получение свидетельства внешнего пилота БАС;
- специалисты, планирующие применять БАС в профессиональной деятельности.

Основной целью данного учебного пособия является подготовка квалифицированных операторов мультироторных беспилотных авиационных

систем, способных безопасно и эффективно выполнять полеты для решения различных профессиональных задач.

Для достижения поставленной цели в пособии решаются следующие задачи:

1. Формирование правовой грамотности - изучение нормативно-правовой базы, регулирующей использование воздушного пространства для полетов БАС, процедур получения разрешений, ответственности за нарушения.

2. Освоение теоретических основ - изучение принципов аэродинамики мультироторных систем, основ метеорологии, влияния внешних факторов на безопасность полетов.

3. Изучение технических аспектов - понимание конструкции и принципов работы БАС, систем управления и навигации, полезной нагрузки, наземных станций управления.

4. Развитие навыков планирования - освоение методов планирования полетов, работы с картографическими материалами, специализированным программным обеспечением, ведения полетной документации.

5. Формирование практических навыков - обучение техникам пилотирования, выполнению предполетных проверок, действиям в нештатных ситуациях.

6. Освоение профессиональных компетенций - изучение технологий выполнения различных видов авиационных работ с применением БАС.

# ТЕМА 1 НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ПОЛЕТОВ БАС

## Лекция 1.1 Воздушное законодательство Российской Федерации

### 1.1.1 Воздушный кодекс Российской Федерации как основа воздушного права

Воздушное пространство представляет собой сферу над сушей и водной поверхностью, в пределах которой государство осуществляет свой суверенитет. В Российской Федерации правовое регулирование использования воздушного пространства основывается на Воздушном кодексе РФ от 19.03.1997 № 60-ФЗ, который является основополагающим законодательным актом в области авиации.

Воздушное пространство над территорией Российской Федерации, включая воздушное пространство над внутренними водами и территориальным морем, является государственной собственностью. Это означает, что любое использование воздушного пространства должно осуществляться в соответствии с установленными государством правилами и требованиями.

Государственное регулирование в области использования воздушного пространства осуществляется в целях обеспечения потребностей граждан и экономики в воздушных перевозках, авиационных работах, а также в целях обеспечения обороны и безопасности государства. Это регулирование включает в себя установление общих правил использования воздушного пространства, сертификацию в области авиации, лицензирование авиационной деятельности, а также государственный контроль за соблюдением воздушного законодательства.

Беспилотные воздушные суда, согласно Воздушному кодексу, определяются как воздушные суда, управляемые в полете пилотом, находящимся вне борта такого судна. Это определение охватывает широкий спектр устройств - от небольших потребительских дронов до крупных промышленных и военных беспилотников.

Важным принципом воздушного права является обеспечение безопасности полетов. Безопасность полетов определяется как состояние, при котором риски, связанные с авиационной деятельностью, снижены до приемлемого уровня и контролируются. Для достижения этого состояния устанавливаются требования к воздушным судам, экипажам, организации и выполнению полетов, обслуживанию воздушного движения и другим аспектам авиационной деятельности.

### **1.1.2 Система управления использованием воздушного пространства**

Единая система организации воздушного движения (ЕС ОрВД) представляет собой комплекс наземных и бортовых средств, правил и процедур, предназначенных для обеспечения безопасного, регулярного и эффективного воздушного движения. В состав ЕС ОрВД входят как гражданские, так и государственные (военные) авиационные власти и службы.

Структура воздушного пространства РФ включает в себя различные зоны и районы, каждый из которых имеет свои особенности использования. Нижнее воздушное пространство (от земной поверхности до 6100 метров включительно) и верхнее воздушное пространство (свыше 6100 метров) имеют различные правила использования и требования к обслуживанию воздушного движения.

Классификация воздушного пространства по принципу обслуживания воздушного движения включает семь классов (A, B, C, D, E, F, G), каждый из которых характеризуется определенным уровнем диспетчерского обслуживания и требованиями к оборудованию воздушных судов. Для операторов беспилотных авиационных систем наиболее значимыми являются классы С и G, поскольку именно в этих классах воздушного пространства чаще всего выполняются полеты БАС.

## **Лекция 1.2 Федеральные правила использования воздушного пространства и порядок получения разрешений**

### **1.2.1 Федеральные правила использования воздушного пространства РФ**

Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации, утвержденные Постановлением Правительства РФ от 11.03.2010 №138, детально регламентируют порядок планирования, координации и выполнения полетов в воздушном пространстве РФ. Эти правила устанавливают единый порядок использования воздушного пространства всеми пользователями - как гражданской, так и государственной авиацией.

Воздушное пространство РФ подразделяется на контролируемое и неконтролируемое. Контролируемое воздушное пространство - это воздушное пространство определенных размеров, в пределах которого осуществляется диспетчерское обслуживание воздушного движения в соответствии с классификацией воздушного пространства. В контролируемом воздушном пространстве все полеты выполняются только при наличии диспетчерского разрешения.

Неконтролируемое воздушное пространство - это воздушное пространство, в пределах которого не осуществляется диспетчерское обслуживание воздушного движения. В неконтролируемом воздушном пространстве полеты могут выполняться без получения диспетчерского разрешения, но с соблюдением установленных правил и ограничений.

Для беспилотных воздушных судов с максимальной взлетной массой до 30 кг установлены особые правила использования воздушного пространства. Такие БВС могут выполнять полеты в неконтролируемом воздушном пространстве на высотах до 150 метров без получения разрешения на использование воздушного пространства, при условии соблюдения всех установленных ограничений и требований безопасности.

### **1.2.2 Процедуры получения разрешений на использование воздушного пространства**

Получение разрешения на использование воздушного пространства является обязательной процедурой для выполнения полетов в контролируемом воздушном пространстве или при выполнении полетов, выходящих за рамки установленных для БВС упрощенных правил.

Заявка на использование воздушного пространства представляет собой официальный документ, который должен содержать исчерпывающую информацию о планируемом полете. В заявке указываются сведения о пользователе воздушного пространства, характеристики воздушного судна, цель полета, район и параметры использования воздушного пространства, время выполнения полета и другие необходимые данные.

План полета является неотъемлемой частью заявки и содержит детальную информацию о маршруте полета, высотах, времени прохождения контрольных точек и других параметрах полета. План полета должен быть составлен таким образом, чтобы обеспечить безопасность полета и не создавать помех другим пользователям воздушного пространства.

Сроки подачи заявок зависят от типа планируемого полета. Для выполнения авиационных работ заявка должна быть подана не менее чем за 24 часа до планируемого времени использования воздушного пространства. Для экспериментальных полетов этот срок увеличивается до 10 суток, а для регулярных полетов - до 15 суток.

Рассмотрение заявки осуществляется соответствующими органами ЕС ОрВД, которые анализируют возможность предоставления запрашиваемого воздушного пространства с учетом интересов других пользователей и

требований безопасности полетов. По результатам рассмотрения принимается решение о выдаче разрешения на использование воздушного пространства или об отказе в его выдаче с указанием причин отказа.

## **Лекция 1.3 Зоны ограничений и ответственность за нарушения**

### **1.3.1 Запретные зоны и зоны ограничения полетов**

Для обеспечения государственной безопасности, защиты важных объектов и безопасности полетов в воздушном пространстве РФ устанавливаются различные виды ограничений. Эти ограничения могут быть постоянными или временными, распространяться на все типы воздушных судов или только на определенные категории.

Запретные зоны (обозначаются буквой P - Prohibited) представляют собой районы воздушного пространства, в пределах которых полеты воздушных судов запрещены. Такие зоны устанавливаются над особо важными государственными объектами, включая резиденции высших должностных лиц государства, военные объекты стратегического значения, атомные электростанции и другие объекты, требующие особой защиты. Полеты в запретных зонах категорически запрещены для всех типов воздушных судов, включая беспилотные.

Зоны ограничения полетов (обозначаются буквой R - Restricted) - это районы воздушного пространства, в пределах которых полеты воздушных судов ограничены определенными условиями. Ограничения могут касаться времени полетов (например, полеты запрещены в определенные часы), высоты полетов (ограничение по максимальной или минимальной высоте), типов воздушных судов или целей полетов. Полеты в зонах ограничения могут выполняться при соблюдении установленных условий или при получении специального разрешения.

Временные зоны ограничения устанавливаются на определенный период времени в связи с проведением специальных мероприятий, учений, испытаний или при возникновении особых обстоятельств. Информация о временных ограничениях распространяется через систему извещений авиаторам (NOTAM - Notice to Airmen).

Опасные зоны (обозначаются буквой D - Dangerous) устанавливаются в районах, где могут выполняться виды деятельности, представляющие опасность для полетов воздушных судов (пример - Рис. 1). В отличие от запретных зон и зон ограничения, полеты в опасных зонах формально не запрещены, но настоятельно не рекомендуются из соображений безопасности.

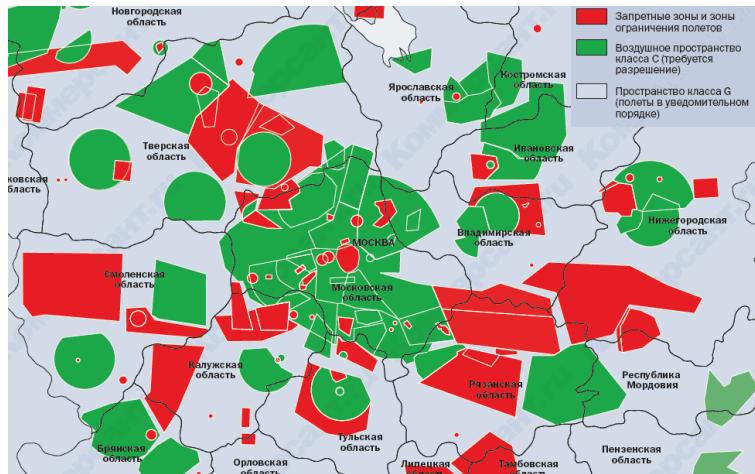


Рис. 1 – Пример карты запретных зон и зон ограничения полетов

### 1.3.2 Ответственность за нарушения воздушного законодательства

Нарушение правил использования воздушного пространства влечет за собой различные виды юридической ответственности в зависимости от характера нарушения и его последствий. Российское законодательство предусматривает административную, гражданско-правовую и уголовную ответственность за нарушения в области авиации.

Административная ответственность регулируется Кодексом об административных правонарушениях РФ. Статья 11.4 КоАП РФ устанавливает ответственность за нарушение правил воздушных перевозок и использования воздушного пространства. Нарушение правил использования воздушного пространства влечет наложение административного штрафа на граждан в размере от двух тысяч до пяти тысяч рублей, на должностных лиц - от двадцати тысяч до пятидесяти тысяч рублей, на юридических лиц - от двухсот тысяч до пятисот тысяч рублей.

Статья 11.5 КоАП РФ предусматривает более строгую ответственность за нарушение правил, обеспечивающих безопасность полетов. Такие нарушения влекут наложение административного штрафа на граждан в размере от пяти тысяч до десяти тысяч рублей с конфискацией воздушного судна или без таковой, на должностных лиц - от пятидесяти тысяч до ста тысяч рублей.

Уголовная ответственность может наступить в случае, если нарушение правил безопасности движения и эксплуатации воздушного транспорта повлекло причинение тяжкого вреда здоровью человека или смерть. Статья 263 Уголовного кодекса РФ предусматривает за такие деяния наказание в виде лишения свободы на срок до семи лет в зависимости от тяжести последствий.

Гражданско-правовая ответственность может наступить при причинении материального ущерба третьим лицам в результате эксплуатации беспилотного воздушного судна. Размер возмещения определяется исходя из фактически причиненного ущерба и может включать как прямые убытки, так и упущенную выгоду.

Особое внимание следует обратить на то, что ответственность за нарушения несет не только оператор БАС, но и владелец воздушного судна, а в случае выполнения коммерческих работ - также эксплуатант. Это подчеркивает важность четкого определения ролей и ответственности всех участников процесса эксплуатации беспилотных авиационных систем.

## **ПРАКТИКА ПО ТЕМЕ 1**

### **Практическое занятие 1.1**

#### **Оформление заявки на использование воздушного пространства**

**Цель:** Научиться правильно оформлять документы для получения разрешения на полеты БАС.

#### **Теоретическая часть:**

Заявка на использование воздушного пространства является основным документом для получения разрешения на выполнение полетов. Правильное оформление заявки критически важно для получения разрешения в установленные сроки и без дополнительных запросов от органов ОрВД.

Структура заявки включает несколько обязательных разделов. В первом разделе указываются сведения о заявителе - наименование организации или фамилия, имя, отчество физического лица, контактные данные, реквизиты документов. Второй раздел содержит характеристики воздушного судна - тип, модель, государственный или учетный номер, максимальная взлетная масса, технические характеристики.

Третий раздел описывает район и параметры использования воздушного пространства. Здесь указываются географические координаты района полета, высоты полета, особенности маршрута. Четвертый раздел определяет временные параметры - дату и время начала и окончания использования воздушного пространства, продолжительность полета.

#### **Практическая работа:**

Студенты работают с реальными формами заявок, заполняя их для различных типов полетных заданий. Каждый студент получает индивидуальное задание с конкретными параметрами полета и должен подготовить полный комплект документов.

**Задание 1:** Аэрофотосъемка линейного объекта (газопровод) протяженностью 5 км на высоте 100 м.

**Задание 2:** Мониторинг лесного массива площадью 3 км<sup>2</sup> на высоте 120 м.

**Задание 3:** Обследование промышленного объекта с полетом на различных высотах от 50 до 150 м.

Преподаватель проверяет правильность заполнения документов, указывает на ошибки и объясняет правильные варианты оформления.

### **Практическое занятие 1.2**

#### **Работа с картами зон ограничения полетов**

**Цель:** Освоить навыки работы с картографическими материалами и определения ограничений в районе полета.

**Теоретическая часть:**

Карты ограничений воздушного пространства являются основным источником информации о запретных зонах, зонах ограничения полетов и других ограничениях. Эти карты регулярно обновляются и публикуются в составе сборника аэронавигационной информации (АИП).

Современные технологии позволяют использовать электронные карты и мобильные приложения для получения актуальной информации об ограничениях. Такие приложения обеспечивают доступ к актуальным данным в режиме реального времени и могут предупреждать о приближении к запретным зонам.

**Практическая работа:**

Студенты работают с различными типами карт и электронных ресурсов:

1. **Работа с бумажными картами:** Анализ карт ограничений из АИП, определение границ зон, высотных ограничений.

2. **Использование электронных ресурсов:** Работа с официальным сайтом Госкорпорации ОрВД, изучение интерактивных карт ограничений.

3. **Мобильные приложения:** Установка и настройка специализированных приложений для операторов БАС, практическая работа с функциями определения разрешенных зон для полетов.

4. **Анализ NOTAM:** Изучение системы извещений авиаторам, понимание структуры и содержания сообщений о временных ограничениях.

Каждый студент получает задание проанализировать ограничения для конкретного района и подготовить заключение о возможности выполнения полета.

### **Практическое занятие 1.3**

#### **Анализ нормативной документации и разбор практических ситуаций**

**Цель:** Развить навыки анализа нормативных документов и их применения в практических ситуациях.

**Теоретическая часть:**

Практическая деятельность оператора БАС требует не только знания нормативных документов, но и умения применять их положения в конкретных ситуациях. Часто возникают нестандартные ситуации, требующие принятия решений на основе анализа различных нормативных актов.

**Практическая работа:**

### **Ситуация 1: Полет над населенным пунктом**

Заказчик требует выполнить аэрофотосъемку исторического центра города. Студенты должны проанализировать требования законодательства, определить процедуру получения разрешения, сформулировать дополнительные требования безопасности.

### **Ситуация 2: Аварийная посадка в запретной зоне**

В процессе выполнения полета произошла техническая неисправность, и БАС совершил аварийную посадку в запретной зоне. Студенты должны определить последовательность действий оператора, процедуры уведомления соответствующих служб, возможные правовые последствия.

### **Ситуация 3: Изменение метеоусловий во время полета**

При выполнении полетного задания резко ухудшились метеорологические условия. Студенты должны оценить возможность продолжения полета, процедуры изменения плана полета, требования к документированию изменений.

### **Ситуация 4: Конфликт с пилотируемой авиацией**

В районе выполнения работ БАС появился вертолет санитарной авиации. Студенты должны определить приоритеты использования воздушного пространства, действия оператора БАС, процедуры координации.

Каждая ситуация разбирается в группах с последующим обсуждением и формулированием правильных решений.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение воздушного пространства и объясните принцип государственного суверенитета над ним.
2. Какие основные принципы использования воздушного пространства установлены Воздушным кодексом РФ?
3. В чем заключается различие между контролируемым и неконтролируемым воздушным пространством?
4. Объясните классификацию воздушного пространства по принципу обслуживания воздушного движения.
5. Какие особенности использования воздушного пространства установлены для БВС массой до 30 кг?
6. Опишите процедуру подачи и рассмотрения заявки на использование воздушного пространства.
7. В чем различие между запретными зонами и зонами ограничения полетов?
8. Какие виды ответственности предусмотрены за нарушения воздушного законодательства?
9. Что такое NOTAM и как эта система используется в авиации?
10. Какие источники информации об ограничениях воздушного пространства должен использовать оператор БАС?

## ЛИТЕРАТУРА

### Основные источники:

1. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 N 60-ФЗ (действующая редакция). - Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_13744/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/)
2. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации (утв. Постановлением Правительства РФ от 11.03.2010 N 138). - Режим доступа: <https://base.garant.ru/197839/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33>
3. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 N 195-ФЗ (статьи 11.4, 11.5). - Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34661/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34661/)
4. Правила регистрации и учёта беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлётной массой от 0,25 килограмма до 30 килограммов (утв. Постановлением Правительства РФ от 25.05.2019 N 658). - Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/122058>

5. Малышев В.В., Бобронников В.Т., Красильщиков М.Н. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление. - М.: МАИ, 2000. - 568 с.

## ТЕМА 2. ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ И МЕТЕОРОЛОГИИ ДЛЯ ПОЛЕТОВ БАС

### Лекция 2.1 Основы аэродинамики мультироторных систем

#### 2.1.1 История развития и современное состояние

Идея использования нескольких винтов для создания летательного аппарата не нова. Еще в начале XX века пионеры авиации понимали, что распределение подъемной силы между несколькими винтами может решить проблемы устойчивости и управления, которые испытывали первые вертолеты.

В 1907 году французские инженеры братья Брге построили первый в мире квадрокоптер "Gyroplane No. 1". Этот аппарат имел четыре винта диаметром по 8 метров каждый и смог оторваться от земли на несколько секунд. Хотя полет был неуправляемым, это стало первым доказательством работоспособности концепции мультиротора.

В 1920-е годы французский инженер Этьен Эмихен создал более совершенный квадрокоптер, который смог пролететь более километра и продержаться в воздухе около 14 минут. Этот успех показал потенциал мультироторных схем, но технологии того времени не позволяли создать эффективную систему управления.

Настоящая революция произошла в 2000-х годах благодаря развитию микроэлектроники. Появление бесколлекторных моторов, литий-полимерных аккумуляторов, микроконтроллеров и датчиков движения (акселерометров, гироскопов) сделало возможным создание компактных и эффективных мультироторных систем.

Сегодня мультироторы широко используются в различных областях:

- **Аэрофотосъемка и видеосъемка** - от любительской съемки до профессионального кинопроизводства
- **Инспекция инфраструктуры** - осмотр линий электропередач, трубопроводов, мостов
- **Сельское хозяйство** - мониторинг посевов, опрыскивание, картографирование
- **Поисково-спасательные операции** - разведка местности, доставка грузов в труднодоступные места
- **Научные исследования** - мониторинг окружающей среды, метеорологические наблюдения
- **Развлечения и спорт** - гонки дронов, акробатические полеты.

#### 2.1.2 Физические принципы и определения

Мультироторная система представляет собой летательный аппарат, который использует три или более несущих винта для создания подъемной силы и управления полетом. В отличие от традиционных вертолетов с одним большим несущим винтом, мультироторы используют несколько винтов меньшего размера, что дает им ряд уникальных преимуществ.

Основное отличие мультироторов от других типов летательных аппаратов заключается в способе создания подъемной силы и управления. Самолеты используют крылья для создания подъемной силы и рули для управления. Вертолеты используют один большой несущий винт с изменяемым шагом лопастей и хвостовой винт для компенсации реактивного момента. Мультироторы же используют несколько винтов с фиксированным шагом, управление которыми осуществляется только изменением скорости вращения.

### 2.1.3 Классификация и типы конфигураций

#### Трикоптеры

Трикоптер - это простейшая мультироторная конфигурация, использующая три винта (см. Рис. 2). Два передних винта вращаются в противоположных направлениях для компенсации реактивного момента, а задний винт установлен на поворотном механизме, который позволяет изменять направление тяги для управления рысканием.

Преимущества трикоптеров включают простоту конструкции и меньшее количество моторов, что снижает стоимость и вес. Однако они менее стабильны, чем четырехвинтовые системы, и требуют более сложной системы управления из-за наличия поворотного механизма.



Рисунок 2 - Трикптер

#### Квадрокоптеры

Квадрокоптер - самая популярная конфигурация мультироторных систем. Четыре винта обеспечивают отличный баланс между простотой, стабильностью

и эффективностью (см. Рис. 3). Существует две основные схемы расположения винтов:

"+" конфигурация - винты расположены строго по осям координат (вперед, назад, влево, вправо). Эта схема интуитивно понятна для управления, но при движении вперед аппарат "режет" воздух ребром рамы, что увеличивает сопротивление.

"X" конфигурация - винты расположены под углом 45 градусов к основным осям. При движении вперед аппарат "режет" воздух углом рамы, что более аэродинамично эффективно. Большинство современных квадрокоптеров используют именно эту схему.



Рисунок 3 – Квадрокоптер

### Гексакоптеры и октокоптеры

Системы с шестью и восемью винтами используются там, где требуется повышенная грузоподъемность или надежность (см. Рис. 4). Дополнительные винты обеспечивают избыточность - при отказе одного мотора аппарат может продолжить полет, хотя и с ограниченной маневренностью.

Гексакоптеры особенно популярны для коммерческой аэросъемки, где безопасность дорогостоящего оборудования критична. Октокоптеры используются для самых тяжелых задач, например, для съемки профессиональными кинокамерами или доставки грузов.



Рисунок 4 – Гекса- и октокоптер

## Коаксиальные системы

В коаксиальных системах винты устанавливаются попарно на одной оси, вращаясь в противоположных направлениях (см. Рис. 5). Это позволяет компактнее разместить большее количество винтов и увеличить тягу на единицу площади. Однако взаимодействие винтов снижает общий КПД системы.



Рисунок 5 – Коаксиальная схема

### 2.1.4 Преимущества и ограничения мультироторов

#### Основные преимущества:

**Механическая простота** - одно из главных преимуществ мультироторов заключается в отсутствии сложных механических систем, таких как автомат перекоса в традиционных вертолетах. Винты имеют фиксированный шаг, что упрощает конструкцию и повышает надежность.

**Статическая устойчивость** - мультироторы естественно склонны к сохранению стабильного положения в пространстве. При отклонении от горизонтального положения автоматически возникают восстанавливающие моменты, что облегчает управление.

**Вертикальный взлет и посадка** - способность взлетать и садиться вертикально без разбега делает мультироторы идеальными для работы в ограниченном пространстве, на кораблях, в городской застройке.

**Точное позиционирование** - мультироторы могут зависать в одной точке с высокой точностью, медленно двигаться в любом направлении, вращаться вокруг вертикальной оси. Эти возможности незаменимы для аэросъемки и инспекционных работ.

**Модульность конструкции** - стандартизация компонентов (моторы, ESC, винты) позволяет легко модифицировать и ремонтировать аппараты, а также создавать конфигурации под конкретные задачи.

### **Основные ограничения:**

**Высокое энергопотребление** - мультироторы расходуют значительно больше энергии на единицу времени полета по сравнению с самолетами. Это связано с низким аэродинамическим качеством винтов и необходимостью постоянного создания подъемной силы для поддержания полета.

**Ограниченнная автономность** - время полета большинства мультироторов составляет от 10 до 30 минут, что является значительное ограничение для многих применений. Увеличение емкости аккумуляторов ведет к росту массы и дальнейшему сокращению времени полета.

**Чувствительность к погодным условиям** - из-за относительно малой массы и больших размеров винтов мультироторы сильно подвержены влиянию ветра. При скорости ветра более 10-15 м/с управление становится затруднительным.

**Шум** - работа нескольких высокооборотных винтов создает характерный высокочастотный шум, который может быть проблемой в городской среде или при скрытом наблюдении.

### **2.1.5 Физическая сущность создания тяги**

Понимание того, как винт создает тягу, является основой для понимания принципов работы мультироторных систем. Существует несколько способов объяснения этого явления, каждый из которых раскрывает разные аспекты процесса.

#### **Объяснение через закон сохранения импульса**

Наиболее фундаментальное объяснение создания тяги винтом основано на третьем законе Ньютона и законе сохранения импульса. Винт ускоряет воздушную массу вниз, придавая ей импульс в этом направлении. По закону сохранения импульса, винт получает равный по величине и противоположный по направлению импульс, который проявляется как тяга, направленная вверх.

Важно понимать, что винт не "опирается" на воздух в том смысле, как человек опирается на землю при ходьбе. Взаимодействие происходит через обмен импульсом - винт отбрасывает воздух с определенной скоростью, а воздух "толкает" винт в противоположном направлении.

Количество воздуха, проходящего через винт в единицу времени, зависит от его диаметра и скорости вращения. Чем больше диаметр винта, тем больший объем воздуха он может обработать. Скорость, с которой этот воздух отбрасывается вниз, зависит от формы лопастей и скорости их вращения.

#### **Объяснение через принцип Бернулли**

Дополнительное понимание дает рассмотрение работы винта через принцип Бернулли. Лопасти винта имеют аэродинамический профиль, похожий на профиль крыла самолета. При движении лопасти через воздух на ее верхней поверхности создается область пониженного давления, а на нижней - повышенного. Разность давлений создает силу, направленную вверх.

Однако в отличие от неподвижного крыла, лопасти винта вращаются, и их скорость изменяется по длине - от нуля в центре до максимума на концах. Это означает, что и углы атаки, и скорости обтекания различны в разных сечениях лопасти, что требует изменения формы профиля по длине лопасти.

### **2.1.6 Теория импульса винта**

Теория импульса, разработанная в конце XIX века Фрудом и Ранкиным, остается основой для понимания работы винтов. Эта теория делает ряд упрощающих допущений, но дает достаточно точные результаты для практических расчетов.

#### **Основные допущения теории**

Теория рассматривает винт как "актуаторный диск" - тонкий круглый диск, который мгновенно увеличивает скорость проходящего через него воздуха. При этом предполагается, что:

- воздух является идеальной жидкостью (без вязкости);
- поток через диск равномерный;
- винт не создает закрутки потока;
- давление далеко от винта равно атмосферному;
- поток является стационарным.

Хотя эти допущения не полностью соответствуют реальности, они позволяют получить простые и достаточно точные формулы для основных характеристик винта.

#### **Струя винта и индуктивные скорости**

Согласно теории импульса, винт создает струю воздуха, которая условно разделяется на три области:

**Область 1 (выше винта):** воздух движется с естественной скоростью, если аппарат движется поступательно, или покоятся, если аппарат зависает. На границе этой области давление равно атмосферному.

**Область 2 (в плоскости винта):** воздух проходит через винт, получая дополнительную скорость, называемую индуктивной. В этой области давление выше атмосферного.

**Область 3 (ниже винта):** воздух движется с увеличенной скоростью, образуя струю. На границе этой области давление снова становится равным атмосферному.

Ключевым результатом теории импульса является вывод о том, что индуктивная скорость в струе в два раза больше индуктивной скорости в диске винта. Это означает, что ускорение воздуха происходит не мгновенно в плоскости винта, а постепенно - половину приращения скорости воздух получает выше винта, половину - ниже.

### **Связь со временем полета**

Понимание теории импульса помогает объяснить, почему время полета мультироторов ограничено. Для создания определенной тяги винт должен отбросить определенную массу воздуха с определенной скоростью. Мощность, необходимая для этого, пропорциональна кубу скорости отбрасывания воздуха.

Отсюда становится очевидным, что для увеличения эффективности лучше отбрасывать большую массу воздуха с меньшей скоростью, чем малую массу с большой скоростью. Это объясняет, почему винты большого диаметра более эффективны, чем маленькие - они обрабатывают больший объем воздуха.

## **2.1.7 Геометрические параметры винтов**

### **Диаметр винта и дисковая нагрузка**

Диаметр винта - один из важнейших параметров, определяющих эффективность его работы. Увеличение диаметра позволяет обрабатывать больший объем воздуха, что ведет к снижению индуктивной скорости и повышению КПД.

Дисковая нагрузка - отношение тяги к ометаемой площади винта - является ключевым параметром для сравнения различных винтов. Меньшая дисковая нагрузка означает более эффективную работу, но большие размеры аппарата.

В мире мультироторов существует постоянный компромисс между эффективностью и компактностью. Гоночные дроны используют винты с высокой дисковой нагрузкой для достижения максимальной маневренности, жертвуя временем полета. Съемочные платформы используют винты большого диаметра для максимальной эффективности и минимального шума.

### **Шаг винта и его влияние на характеристики**

Шаг винта определяет, насколько "агрессивно" винт "вгрызается" в воздух. Винт с большим шагом при том же числе оборотов теоретически обеспечивает большую скорость полета, но требует больше мощности и может работать неэффективно на низких скоростях.

Для мультироторов, которые значительную часть времени проводят в режиме зависания или медленного полета, обычно выбирают винты с относительно небольшим шагом. Это обеспечивает хорошую эффективность в статических режимах, хотя и ограничивает максимальную скорость полета.

### **Количество лопастей**

Традиционно в авиации используются двухлопастные винты как наиболее эффективные. Однако для мультироторов часто применяются трехлопастные винты. Дополнительная лопасть повышает плавность работы, снижает вибрации и позволяет получить больше тяги при том же диаметре, но снижает КПД.

Четырехлопастные и более сложные винты используются реже и в основном для специальных применений, где важны компактность или особые характеристики.

### **2.1.8 Конфигурации мультироторных систем**

Квадрокоптер стал стандартом в мире мультироторов благодаря оптимальному сочетанию простоты, эффективности и возможностей управления. Четыре винта обеспечивают полную управляемость по всем шести степеням свободы, при этом конструкция остается относительно простой.

### **Принципы управления квадрокоптера**

Управление квадрокоптером основано на дифференциальном изменении скорости вращения винтов. Каждый из четырех каналов управления реализуется своим способом:

**Вертикальное движение (газ, throttle):** Для подъема все четыре винта одновременно увеличивают обороты, создавая общую тягу больше веса аппарата. Для снижения обороты уменьшаются, и общая тяга становится меньше веса. Для зависания тяга равна весу.

**Движение вперед-назад (тангаж, pitch):** Чтобы наклонить аппарат вперед и заставить его двигаться в этом направлении, увеличивают обороты задних винтов и уменьшают передних. Это создает момент, наклоняющий аппарат. Горизонтальная составляющая общей тяги тянет аппарат вперед.

**Движение влево-вправо (крен, roll):** Принцип аналогичен тангажу, но используются левые и правые винты. Для движения вправо увеличивают обороты левых винтов.

**Поворот вокруг вертикальной оси (рыскание, yaw):** Диагонально противоположные винты вращаются в одну сторону, поэтому их реактивные моменты складываются. Для поворота по часовой стрелке увеличивают обороты

винтов, вращающихся против часовой стрелки, и уменьшают обороты винтов, вращающихся по часовой стрелке.

### **Направления вращения винтов**

Правильное направление вращения винтов критично для управления. В классической X-конфигурации:

- Винты 1 и 3 (диагонально противоположные) вращаются по часовой стрелке
- Винты 2 и 4 вращаются против часовой стрелки

Это обеспечивает компенсацию реактивных моментов в режиме зависания и возможность управления рысканием.

### **Преимущества X-конфигурации**

X-конфигурация стала стандартной для большинства квадрокоптеров по нескольким причинам:

**Аэродинамическая эффективность:** При движении вперед аппарат "режет" воздух острым углом рамы, а не плоской стороной, что снижает сопротивление.

**Симметричность управления:** Все направления движения (вперед, назад, влево, вправо) реализуются одинаково, что упрощает программирование контроллера и делает управление более интуитивным.

**Универсальность:** Не требуется определения "передней" части аппарата - любое направление может быть принято за переднее.

## **2.1.9 Многовинтовые системы**

### **Гексакоптеры - баланс эффективности и надежности**

Гексакоптеры используют шесть винтов, что дает им существенные преимущества в определенных применениях. Основное преимущество - отказоустойчивость. При выходе из строя одного мотора гексакоптер может продолжить управляемый полет, хотя и с ограниченными возможностями маневрирования.

Дополнительные винты также означают, что каждый винт несет меньшую нагрузку, что может продлить срок службы моторов и повысить общую надежность системы. Кроме того, распределение тяги между шестью точками создает более стабильную платформу, что важно для профессиональной аэросъемки.

Расположение винтов в гексакоптере может быть различным:

- **Плоский гексакоптер:** все винты в одной плоскости
- **Y6 коаксиальный:** три оси с парами винтов на каждой

- **Tilted hex:** винты наклонены под углом для повышения эффективности поступательного полета

### **Октокоптеры - максимальная грузоподъемность**

Октокоптеры с восемью винтами используются для самых требовательных применений - подъема тяжелых профессиональных камер, доставки грузов, долговременного мониторинга. Восемь винтов обеспечивают не только высокую грузоподъемность, но и исключительную отказоустойчивость - система может продолжить полет даже при отказе двух моторов.

Основные конфигурации октокоптеров:

- **Плоский октокоптер:** восемь винтов в одной плоскости
- **X8 коаксиальный:** четыре оси с парами винтов
- **Комбинированные системы:** сочетание различных принципов.

### **2.1.10 Нетрадиционные конфигурации**

#### **Конвертопланы (tiltrotor)**

Эти системы сочетают преимущества мультироторов (вертикальный взлет) с эффективностью самолетов (горизонтальный полет). Винты могут поворачиваться от вертикального положения для взлета к горизонтальному для поступательного полета.

Такие системы сложнее в управлении, но обеспечивают значительно большую дальность полета и скорость. Они находят применение в доставке грузов на большие расстояния и в военных целях.

#### **Системы с изменяемой геометрией**

Современные разработки включают мультироторы со складывающимися винтами, изменяемым углом наклона моторов, переменным шагом винтов. Эти технологии позволяют оптимизировать аэродинамику для различных режимов полета, но значительно усложняют конструкцию.

### **2.1.11 Управление полетом и динамика**

#### **Физика управления мультиротором**

Управление мультиротором принципиально отличается от управления традиционными летательными аппаратами. В самолетах управление осуществляется аэродинамическими рулями, которые эффективны только при наличии воздушного потока. В вертолетах используется автомат перекоса, изменяющий подъемную силу различных частей несущего винта.

Мультироторы используют совершенно иной принцип - управление осуществляется только изменением скорости вращения отдельных винтов. Это

делает их управляемыми даже при нулевой поступательной скорости, но требует постоянной работы всех моторов.

### **Моменты и их создание**

Каждый тип движения мультиротора создается определенным способом распределения тяги между винтами:

**Создание момента тангажа:** Когда нужно наклонить аппарат вперед, задние моторы увеличивают обороты, а передние уменьшают. Разность тяг создает момент относительно центра масс, наклоняющий аппарат. Важно понимать, что общая тяга при этом должна оставаться примерно постоянной для поддержания высоты.

**Создание момента крена:** Аналогично тангажу, но используются левые и правые моторы.

**Создание момента рыскания:** Используется разность реактивных моментов винтов. Каждый винт создает реактивный момент, стремящийся повернуть корпус в направлении, противоположном вращению винта. Изменяя соотношение оборотов между винтами, вращающимися в разные стороны, можно создать результирующий момент рыскания.

### **Связность каналов управления**

Важной особенностью мультироторов является связность каналов управления. Например, при создании момента рыскания изменяется общая тяга системы, что влияет на вертикальное движение. Системы управления должны это компенсировать.

Современные полетные контроллеры используют сложные алгоритмы микширования (смешивания) команд управления, чтобы обеспечить независимое управление по всем каналам.

#### **2.1.12 Режимы полета**

##### **Зависание - основной режим работы**

Зависание - это режим, в котором мультиротор поддерживает неподвижное положение в пространстве. Физически это означает balance между весом аппарата и суммарной тягой винтов, а также отсутствие результирующих моментов.

В идеальных условиях (отсутствие ветра, точная центровка) для зависания достаточно одинаковых оборотов всех винтов. На практике всегда присутствуют небольшие дисбалансы - различия в характеристиках моторов, неточность центровки, влияние ветра. Автопилот постоянно корректирует обороты винтов для поддержания стабильного зависания.

Зависание - наиболее энергозатратный режим для мультиротора, поскольку вся энергия идет на создание подъемной силы без получения горизонтального перемещения.

### **Поступательное движение**

Для движения в горизонтальном направлении мультиротор должен наклониться в сторону движения. Это создает горизонтальную составляющую тяги, которая и обеспечивает ускорение в нужном направлении.

Скорость движения определяется углом наклона и общей тягой. При большем наклоне большая горизонтальная составляющая тяги, но меньше вертикальная, поэтому для поддержания высоты требуется увеличить общую тягу.

Существует максимальный угол наклона, при котором мультиротор еще может поддерживать высоту. Этот угол определяет максимальную горизонтальную скорость. Для большинства мультироторов он составляет 45-60 градусов.

### **Автоматические режимы полета**

Современные мультироторы поддерживают множество автоматических режимов:

**Position Hold (удержание позиции):** Аппарат автоматически поддерживает заданные координаты, компенсируя влияние ветра и другие возмущения.

**Altitude Hold (удержание высоты):** Поддерживается заданная высота при ручном управлении горизонтальным движением.

**Return to Launch (возврат к точке взлета):** Автоматический возврат и посадка в точке взлета.

**Follow Me (следование):** Аппарат следует за движущимся объектом (обычно за пилотом с GPS-приемником).

**Waypoint Navigation (полет по маршруту):** Автоматический полет по заранее заданным точкам маршрута.

### **2.1.13 Системы управления и стабилизации**

#### **Датчики и их роль**

Современные мультироторы используют несколько типов датчиков:

##### **Инерциальные датчики (IMU):**

- *Акселерометры* измеряют ускорения по трем осям, позволяя определить наклон аппарата относительно вектора тяжести

- *Гироскопы* измеряют угловые скорости, обеспечивая информацию о скорости изменения ориентации
- *Магнитометры* определяют направление на магнитный север, служа электронным компасом

**Барометры** измеряют атмосферное давление, позволяя определить высоту полета с точностью до нескольких десятков сантиметров.

**GPS приемники** обеспечивают информацию о глобальных координатах и скорости движения над землей.

#### **Дополнительные датчики:**

- *Ультразвуковые дальномеры* для точного измерения высоты над поверхностью
- *Оптические датчики* для определения смещения относительно подстилающей поверхности
- *Лидары* для обнаружения препятствий и создания карт местности

#### **Алгоритмы управления**

**ПИД-регулирование** остается основой большинства систем управления мультироторами. Этот алгоритм использует три составляющие:

*Пропорциональная (P)* - реагирует на величину отклонения от заданного значения. Чем больше отклонение, тем сильнее управляющее воздействие.

*Интегральная (I)* - учитывает накопленную за время ошибку, устранивая систематические отклонения.

*Дифференциальная (D)* - реагирует на скорость изменения отклонения, обеспечивая упреждающую коррекцию.

**Каскадное управление:** Система управления мультиротором обычно организована в виде каскада из двух контуров:

- *Внешний контур* управляет углами наклона (стабилизирует ориентацию)
- *Внутренний контур* управляет угловыми скоростями (обеспечивает быстрое реагирование)

Такая структура обеспечивает как стабильность полета, так и приемлемое качество переходных процессов.

## **Лекция 2.2 Аэродинамические эффекты и явления**

### **2.2.1 Эффект земли - помощь от поверхности**

Эффект земли - одно из наиболее заметных аэродинамических явлений, с которым сталкиваются операторы мультироторов. При полете вблизи земной поверхности винт работает более эффективно, чем в свободном воздухе.

## **Физическая природа явления**

Когда мультиротор находится близко к земле, поток воздуха от винтов, достигая поверхности, отражается обратно вверх. Это создает дополнительное давление под аппаратом, которое можно представить как "воздушную подушку". Винтам становится "легче" создавать тягу - они как бы получают дополнительную опору.

Эффект наиболее выражен на высотах менее одного диаметра винта над поверхностью и практически исчезает на высотах более двух диаметров. Характер поверхности также влияет на проявление эффекта - над водой или гладким асфальтом он сильнее, чем над травой или пересеченной местностью.

## **Практические проявления**

Операторы мультироторов часто замечают, что аппарат "прилипает" к земле при посадке - на последнем метре высоты снижение замедляется, как будто аппарат попал в невидимую "яму". Для этого эффекта требует увеличения команды снижения или даже полного сброса газа.

При взлете наблюдается обратная картина - аппарат легко отрывается от земли и быстро набирает первый метр высоты, но затем подъем замедляется. Это может введение в заблуждение начинающих пилотов, которые могут подумать, что у аппарата недостаточно мощности.

Эффект земли можно использовать с пользой - при работе на небольшой высоте (инспекция поверхностей, аэросъемка с низких точек) аппарат потребляет значительно меньше энергии, что продлевает время полета.

### **2.2.2 Взаимодействие винтов**

В отличие от одиночных винтов на самолетах или вертолетах, винты мультиротора работают в условиях взаимного влияния. Это создает ряд аэродинамических эффектов, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации.

#### **Индуктивное взаимодействие**

Каждый винт создает завихрения на концах лопастей и индуктивный поток воздуха. Соседние винты попадают в эти возмущения, что может снижать их эффективность. Степень взаимодействия зависит от расстояния между винтами - чем ближе они друг к другу, тем сильнее влияние.

Для минимизации взаимодействия винты в мультироторах разносят как можно дальше друг от друга, но это увеличивает размеры и массу конструкции.

В компактных гоночных дронах иногда приходится мириться с некоторым снижением эффективности ради маневренности.

### **Рециркуляция воздуха**

При определенных условиях между винтами может возникать рециркуляция - воздух, отброшенный одним винтом, частично всасывается соседним. Это явление особенно выражено в коаксиальных системах, где винты расположены на одной оси.

### **Влияние на устойчивость**

Взаимодействие винтов может влиять на устойчивость мультиротора. Небольшие различия в работе винтов, вызванные их взаимным влиянием, могут создавать моменты, которые системе управления приходится постоянно компенсировать. Это увеличивает энергопотребление и может снижать точность позиционирования.

## **2.2.3 Срывные режимы и их предотвращение**

### **Срыв потока на лопастях**

Как и любое аэродинамическое устройство, лопасти винта имеют критический угол атаки, при превышении которого происходит срыв потока. Для винтов мультироторов это может происходить в нескольких ситуациях:

**При резком увеличении нагрузки** - например, при попытке быстрого подъема тяжелого груза или при попадании в сильные восходящие потоки.

**При неоптимальном сочетании оборотов и поступательной скорости** - винт, рассчитанный на статические режимы, может работать неэффективно при высоких скоростях полета.

**При повреждении лопастей** - сколы, трещины или загрязнения изменяют аэродинамический профиль и могут привести к преждевременному срыву.

### **Вихревое кольцо (кольцевой вихрь)**

Одно из наиболее опасных аэродинамических явлений для мультироторов - состояние вихревого кольца. Оно возникает при вертикальном снижении со скоростью, близкой к индуктивной скорости винта. В этом режиме воздух начинает рециркулировать через диск винта, создавая неустойчивое состояние.

### **Признаки вихревого кольца:**

- Резкие, непредсказуемые изменения тяги
- Сильные вибрации
- Потеря эффективности управления по вертикали
- Характерный изменяющийся звук винтов

### **Выход из режима:**

- Немедленное прекращение вертикального снижения
  - Движение в любом горизонтальном направлении для "протяжки" винтов через их собственную струю
  - При критическом развитии ситуации - увеличение оборотов винтов
- Предотвращение:**
- Избегание скоростей снижения более 3-5 м/с
  - При необходимости быстрого снижения - выполнение спирального снижения с горизонтальной составляющей скорости

## 2.2.4 Влияние атмосферных условий

### Влияние плотности воздуха

Мотооры чрезвычайно чувствительны к плотности воздуха, которая зависит от высоты над уровнем моря, температуры и влажности. С увеличением высоты плотность воздуха снижается, что приводит к уменьшению создаваемой тяги при тех же оборотах винта.

**Высотность мультироторов** ограничивается именно снижением плотности воздуха. На высоте 3000 метров плотность воздуха примерно на 30% меньше, чем на уровне моря, что соответственно снижает максимальную тягу.

**Температурное влияние** также существенно - в жаркий день плотность воздуха может быть на 10-15% меньше, чем в холодный, что заметно влияет на характеристики полета.

### Влияние ветра

Ветер оказывает комплексное воздействие на мультиротор:

**Статическое воздействие** - боковой ветер создает постоянные моменты, которые система управления должна компенсировать наклоном аппарата. Это увеличивает энергопотребление.

**Динамическое воздействие** - порывы ветра создают переменные нагрузки, на которые система управления приходится реагировать. Частые коррекции также увеличивают расход энергии.

**Градиент ветра** - изменение скорости и направления ветра с высотой может создавать сложные условия для управления, особенно при взлете и посадке.

**Турбулентность** - особенно опасна для малых мультироторов. Размер турбулентных образований может быть сопоставим с размерами аппарата, создавая резкие изменения нагрузки на различные части конструкции.

### 2.3.1 Выбор компонентов - основа успешного проекта

Проектирование мультиротора начинается с четкого определения задач и требований. От этого зависит выбор всех остальных компонентов и общая архитектура системы.

#### Определение задач и требований

**Тип применения** определяет основные характеристики будущего аппарата:

*Аэросъемка* требует стабильной платформы с минимальными вибрациями, большого времени полета, возможности нести камеру и подвес.

*Гонки* требуют максимальной маневренности, высокой тяговооруженности, минимального веса, быстрого отклика на команды управления.

*Доставка грузов* требует высокой грузоподъемности, надежности, возможности автономного полета.

*Мониторинг и инспекция* требуют длительного времени полета, стабильности, возможности нести специальное оборудование.

#### Массово-размерные характеристики

Определение целевой массы аппарата - ключевой момент проектирования. От массы зависит требуемая мощность, размеры винтов, емкость аккумуляторов, мощность моторов.

**Правило "квадрата-куба"** играет важную роль: при увеличении размеров аппарата в  $k$  раз его масса растет пропорционально  $k^3$ , а площадь винтов - пропорционально  $k^2$ . Это означает, что крупные мультироторы имеют более высокую дисковую нагрузку и менее эффективны.

#### Типичные соотношения для различных классов:

- Микро-дроны (до 100 г): время полета 5-10 мин, простейшие задачи
- Мини-дроны (100-500 г): время полета 10-20 мин, любительская съемка
- Средние (500-2000 г): время полета 15-30 мин, полупрофессиональная съемка
- Тяжелые (2-25 кг): время полета 20-40 мин, профессиональная съемка, мониторинг
- Сверхтяжелые (более 25 кг): специальные применения, доставка грузов.

### 2.3.2 Винты - сердце аэродинамики

#### Выбор диаметра

Диаметр винта - компромисс между эффективностью и практичностью. Большие винты более эффективны, но создают проблемы:

**Размеры аппарата** увеличиваются пропорционально диаметру винтов, что усложняет транспортировку и работу в ограниченном пространстве.

**Инерционность** больших винтов выше, что замедляет отклик на команды управления.

**Опасность** при контакте больших винтов с препятствиями или людьми значительно выше.

#### **Практические рекомендации по выбору диаметра:**

- Для гоночных дронов: 3-5 дюймов (минимальная инерция, максимальная маневренность)
- Для любительской съемки: 8-10 дюймов (баланс эффективности и компактности)
- Для профессиональной съемки: 12-15 дюймов (максимальная эффективность и стабильность)
- Для тяжелых платформ: 18-24 дюйма (максимальная грузоподъемность)

#### **Выбор шага**

Шаг винта определяет его "агрессивность":

##### **Малый шаг** (отношение шаг/диаметр 0,3-0,5):

- Хорошая эффективность в статических режимах
- Низкий уровень шума
- Ограниченнная максимальная скорость
- Подходит для съемочных платформ и задач, требующих точного позиционирования

##### **Большой шаг** (отношение шаг/диаметр 0,6-0,8):

- Высокая максимальная скорость
- Хорошая эффективность в поступательном полете
- Повышенный уровень шума
- Подходит для гоночных и скоростных применений

#### **Материалы винтов**

##### **Пластиковые винты** (ABS, нейлон, поликарбонат):

*Преимущества:* низкая стоимость, безопасность при разрушении, простота изготовления, возможность ремонта

*Недостатки:* большая масса, деформации при высоких нагрузках, износ при контакте с препятствиями

##### **Карбоновые винты:**

*Преимущества:* минимальная масса, высокая жесткость, точность изготовления, долговечность;

*Недостатки:* высокая стоимость, опасные осколки при разрушении, сложность ремонта.

**Деревянные винты** (для специальных применений):

*Преимущества:* хорошие аэродинамические свойства, малый шум, возможность изготовления по индивидуальным размерам;

*Недостатки:* большая масса, чувствительность к влаге, ограниченная прочность.

### 2.3.3 Силовая установка

#### Выбор моторов

Современные мультироторы используют исключительно бесколлекторные (BLDC) моторы благодаря их высокой эффективности, надежности и точности управления.

#### Основные параметры моторов:

*KV-рейтинг* - количество оборотов в минуту на каждый вольт приложенного напряжения без нагрузки. Этот параметр определяет скоростные характеристики:

- Высокие KV (2000-3000+): для малых винтов и высоких скоростей
- Средние KV (800-1500): универсальные применения
- Низкие KV (300-700): для больших винтов и эффективности

*Максимальная мощность* определяет потенциальную тягу. Важно учитывать как пиковую мощность (на несколько секунд), так и продолжительную (неограниченно долго).

*Масса мотора* критически важна для мультироторов. Каждый лишний грамм в моторе требует дополнительной энергии для своего подъема.

**Соответствие мотора и винта** - ключевой момент выбора. Мотор должен иметь достаточную мощность для раскрутки выбранного винта до нужных оборотов, но не должен быть значительно переразмерен.

#### Регуляторы скорости (ESC)

ESC преобразуют сигнал управления в трехфазное питание для мотора и являются критически важными для безопасности и производительности.

**Номинал по току** должен превышать максимальное потребление мотора с запасом не менее 30%. Перегрузка ESC ведет к его перегреву и возможному выходу из строя.

**Частота обновления сигнала** влияет на отклик системы управления. Современные ESC поддерживают частоты до 32 кГц, что обеспечивает практически мгновенный отклик на команды.

#### **Дополнительные функции:**

- Телеметрия (передача данных о токе, напряжении, температуре)
- Тормоз мотора (активное замедление вращения)
- Защита от перегрузок и перегрева
- Программируемые параметры работы.

### **2.3.4 Энергосистема**

#### **Аккумуляторы**

Литий-полимерные (LiPo) аккумуляторы стали стандартом для мультироторов благодаря высокой удельной мощности и энергоплотности.

#### **Основные характеристики:**

*Напряжение* определяется количеством последовательно соединенных элементов:

- 1S (3,7В): микро-дроны
- 2S (7,4В): мини-дроны
- 3S (11,1В): средние дроны
- 4S (14,8В): наиболее популярная конфигурация
- 6S (22,2В): мощные платформы

*Емкость* измеряется в миллиампер-часах (mAh) и определяет время полета. Однако увеличение емкости увеличивает массу и размеры аккумулятора.

*Разрядный ток* (C-рейтинг) показывает, какой максимальный ток может отдавать аккумулятор без повреждения. Для мультироторов требуются аккумуляторы с высоким C-рейтингом (15-45C).

#### **Безопасность LiPo аккумуляторов:**

- Нельзя разряжать ниже 3,0В на элемент
- Нельзя заряжать током более 1C без специальных мер предосторожности

- Требуется балансировка элементов при зарядке
- Необходимо правильное хранение и транспортировка

#### **Мощность в зависании** составляет основу для расчета времени полета:

Для винта каждого мотора можно рассчитать идеальную мощность по формуле теории импульса, затем учесть КПД винта (обычно 0,4-0,7), КПД мотора (0,8-0,9) и КПД ESC (0,9-0,95).

#### **Дополнительное потребление** включает:

- Полетный контроллер и датчики (1-5 Вт)
- Система видеопередачи (2-20 Вт)
- Камера и подвес (5-50 Вт)
- Дополнительное оборудование

**Реальное время полета** обычно составляет 60-80% от теоретически рассчитанного из-за:

- Переменности режимов полета
- Влияния погодных условий
- Деградации аккумулятора
- Запаса безопасности.

### 2.3.5 Конструкция и центровка

**Карбоновое волокно** - стандарт для современных мультироторов:

*Преимущества:* высокая удельная прочность, жесткость, малая масса, устойчивость к вибрациям

*Недостатки:* высокая стоимость, сложность ремонта, проблемы с прохождением радиосигналов

**Алюминий:**

*Преимущества:* хорошая прочность, простота обработки, невысокая стоимость, хорошая теплопроводность

*Недостатки:* большая масса, подверженность коррозии, передача вибраций

**Пластики** (АБС, нейлон, поликарбонат):

*Преимущества:* низкая стоимость, простота изготовления, безопасность, возможность сложных форм

*Недостатки:* большая масса, ограниченная прочность, температурная чувствительность

**Центровка и балансировка**

**Центр масс** должен совпадать с геометрическим центром расположения винтов. Даже небольшое смещение (несколько миллиметров) создает постоянный момент, который системе управления приходится компенсировать, увеличивая энергопотребление.

**Балансировка винтов** критически важна для снижения вибраций. Небалансированные винты создают переменные нагрузки на подшипники моторов, конструкцию аппарата и вызывают вибрации камеры.

**Жесткость конструкции** должна быть достаточной для предотвращения резонансных колебаний. Особое внимание - креплению моторов и камеры

## Лекция 2.4 Современные тенденции и перспективы развития

### 2.4.1 Технологические тренды

#### Интеллектуализация управления

Современные мультироторы все больше полагаются на интеллектуальные системы управления, способные принимать самостоятельные решения в полете.

**Системы технического зрения** позволяют аппаратам самостоятельно обнаруживать и обходить препятствия, следить за движущимися объектами, выполнять автоматическую посадку на неподготовленные площадки.

**Машинное обучение** применяется для оптимизации управления полетом в различных условиях, предсказания отказов оборудования, адаптации к изменяющимся характеристикам аппарата.

**Роевой интеллект** позволяет группе мультироторов координированно выполнять сложные задачи - от поисково-спасательных операций до развлекательных шоу.

#### Новые материалы и технологии

**Метаматериалы** с программируемыми свойствами открывают возможности создания винтов с изменяемой геометрией, "умных" конструкций, способных адаптироваться к условиям полета.

**Аддитивные технологии** (3D-печать) позволяют создавать сложные аэродинамические формы, интегрированные конструкции, индивидуальные решения для специальных применений.

**Композиционные материалы** нового поколения обеспечивают еще большее снижение массы при сохранении или увеличении прочности.

### 2.4.2 Энергетические решения

#### Гибридные силовые установки

Ограничения традиционных электрических мультироторов стимулируют развитие гибридных решений:

**Электро-топливные гибриды** используют двигатель внутреннего сгорания для привода генератора, питающего электрические моторы. Это обеспечивает время полета в несколько часов при сохранении всех преимуществ электропривода винтов.

**Топливные элементы** на водороде обещают чистую энергию с высокой удельной энергоплотностью. Однако пока ограничивает сложность и стоимость водородной инфраструктуры.

**Солнечные панели** интегрируются в конструкцию аппаратов для продления времени полета в солнечных условиях.

### **Аккумуляторные технологии**

**Твердотельные аккумуляторы** обещают значительно большую энергоплотность и безопасность по сравнению с традиционными LiPo.

**Литий-серные батареи** могут обеспечить в 2-3 раза большую удельную энергоемкость.

**Суперконденсаторы** позволяют создавать системы рекуперации энергии и обеспечивают пиковые токи разряда.

### **2.4.3 Новые области применения**

#### **Городская мобильность**

Развитие технологий приближает эпоху "летающих автомобилей" - персональных транспортных средств на основе мультироторных технологий. Компании по всему миру разрабатывают пилотируемые мультироторы для городского транспорта.

#### **Автономная доставка**

Мультироторы становятся основой систем автономной доставки товаров. От доставки пиццы до медицинских препаратов в отдаленные районы - сфера применения постоянно расширяется.

#### **Инфраструктурный мониторинг**

Регулярный мониторинг состояния мостов, линий электропередач, трубопроводов с помощью автономных мультироторов может значительно повысить безопасность и снизить расходы на обслуживание инфраструктуры.

#### **Экологический мониторинг**

Мультироторы становятся незаменимыми инструментами для мониторинга состояния окружающей среды - от отслеживания загрязнений до подсчета популяций животных.

## **Лекция 2.5 Безопасность и регулирование**

### **2.5.1 Аспекты безопасности**

#### **Отказоустойчивость**

Современные мультироторы оснащаются множественными системами безопасности:

**Резервирование критических систем** - дублирование датчиков, контроллеров, систем связи обеспечивает продолжение полета при отказе одного из компонентов.

#### **Автоматические режимы безопасности:**

- Return-to-Launch при потере связи с пилотом;

- Автоматическая посадка при низком заряде аккумулятора;
- Автоматическое снижение при обнаружении неисправности.

**Парашютные системы** для крупных мультироторов обеспечивают безопасную посадку при критических отказах.

### **Предотвращение столкновений**

**Системы обнаружения и избежания препятствий** (DAA - Detect and Avoid) становятся стандартным оборудованием:

*Радарные системы* обеспечивают обнаружение препятствий в любых погодных условиях

*Лидарные системы* создают детальные трехмерные карты окружающего пространства

*Визуальные системы* используют камеры и алгоритмы компьютерного зрения

*Интегрированные системы* объединяют несколько типов датчиков для максимальной надежности.

## **2.5.2 Регулирование и стандарты**

### **Международные стандарты**

Развитие мультироторных технологий стимулировало создание новых международных стандартов:

- **ИКАО (ICAO)** разрабатывает стандарты для интеграции беспилотных систем в общее воздушное пространство;
- **ИСО (ISO)** создает стандарты качества и безопасности для различных компонентов и систем;
- **МЭК (IEC)** разрабатывает стандарты электротехнических компонентов.

### **Национальные регулирования**

Большинство стран мира создали или создают национальные системы регулирования использования мультироторов:

**Регистрация и идентификация** аппаратов становится обязательной во многих юрисдикциях

**Лицензирование пилотов** требуется для коммерческого использования

**Зоны ограничений полетов** устанавливаются вокруг аэропортов, военных объектов, критической инфраструктуры.

## Лекция 2.6 Метеорологические условия и их влияние на полеты БАС

### 2.6.1 Основные метеорологические элементы

Метеорологические условия играют критическую роль в безопасности полетов беспилотных авиационных систем. Понимание основных метеорологических элементов и их влияния на полет является обязательным для операторов БАС.

Атмосферное давление представляет собой давление, оказываемое атмосферой на земную поверхность и все находящиеся в ней объекты. Стандартное атмосферное давление на уровне моря составляет 760 мм ртутного столба или 1013,25 гПа. Изменения атмосферного давления влияют на плотность воздуха и, соответственно, на аэродинамические характеристики БАС. Барометрические высотомеры, используемые в БАС, основаны на измерении атмосферного давления, поэтому точность определения высоты зависит от правильности учета текущего давления.

Температура воздуха определяет его плотность при постоянном давлении. С повышением температуры плотность воздуха уменьшается, что приводит к снижению эффективности винтов БАС. Международная стандартная атмосфера предполагает температуру  $+15^{\circ}\text{C}$  на уровне моря с градиентом понижения  $6,5^{\circ}\text{C}$  на каждый километр высоты. Отклонения от стандартной температуры должны учитываться при планировании полетов, особенно в экстремальных климатических условиях.

Влажность воздуха характеризуется содержанием водяного пара в атмосфере. Различают абсолютную влажность (количество водяного пара в единице объема воздуха) и относительную влажность (отношение фактического содержания водяного пара к максимально возможному при данной температуре). Высокая влажность может привести к конденсации влаги на элементах БАС, что создает риск коррозии и нарушения работы электронных систем.

### 2.6.2 Ветер и его характеристики

Ветер представляет собой горизонтальное движение воздушных масс относительно земной поверхности. Для авиации важными характеристиками ветра являются его направление, скорость, порывистость и изменчивость по высоте.

Направление ветра определяется по той стороне горизонта, откуда он дует, и выражается в градусах от  $0^{\circ}$  до  $360^{\circ}$  по часовой стрелке от северного направления. Скорость ветра измеряется в метрах в секунду, километрах в час

или узлах (морских милях в час). Для операторов БАС важно понимать, что ветер может значительно изменяться как по направлению, так и по скорости на различных высотах.

Градиент ветра - изменение скорости или направления ветра в пространстве - представляет особую опасность для малых воздушных судов. Вертикальный градиент ветра (изменение ветра по высоте) может вызвать резкие изменения в аэродинамических условиях полета БАС при наборе высоты или снижении. Горизонтальный градиент ветра может привести к неожиданному изменению траектории полета.

Турбулентность - беспорядочное движение воздушных масс - возникает при взаимодействии воздушных потоков различной скорости и направления. Источниками турбулентности могут быть термические восходящие потоки, орографические препятствия (горы, здания), струйные течения в атмосфере. Для БАС особенно опасна турбулентность в приземном слое, которая может возникать при обтекании ветром препятствий.

### **2.6.3 Опасные метеорологические явления**

Грозы представляют комплексную опасность для БАС, включающую сильные восходящие и нисходящие потоки, турбулентность, осадки, град, обледенение и электрические разряды. Мощные конвективные потоки в грозовых облаках могут достигать скоростей свыше 30 м/с, что многократно превышает возможности БАС по противостоянию таким воздействиям. Полеты БАС в грозовых условиях категорически запрещены.

Обледенение происходит при полете в условиях отрицательных температур и наличии переохлажденных капель воды в атмосфере. Лед, образующийся на лопастях винтов, нарушает их аэродинамические характеристики и может привести к дисбалансу и вибрации. Обледенение электронных компонентов может вызвать их отказ. Большинство гражданских БАС не имеют противообледенительных систем, поэтому полеты в условиях обледенения недопустимы.

Сдвиг ветра - резкое изменение скорости или направления ветра на коротком расстоянии - может вызвать потерю управляемости БАС. Особенно опасен сдвиг ветра при взлете и посадке, когда БАС находится на малых высотах и имеет ограниченные возможности для восстановления нормального режима полета.

Пыльные и песчаные бури создают опасность не только из-за ограничения видимости, но и из-за попадания абразивных частиц в движущиеся части БАС.

Мелкие частицы пыли могут проникать в электронные компоненты и вызывать их отказ.

## **Лекция 2.7 Оценка метеорологической обстановки для полетов БАС**

### **2.7.1 Источники метеорологической информации**

Получение актуальной и достоверной метеорологической информации является обязательным этапом подготовки к полету БАС. Существует несколько основных источников метеорологической информации, каждый из которых имеет свои особенности и области применения.

Гидрометеорологическая служба России (Росгидромет) является основным источником официальной метеорологической информации. Сеть метеорологических станций Росгидромета обеспечивает регулярные наблюдения за погодными условиями и составление прогнозов. Метеорологические сводки (METAR) и прогнозы аэродромов (TAF) содержат информацию о текущих и ожидаемых метеоусловиях в стандартизированном международном формате.

Автоматические метеорологические станции (АМСГ) обеспечивают непрерывный мониторинг основных метеорологических параметров. Эти станции особенно важны для получения актуальной информации о приземных условиях в районе выполнения полетов БАС. Многие АМСГ передают данные в режиме реального времени через интернет, что обеспечивает операторам БАС доступ к самой свежей информации.

Спутниковая метеорология предоставляет глобальную картину погодных условий. Спутниковые снимки позволяют отслеживать движение облачности, фронтальных систем, зон осадков. Радиолокационные данные о осадках особенно важны для выявления зон интенсивных осадков и гроз.

Интернет-ресурсы и мобильные приложения обеспечивают удобный доступ к метеорологической информации. Многие из этих ресурсов предоставляют специализированную информацию для авиации, включая данные о ветре на различных высотах, турбулентности, обледенении.

### **2.7.2 Интерпретация метеорологических данных**

Правильная интерпретация метеорологических данных требует понимания форматов представления информации и умения оценивать их применимость к конкретным условиям полета БАС.

Метеорологическая сводка METAR представляет собой стандартизированный отчет о текущих погодных условиях на аэродроме или

метеостанции. Формат METAR включает информацию о времени наблюдения, направлении и скорости ветра, видимости, текущей погоде, облачности, температуре, точке росы, атмосферном давлении. Для операторов БАС особенно важны данные о ветре у поверхности, видимости и высоте нижней границы облачности.

Прогноз TAF (Terminal Aerodrome Forecast) содержит информацию об ожидаемых изменениях погодных условий на период до 30 часов. TAF включает прогнозы изменений ветра, видимости, осадков, облачности. Понимание формата TAF позволяет операторам планировать полеты с учетом ожидаемых изменений погоды.

Карты приземного анализа и прогноза показывают расположение и движение атмосферных фронтов, центров высокого и низкого давления, зон осадков. Эти карты помогают понять синоптическую ситуацию и прогнозировать развитие погодных условий в более широком масштабе.

### **2.7.3 Принятие решений на основе метеорологической информации**

Оценка пригодности метеорологических условий для полета БАС является ответственным решением, которое должно основываться на комплексном анализе всех доступных данных и их сопоставлении с ограничениями конкретного типа БАС.

Критерии принятия решения о выполнении полета должны учитывать не только текущие условия, но и их ожидаемые изменения в течение планируемого времени полета. Особое внимание следует уделять прогнозу ухудшения условий, которое может произойти во время выполнения полетного задания.

Ограничения по ветру являются одними из наиболее важных для БАС. Большинство гражданских мультироторных БАС имеют ограничения по максимальной скорости ветра в диапазоне 10-15 м/с. Однако следует учитывать не только среднюю скорость ветра, но и его порывистость.

Видимость должна быть достаточной для поддержания визуального контакта с БАС на всем протяжении полета. В условиях ограниченной видимости возрастает риск столкновения с препятствиями и потери ориентации. Минимальная видимость для полетов БАС обычно устанавливается на уровне 500-1000 метров в зависимости от типа выполняемых работ.

Высота нижней границы облачности ограничивает максимальную высоту полета БАС. Полеты в облаках недопустимы из-за потери визуального контакта и возможности обледенения. Минимальная высота облачности для полетов БАС обычно составляет 50-100 метров.

## **ПРАКТИКА ПО ТЕМЕ 2**

### **Практическое занятие 2.1**

#### **Оценка метеорологических условий и их влияния на выполнение полета**

**Цель:** Научиться анализировать метеорологическую информацию и принимать обоснованные решения о возможности выполнения полетов БАС.

#### **Теоретическая часть:**

Метеорологическое обеспечение полетов БАС требует комплексного подхода к анализу погодных условий. Оператор должен уметь не только получать и интерпретировать метеорологическую информацию, но и оценивать ее достоверность и применимость к конкретным условиям полета.

Процесс метеорологического обеспечения включает несколько этапов: получение актуальной информации о текущих условиях, анализ прогнозов на период выполнения полета, оценку соответствия условий ограничениям БАС, принятие решения о выполнении или переносе полета.

#### **Практическая работа:**

##### **Задание 1: Анализ сводки METAR**

Студенты получают реальные сводки METAR от различных метеостанций и должны:

- расшифровать все элементы сводки;
- определить пригодность условий для полета БАС;
- выявить потенциальные опасности;
- сформулировать рекомендации по выполнению полета.

Пример сводки: METAR UUWW 121200Z 27015G25KT 4000 -RA SCT008 BKN015 OVC030 06/04 Q1008 NOSIG.

##### **Задание 2: Работа с прогнозом TAF**

Анализ прогноза погоды на аэродроме с определением:

- периодов, благоприятных для полетов;
- ожидаемых ухудшений условий;
- критических изменений погоды;
- планирования времени выполнения полетного задания.

##### **Задание 3: Комплексный анализ метеообстановки**

На основе синоптических карт, спутниковых снимков и локальных прогнозов студенты должны:

- Оценить общую метеорологическую ситуацию в регионе
- Определить влияние синоптических процессов на местные условия

- Спрогнозировать изменения погоды в районе полета
- Подготовить метеорологическое заключение для планирования полетов

## **Практическое занятие 2.2**

### **Определение пригодности условий для выполнения полета**

**Цель:** Развить навыки принятия решений о выполнении полетов на основе анализа метеорологических условий и технических ограничений БАС.

#### **Теоретическая часть:**

Принятие решения о выполнении полета является критически важным навыком оператора БАС. Это решение должно основываться на объективном анализе метеорологических условий, технических характеристик БАС, требований полетного задания и факторов безопасности.

Методология принятия решений включает определение критических параметров, сравнение фактических и прогнозируемых условий с ограничениями, оценку запасов безопасности, анализ альтернативных вариантов действий.

#### **Практическая работа:**

##### **Сценарий 1: Аэрофотосъемка в условиях переменной облачности**

Исходные данные:

- Задача: съемка участка площадью 2 км<sup>2</sup> на высоте 100 м;
- Текущие условия: ветер 8 м/с, видимость 3 км, облачность переменная 200-500 м;
- Прогноз: усиление ветра до 12 м/с, понижение облачности до 150 м;
- Ограничения БАС: максимальный ветер 10 м/с, минимальная облачность 120 м.

Студенты должны:

- проанализировать соответствие условий требованиям полета;
- оценить возможные риски;
- принять решение о выполнении, переносе или модификации задания;
- обосновать свое решение.

##### **Сценарий 2: Мониторинг линейного объекта в условиях приближающегося фронта**

Исходные данные:

- Задача: обследование ЛЭП протяженностью 10 км;
- Время выполнения: 3 часа;
- Текущие условия: благоприятные;
- Прогноз: приближение холодного фронта с ухудшением условий через 2 часа.

Анализ включает:

- оценку времени, необходимого для выполнения задания;
- определение критического времени начала ухудшения условий;
- планирование этапности выполнения работ;
- подготовку плана действий при ухудшении погоды.

### **Сценарий 3: Срочное задание в условиях ограниченной видимости**

Моделирование ситуации, когда необходимо выполнить срочное задание (поиск пропавшего человека) в условиях тумана с видимостью 800 м.

Студенты должны:

- Оценить возможности выполнения задания с учетом ограничений
- Рассмотреть альтернативные методы выполнения
- Определить дополнительные меры безопасности
- Принять взвешенное решение с учетом важности задания

## **Практическое занятие 2.3**

### **Работа с метеорологическим оборудованием и информационными ресурсами**

**Цель:** Освоить практические навыки работы с метеорологическим оборудованием и информационными системами.

**Теоретическая часть:**

Современные операторы БАС имеют доступ к широкому спектру метеорологического оборудования и информационных ресурсов. Портативные метеостанции позволяют получать точные данные о локальных условиях. Интернет-ресурсы и мобильные приложения обеспечивают доступ к профессиональной метеорологической информации.

**Практическая работа:**

#### **Модуль 1: Работа с портативной метеостанцией**

Изучение устройства и принципов работы портативной метеостанции:

- измерение скорости и направления ветра;
- определение температуры и влажности воздуха;

- измерение атмосферного давления;
- калибровка и поверка приборов;
- интерпретация показаний.

Практические измерения:

- проведение серии измерений в различных условиях;
- сравнение показаний различных приборов;
- оценка точности и надежности измерений;
- документирование результатов.

## **Модуль 2: Работа с профессиональными интернет-ресурсами**

Изучение специализированных метеорологических сайтов:

- сайт Росгидромета ([meteoinfo.ru](http://meteoinfo.ru));
- международные авиационные метеорологические ресурсы;
- специализированные сервисы для дронов.

Практические задания:

- получение актуальной информации для заданного района
- анализ синоптических карт и спутниковых снимков
- работа с архивными данными
- настройка персональных уведомлений об изменении погоды.

## **Модуль 3: Мобильные приложения для авиационной метеорологии**

Обзор и тестирование мобильных приложений:

- UAV Forecast;
- Windy;
- MeteoBlue;
- Авиационные приложения.

Практическая работа:

- установка и настройка приложений
- сравнение данных от различных источников
- настройка уведомлений и предупреждений
- использование функций планирования полетов.

Каждый студент должен подготовить метеорологический бюллетень для конкретного полетного задания, используя все доступные источники информации.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ 2

1. Объясните принцип создания подъемной силы винтом мультироторного БАС.
2. Как влияет плотность воздуха на эффективность работы винтов БАС?
3. Что такое эффект влияния земли и как он проявляется при полетах БАС?
4. Опишите принцип управления квадрокоптером за счет изменения тяги винтов.
5. Какие метеорологические параметры наиболее критичны для полетов БАС?
6. Объясните понятие градиента ветра и его влияние на полет БАС.
7. Какие опасные метеорологические явления исключают возможность полетов БАС?
8. Как интерпретировать информацию в сводке METAR для планирования полетов БАС?
9. Какие источники метеорологической информации должен использовать оператор БАС?
10. Как принимать решение о выполнении полета в условиях ограниченной видимости?
11. Объясните, почему мультиротор может зависать в воздухе, используя законы физики
12. Какие преимущества дает X-конфигурация квадрокоптера по сравнению с + -конфигурацией?
13. Почему винты квадрокоптера вращаются в разных направлениях?
14. Как влияет эффект земли на управление мультиротором при взлете и посадке?
15. Проанализируйте преимущества и недостатки увеличения количества винтов в мультироторе
16. Объясните физику возникновения вихревого кольца и способы выхода из этого состояния
17. Как влияет высота над уровнем моря на характеристики мультиротора?
18. Почему время полета мультироторов ограничено по сравнению с самолетами?
19. Разработайте методику выбора оптимального диаметра винта для заданной массы аппарата

20. Проанализируйте влияние взаимодействия винтов на общую эффективность мультироторной системы
21. Предложите пути повышения энергоэффективности мультироторов
22. Оцените перспективы применения мультироторных технологий в городском транспорте.

## ЛИТЕРАТУРА

### **Основные источники:**

1. *Булат П.В., Дудников С.Ю., Кузнецов П.Н.* Основы аэродинамики беспилотных воздушных судов: Учебное пособие. – М.: Издательство «Спутник +», 2021. – 273 с.
2. *Богданов А.В., Голубев И.С.* Авиационная метеорология: Учебник для вузов. – СПб.: РГГМУ, 2005. – 318 с.
3. Руководство по авиационной метеорологии. Doc 8896 AN/893. – ИКАО, 2018. – 245 с.

### **Дополнительные источники:**

4. *Ветеров Ю.А.* Основы аэродинамики и динамики полета винтокрылых летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1988. – 264 с.
5. Метеорологическое обеспечение авиации: Справочник / Под ред. В.Н. Лебедева. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 567 с.
6. Сайт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – Режим доступа: <https://www.meteorf.ru/>
7. Всемирная метеорологическая организация. – Режим доступа: <https://public.wmo.int/>

## ТЕМА 3. КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС

### Лекция 3.1 Основные узлы и системы мультироторных БАС

#### 3.3.1 Конструктивная схема мультироторных БАС

Мультироторные беспилотные авиационные системы представляют собой сложные технические комплексы, состоящие из множества взаимосвязанных компонентов и систем. Понимание конструкции и принципов работы каждого элемента является основой для безопасной и эффективной эксплуатации БАС.

Основу конструкции составляет рама (шасси), которая объединяет все компоненты в единую структуру. Рама должна обеспечивать необходимую прочность и жесткость при минимальной массе. Материалы, используемые для изготовления рам, включают углеродное волокно, алюминиевые сплавы, стеклопластик и современные композитные материалы. Конструкция рамы определяет компоновочную схему БАС - количество и расположение винтов, места установки полезной нагрузки, батарей и электронных компонентов.

Силовая установка мультироторного БАС состоит из электродвигателей, винтов и электронных регуляторов оборотов (ESC - Electronic Speed Controller). Каждый винт приводится в действие отдельным электродвигателем, что обеспечивает независимое управление тягой каждого винта. Такая схема позволяет осуществлять управление БАС по всем осям и обеспечивает высокую маневренность.

Электродвигатели, применяемые в БАС, представляют собой бесколлекторные (бесщеточные) двигатели постоянного тока. Эти двигатели характеризуются высокой эффективностью, надежностью и долговечностью. Отсутствие щеток исключает искрообразование и снижает требования к обслуживанию. Основными характеристиками электродвигателей являются номинальная мощность, максимальные обороты, крутящий момент и константа двигателя (KV), определяющая количество оборотов в минуту на вольт напряжения.

#### 3.3.2 Системы управления и навигации

Система управления полетом (Flight Control System) является "мозгом" БАС, обеспечивающим автоматическое управление полетом, стабилизацию и выполнение заданных маневров. Основу системы составляет полетный контроллер - специализированный компьютер, который обрабатывает информацию от датчиков и формирует управляющие команды для электродвигателей.

Инерциальный измерительный блок (IMU - Inertial Measurement Unit) содержит акселерометры, гироскопы и магнитометры, которые измеряют ускорения, угловые скорости и магнитное поле Земли. Эти данные используются для определения пространственного положения БАС и его изменений. Современные IMU содержат МЭМС-датчики (микроэлектромеханические системы), которые обеспечивают высокую точность измерений при компактных размерах и низкой стоимости.

Система GPS/GNSS обеспечивает определение координат БАС с точностью до нескольких метров. Современные приемники могут работать с различными спутниковыми системами - американской GPS, российской ГЛОНАСС, европейской Galileo, китайской BeiDou. Использование нескольких систем одновременно повышает точность и надежность навигации. Для повышения точности позиционирования могут применяться дифференциальные методы (DGPS, RTK), обеспечивающие точность до нескольких сантиметров.

Барометрический высотомер определяет высоту полета на основе измерения атмосферного давления. Поскольку давление изменяется не только с высотой, но и в зависимости от погодных условий, барометрический высотомер требует регулярной калибровки. Многие современные БАС используют комбинированные системы определения высоты, объединяющие барометрические, GPS и ультразвуковые датчики.

### **3.3.3 Системы связи и передачи данных**

Система радиосвязи обеспечивает управление БАС и передачу телеметрической информации между воздушным судном и наземной станцией управления. Современные системы связи используют цифровые протоколы передачи данных, которые обеспечивают высокую помехоустойчивость и возможность передачи больших объемов информации.

Наиболее распространенными диапазонами частот для систем управления БАС являются 2,4 ГГц и 900 МГц. Диапазон 2,4 ГГц обеспечивает высокую скорость передачи данных, но имеет ограниченную дальность действия. Диапазон 900 МГц характеризуется большей дальностью связи, но меньшей пропускной способностью. Выбор диапазона зависит от требований конкретного применения.

Система передачи видеоданных (FPV - First Person View) позволяет оператору видеть изображение с камеры БАС в режиме реального времени. Это критически важно для точного пилотирования и выполнения специализированных задач. Видеосистемы могут работать в различных

диапазонах частот - 1,2 ГГц, 2,4 ГГц, 5,8 ГГц. Каждый диапазон имеет свои преимущества и ограничения в части дальности, качества изображения и помехоустойчивости.

Телеметрическая система передает на наземную станцию информацию о состоянии БАС - координаты, высота, скорость, заряд батареи, состояние систем. Эта информация необходима оператору для мониторинга полета и принятия управлений решений. Современные телеметрические системы могут передавать десятки параметров с частотой обновления до 100 Гц.

### **3.3.4 Энергетические системы**

Система энергоснабжения БАС включает аккумуляторные батареи, системы управления питанием и зарядные устройства. Выбор типа и характеристик аккумуляторов критически влияет на летные характеристики БАС - время полета, полезную нагрузку, безопасность эксплуатации.

Литий-полимерные (Li-Po) аккумуляторы являются наиболее распространенным типом батарей для БАС благодаря высокой удельной энергоемкости и способности отдавать большие токи. Номинальное напряжение элемента Li-Po составляет 3,7 В, максимальное напряжение заряженного элемента - 4,2 В, минимальное напряжение разряда - 3,0 В. Батареи состоят из нескольких элементов, соединенных последовательно для получения требуемого напряжения.

Система управления питанием (BMS - Battery Management System) контролирует процессы заряда и разряда аккумулятора, предотвращает перезаряд, переразряд и перегрев элементов. BMS также обеспечивает балансировку элементов батареи, выравнивая их напряжения для максимального срока службы и безопасности.

Распределение питания в БАС осуществляется через плату распределения питания (PDB - Power Distribution Board), которая распределяет электроэнергию от батареи к различным потребителям - электродвигателям, полетному контроллеру, системам связи, полезной нагрузке. PDB также может включать преобразователи напряжения для питания компонентов, требующих различных напряжений питания.

## **Лекция 3.2 Полезная нагрузка и специализированное оборудование**

### **3.2.1 Типы полезной нагрузки БАС**

Полезная нагрузка определяет функциональные возможности БАС и область его применения. Выбор полезной нагрузки должен учитывать массогабаритные ограничения БАС, энергопотребление оборудования, требования к качеству получаемых данных и условия эксплуатации.

Фотографические системы являются наиболее распространенным типом полезной нагрузки. Они включают цифровые камеры различных типов - от простых веб-камер до профессиональных фотоаппаратов. Основными характеристиками фотосистем являются разрешение матрицы, размер пикселя, чувствительность, динамический диапазон, оптические характеристики объектива.

Для аэрофотосъемки используются камеры с фиксированным фокусным расстоянием и широкоугольными объективами, обеспечивающими максимальный охват территории при минимальном количестве снимков. Качество получаемых изображений зависит не только от характеристик камеры, но и от стабилизации изображения, которая компенсирует вибрации и колебания БАС.

Видеосистемы обеспечивают получение видеоизображения в режиме реального времени или его запись на носители информации. Современные видеосистемы способны записывать видео в разрешении 4К и выше с частотой кадров до 60 fps. Для профессиональных применений используются камеры с расширенным динамическим диапазоном и возможностью записи в RAW-форматах.

Тепловизионные системы регистрируют инфракрасное излучение объектов и формируют тепловые изображения. Они широко применяются для поиска и спасения людей, мониторинга энергетических объектов, контроля пожарной безопасности, экологического мониторинга. Основными характеристиками тепловизоров являются спектральный диапазон, температурная чувствительность, разрешение матрицы, температурный диапазон измерений.

### **3.2.2 Системы стабилизации полезной нагрузки**

Гимбал (подвес) представляет собой механическую систему, обеспечивающую стабилизацию полезной нагрузки относительно колебаний и поворотов БАС. Стабилизация необходима для получения качественных

изображений и видео, особенно при полетах в условиях турбулентности или при выполнении сложных маневров.

Двухосевые гимбалы обеспечивают стабилизацию по двум осям - тангажу и крену. Такие системы достаточны для большинства задач аэрофотосъемки, когда БАС движется преимущественно поступательно. Трехосевые гимбалы дополнительно стабилизируют полезную нагрузку по рысканию, что обеспечивает максимальное качество стабилизации при любых движениях БАС.

Принцип работы гимбала основан на использовании гироскопических датчиков, которые определяют угловые движения БАС, и исполнительных механизмов (обычно бесколлекторных электродвигателей), которые поворачивают полезную нагрузку в противоположном направлении, компенсируя колебания. Современные гимбалы обеспечивают точность стабилизации до  $\pm 0,01$  градуса.

Электронная стабилизация изображения дополняет или заменяет механическую стабилизацию. Она основана на цифровой обработке изображения и компенсации движений программными методами. Электронная стабилизация имеет меньшую массу и энергопотребление, но может приводить к некоторому снижению разрешения изображения.

### **3.2.3 Специализированное оборудование для различных применений**

Лидарные системы (Light Detection and Ranging) используют лазерное излучение для создания трехмерных моделей местности и объектов. Лидары обеспечивают высокую точность измерения расстояний (до нескольких сантиметров) и могут работать в условиях ограниченной видимости. Основными применениями лидаров являются топографическая съемка, мониторинг лесных ресурсов, археологические исследования.

Мультиспектральные и гиперспектральные камеры регистрируют излучение в различных спектральных диапазонах, что позволяет получать информацию о свойствах объектов, невидимых в обычном свете. Эти системы широко применяются в сельском хозяйстве для оценки состояния растительности, в геологии для поиска полезных ископаемых, в экологии для мониторинга загрязнений.

Радиолокационные системы (РЛС) обеспечивают получение изображений земной поверхности в радиодиапазоне. Преимуществами РЛС являются возможность работы в любых метеорологических условиях и в темное время суток, способность "просвечивать" растительный покров и получать информацию о подстилающей поверхности.

Системы экологического мониторинга включают датчики для измерения концентрации различных газов, радиационного фона, уровня шума, качества воды. Такие системы позволяют проводить экспресс-анализ экологической обстановки в труднодоступных или опасных районах.

Транспортные системы предназначены для доставки грузов с помощью БАС. Они включают контейнеры различных типов, системы сброса грузов, механизмы захвата и транспортировки объектов. Грузовые БАС находят применение в логистике, доставке медикаментов в отдаленные районы, снабжении научных экспедиций.

### **Лекция 3.3 Наземные станции управления и вспомогательное оборудование**

#### **3.3.1 Конструкция и компоненты наземной станции управления**

Наземная станция управления (НСУ) представляет собой комплекс оборудования, обеспечивающий управление БАС, мониторинг параметров полета, планирование полетных заданий и обработку получаемых данных. НСУ является критически важным элементом БАС, от надежности и функциональности которого зависит безопасность и эффективность полетов.

Пульт управления (передатчик) служит для передачи команд управления от оператора к БАС. Современные передатчики используют цифровые протоколы связи, обеспечивающие высокую помехоустойчивость и возможность передачи большого количества каналов управления. Типичный передатчик имеет от 6 до 16 каналов управления, что позволяет управлять не только основными функциями БАС, но и дополнительным оборудованием.

Основными органами управления являются стики (джойстики) для управления движением БАС, переключатели для изменения режимов полета, потенциометры для регулировки различных параметров. Эргономика пульта управления критически важна, поскольку оператор должен быстро и точно выполнять команды управления в любых условиях.

Приемное оборудование НСУ включает приемники телеметрии и видеосигнала. Приемник телеметрии получает информацию о состоянии БАС и отображает ее на экране или передает в компьютер для анализа. Видеоприемник обеспечивает получение изображения с камеры БАС в режиме реального времени.

#### **3.3.2 Программное обеспечение наземных станций**

Программное обеспечение НСУ выполняет множество функций - от планирования полетных заданий до анализа полученных данных. Современные программные комплексы представляют собой интегрированные системы, объединяющие все аспекты эксплуатации БАС.

Программы планирования полетов позволяют создавать маршруты полета с учетом характеристик БАС, требований полетного задания и ограничений воздушного пространства. Они включают функции построения сетки маршрутов для площадной съемки, расчета параметров перекрытия снимков, оптимизации траектории полета по времени и энергопотреблению.

Системы мониторинга полета отображают текущие параметры БАС - координаты, высоту, скорость, заряд батареи, состояние систем. Они обеспечивают визуализацию траектории полета на картографической основе, предупреждают оператора о критических ситуациях, ведут журнал полета.

Программы обработки данных выполняют первичную обработку полученной информации - геопривязку изображений, создание ортофотопланов, построение трехмерных моделей, анализ мультиспектральных данных. Интеграция функций обработки в НСУ позволяет получать готовые результаты непосредственно после выполнения полета.

### **3.3.3 Вспомогательное оборудование и принадлежности**

Транспортировочные кейсы обеспечивают защиту БАС и оборудования при транспортировке и хранении. Они должны обеспечивать защиту от механических воздействий, влаги, пыли, экстремальных температур. Современные кейсы изготавливаются из ударопрочных материалов и имеют специальные вкладыши, точно повторяющие форму защищаемого оборудования.

Зарядные устройства и блоки питания обеспечивают зарядку аккумуляторов БАС и питание наземного оборудования. Профессиональные зарядные устройства позволяют заряжать несколько батарей одновременно, контролировать процесс зарядки, выполнять балансировку элементов. Для полевых условий используются зарядные устройства, работающие от автомобильных аккумуляторов или портативных генераторов.

Запасные части и расходные материалы включают винты, моторы, элементы рамы, кабели, разъемы. Наличие запасных частей критически важно для обеспечения непрерывности работ, особенно при эксплуатации в отдаленных районах. Комплект запасных частей должен включать наиболее часто выходящие из строя или повреждающиеся элементы.

Инструменты для технического обслуживания включают отвертки, ключи, паяльное оборудование, измерительные приборы. Качественный инструмент обеспечивает надежность и безопасность технического обслуживания, предотвращает повреждение компонентов при разборке и сборке.

## **Лекция 3.4 Эксплуатационные ограничения и характеристики**

### **3.4.1 Летно-технические характеристики БАС**

Летно-технические характеристики определяют возможности БАС по выполнению различных полетных заданий и являются основой для планирования полетов и оценки применимости конкретного типа БАС для решения поставленных задач.

Максимальная взлетная масса (MTOW - Maximum Take-Off Weight) определяет общую массу БАС, включая собственную массу, полезную нагрузку, топливо (для БАС с ДВС) или батареи. Превышение максимальной взлетной массы приводит к ухудшению летных характеристик, увеличению энергопотребления и может создать угрозу безопасности полета.

Полезная нагрузка представляет собой максимальную массу оборудования, которое может нести БАС при сохранении приемлемых летных характеристик. Полезная нагрузка зависит от собственной массы БАС, емкости батарей, требуемого времени полета. Увеличение полезной нагрузки приводит к сокращению времени полета и наоборот.

Максимальная скорость полета ограничивается мощностью силовой установки, аэродинамическими характеристиками, прочностью конструкции. Для большинства мультироторных БАС максимальная скорость составляет 15-25 м/с. При полетах на максимальной скорости значительно возрастает энергопотребление, что сокращает время полета.

Практическая дальность полета определяется емкостью батарей, энергопотреблением, метеорологическими условиями. Она существенно зависит от режима полета - при зависании энергопотребление максимально, при полете с оптимальной скоростью - минимально. Встречный ветер значительно сокращает дальность полета.

### **3.4.2 Высотно-скоростные ограничения**

Максимальная высота полета БАС ограничивается несколькими факторами. Аэродинамические ограничения связаны с уменьшением плотности воздуха с высотой, что приводит к снижению эффективности винтов. Для

компенсации уменьшения тяги требуется увеличение оборотов двигателей, что приводит к росту энергопотребления.

Нормативные ограничения устанавливают максимальную высоту полета БАС в 150 метров в неконтролируемом воздушном пространстве. Полеты на больших высотах требуют получения специальных разрешений и соблюдения дополнительных требований безопасности.

Технические ограничения связаны с работой систем БАС на больших высотах. Барометрические высотомеры теряют точность при изменении погодных условий. GPS-приемники могут испытывать затруднения в работе из-за многолучевого распространения сигналов. Батареи имеют пониженную эффективность при низких температурах, характерных для больших высот.

Скоростные ограничения определяются аэродинамическими характеристиками винтов, мощностью двигателей, прочностью конструкции. При превышении максимальной скорости возможны аэродинамические явления, приводящие к потере управляемости - срыв потока с лопастей винтов, возникновение вибраций, флаттер элементов конструкции.

### **3.4.3 Климатические и эксплуатационные ограничения**

Температурные ограничения связаны с рабочими диапазонами электронных компонентов и батарей. Большинство гражданских БАС предназначены для эксплуатации в диапазоне температур от -10°C до +40°C. При низких температурах снижается емкость батарей, возможно обмерзание элементов конструкции. При высоких температурах возрастает риск перегрева электроники, снижается плотность воздуха.

Ограничения по влажности связаны с защитой электронных компонентов от воздействия влаги. Большинство БАС не имеют полной герметизации и не предназначены для полетов в условиях осадков. Попадание влаги в электронные компоненты может привести к их отказу и аварии БАС.

Ветровые ограничения определяются способностью БАС противостоять воздействию ветра и поддерживать заданную траекторию полета. Максимальная скорость ветра, при которой возможен безопасный полет, обычно составляет 10-15 м/с для большинства БАС. При сильном ветре возрастает энергопотребление, ухудшается точность позиционирования, усложняется управление.

Ограничения по электромагнитной совместимости связаны с возможностью помех радиоэлектронным системам БАС от внешних источников. Мощные радиопередатчики, радиолокационные станции, линии электропередач могут создавать помехи системам связи и навигации БАС. В районах с высоким

уровнем электромагнитных помех может потребоваться использование специальных мер защиты или ограничение полетов.

## **ПРАКТИКА ПО ТЕМЕ 3**

### **Практическое занятие 3.1**

#### **Изучение конструкции мультироторных БАС**

**Цель:** Изучить основные конструктивные элементы БАС, их назначение и взаимосвязь.

#### **Теоретическая часть:**

Обзор основных компонентов мультироторной БАС, их функций и принципов взаимодействия. Рассмотрение различных конструктивных схем и их особенностей.

#### **Практическая работа (2,5 часа):**

##### **Модуль 1: Разборка и сборка БАС (1,5 часа)**

- Изучение инструкции по эксплуатации конкретной модели БАС
- Последовательная разборка БАС с изучением каждого компонента
- Идентификация основных узлов: рама, моторы, винты, полетный контроллер, батарея
- Изучение способов крепления и соединения компонентов
- Сборка БАС в обратной последовательности с контролем правильности установки

##### **Модуль 2: Изучение электронных компонентов (1 час)**

- Детальное изучение полетного контроллера и его разъемов
- Изучение схемы подключения периферийных устройств
- Анализ системы распределения питания
- Изучение датчиков IMU, GPS, барометра
- Проверка правильности подключения всех компонентов

Каждый студент работает с отдельным комплектом БАС, выполняя все операции самостоятельно под наблюдением преподавателя. По результатам работы составляется отчет с описанием изученных компонентов и их функций.

### **Практическое занятие 3.2**

#### **Проверка технического состояния БАС (2 часа)**

**Цель:** Освоить методики проверки технического состояния БАС и выявления неисправностей.

#### **Теоретическая часть (30 минут):**

Методология технического контроля БАС. Типичные неисправности и методы их выявления. Критерии оценки технического состояния различных компонентов.

#### **Практическая работа (1,5 часа):**

### **Визуальный контроль (30 минут):**

- Проверка целостности рамы и отсутствия трещин
- Контроль состояния винтов (отсутствие сколов, трещин, деформаций)
- Проверка крепления моторов и отсутствия люфтов
- Контроль состояния проводки и разъемов
- Проверка чистоты и отсутствия загрязнений на компонентах

### **Функциональный контроль (45 минут):**

- Проверка работоспособности моторов (плавность вращения, отсутствие вибраций)
- Тестирование системы управления и калибровка датчиков
- Проверка работы GPS-приемника и качества приема сигнала
- Контроль функционирования системы связи
- Тестирование полезной нагрузки (камеры, гимбала)

### **Измерительный контроль (15 минут):**

- Измерение напряжения и емкости батарей
- Контроль потребления тока различными компонентами
- Проверка балансировки винтов
- Измерение центровки БАС

По результатам проверки составляется заключение о техническом состоянии БАС с указанием выявленных недостатков и рекомендаций по их устранению.

## **Практическое занятие 3.3**

### **Монтаж и демонтаж основных узлов (2 часа)**

**Цель:** Отработать навыки монтажа и демонтажа основных узлов БАС при техническом обслуживании и ремонте.

### **Теоретическая часть (20 минут):**

Правила и последовательность выполнения монтажно-демонтажных работ. Инструменты и приспособления. Меры безопасности при работе с электронными компонентами.

### **Практическая работа (1 час 40 минут):**

#### **Замена винтов (20 минут):**

- Правильное снятие поврежденных винтов
- Проверка состояния крепежных элементов
- Установка новых винтов с правильным моментом затяжки
- Проверка балансировки после замены

**Замена моторов (30 минут):**

- Отключение электрических соединений
- Демонтаж мотора с рамы
- Установка нового мотора
- Подключение проводки с соблюдением полярности
- Проверка крепления и отсутствия люфтов

**Замена полетного контроллера (25 минут):**

- Документирование схемы подключений
- Аккуратное отключение всех разъемов
- Демонтаж старого контроллера
- Установка и подключение нового контроллера
- Проверка правильности всех соединений

**Замена батареи и системы питания (25 минут):**

- Безопасное отключение батареи
- Демонтаж батарейного отсека
- Проверка контактов и проводки
- Установка новой батареи
- Проверка надежности крепления и контактов

Все работы выполняются с использованием соответствующих инструментов и с соблюдением требований безопасности. Особое внимание уделяется правильности подключения электрических соединений и надежности механических креплений.

**Практическое занятие 3.4****Установка и настройка полезной нагрузки (3 часа)**

**Цель:** Освоить процедуры установки различных типов полезной нагрузки и их интеграции с системами БАС.

**Теоретическая часть (30 минут):**

Типы полезной нагрузки и требования к их установке. Влияние полезной нагрузки на центровку и летные характеристики БАС. Методы крепления и стабилизации полезной нагрузки.

**Практическая работа (2,5 часа):****Модуль 1: Установка фотокамеры на гимбал (1 час):**

- Изучение конструкции гимбала и принципов его работы
- Правильная установка камеры с обеспечением балансировки
- Подключение управляющих и питающих кабелей
- Калибровка гимбала и проверка диапазонов поворота

- Настройка параметров стабилизации

**Модуль 2: Настройка видеосистемы (45 минут):**

- Подключение видеопередатчика к камере
- Настройка частоты и мощности передатчика
- Проверка качества видеосигнала на приемнике
- Настройка параметров изображения (яркость, контраст, насыщенность)
- Тестирование дальности передачи видеосигнала

**Модуль 3: Установка специализированного оборудования (45 минут):**

Работа с различными типами полезной нагрузки:

- Термовизионная камера
- Мультиспектральная камера
- Лидарный датчик
- Система сброса грузов

Для каждого типа оборудования выполняется:

- Механическая установка и крепление
- Электрическое подключение
- Настройка параметров работы
- Проверка функционирования
- Интеграция с системой управления БАС

**Модуль 4: Проверка влияния на центровку (20 минут):**

- Определение центра тяжести БАС с установленной полезной нагрузкой
- Оценка влияния на устойчивость и управляемость
- При необходимости - перемещение батареи для компенсации смещения центровки
- Проверка соответствия массы ограничениям БАС

По результатам работы каждый студент должен успешно установить и настроить полезную нагрузку, продемонстрировать ее работоспособность и подготовить БАС к выполнению полетного задания.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ 3

1. Назовите основные компоненты мультироторной БАС и объясните их функции.
2. В чем преимущества бесколлекторных электродвигателей для БАС?
3. Какие датчики входят в состав инерциального измерительного блока?
4. Объясните принцип работы системы GPS/GNSS в БАС.
5. Какие типы аккумуляторов используются в БАС и каковы их характеристики?
6. Что такое гимбал и для чего он необходим?
7. Какие факторы ограничивают максимальную высоту полета БАС?
8. Как влияет температура окружающей среды на работу БАС?
9. Какие типы полезной нагрузки наиболее распространены в БАС?
10. Что необходимо учитывать при установке полезной нагрузки на БАС?

## ЛИТЕРАТУРА

### Основные источники:

1. *Ковалёв М.А., Овакимян Д.Н.* Беспилотные летательные аппараты вертикального взлета: сборка, настройка и программирование: учебное пособие. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 96 с.
2. *Булат П.В., Дудников С.Ю., Кузнецов П.Н.* Основы аэродинамики беспилотных воздушных судов: Учебное пособие. – М.: Издательство «Спутник +», 2021. – 273 с.
3. *Чернопятов А.М.* Беспилотные авиационные системы: учебник. – Москва: Директ-Медиа, 2024. – 188 с.
4. *Гостев А.В., Богомолов Д.В., Чичерин А.С.* Технологические процессы технического обслуживания беспилотных ВС: учебно-методическое пособие. – М.: ИД Академии Жуковского, 2023. – 16 с.
5. Техническая документация производителей БАС (DJI, Autel, Parrot и др.) - официальные сайты компаний
6. Портал "Беспилотная авиация" - <https://www.uavrussia.ru/>

## **ТЕМА 4. ПЛАНИРОВАНИЕ ПОЛЕТОВ И ПОДГОТОВКА ПОЛЕТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ**

### **Лекция 4.1 Основы планирования полетов БАС**

#### **4.4.1 Принципы планирования полетных заданий**

Планирование полетов беспилотных авиационных систем представляет собой комплексный процесс, включающий анализ поставленной задачи, оценку условий выполнения полета, выбор оптимальных параметров полета и подготовку необходимой документации. Качественное планирование является основой безопасного и эффективного выполнения полетных заданий.

Процесс планирования начинается с анализа технического задания, которое определяет цели полета, требования к качеству получаемых данных, временные ограничения и особые условия выполнения работ. Техническое задание должно содержать четкие критерии успешного выполнения работы, что позволяет оператору правильно выбрать параметры полета и необходимое оборудование.

Выбор типа БАС и полезной нагрузки осуществляется на основе анализа требований технического задания. Необходимо учитывать массогабаритные характеристики требуемого оборудования, энергопотребление, климатические условия эксплуатации, требования к точности позиционирования и качеству получаемых данных.

Анализ района полетов включает изучение топографических особенностей местности, наличия препятствий, ограничений воздушного пространства, метеорологических условий. Особое внимание уделяется выявлению потенциальных опасностей - линий электропередач, высотных сооружений, зон с интенсивным движением пилотируемой авиации.

Определение оптимальных параметров полета требует учета множества факторов: высота полета должна обеспечивать требуемое разрешение съемки при соблюдении ограничений воздушного пространства; скорость полета должна обеспечивать качество съемки при оптимальном расходе энергии; маршрут полета должен обеспечивать полное покрытие исследуемой территории с минимальными затратами времени.

#### **4.4.2 Факторы, влияющие на планирование полетов**

Метеорологические условия оказывают критическое влияние на возможность и безопасность выполнения полетов БАС. Ветер влияет на устойчивость БАС, точность позиционирования, расход энергии и время полета. Встречный ветер увеличивает время полета по маршруту и энергопотребление,

попутный ветер может привести к превышению максимальной скорости относительно земли, боковой ветер усложняет поддержание заданной траектории.

Видимость определяет возможность поддержания визуального контакта с БАС, что является обязательным требованием для большинства типов полетов. В условиях ограниченной видимости возрастает риск столкновения с препятствиями, ухудшается качество получаемых изображений, усложняется навигация по визуальным ориентирам.

Облачность ограничивает максимальную высоту полета и может влиять на качество GPS-навигации. Полеты в облаках недопустимы из-за потери визуального контакта, возможности обледенения и турбулентности. Низкая облачность может потребовать снижения высоты полета, что приведет к увеличению количества маршрутов и времени съемки.

Характеристики местности влияют на выбор высоты полета, траектории маршрутов, расположение точек взлета и посадки. Пересеченная местность требует изменения высоты полета для поддержания постоянного расстояния до поверхности. Наличие препятствий может потребовать корректировки маршрута или увеличения высоты полета.

Ограничения воздушного пространства определяют районы, где полеты запрещены или ограничены. Наличие запретных зон может существенно изменить планируемый маршрут или сделать выполнение задания невозможным. Зоны ограничения полетов могут требовать получения специальных разрешений или соблюдения дополнительных условий.

#### **4.4.3 Оптимизация параметров полета**

Выбор высоты полета является компромиссом между несколькими факторами. Увеличение высоты полета расширяет зону обзора камеры, что позволяет сократить количество маршрутов и время съемки, но при этом снижается разрешение получаемых изображений. Уменьшение высоты обеспечивает высокое разрешение, но требует большего количества маршрутов и увеличивает риск столкновения с препятствиями.

Расчет разрешения изображения на местности (GSD - Ground Sample Distance) выполняется по формуле:  $GSD = (H \times p) / f$ , где  $H$  - высота полета,  $p$  - размер пикселя матрицы камеры,  $f$  - фокусное расстояние объектива. Требуемое разрешение определяется техническим заданием и влияет на выбор высоты полета и характеристик камеры.

Планирование перекрытий снимков обеспечивает возможность создания ортофотопланов и трехмерных моделей. Продольное перекрытие (вдоль маршрута) обычно составляет 70-80%, поперечное перекрытие (между маршрутами) - 60-70%. Увеличение перекрытий повышает качество обработки данных, но увеличивает количество снимков и время полета.

Оптимизация скорости полета направлена на обеспечение качества съемки при минимальном расходе энергии. Слишком высокая скорость может привести к смазыванию изображений, особенно при съемке с коротким фокусным расстоянием. Слишком низкая скорость увеличивает время полета и расход энергии. Оптимальная скорость обычно составляет 5-15 м/с в зависимости от типа съемки и характеристик оборудования.

## **Лекция 4.2 Картографические материалы и системы координат**

### **4.2.1 Типы картографических материалов для планирования полетов**

Топографические карты являются основным источником информации о рельефе местности, гидрографии, растительности, населенных пунктах, дорожной сети и других объектах. Для планирования полетов БАС наиболее важна информация о высотах местности, что позволяет правильно выбрать высоту полета и выявить препятствия на маршруте.

Масштаб топографических карт определяет детальность представленной информации. Для планирования полетов БАС наиболее подходят карты масштаба 1:25000 и 1:50000, которые содержат достаточную детализацию для выявления препятствий и особенностей местности. Карты более мелкого масштаба могут использоваться для общего анализа района работ.

Аэронавигационные карты содержат специализированную информацию для авиации - границы воздушного пространства различных классов, расположение аэродромов, радионавигационных средств, препятствий для полетов. Эти карты критически важны для планирования полетов в районах с интенсивным воздушным движением.

Спутниковые снимки и ортофотопланы обеспечивают актуальную визуальную информацию о местности. Они позволяют выявить изменения, произошедшие после создания топографических карт, оценить состояние растительности, наличие временных сооружений и препятствий.

Цифровые модели местности (ЦММ) представляют рельеф в виде массива высотных отметок с регулярным шагом. ЦММ используются для автоматического планирования полетов с огибанием рельефа, расчета зон видимости, моделирования распространения радиосигналов.

### **4.2.2 Системы координат и проекции**

Система координат определяет способ задания положения точек на земной поверхности. В России основной системой координат является СК-42 (система координат 1942 года), основанная на эллипсоиде Красовского. Для современных GPS-измерений используется система WGS-84, которая имеет небольшие отличия от СК-42.

Географические координаты (широта и долгота) представляют наиболее универсальный способ задания координат точек на земной поверхности. Широта измеряется в градусах от экватора к полюсам (от  $0^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ ), долгота - в градусах от нулевого меридиана (от  $0^{\circ}$  до  $180^{\circ}$  в восточном и западном направлениях).

Прямоугольные координаты используются для точных измерений на ограниченных территориях. В России применяется система координат Гаусса-Крюгера, которая разделяет территорию на зоны шириной  $6^{\circ}$  по долготе. В каждой зоне используется своя проекция, обеспечивающая минимальные искажения расстояний и площадей.

UTM (Universal Transverse Mercator) - международная система координат, широко используемая в GPS-навигации и картографии. Система UTM также основана на зональном принципе, но использует зоны шириной  $6^{\circ}$  и специальную формулу для расчета координат.

Местные системы координат могут использоваться для работ на ограниченных территориях. Они обеспечивают максимальную точность измерений в конкретном районе, но требуют пересчета координат при работе с картографическими материалами в других системах.

### **4.2.3 Работа с электронными картами и ГИС**

Географические информационные системы (ГИС) представляют собой программные комплексы для работы с пространственными данными. ГИС позволяют совмещать различные типы картографической информации, выполнять пространственный анализ, создавать тематические карты.

Векторные данные представляют географические объекты в виде точек, линий и полигонов с привязанными атрибутивными данными. Векторные карты обеспечивают высокую точность представления объектов и возможность выполнения точных измерений. Основными форматами векторных данных являются Shapefile, KML, GeoJSON.

Растровые данные представляют изображения земной поверхности в виде регулярной сетки пикселей. К растровым данным относятся спутниковые

снимки, отсканированные карты, цифровые модели рельефа. Растровые данные обеспечивают наглядное представление местности, но имеют ограничения по точности измерений.

Интеграция данных различных типов позволяет создавать комплексные картографические продукты для планирования полетов. Например, совмещение векторной карты дорог со спутниковым снимком обеспечивает точную навигацию и актуальную визуальную информацию о местности.

Геопривязка данных обеспечивает соответствие между координатами на карте и реальными координатами на местности. Все картографические материалы, используемые для планирования полетов, должны быть правильно геопривязаны в единой системе координат.

## **Лекция 4.3 Программное обеспечение для планирования полетов**

### **4.3.1 Типы программного обеспечения для планирования**

Специализированное программное обеспечение для планирования полетов БАС можно разделить на несколько категорий в зависимости от функциональности и области применения. Универсальные программы обеспечивают базовые функции планирования для различных типов БАС и полетных задач. Специализированные программы оптимизированы для конкретных задач или типов БАС.

Программы планирования полетов обеспечивают создание маршрутов полета, расчет параметров съемки, оптимизацию траекторий. Они включают функции построения сетки маршрутов для площадной съемки, планирования полетов по сложным траекториям, расчета времени полета и энергопотребления.

Наземные станции управления объединяют функции планирования, мониторинга полета и первичной обработки данных. Они обеспечивают полный цикл работы с БАС от планирования полета до получения готовых результатов. Наземные станции обычно поставляются производителями БАС и оптимизированы для конкретных моделей.

Мобильные приложения обеспечивают планирование и управление полетами с использованием планшетов и смартфонов. Они удобны для полевых условий, но могут иметь ограниченную функциональность по сравнению с настольными программами.

Облачные сервисы предоставляют возможности планирования полетов и обработки данных через интернет. Они обеспечивают доступ к актуальным картографическим данным, возможности совместной работы, автоматическую обработку больших объемов данных.

### **4.3.2 Основные функции программ планирования**

Построение маршрутов полета является основной функцией программ планирования. Для площадной съемки программы автоматически строят сетку параллельных маршрутов с заданным перекрытием. Параметры сетки рассчитываются на основе характеристик камеры, требуемого разрешения и высоты полета.

Расчет параметров съемки включает определение количества снимков, интервалов съемки, общего времени полета. Программы учитывают характеристики камеры, скорость полета, требуемые перекрытия снимков. Результаты расчета позволяют оценить объем получаемых данных и требования к накопителям информации.

Оптимизация маршрутов направлена на минимизацию времени полета и энергопотребления. Программы анализируют различные варианты последовательности прохождения маршрутов, учитывают направление ветра, рельеф местности, ограничения воздушного пространства.

Моделирование полета позволяет предварительно оценить выполнимость полетного задания. Программы рассчитывают энергопотребление на каждом этапе полета, учитывают влияние ветра и рельефа местности, определяют критические участки маршрута.

Интеграция с картографическими данными обеспечивает визуализацию планируемого маршрута на фоне карт и спутниковых снимков. Это позволяет оператору оценить особенности местности, выявить препятствия, выбрать оптимальные точки взлета и посадки.

### **4.3.3 Работа с программным обеспечением планирования**

Подготовка исходных данных включает загрузку картографических материалов, задание границ съемочного участка, ввод характеристик БАС и камеры. Качество исходных данных критически влияет на точность планирования и успешность выполнения полетного задания.

Настройка параметров полета требует понимания взаимосвязи между различными параметрами. Изменение высоты полета влияет на разрешение снимков, количество маршрутов, время полета. Изменение скорости полета влияет на качество съемки, энергопотребление, влияние ветра.

Проверка и валидация плана полета включает анализ соответствия плана техническому заданию, проверку соблюдения ограничений БАС, оценку

влияния внешних факторов. Программы могут автоматически выявлять потенциальные проблемы и предлагать варианты их решения.

Экспорт полетного задания в формат, понятный автопилоту БАС, является завершающим этапом планирования. Различные типы БАС используют разные форматы полетных заданий, поэтому программа планирования должна поддерживать соответствующие форматы.

Документирование плана полета включает создание отчетов с описанием параметров полета, карт маршрутов, расчетных данных. Эта документация необходима для получения разрешений на полеты, контроля выполнения задания, анализа результатов.

## **Лекция 4.4 Полетная документация и ее ведение**

### **4.4.1 Виды полетной документации**

Полетная документация представляет собой комплекс документов, обеспечивающих планирование, выполнение и контроль полетов БАС. Правильное ведение документации является обязательным требованием для легальной эксплуатации БАС и обеспечения безопасности полетов.

План полета содержит основную информацию о предстоящем полете - маршрут, высоты, время выполнения, особые условия. План полета является основным документом для получения разрешения на использование воздушного пространства и должен содержать всю информацию, необходимую органам ОрВД.

Полетное задание детализирует техническую сторону выполнения полета - параметры съемки, характеристики оборудования, требования к качеству данных. Полетное задание является основой для настройки БАС и контроля выполнения работ.

Полетный журнал фиксирует фактические параметры выполненных полетов. В журнале отражаются время взлета и посадки, фактический маршрут полета, метеорологические условия, особые случаи, техническое состояние БАС. Полетный журнал является юридическим документом и должен вестись с соблюдением установленных требований.

Техническая документация включает сведения о техническом состоянии БАС, выполненном техническом обслуживании, замене компонентов, выявленных неисправностях. Ведение технической документации обеспечивает контроль технического состояния БАС и планирование технического обслуживания.

#### **4.4.2 Требования к ведению документации**

Полнота документации означает, что все полеты БАС должны быть задокументированы независимо от их продолжительности и целей. Отсутствие документации по отдельным полетам может рассматриваться как нарушение правил эксплуатации.

Достоверность информации требует точного отражения фактических параметров полетов. Искажение данных в документации недопустимо и может повлечь серьезные правовые последствия при расследовании инцидентов.

Своевременность ведения документации означает, что записи должны производиться непосредственно после выполнения полетов. Ретроспективное заполнение документации снижает ее достоверность и может привести к ошибкам.

Сохранность документации обеспечивается созданием резервных копий, использованием надежных носителей информации, соблюдением правил архивирования. Утрата полетной документации может создать проблемы при проверках контролирующих органов.

Конфиденциальность информации требует ограничения доступа к полетной документации только для уполномоченных лиц. Некоторые виды полетных данных могут содержать конфиденциальную информацию о заказчиках или объектах съемки.

## **ПРАКТИКА ПО ТЕМЕ 4**

### **Практическое занятие 4.1**

#### **Составление плана полета (3 часа)**

**Цель:** Освоить методику составления планов полета для различных типов заданий с учетом технических характеристик БАС и внешних условий.

#### **Теоретическая часть (30 минут):**

Структура плана полета и требования к его содержанию. Взаимосвязь между параметрами полета и их влияние на выполнение задания. Методы оптимизации планов полета.

#### **Практическая работа (2,5 часа):**

##### **Задание 1: Планирование аэрофотосъемки (1 час):**

Исходные данные:

- Участок съемки: прямоугольный участок  $2 \times 1$  км
- Требуемое разрешение: 5 см/пиксель
- БАС: квадрокоптер с камерой 20 Мп,  $f=24$ мм
- Ограничения: высота полета до 120 м, время полета до 25 минут

Задачи студентов:

- Рассчитать оптимальную высоту полета
- Определить количество и направление маршрутов
- Рассчитать перекрытия снимков
- Оценить общее время полета
- Определить количество батарей

##### **Задание 2: Планирование мониторинга линейного объекта (45 минут):**

Исходные данные:

- Объект: линия электропередач длиной 15 км
- Требования: детальная съемка опор и проводов
- Ограничения: минимальное расстояние от ЛЭП 30 м
- Особенности: пересеченная местность, перепад высот 200 м

Задачи студентов:

- Выбрать траекторию полета с учетом безопасности
- Рассчитать изменения высоты полета по маршруту
- Определить критические участки маршрута
- Спланировать промежуточные посадки для замены батарей

##### **Задание 3: Планирование поискового полета (45 минут):**

Исходные данные:

- Задача: поиск пропавшего человека в лесном массиве
- Район поиска: 5 км<sup>2</sup>

- Требования: максимальное покрытие территории за минимальное время
- Условия: ограниченная видимость, время до наступления темноты 2 часа

Задачи студентов:

- Определить приоритетные зоны поиска
- Выбрать оптимальную высоту полета для обзора
- Спланировать маршрут с учетом времени
- Предусмотреть координацию с наземными службами

Каждое задание выполняется индивидуально с последующим обсуждением результатов и сравнением различных подходов к планированию.

## **Практическое занятие 4.2**

### **Подготовка полетной документации (3 часа)**

**Цель:** Научиться правильно оформлять полетную документацию в соответствии с установленными требованиями.

#### **Теоретическая часть (30 минут):**

Обзор требований к полетной документации. Форматы документов и правила их заполнения. Особенности ведения электронной документации.

#### **Практическая работа (2,5 часа):**

##### **Модуль 1: Оформление плана полета (1 час):**

Студенты получают бланки планов полета и должны заполнить их на основе подготовленных ранее полетных заданий. Проверяется:

- Правильность указания координат и высот
- Соответствие временных параметров
- Полнота информации о БАС и экипаже
- Соблюдение формата документа

##### **Модуль 2: Ведение полетного журнала (45 минут):**

Моделирование реального полета с заполнением полетного журнала:

- Предполетная подготовка и проверки
- Фиксация времени взлета и посадки
- Отражение изменений в ходе полета
- Документирование особых случаев
- Послеполетные записи

##### **Модуль 3: Подготовка отчетной документации (45 минут):**

Составление отчета о выполненных полетах:

- Сводная информация о полетах за период

- Анализ выполнения плановых заданий
- Статистика налета и технического состояния
- Выявленные проблемы и предложения по их решению

**Модуль 4: Работа с электронными системами документооборота (20 минут):**

Знакомство с электронными системами ведения полетной документации:

- Особенности электронного документооборота
- Требования к электронной подписи
- Резервное копирование и архивирование
- Интеграция с системами планирования полетов

**Практическое занятие 4.3**

**Работа со специализированным программным обеспечением**

**Цель:** Освоить работу с профессиональным программным обеспечением для планирования полетов БАС.

**Теоретическая часть (30 минут):**

Обзор популярного ПО для планирования полетов: Mission Planner, UgCS, Pix4Dcapture, DJI Ground Station Pro. Критерии выбора программного обеспечения для различных задач.

**Практическая работа (2,5 часа):**

**Модуль 1: Mission Planner (1 час):**

Изучение интерфейса и основных функций:

- Подключение и настройка БАС
- Загрузка картографических данных
- Создание простого маршрута полета
- Настройка параметров автопилота
- Мониторинг полета в реальном времени

Практическое задание: создать маршрут полета для съемки заданного участка с автоматическим расчетом точек съемки.

**Модуль 2: UgCS (Universal Ground Control Software) (45 минут):**

Работа с профессиональной системой планирования:

- Импорт 3D-модели местности
- Планирование полета с облетом препятствий
- Расчет зон покрытия камерой
- Оптимизация маршрута по времени
- Экспорт полетного задания

Практическое задание: спланировать полет для съемки сложного рельефа с постоянным расстоянием до поверхности.

**Модуль 3: Специализированные мобильные приложения (45 минут):**

Работа с мобильными приложениями для планирования:

- Pix4Dcapture для фотограмметрической съемки
- DJI GO/DJI Fly для потребительских дронов
- Litchi для автономных полетов
- Практические задания:
  - Создание полетного задания на мобильном устройстве
  - Синхронизация с облачными сервисами
  - Выполнение автономного полета по заданному маршруту

Студенты работают в группах по 2-3 человека, каждая группа изучает одну программу и затем представляет результаты остальным.

**Практическое занятие 4.4**

**Подготовка картографического материала (2 часа)**

**Цель:** Научиться работать с различными типами картографических материалов и подготавливать их для планирования полетов.

**Теоретическая часть (20 минут):**

Источники картографических данных. Форматы картографических файлов. Требования к точности и актуальности картографической информации.

**Практическая работа (1 час 40 минут):**

**Модуль 1: Работа с топографическими картами (40 минут):**

- Загрузка растровых карт различных масштабов
- Геопривязка отсканированных карт
- Векторизация важных объектов (препятствия, границы)
- Создание пользовательских слоев с дополнительной информацией

**Модуль 2: Использование спутниковых снимков (30 минут):**

- Загрузка актуальных спутниковых снимков
- Анализ изменений местности по разновременным снимкам
- Выявление новых препятствий и объектов
- Оценка сезонных изменений растительности

**Модуль 3: Работа с цифровыми моделями рельефа (30 минут):**

- Загрузка и визуализация ЦМР
- Построение профилей местности по маршруту полета
- Расчет зон видимости с точек взлета
- Анализ влияния рельефа на распространение радиосигналов

Каждый студент подготавливает комплект картографических материалов для конкретного района полетов, включающий топографическую основу, актуальные снимки и модель рельефа.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ 4

1. Какие факторы необходимо учитывать при планировании полетов БАС?
2. Как рассчитать разрешение изображения на местности (GSD)?
3. Какие типы перекрытий используются при аэрофотосъемке и зачем они нужны?
4. В чем различие между географическими и прямоугольными координатами?
5. Какие функции выполняет программное обеспечение для планирования полетов?
6. Какие виды полетной документации должен вести оператор БАС?
7. Как влияет высота полета на качество и производительность съемки?
8. Какие картографические материалы необходимы для планирования полетов?
9. Как оптимизировать маршрут полета для минимизации времени и энергопотребления?
10. Какие требования предъявляются к ведению полетной документации?

## ЛИТЕРАТУРА

### **Основные источники:**

1. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов (ГКИНП (ГНТА)-02-036-02). – М.: ЦНИИГАиК, 2002.
2. Руководство по аэрофотосъемке и фотограмметрии при инженерных изысканиях для строительства. – М.: Стройиздат, 2009.
3. Лобанов А.Н. Фотограмметрия: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1984. – 552 с.

### **Дополнительные источники:**

4. Официальная документация Mission Planner. – Режим доступа: <https://ardupilot.org/planner/>
5. UgCS User Manual. – Режим доступа: <https://www.ugcs.com/>
6. Сайт OpenStreetMap для получения картографических данных. – Режим доступа: <https://www.openstreetmap.org/>
7. Портал Росреестра для получения официальных картографических материалов. – Режим доступа: <https://rosreestr.ru/>
8. QGIS Documentation. – Режим доступа: <https://qgis.org/ru/docs/index.html>

## ТЕМА 5. ПОДГОТОВКА БАС К ПОЛЕТУ И ПРЕДПОЛЕТНЫЕ ПРОВЕРКИ

### Лекция 5.1 Предполетная подготовка и проверка систем БАС

#### 5.1.1 Общие принципы предполетной подготовки

Предполетная подготовка представляет собой комплекс мероприятий, направленных на обеспечение безопасности полета и готовности БАС к выполнению полетного задания. Качественная предполетная подготовка является критическим фактором безопасности полетов и должна выполняться перед каждым полетом независимо от его продолжительности и сложности.

Системный подход к предполетной подготовке предполагает последовательную проверку всех систем БАС в определенном порядке. Такой подход исключает пропуск важных элементов проверки и обеспечивает полноту контроля технического состояния. Последовательность проверок должна быть логичной и удобной для выполнения, исключающей необходимость многократного доступа к одним и тем же элементам конструкции.

Документирование процесса предполетной подготовки осуществляется с использованием чек-листов, которые содержат перечень всех проверяемых элементов и параметров. Чек-лист должен быть адаптирован к конкретному типу БАС и условиям эксплуатации. Использование чек-листа исключает человеческий фактор и обеспечивает стандартизацию процедур подготовки.

Временные рамки предполетной подготовки зависят от сложности БАС и условий эксплуатации. Для простых потребительских БАС предполетная подготовка может занимать 10-15 минут, для профессиональных систем - 30-60 минут. При работе в сложных условиях или после длительного хранения время подготовки может быть увеличено.

Ответственность за предполетную подготовку несет оператор БАС, который должен обладать необходимыми знаниями и навыками для выполнения всех проверок. В случае выявления неисправностей оператор должен принять решение о возможности выполнения полета или необходимости устранения неисправностей.

#### 5.1.2 Проверка механических систем

Внешний осмотр БАС начинается с общей оценки состояния конструкции. Проверяется отсутствие видимых повреждений рамы, трещин, деформаций, следов коррозии. Особое внимание уделяется местам соединения элементов

рамы, креплению моторов, установке полезной нагрузки. Любые повреждения конструкции могут привести к разрушению БАС в полете.

Проверка винтов включает контроль их состояния, правильности установки, надежности крепления. Винты должны быть чистыми, без сколов, трещин, деформаций. Проверяется соответствие типа винтов направлению вращения моторов - винты с правой и левой резьбой должны устанавливаться на соответствующие моторы. Неправильная установка винтов может привести к их самопроизвольному откручиванию в полете.

Контроль состояния моторов включает проверку их крепления к раме, отсутствие люфтов в подшипниках, чистоту и целостность обмоток. Моторы должны вращаться плавно, без заеданий и посторонних звуков. Проверяется надежность крепления проводов к моторам и отсутствие повреждений изоляции.

Проверка шасси и посадочных опор включает контроль их состояния, надежности крепления, работоспособности амортизирующих элементов. Шасси должно обеспечивать устойчивое положение БАС на земле и защиту корпуса и полезной нагрузки при посадке.

Контроль полезной нагрузки включает проверку ее крепления, состояния защитных элементов, работоспособности подвеса. Полезная нагрузка должна быть надежно закреплена и защищена от механических воздействий. Проверяется работоспособность гимбала, плавность его движения, отсутствие люфтов.

### **5.1.3 Проверка электронных систем**

Проверка системы питания начинается с контроля состояния аккумуляторных батарей. Проверяется заряд батарей, отсутствие повреждений корпуса, надежность контактов. Батареи должны быть заряжены до уровня, обеспечивающего выполнение полетного задания с необходимым запасом. Проверяется работоспособность системы контроля батарей, правильность отображения уровня заряда.

Контроль полетного контроллера включает проверку его включения, прохождения самодиагностики, отсутствия сообщений об ошибках. Полетный контроллер должен правильно определять свое положение в пространстве, получать сигналы от всех датчиков, поддерживать связь с наземной станцией управления.

Проверка системы навигации включает контроль работы GPS-приемника, качества приема сигналов спутников, точности определения координат. GPS-приемник должен принимать сигналы достаточного количества спутников для

обеспечения требуемой точности навигации. Проверяется работоспособность других навигационных систем - барометрического высотомера, компаса, ультразвуковых датчиков.

Тестирование системы связи включает проверку качества радиосвязи между БАС и наземной станцией управления на различных расстояниях. Проверяется стабильность передачи команд управления, качество приема телеметрической информации, работоспособность системы передачи видеосигнала. Дальность связи должна обеспечивать выполнение полетного задания с необходимым запасом.

Калибровка датчиков выполняется для обеспечения точности измерений и правильной работы системы стабилизации. Калибруются акселерометры, гироскопы, магнитометр, барометр. Калибровка должна выполняться в соответствии с инструкциями производителя и при необходимости повторяться.

## **Лекция 5.2 Выбор и подготовка стартово-посадочной площадки**

### **5.2.1 Требования к стартово-посадочной площадке**

Стартово-посадочная площадка является критически важным элементом обеспечения безопасности полетов БАС. Правильный выбор площадки и ее подготовка существенно влияют на безопасность взлета и посадки, а также на общую безопасность полетов.

Размеры площадки должны обеспечивать безопасное выполнение взлета и посадки с учетом возможных отклонений траектории БАС. Минимальный размер площадки определяется размерами БАС, его маневренными характеристиками, квалификацией оператора. Для большинства мультироторных БАС достаточна площадка размером  $10 \times 10$  метров, но в сложных условиях или для крупных БАС требуются большие размеры.

Поверхность площадки должна быть ровной, твердой, без препятствий и посторонних предметов. Неровности поверхности могут привести к повреждению БАС при посадке или создать препятствия для взлета. Мягкие поверхности (песок, снег, трава) могут затруднить взлет из-за попадания частиц в винты или создания дополнительного сопротивления.

Отсутствие препятствий в зоне взлета и посадки обеспечивает безопасность маневрирования БАС на малых высотах. Препятствия включают деревья, здания, линии электропередач, мачты связи, другие сооружения. Минимальное расстояние до препятствий должно составлять не менее 30 метров по горизонтали и обеспечивать свободный коридор для взлета и посадки.

Защита от ветра может потребоваться при работе в условиях сильного или порывистого ветра. Естественные или искусственные препятствия могут использоваться для создания зоны, защищенной от ветра. Однако следует учитывать, что препятствия могут создавать турбулентность, которая также опасна для БАС.

### **5.2.2 Анализ окружающей обстановки**

Оценка воздушной обстановки включает анализ возможного присутствия других воздушных судов в районе взлета и посадки. Особое внимание уделяется маршрутам пилотируемой авиации, районам базирования вертолетов, активности парапланеристов и других БАС. При обнаружении других воздушных судов необходимо обеспечить координацию действий или выбрать другое время и место для полетов.

Контроль наземной обстановки включает оценку присутствия людей, транспортных средств, животных в районе полетов. Люди должны находиться на безопасном расстоянии от БАС и быть проинформированы о выполняемых полетах. Транспортные средства не должны создавать помех полетам и должны иметь возможность быстрого удаления в случае необходимости.

Анализ электромагнитной обстановки важен для обеспечения нормальной работы систем связи и навигации БАС. Источники электромагнитных помех включают радиопередатчики, радиолокационные станции, линии электропередач, промышленное оборудование. При высоком уровне помех может потребоваться изменение частот работы систем связи или выбор другого места для полетов.

Метеорологические условия в районе площадки могут отличаться от общих условий из-за местных особенностей. Локальные ветры, создаваемые рельефом местности или застройкой, могут существенно влиять на безопасность взлета и посадки. Термические потоки, возникающие над нагретыми поверхностями, создают турбулентность и восходящие потоки.

### **5.2.3 Подготовка рабочего места оператора**

Расположение оператора должно обеспечивать хорошую видимость БАС на всех этапах полета, удобство управления, безопасность оператора и окружающих. Оператор должен находиться на безопасном расстоянии от БАС, но сохранять возможность визуального контроля. Рекомендуемое расстояние составляет 3-5 метров от точки взлета.

Организация рабочего места включает размещение наземной станции управления, запасных батарей, инструментов, документации. Все оборудование должно быть защищено от воздействия погодных условий, пыли, механических повреждений. Рабочее место должно обеспечивать удобство работы оператора в течение всего времени выполнения полетного задания.

Обеспечение связи включает проверку работоспособности средств связи с диспетчерскими службами, службами экстренного реагирования, другими участниками полетов. Должны быть подготовлены средства связи для координации с наземными службами, уведомления о начале и окончании полетов, передачи экстренной информации.

Подготовка средств безопасности включает размещение огнетушителей, аптечки первой помощи, средств ограждения опасной зоны. Должны быть подготовлены средства для быстрого отключения БАС в экстренной ситуации, эвакуации людей из опасной зоны, оказания первой помощи при необходимости.

## **Лекция 5.3 Калибровка датчиков и настройка систем**

### **5.3.1 Принципы калибровки датчиков БАС**

Калибровка датчиков является обязательной процедурой, обеспечивающей точность измерений и правильную работу системы управления полетом. Датчики БАС подвержены влиянию различных факторов - температуры, магнитных полей, вибраций, старения компонентов, что приводит к появлению систематических ошибок в их показаниях.

Периодичность калибровки зависит от типа датчика, условий эксплуатации, требований к точности. Некоторые датчики требуют калибровки перед каждым полетом, другие - периодически или при изменении условий эксплуатации. Магнитометр обычно калибруется при смене места эксплуатации или при появлении ошибок компаса, акселерометры и гироскопы - реже, при появлении проблем со стабилизацией.

Условия калибровки критически влияют на ее качество. Калибровка должна выполняться в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации. Температура, влажность, уровень вибраций должны соответствовать рабочим условиям. Калибровка в помещении может не обеспечить правильную работу датчиков на открытом воздухе.

Контроль качества калибровки включает проверку результатов калибровки, сравнение с эталонными значениями, тестирование работы датчиков в различных режимах. Неудовлетворительные результаты калибровки

могут указывать на неисправность датчиков или неправильность процедуры калибровки.

### **5.3.2 Калибровка инерциальных датчиков**

Калибровка акселерометров обеспечивает правильное измерение ускорений и определение положения БАС относительно горизонта. Процедура калибровки включает размещение БАС в различных ориентациях и измерение показаний акселерометров. Обычно используется шесть положений - БАС размещается на каждой из шести граней воображаемого куба.

Важность неподвижности БАС во время калибровки акселерометров критична для получения точных результатов. Любые движения или вибрации приведут к ошибкам калибровки. Поверхность, на которую устанавливается БАС, должна быть строго горизонтальной и устойчивой. Процедура должна выполняться в условиях отсутствия внешних вибраций.

Калибровка гироскопов направлена на компенсацию смещения нуля и определение масштабных коэффициентов. Процедура включает измерение показаний гироскопов в неподвижном состоянии для определения смещения нуля, а также при вращении с известной угловой скоростью для определения масштабного коэффициента.

Температурная компенсация инерциальных датчиков может потребоваться при эксплуатации в широком диапазоне температур. Характеристики датчиков изменяются с температурой, что приводит к ошибкам измерений. Современные полетные контроллеры могут выполнять автоматическую температурную компенсацию на основе предварительно определенных коэффициентов.

### **5.3.3 Калибровка магнитометра и навигационных систем**

Калибровка магнитометра (компаса) является одной из наиболее важных и сложных процедур. Магнитометр подвержен влиянию магнитных полей, создаваемых металлическими предметами, электрическими устройствами, геологическими особенностями местности. Калибровка должна выполняться в каждом новом районе эксплуатации.

Процедура калибровки магнитометра включает вращение БАС вокруг всех трех осей для определения влияния собственных магнитных полей и внешних помех. Современные автопилоты обычно выполняют автоматическую калибровку при медленном вращении БАС в различных плоскостях. Качество

калибровки оценивается по величине остаточных ошибок и стабильности показаний компаса.

Влияние металлических предметов на калибровку магнитометра требует особого внимания. Калибровка должна выполняться вдали от автомобилей, металлических конструкций, электронного оборудования. Расстояние до крупных металлических предметов должно составлять не менее 10 метров. После калибровки следует проверить стабильность показаний компаса при изменении ориентации БАС.

Настройка GPS-приемника включает проверку качества приема сигналов спутников, настройку параметров навигации, определение точности позиционирования. GPS-приемник должен принимать сигналы достаточного количества спутников (не менее 6-8) для обеспечения требуемой точности. Проверяется стабильность определения координат в статическом режиме.

Калибровка барометрического высотомера требует установки текущего атмосферного давления на уровне взлета. Барометрический высотомер измеряет высоту относительно уровня с заданным давлением, поэтому неправильная установка давления приведет к систематической ошибке в определении высоты. Давление должно устанавливаться на основе данных местной метеостанции или измерений портативным барометром.

## **ПРАКТИКА ПО ТЕМЕ 5**

### **Практическое занятие 5.1.**

#### **Выбор и подготовка стартово-посадочной площадки (3 часа)**

**Цель:** Научиться правильно выбирать и готовить стартово-посадочные площадки для различных условий эксплуатации БАС.

#### **Теоретическая часть (30 минут):**

Критерии выбора стартово-посадочной площадки. Анализ факторов безопасности. Особенности подготовки площадок в различных условиях - городская застройка, пересеченная местность, ограниченное пространство.

#### **Практическая работа (2,5 часа):**

##### **Модуль 1: Оценка потенциальных площадок (1 час):**

Студенты получают задание оценить несколько предлагаемых площадок для различных сценариев:

###### **Сценарий 1: Аэрофотосъемка промышленного объекта**

- Анализ территории промышленного предприятия
- Выявление препятствий (трубы, здания, ЛЭП)
- Оценка электромагнитной обстановки
- Учет требований безопасности производства

###### **Сценарий 2: Съемка в городских условиях**

- Поиск подходящих площадок в городской застройке
- Анализ воздушного движения (вертолетные площадки, аэропорты)
- Учет скопления людей и транспорта
- Соблюдение ограничений над населенными пунктами

###### **Сценарий 3: Работа в полевых условиях**

- Выбор площадки на пересеченной местности
- Анализ влияния рельефа на ветровые условия
- Оценка доступности для транспорта
- Планирование резервных площадок

##### **Модуль 2: Практическая подготовка площадки (1 час):**

На учебной площадке студенты выполняют:

- Очистку территории от посторонних предметов
- Установку ограждений и предупредительных знаков
- Размещение наземного оборудования
- Определение направлений взлета и посадки с учетом ветра
- Подготовку резервных зон для экстренной посадки

##### **Модуль 3: Организация рабочего места оператора (30 минут):**

- Выбор оптимального положения оператора

- Размещение пульта управления и мониторов
- Обеспечение защиты оборудования от погодных условий
- Подготовка средств связи и документации
- Размещение запасного оборудования и батарей

По результатам работы каждый студент готовит план организации площадки для конкретного полетного задания с обоснованием принятых решений.

## **Практическое занятие 5.2**

### **Проведение предполетных проверок (3 часа)**

**Цель:** Отработать навыки систематического выполнения предполетных проверок с использованием чек-листов.

#### **Теоретическая часть (20 минут):**

Структура предполетных проверок. Использование чек-листов. Критерии принятия решений при выявлении неисправностей.

#### **Практическая работа (2 часа 40 минут):**

##### **Модуль 1: Внешний осмотр БАС (45 минут):**

Каждый студент получает БАС и чек-лист для выполнения внешнего осмотра:

###### *Проверка рамы и конструкции:*

- Визуальный контроль целостности рамы
- Проверка надежности крепежных элементов
- Выявление трещин, деформаций, коррозии
- Контроль чистоты и отсутствия загрязнений

###### *Проверка винтов и моторов:*

- Контроль состояния винтов (сколы, трещины, балансировка)
- Проверка правильности установки и затяжки
- Контроль свободного вращения моторов
- Проверка надежности крепления моторов к раме

###### *Проверка полезной нагрузки:*

- Контроль крепления камеры и гимбала
- Проверка защитных элементов
- Тестирование подвижности гимбала
- Проверка чистоты оптики

##### **Модуль 2: Проверка электронных систем (1 час):**

###### *Проверка системы питания:*

- Контроль заряда основной и резервных батарей

- Проверка надежности контактов
- Тестирование системы мониторинга батарей
- Проверка резервных источников питания

*Проверка полетного контроллера:*

- Включение системы и прохождение самодиагностики
- Проверка отсутствия сообщений об ошибках
- Контроль работы индикации
- Тестирование реакции на команды управления

*Проверка систем связи и навигации:*

- Тестирование радиосвязи с наземной станцией
- Проверка качества GPS-приема
- Контроль работы системы передачи видео
- Проверка телеметрической связи

**Модуль 3: Функциональные проверки (55 минут):**

*Проверка системы управления:*

- Тестирование реакции на команды с пульта
- Проверка работы различных режимов полета
- Контроль системы стабилизации
- Тестирование аварийных функций

*Проверка автопилота:*

- Загрузка и проверка полетного задания
- Тестирование автоматических режимов
- Проверка системы возврата домой
- Контроль работы системы предотвращения столкновений

Студенты работают в парах, один выполняет проверки, другой контролирует по чек-листву и фиксирует результаты.

### **Практическое занятие 5.3**

**Загрузка программы полета в бортовой навигационный комплекс (2 часа)**

**Цель:** Освоить процедуры загрузки полетных заданий в различные типы автопилотов и проверки их корректности.

**Теоретическая часть (20 минут):**

Форматы полетных заданий. Особенности различных автопилотов.

Проверка корректности загруженного задания.

**Практическая работа (1 час 40 минут):**

**Модуль 1: Подготовка полетного задания (30 минут):**

- Создание простого маршрута в программе планирования

- Настройка параметров съемки и высот полета
- Добавление точек интереса и служебных команд
- Проверка маршрута на соответствие ограничениям БАС
- Экспорт задания в формат автопилота

### **Модуль 2: Загрузка задания в автопилот (40 минут):**

Работа с различными типами автопилотов:

*ArduPilot/PX4:*

- Подключение к автопилоту через Mission Planner/QGroundControl
- Загрузка waypoint-файла
- Проверка корректности координат и команд
- Верификация загруженного маршрута

*DJI системы:*

- Использование DJI Ground Station Pro
- Создание и загрузка KML-маршрута
- Настройка параметров автоматической съемки
- Проверка ограничений системы

*Proprietary системы:*

- Работа со специализированным ПО производителя
- Загрузка задания через мобильное приложение
- Синхронизация с облачными сервисами

### **Модуль 3: Проверка и тестирование (30 минут):**

- Визуальная проверка маршрута на карте
- Симуляция полета для выявления проблем
- Проверка расчетного времени полета и энергопотребления
- Тестирование критических точек маршрута
- Подготовка резервных вариантов полетного задания

Каждый студент должен успешно загрузить полетное задание в автопилот и продемонстрировать понимание всех параметров полета.

## **Практическое занятие 5.4**

### **Калибровка компаса, акселерометра и других датчиков (2 часа)**

**Цель:** Освоить процедуры калибровки основных датчиков БАС для обеспечения точности измерений.

**Теоретическая часть (15 минут):**

Принципы работы инерциальных датчиков. Источники ошибок и методы их компенсации. Периодичность калибровки различных датчиков.

**Практическая работа (1 час 45 минут):**

## **Модуль 1: Калибровка акселерометра (30 минут):**

### *Подготовка к калибровке:*

- Выбор ровной горизонтальной поверхности
- Подготовка калибровочного приспособления или разметки
- Подключение БАС к наземной станции
- Запуск процедуры калибровки в ПО

### *Выполнение калибровки:*

- Размещение БАС в шести стандартных положениях
- Контроль неподвижности БАС в каждом положении
- Ожидание завершения измерений в каждой позиции
- Проверка результатов калибровки
- Повторение при неудовлетворительных результатах

## **Модуль 2: Калибровка гироскопов (20 минут):**

- Размещение БАС на устойчивой поверхности
- Обеспечение полной неподвижности
- Запуск автоматической процедуры калибровки
- Контроль стабильности показаний
- Проверка отсутствия дрейфа показаний

## **Модуль 3: Калибровка магнитометра (45 минут):**

### *Выбор места калибровки:*

- Удаление от металлических предметов ( $>10$  м)
- Отключение электронных устройств поблизости
- Проверка отсутствия магнитных аномалий
- Подготовка достаточного пространства для вращения БАС

### *Процедура калибровки:*

- Медленное вращение БАС вокруг вертикальной оси ( $360^\circ$ )
- Поворот БАС на бок и повторное вращение
- Поворот БАС в другие положения и вращение
- Контроль качества калибровки по индикаторам ПО
- Проверка стабильности показаний компаса

## **Модуль 4: Калибровка барометра (10 минут):**

- Получение данных о текущем атмосферном давлении
- Ввод давления в настройки автопилота
- Проверка показаний высотометра на известной высоте
- Корректировка при необходимости

По завершении каждой калибровки студенты должны провести тестовые измерения и убедиться в правильности работы датчиков.

## **Практическое занятие 5.5**

### **Проверка работоспособности всех систем БАС (2 часа)**

**Цель:** Провести комплексную проверку готовности БАС к полету и отработать процедуры выявления и устранения неисправностей.

#### **Теоретическая часть (15 минут):**

Методология системного тестирования. Критерии готовности БАС к полету. Процедуры принятия решений при выявлении неисправностей.

#### **Практическая работа (1 час 45 минут):**

##### **Модуль 1: Комплексная системная проверка (45 минут):**

###### *Интегрированное тестирование систем:*

- Включение всех систем БАС в рабочем режиме
- Проверка взаимодействия между подсистемами
- Тестирование в различных режимах работы
- Контроль стабильности работы под нагрузкой
- Проверка автоматических защитных функций

###### *Тестирование в условиях, близких к полетным:*

- Имитация полетных режимов на земле
- Проверка реакции на команды управления
- Тестирование переключения между режимами
- Контроль работы телеметрических систем
- Проверка системы аварийного отключения

##### **Модуль 2: Диагностика и устранение неисправностей (45 минут):**

Преподаватель вводит различные имитированные неисправности, студенты должны их выявить и устранить:

###### *Типовые неисправности:*

- Ошибки калибровки датчиков
- Проблемы с GPS-приемом
- Нестабильность радиосвязи
- Дисбаланс винтов
- Проблемы с системой питания

###### *Процедуры диагностики:*

- Анализ сообщений об ошибках
- Использование диагностических функций ПО
- Визуальный и инструментальный контроль
- Пошаговая проверка подозрительных систем
- Документирование выявленных проблем

### **Модуль 3: Окончательная проверка готовности (15 минут):**

- Повторная проверка устраниенных неисправностей
- Финальное тестирование всех критических систем
- Заполнение чек-листа готовности к полету
- Принятие решения о готовности БАС
- Документирование результатов проверки

Каждый студент должен успешно выполнить полную предполетную подготовку БАС и получить допуск к выполнению полета.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ 5

1. Какие основные этапы включает предполетная подготовка БАС?
2. Что проверяется при внешнем осмотре БАС?
3. Какие требования предъявляются к стартово-посадочной площадке?
4. Как выполняется калибровка акселерометра?
5. Почему необходима калибровка магнитометра и как часто она выполняется?
6. Какие факторы влияют на выбор стартово-посадочной площадки?
7. Как проверить готовность системы питания БАС к полету?
8. Что включает проверка системы навигации?
9. Как загрузить полетное задание в автопилот?
10. Какие действия предпринимаются при выявлении неисправностей во время предполетной подготовки?

## ЛИТЕРАТУРА

### Основные источники:

1. Руководство по эксплуатации конкретных моделей БАС (DJI Mavic, Phantom, Autel EVO и др.) - официальные руководства производителей
2. ArduPilot Documentation. – Режим доступа: <https://ardupilot.org/>
3. PX4 User Guide. – Режим доступа: <https://docs.px4.io/>
4. Гостев А.В., Богомолов Д.В., Чичерин А.С. Технологические процессы технического обслуживания беспилотных ВС: учебно-методическое пособие. – М.: ИД Академии Жуковского, 2023.
5. Mission Planner Documentation. – Режим доступа: <https://ardupilot.org/planner/>
6. QGroundControl User Guide. – Режим доступа: <https://docs.qgroundcontrol.com/>
7. Техническая документация производителей автопилотов (Pixhawk, Cube, Navio и др.)

## ТЕМА 6. ТЕХНИКА ПИЛОТИРОВАНИЯ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС

### Лекция 6.1 Основы управления мультироторными БАС

#### 6.1.1 Принципы управления полетом

Управление мультироторными БАС основано на изменении тяги отдельных винтов для создания управляющих моментов и изменения общей подъемной силы. В отличие от самолетов, которые используют аэродинамические рули, мультироторы управляются исключительно за счет дифференциального изменения оборотов винтов.

Вертикальное управление (тяга) осуществляется одновременным изменением оборотов всех винтов. Увеличение оборотов всех винтов приводит к набору высоты, уменьшение - к снижению. При равенстве суммарной тяги винтов весу БАС происходит зависание на постоянной высоте. Точность управления по вертикали зависит от чувствительности системы управления двигателями и стабильности их характеристик.

Управление по тангажу (наклон вперед-назад) достигается изменением соотношения тяги передних и задних винтов. Увеличение тяги задних винтов при одновременном уменьшении тяги передних создает момент тангажа, наклоняющий БАС вперед. Возникающая при этом горизонтальная составляющая тяги обеспечивает поступательное движение вперед.

Управление по крену (наклон влево-вправо) осуществляется аналогично управлению по тангажу, но с использованием левых и правых винтов. Дифференциальное изменение тяги создает момент крена, наклоняющий БАС в сторону и обеспечивающий боковое движение.

Управление по рысканию (поворот вокруг вертикальной оси) использует реактивный момент винтов. В схеме квадрокоптера два противоположных винта вращаются по часовой стрелке, два других - против часовой стрелки. Изменение соотношения тяги винтов, вращающихся в разные стороны, создает результирующий момент рыскания.

#### 6.1.2 Режимы полета и их характеристики

Ручной режим (Manual/Stabilize) обеспечивает прямое управление БАС оператором с автоматической стабилизацией углового положения. В этом режиме автопилот поддерживает заданные углы наклона БАС, но не контролирует скорость и положение. Оператор должен постоянно корректировать управление для поддержания желаемой траектории полета.

Режим удержания позиции (Position Hold/Loiter) автоматически поддерживает БАС в заданной точке пространства с использованием GPS-

навигации. Автопилот компенсирует влияние ветра и других возмущений, возвращая БАС в исходную позицию. Этот режим удобен для детального обследования объектов или выполнения точных маневров.

Режим следования высоте (Altitude Hold) поддерживает постоянную высоту полета с использованием барометрического высотомера. Оператор управляет горизонтальным движением БАС, а автопилот автоматически корректирует тягу винтов для поддержания высоты. Режим полезен при полетах над неровной местностью.

Автоматический режим (Auto/Mission) обеспечивает полет БАС по предварительно запрограммированному маршруту без участия оператора. Автопилот самостоятельно выполняет взлет, следование по маршруту, выполнение заданных действий и посадку. Оператор контролирует выполнение полета и может в любой момент перейти в ручной режим.

Режим возврата домой (Return to Home/RTH) автоматически возвращает БАС к точке взлета при потере связи, критически низком заряде батареи или по команде оператора. Автопилот прокладывает оптимальный маршрут возврата, учитывая препятствия и ограничения воздушного пространства.

### **6.3.1. Система координат и ориентация БАС**

Система координат БАС определяется относительно его продольной оси, направленной вперед по направлению полета. Ось X направлена вперед, ось Y - вправо, ось Z - вниз. Эта правосторонняя система координат используется в большинстве автопилотов и программ управления полетом.

Углы Эйлера описывают ориентацию БАС в пространстве тремя углами: крен (roll), тангаж (pitch) и рыскание (yaw). Крен - поворот вокруг продольной оси, тангаж - поворот вокруг поперечной оси, рыскание - поворот вокруг вертикальной оси. Понимание этих углов критически важно для правильного управления БАС.

Кватернионы представляют альтернативный математический способ описания ориентации, свободный от проблем сингулярностей углов Эйлера. Современные автопилоты внутренне используют кватернионы для расчетов, но отображают ориентацию в углах Эйлера для удобства восприятия оператором.

Системы координат земли и БАС различаются и требуют преобразований при планировании полетов. Координаты точек маршрута задаются в земной системе координат (широта, долгота, высота), а команды управления формируются в системе координат БАС. Автопилот выполняет необходимые преобразования автоматически.

## **Лекция 6.2 Взлет, полет по маршруту и посадка**

### **6.2.1 Процедуры взлета**

Подготовка к взлету включает финальную проверку всех систем БАС, подтверждение готовности стартовой площадки, получение разрешения на взлет от соответствующих служб. Оператор должен убедиться в отсутствии людей и препятствий в зоне взлета, проверить метеорологические условия, подтвердить работоспособность систем связи.

Автоматический взлет выполняется по команде с наземной станции управления после активации соответствующего режима автопилота. БАС самостоятельно запускает двигатели, плавно увеличивает тягу до отрыва от земли, набирает заданную высоту и переходит в режим зависания или следования по маршруту. Оператор контролирует процесс и готов в любой момент перейти в ручной режим.

Ручной взлет требует активного управления со стороны оператора. Оператор плавно увеличивает тягу до отрыва БАС от земли, контролирует стабильность полета, корректирует положение БАС относительно площадки. После достижения безопасной высоты можно переходить к выполнению полетного задания.

Особенности взлета в различных условиях требуют адаптации процедур. При сильном ветре необходимо учитывать его влияние на траекторию взлета и обеспечивать дополнительный запас мощности. При взлете с ограниченных площадок требуется особая точность управления. В условиях ограниченной видимости возрастает роль инструментального контроля параметров полета.

Контроль параметров взлета включает мониторинг высоты, скорости набора высоты, углов наклона БАС, потребления энергии, работы двигателей. Любые отклонения от нормальных параметров должны немедленно анализироваться и при необходимости приводить к прекращению взлета.

### **6.2.2 Техника полета по маршруту**

Навигация по маршруту в автоматическом режиме обеспечивается автопилотом на основе GPS-координат путевых точек. Автопилот рассчитывает оптимальную траекторию между точками, учитывая ограничения по скорости, ускорению, максимальным углам наклона. Оператор контролирует соблюдение маршрута и готов к вмешательству при необходимости.

Ручное пилотирование по маршруту требует постоянного внимания оператора к навигации и управлению БАС. Оператор должен поддерживать

заданную траекторию, высоту, скорость полета, ориентируясь по приборам и визуальным ориентирам. Это требует значительных навыков пилотирования и хорошего знания района полетов.

Контроль высоты полета осуществляется с использованием барометрического высотомера, GPS-высотомера, ультразвуковых датчиков. Каждый тип датчика имеет свои особенности и ограничения. Барометрический высотомер точен на больших высотах, но подвержен влиянию изменений атмосферного давления. GPS-высотомер менее точен, но стабилен. Ультразвуковые датчики точны на малых высотах.

Управление скоростью полета влияет на качество выполнения полетного задания и энергопотребление. Высокая скорость сокращает время полета, но может ухудшить качество съемки из-за смазывания изображений. Низкая скорость обеспечивает высокое качество съемки, но увеличивает время полета и расход энергии.

Мониторинг состояния БАС во время полета включает контроль заряда батареи, температуры двигателей, качества GPS-приема, стабильности радиосвязи. Современные телеметрические системы передают десятки параметров в режиме реального времени, позволяя оператору своевременно выявлять проблемы.

### **6.2.3 Процедуры посадки**

Подготовка к посадке включает выбор подходящей площадки, анализ метеорологических условий, проверку состояния БАС. Площадка для посадки должна быть ровной, свободной от препятствий и людей, защищенной от сильного ветра. При посадке не в точке взлета необходимо дополнительно оценить пригодность альтернативной площадки.

Автоматическая посадка выполняется автопилотом по заранее запрограммированному алгоритму. БАС снижается до заданной высоты над площадкой, выполняет финальное выравнивание, плавно уменьшает тягу до касания земли и отключает двигатели. Современные системы используют оптические датчики для точного определения момента касания.

Ручная посадка требует от оператора точного управления снижением и приземлением БАС. Оператор должен поддерживать БАС над центром площадки, контролировать скорость снижения, обеспечить плавное касание земли. Особое внимание требуется при посадке в условиях ветра или на неровную поверхность.

Экстренная посадка может потребоваться при отказе систем БАС, критически низком заряде батареи, ухудшении погодных условий. Оператор должен быстро выбрать наиболее подходящую площадку, выполнить посадку с минимальным риском для людей и имущества. При этом сохранность БАС может быть принесена в жертву безопасности.

Последополетные действия включают отключение всех систем БАС, извлечение батарей, осмотр на предмет повреждений, сохранение полетных данных. Важно документировать любые особенности полета, выявленные проблемы, расход ресурсов для планирования последующих полетов.

## **Лекция 6.3 Полеты в различных режимах и условиях**

### **6.3.1 Особенности полетов в автоматическом режиме**

Планирование автоматического полета требует детального анализа маршрута, препятствий, ограничений воздушного пространства. Все параметры полета должны быть заранее рассчитаны и запрограммированы в автопилот. Особое внимание уделяется критическим точкам маршрута, где возможны проблемы с навигацией или препятствия.

Мониторинг автоматического полета включает постоянное наблюдение за траекторией БАС, соответствием фактических параметров запланированным, состоянием всех систем. Оператор должен быть готов в любой момент перейти в ручной режим управления при выявлении проблем или изменении внешних условий.

Вмешательство в автоматический полет может потребоваться при отклонении БАС от заданной траектории, появлении препятствий на маршруте, изменении метеорологических условий, отказе систем навигации. Переход из автоматического в ручной режим должен выполняться плавно, без резких изменений режима полета.

Ограничения автоматического режима связаны с возможностями систем навигации и обнаружения препятствий. GPS-навигация может быть ненадежна в городских условиях, вблизи высоких зданий, под мостами. Системы обнаружения препятствий имеют ограниченную дальность действия и могут не обнаружить тонкие препятствия типа проводов.

### **6.3.2 Ручное пилотирование в сложных условиях**

Полеты в условиях ограниченной видимости требуют повышенного внимания к инструментальному контролю параметров полета. Оператор должен полагаться на показания приборов, а не на визуальное восприятие. Скорость

полета должна быть снижена, маневры выполняться более плавно, постоянно контролироваться высота и положение БАС.

Управление в условиях ветра требует учета его влияния на траекторию и устойчивость БАС. При встречном ветре увеличивается время полета и энергопотребление, при попутном ветре может быть превышена максимальная скорость относительно земли. Боковой ветер требует постоянной коррекции курса для поддержания заданной траектории.

Полеты на малых высотах увеличивают риск столкновения с препятствиями и требуют повышенного внимания к окружающей обстановке. Влияние земли может изменить аэродинамические характеристики БАС, особенно при взлете и посадке. Тurbулентность от препятствий может вызвать потерю управляемости.

Полеты в стесненных условиях (между зданиями, в лесу, в помещениях) требуют высокого мастерства пилотирования и точного управления. GPS-навигация может быть недоступна, системы обнаружения препятствий перегружены информацией. Скорость полета должна быть минимальной, маневры - предельно точными.

### **6.3.3 Специальные маневры и техники пилотирования**

Точное зависание над объектом требует компенсации влияния ветра и поддержания стабильного положения БАС. Используются режимы удержания позиции с GPS-навигацией или ручное управление с постоянной коррекцией. Для повышения точности могут использоваться оптические системы позиционирования.

Облет препятствий выполняется с поддержанием безопасного расстояния и постоянным контролем траектории. Маневр должен планироваться заранее с учетом габаритов БАС, его маневренных характеристик, влияния ветра. При облете высоких препятствий необходимо учитывать турбулентность и изменения ветрового потока.

Полеты по сложным траекториям (спираль, восьмерка, следование за движущимся объектом) требуют плавного и координированного управления по всем осям. Важно поддерживать постоянную скорость и избегать резких изменений направления, которые могут привести к потере управляемости.

Съемка с различных ракурсов может требовать наклона БАС или изменения ориентации камеры. При наклонах БАС изменяется его аэродинамика и управляемость, что требует соответствующей коррекции управления.

Использование стабилизированных подвесов позволяет изменять ракурс съемки без наклона БАС.

## **Лекция 6.4 Контроль параметров полета и системы мониторинга**

### **6.4.1 Основные параметры полета и их контроль**

Навигационные параметры включают координаты БАС, высоту, скорость, курс, отклонение от заданной траектории. Эти параметры критически важны для безопасности полета и выполнения полетного задания. Координаты определяются системой GPS/GNSS с точностью до нескольких метров, высота - барометрическим высотометром и GPS.

Высота полета контролируется несколькими независимыми системами для повышения надежности. Барометрический высотометр обеспечивает высокую точность на больших высотах, но подвержен влиянию изменений атмосферного давления. GPS-высотометр менее точен, но стабилен. Ультразвуковые и лидарные датчики обеспечивают точные измерения на малых высотах.

Скорость полета измеряется относительно земли (ground speed) и относительно воздуха (air speed). Ground speed определяется по GPS-данным и показывает фактическую скорость перемещения БАС по земной поверхности. Air speed учитывает влияние ветра и важна для оценки аэродинамических характеристик БАС.

Углы ориентации БАС (крен, тангаж, рыскание) контролируются инерциальными датчиками и отображаются на искусственном горизонте наземной станции. Большие углы наклона могут указывать на проблемы с управлением, сильный ветер или неисправности двигателей.

### **6.4.2 Мониторинг технического состояния**

Система питания требует постоянного мониторинга напряжения, тока, температуры батарей. Снижение напряжения указывает на разряд батареи, высокий ток - на повышенную нагрузку, повышенная температура - на возможные проблемы с системой охлаждения или перегрузку.

Состояние двигателей контролируется по температуре, оборотам, потребляемому току, вибрациям. Перегрев двигателей может привести к их отказу, неравномерность оборотов - к потере управляемости, повышенные вибрации - к разрушению конструкции.

Работа систем навигации оценивается по количеству видимых спутников GPS, точности позиционирования, стабильности сигнала. Потеря GPS-сигнала

может привести к отклонению от маршрута или активации режима возврата домой.

Качество радиосвязи контролируется по уровню сигнала, количеству потерянных пакетов данных, задержкам передачи. Ухудшение связи может привести к потере управления БАС или активации автоматических защитных функций.

#### **6.4.3 Телеметрические системы и их использование**

Состав телеметрической информации включает навигационные данные, параметры двигателей, состояние батарей, данные датчиков, состояние систем управления. Современные телеметрические системы могут передавать более 100 различных параметров с частотой обновления до 100 Гц.

Протоколы передачи телеметрии обеспечивают надежную доставку данных в условиях помех и ограниченной пропускной способности канала связи. Используются методы сжатия данных, коррекции ошибок, приоритизации критически важной информации.

Отображение телеметрической информации на наземной станции должно обеспечивать быстрое восприятие оператором критически важных параметров. Используются цветовая индикация, звуковые сигналы, графические индикаторы для привлечения внимания к проблемам.

Запись и анализ телеметрических данных позволяют анализировать полеты, выявлять проблемы, планировать техническое обслуживание. Данные записываются как на борту БАС, так и на наземной станции для обеспечения резервирования.

Предупредительные сигналы и аварийные сообщения информируют оператора о критических ситуациях, требующих немедленного вмешательства. Система должна четко различать уровни важности сообщений и обеспечивать их приоритетное отображение.

## ПРАКТИКА ПО ТЕМЕ 6

### Практическое занятие 6.1

#### **Выполнение основных маневров при управлении БАС (3 часа)**

**Цель:** Освоить базовые навыки управления БАС в ручном режиме, отработать основные маневры полета.

#### **Теоретическая часть (30 минут):**

Основы ручного управления мульти rotorными БАС. Влияние команд управления на движение БАС. Координация движений. Техника безопасности при ручном пилотировании.

#### **Практическая работа (2,5 часа):**

##### **Модуль 1: Базовые маневры (1 час 15 минут):**

###### *Вертикальные маневры (20 минут):*

- Плавный взлет с постепенным набором высоты до 10 м
- Зависание на различных высотах (2, 5, 10 м)
- Контролируемое снижение с различными скоростями
- Точная посадка в заданную точку

###### *Горизонтальные перемещения (25 минут):*

- Движение вперед-назад с постоянной скоростью
- Боковые перемещения влево-вправо
- Диагональные движения
- Остановка в заданной точке после движения

###### *Повороты и ориентация (20 минут):*

- Повороты на месте на заданные углы ( $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $360^\circ$ )
- Поддержание ориентации при движении
- Полеты с изменением ориентации
- Возврат к исходной ориентации

###### *Комбинированные маневры (10 минут):*

- Одновременное изменение высоты и горизонтального положения
- Спиральное движение с набором высоты
- Движение по квадрату с поворотами в углах

##### **Модуль 2: Точное позиционирование (45 минут):**

###### *Зависание над точкой (15 минут):*

- Зависание над маркером на земле в течение 1 минуты
- Компенсация влияния ветра
- Поддержание постоянной высоты
- Минимизация колебаний БАС

###### *Движение по заданной траектории (20 минут):*

- Полет по прямой линии между двумя точками
- Полет по кругу заданного радиуса
- Полет в виде восьмерки
- Полет по сложной траектории с несколькими поворотами

*Точная посадка (10 минут):*

- Посадка в круг диаметром 1 м
- Посадка на возвышенную площадку
- Посадка при боковом ветре
- Посадка с подходом под углом

**Модуль 3: Маневры в ограниченном пространстве (50 минут):**

*Полеты между препятствиями (25 минут):*

- Пролет между двумя вертикальными стойками
- Облет препятствий с минимальным зазором
- Полет в "коридоре" ограниченной ширины
- Подлет к объекту на минимальное расстояние

*Полеты на различных высотах (15 минут):*

- Низковысотные полеты (1-2 м от земли)
- Полеты вблизи препятствий
- Изменение высоты при ограниченном вертикальном пространстве

*Экстренные маневры (10 минут):*

- Быстрая остановка при движении на препятствие
- Резкое изменение направления полета
- Экстренный набор высоты
- Экстренная посадка в ограниченное пространство

Каждый студент выполняет все маневры под наблюдением инструктора, получает индивидуальные рекомендации по технике пилотирования.

## Практическое занятие 6.2

### Взлет и посадка в различных условиях (2 часа)

**Цель:** Отработать навыки взлета и посадки в различных метеорологических условиях и на различных типах поверхностей.

**Теоретическая часть (20 минут):**

Влияние внешних условий на взлет и посадку. Техника выполнения взлета и посадки при ветре. Особенности посадки на различные поверхности.

**Практическая работа (1 час 40 минут):**

**Модуль 1: Взлет и посадка при различной силе ветра (50 минут):**

*Слабый ветер (до 5 м/с) - 15 минут:*

- Стандартные процедуры взлета и посадки
- Контроль стабильности БАС
- Оценка влияния ветра на траекторию
- Коррекция положения при зависании

*Умеренный ветер (5-8 м/с) - 20 минут:*

- Взлет против ветра и по ветру
- Боковые взлеты при поперечном ветре
- Посадка с учетом сноса ветром
- Компенсация влияния ветра на различных высотах

*Сильный ветер (8-12 м/с) - 15 минут:*

- Оценка возможности безопасного взлета
- Техника взлета при сильном ветре
- Быстрый набор безопасной высоты
- Осторожная посадка с повышенной скоростью снижения

**Модуль 2: Взлет и посадка на различные поверхности (30 минут):**

*Твердые поверхности (10 минут):*

- Взлет и посадка на асфальт, бетон
- Учет отражения воздушного потока от поверхности
- Контроль устойчивости БАС при касании

*Мягкие поверхности (10 минут):*

- Взлет и посадка на траву, песок
- Предотвращение попадания частиц в винты
- Компенсация неровностей поверхности

*Наклонные поверхности (10 минут):*

- Взлет и посадка на склоне
- Поддержание горизонтального положения БАС
- Предотвращение скольжения по склону

**Модуль 3: Взлет и посадка в ограниченных условиях (20 минут):**

*Ограниченные площадки (10 минут):*

- Взлет с малых площадок
- Вертикальный взлет без горизонтального движения
- Точная посадка в ограниченное пространство

*Взлет и посадка вблизи препятствий (10 минут):*

- Учет влияния препятствий на воздушные потоки
- Избежание турбулентности от препятствий
- Безопасные траектории взлета и посадки

## Практическое занятие 6.3

### Полет по маршруту в автоматическом и ручном режимах (3 часа)

**Цель:** Освоить навыки выполнения полетов по заданному маршруту в различных режимах управления.

#### Теоретическая часть (20 минут):

Особенности полетов по маршруту. Переключение между автоматическим и ручным режимами. Контроль выполнения полетного задания.

#### Практическая работа (2 часа 40 минут):

##### Модуль 1: Автоматический полет по маршруту (1 час 20 минут):

###### *Подготовка и загрузка маршрута (20 минут):*

- Создание простого маршрута из 5-6 точек
- Загрузка маршрута в автопилот
- Проверка параметров полета
- Настройка скорости и высоты полета

###### *Выполнение автоматического полета (40 минут):*

- Автоматический взлет и переход к первой точке
- Мониторинг соблюдения маршрута
- Контроль параметров полета
- Реакция на отклонения от плана
- Автоматическая посадка по завершении маршрута

###### *Вмешательство в автоматический полет (20 минут):*

- Переход из автоматического в ручной режим
- Ручная коррекция траектории
- Возврат в автоматический режим
- Изменение параметров полета во время выполнения

##### Модуль 2: Ручной полет по маршруту (1 час):

###### *Навигация по визуальным ориентирам (20 минут):*

- Полет к видимым ориентирам
- Поддержание заданного курса
- Коррекция траектории по ориентирам
- Определение местоположения по карте

###### *Полет по приборам (25 минут):*

- Использование GPS-навигации
- Следование по электронной карте
- Поддержание заданной высоты и скорости
- Контроль отклонения от маршрута

###### *Комбинированная навигация (15 минут):*

- Сочетание визуальной и приборной навигации
- Сверка показаний приборов с визуальными наблюдениями
- Принятие решений при противоречивой информации

### **Модуль 3: Сложные маршруты и маневры (20 минут):**

*Маршруты с изменением высоты:*

- Полет с огибанием рельефа
- Поддержание постоянного расстояния до поверхности
- Полет над препятствиями различной высоты

*Маршруты с точными маневрами:*

- Облет препятствий по сложной траектории
- Полет через заданные точки с высокой точностью
- Выполнение специальных маневров в заданных точках

## **Практическое занятие 6.4**

### **Полеты в различных режимах управления (2 часа)**

**Цель:** Изучить особенности различных режимов управления БАС и научиться эффективно их использовать.

#### **Теоретическая часть (15 минут):**

Обзор режимов управления современных БАС. Области применения различных режимов. Переключение между режимами в полете.

#### **Практическая работа (1 час 45 минут):**

##### **Модуль 1: Режимы стабилизации (30 минут):**

*Режим Stabilize/Manual (15 минут):*

- Прямое управление углами наклона БАС
- Отработка координированного управления
- Поддержание высоты ручным управлением тягой
- Особенности поведения БАС в этом режиме

*Режим Altitude Hold (15 минут):*

- Автоматическое поддержание высоты
- Ручное управление горизонтальным движением
- Изменение заданной высоты
- Реакция на изменения нагрузки ветра

##### **Модуль 2: Режимы позиционирования (45 минут):**

*Режим Position Hold/Loiter (20 минут):*

- Автоматическое удержание позиции
- Ручное задание новой позиции
- Поведение при потере GPS-сигнала

- Влияние ветра на точность удержания

*Режим Guided (15 минут):*

- Управление через наземную станцию
- Задание координат точки назначения
- Автоматический полет к заданной точке
- Изменение точки назначения в полете

*Режим Follow Me (10 минут):*

- Автоматическое следование за оператором
- Настройка дистанции и высоты следования
- Поведение при потере сигнала от оператора

**Модуль 3: Автоматические режимы (30 минут):**

*Режим Auto/Mission (20 минут):*

- Выполнение предварительно загруженного маршрута
- Автоматическое выполнение команд в точках маршрута
- Мониторинг выполнения полетного задания
- Вмешательство в автоматический полет

*Режим Return to Home (10 минут):*

- Автоматическая активация при потере связи
- Ручная активация режима
- Настройка параметров возврата домой
- Поведение при препятствиях на пути возврата

## Практическое занятие 6.5

### **Отработка навыков пилотирования на симуляторе и реальных БАС (2 часа)**

**Цель:** Закрепить полученные навыки пилотирования с использованием симуляторов и реальных БАС в безопасной среде.

**Теоретическая часть (10 минут):**

Роль симуляторов в обучении пилотированию. Ограничения симуляторов.

Перенос навыков с симулятора на реальные БАС.

**Практическая работа (1 час 50 минут):**

**Модуль 1: Работа с симулятором полетов (50 минут):**

*Базовые упражнения на симуляторе (20 минут):*

- Настройка симулятора и калибровка управления
- Выполнение базовых маневров в виртуальной среде
- Отработка взлета и посадки
- Полеты в различных погодных условиях

*Сложные сценарии (20 минут):*

- Полеты в условиях сильного ветра
- Отказы различных систем БАС
- Полеты в сложной местности
- Экстренные ситуации и их отработка

*Специальные упражнения (10 минут):*

- Полеты в условиях ограниченной видимости
- Полеты в городской среде
- Полеты вблизи препятствий
- Точное позиционирование

**Модуль 2: Практические полеты на учебных БАС (60 минут):**

*Закрепление базовых навыков (25 минут):*

- Выполнение всех изученных маневров на реальном БАС
- Оценка различий между симулятором и реальностью
- Адаптация техники управления к реальным условиям
- Учет влияния внешних факторов

*Выполнение комплексных заданий (25 минут):*

- Полет по маршруту с несколькими задачами
- Съемка объектов с различных ракурсов
- Полеты с имитацией реальных рабочих условий
- Работа в команде с другими операторами

*Оценка навыков и выдача рекомендаций (10 минут):*

- Анализ выполненных упражнений
- Выявление сильных и слабых сторон
- Рекомендации по дальнейшему совершенствованию
- Планирование дополнительных тренировок

Каждый студент должен продемонстрировать уверенное владение всеми изученными навыками пилотирования и получить зачет по практическому пилотированию.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ 6

1. Объясните принцип управления мультироторным БАС по различным осям.
2. Какие основные режимы полета используются в современных БАС?
3. В чем различие между автоматическим и ручным режимами управления?
4. Какие параметры полета необходимо постоянно контролировать?
5. Как выполняется взлет и посадка при сильном ветре?
6. Что такое режим "Return to Home" и когда он активируется?
7. Какие особенности имеет полет в режиме удержания позиции?
8. Как влияет высота полета на управляемость БАС?
9. Какие телеметрические данные наиболее критичны для безопасности полета?
10. В каких случаях необходимо немедленно перейти в ручной режим управления?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ТЕМЕ 6

### Основные источники:

1. Руководства по эксплуатации конкретных моделей БАС:
  - DJI Mavic Series User Manual. – Режим доступа: <https://www.dji.com/support>
  - Autel Robotics EVO Series Manual. – Режим доступа: <https://www.autelrobotics.com/support>
  - Parrot Professional Drones Documentation. – Режим доступа: <https://www.parrot.com/business-solutions-us/support>
2. ArduPilot Flight Modes Documentation. – Режим доступа: <https://ardupilot.org/copter/docs/flight-modes.html>
3. PX4 Flight Modes. – Режим доступа: [https://docs.px4.io/main/en/flight\\_modes/](https://docs.px4.io/main/en/flight_modes/)

### Дополнительные источники:

4. Ковалёв М.А., Овакимян Д.Н. Беспилотные летательные аппараты вертикального взлета: сборка, настройка и программирование: учебное пособие. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 96 с.
5. RC Helicopter Flight Training Guide / Various authors. – Режим доступа: <https://www.rchelicopterfun.com/>
6. UAV Flight Training Materials. – Режим доступа: <https://www.faa.gov/uas/>

7. Симуляторы полетов для обучения:

- RealFlight RF-X. – Режим доступа: <https://www.realflight.com/>
- AeroSIM RC. – Режим доступа: <https://www.aerosimrc.com/>
- Phoenix RC Pro Simulator. – Режим доступа:

<https://www.phoenix-sim.com/>

## ТЕМА 7. ДЕЙСТВИЯ В НЕШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

### Лекция 7.1 Классификация нештатных и аварийных ситуаций

#### 7.1.1 Определения и классификация

Нештатная ситуация представляет собой отклонение от нормального режима полета, которое требует вмешательства оператора, но не создает непосредственной угрозы безопасности. К нештатным ситуациям относятся незначительные отказы оборудования, отклонения от плана полета, изменения внешних условий, которые могут быть компенсированы действиями оператора или автоматическими системами.

Аварийная ситуация характеризуется серьезной угрозой безопасности полета, требующей немедленных действий для предотвращения катастрофы. Аварийные ситуации включают отказы критически важных систем, потерю управляемости, столкновения с препятствиями, пожар на борту, критические метеорологические условия.

Классификация по причинам возникновения разделяет нештатные ситуации на технические отказы, ошибки оператора, воздействие внешних факторов, нарушение правил эксплуатации. Каждая категория требует специфических действий по предотвращению и ликвидации последствий.

Технические отказы включают неисправности двигателей, систем управления, навигации, связи, энергоснабжения. Современные БАС имеют множество датчиков и систем диагностики, позволяющих раннее обнаружение развивающихся отказов.

Ошибки оператора могут возникать на всех этапах полета - от планирования до послеполетного обслуживания. Основными причинами ошибок являются недостаточная подготовка, усталость, стресс, невнимательность, неправильное понимание ситуации.

Внешние факторы включают изменения погодных условий, появление препятствий, вмешательство посторонних лиц, воздействие птиц, электромагнитные помехи. Многие внешние факторы трудно предсказать, что требует готовности к быстрому реагированию.

#### 7.1.2 Статистика и анализ причин инцидентов

Статистический анализ инцидентов с БАС показывает, что наиболее частыми причинами являются ошибки операторов (около 40% случаев), технические отказы (30%), неблагоприятные метеорологические условия (20%), прочие факторы (10%). Эти данные подчеркивают важность качественной подготовки операторов и регулярного технического обслуживания.

Ошибки в планировании полетов составляют значительную долю инцидентов. Неправильная оценка метеорологических условий, недостаточный анализ препятствий, некорректный расчет энергопотребления приводят к ситуациям, когда БАС не может безопасно завершить полетное задание.

Технические отказы чаще всего связаны с системой энергоснабжения (разряд или отказ батарей), отказами двигателей, поломками винтов, сбоями в работе автопилота. Многие технические отказы можно предотвратить регулярным техническим обслуживанием и соблюдением ограничений эксплуатации.

Человеческий фактор остается основной причиной серьезных инцидентов. Недооценка рисков, пренебрежение процедурами безопасности, попытки выполнить полет в неподходящих условиях, неправильные действия в критических ситуациях приводят к авариям, которых можно было избежать.

### **7.1.3 Системы предупреждения и раннего обнаружения**

Автоматические системы мониторинга современных БАС непрерывно контролируют состояние всех критически важных систем и параметров полета. Системы раннего предупреждения анализируют тенденции изменения параметров и могут предсказать развитие отказов до их критического проявления.

Система контроля энергопотребления отслеживает заряд батарей, ток потребления, температуру элементов питания. При достижении критических значений система предупреждает оператора и может автоматически активировать режим возврата домой или экстренной посадки.

Мониторинг работы двигателей включает контроль температуры, оборотов, потребляемого тока, вибраций. Отклонения от нормальных параметров могут указывать на развивающиеся неисправности подшипников, дисбаланс винтов, проблемы с системой управления двигателями.

Контроль качества навигационных данных включает анализ количества видимых спутников GPS, точности позиционирования, стабильности сигнала. Система может переключаться между различными источниками навигационной информации при ухудшении качества основного источника.

Системы обнаружения препятствий используют ультразвуковые, оптические, радарные датчики для выявления препятствий на пути полета. При обнаружении препятствия система может автоматически остановить БАС, изменить траекторию полета или предупредить оператора.

## Лекция 7.2 Отказы систем БАС и методы их диагностики

### 7.2.1 Отказы силовой установки

Отказ одного двигателя в мультироторной схеме приводит к дисбалансу тяги и возникновению неконтролируемого вращения БАС. Современные автопилоты могут частично компенсировать отказ одного двигателя в схемах с избыточным количеством винтов (гексакоптеры, октокоптеры), но квадрокоптеры теряют управляемость при отказе любого двигателя.

Признаки отказа двигателя включают резкое изменение углового положения БАС, появление неконтролируемого вращения, снижение общей тяги, изменение звука работы силовой установки. Автопилот может сигнализировать об отказе двигателя через телеметрическую систему.

Частичная потеря тяги может происходить при засорении винтов, частичном отказе системы управления двигателем, снижении напряжения питания. Такие ситуации могут развиваться постепенно и требуют внимательного мониторинга параметров полета.

Поломка винтов может произойти при столкновении с препятствиями, усталостном разрушении материала, неправильной балансировке. Поломка винта приводит к мгновенной потере тяги и сильной вибрации, что может повредить другие компоненты БАС.

Методы диагностики отказов силовой установки включают мониторинг температуры двигателей, анализ потребляемого тока, контроль оборотов, измерение вибраций. Современные автопилоты могут автоматически обнаруживать многие типы отказов и информировать оператора.

### 7.2.2 Отказы системы управления и навигации

Отказ полетного контроллера является критической ситуацией, поскольку БАС теряет автоматическую стабилизацию и может стать неуправляемым. Признаки отказа включают потерю связи с автопилотом, неадекватную реакцию на команды управления, хаотичное поведение БАС.

Сбои в работе инерциальных датчиков могут привести к неправильному определению ориентации БАС и некорректной работе системы стабилизации. Калибровочные ошибки, температурный дрейф, механические повреждения датчиков являются основными причинами таких сбоев.

Потеря GPS-сигнала лишает БАС точной навигации и может привести к активации режима возврата домой или переходу в режим стабилизации без удержания позиции. В городских условиях и вблизи высоких сооружений GPS-сигнал может быть нестабильным.

Отказы барометрического высотомера могут привести к неконтролируемому изменению высоты полета. Засорение статических портов, температурные эффекты, электронные сбои являются основными причинами отказов высотомера.

Диагностика отказов системы управления включает анализ телеметрических данных, сравнение показаний различных датчиков, проверку реакции БАС на команды управления. Многие современные автопилоты имеют резервные датчики и могут автоматически переключаться на резервные системы.

### **7.2.3 Отказы системы энергоснабжения**

Разряд основной батареи является наиболее частой причиной принудительной посадки БАС. Система мониторинга батареи должна предупреждать оператора о низком заряде и автоматически активировать режим возврата домой при критическом уровне заряда.

Отказ элементов батареи может привести к резкому снижению напряжения и аварийному отключению БАС. Современные Li-Po батареи имеют системы защиты, которые отключают батарею при обнаружении неисправных элементов, что может привести к внезапной потере питания.

Перегрев батареи может произойти при высоких токах нагрузки, повреждении элементов, неисправности системы охлаждения. Перегрев может привести к пожару или взрыву батареи, что создает серьезную угрозу безопасности.

Проблемы с системой распределения питания включают отказы преобразователей напряжения, повреждения проводки, плохие контакты. Такие проблемы могут привести к отключению отдельных систем БАС или полной потере питания.

Диагностика проблем энергоснабжения включает мониторинг напряжения, тока, температуры батареи, контроль работы системы управления батареей. Важно регулярно проверять состояние батарей и заменять их при обнаружении признаков деградации.

## **Лекция 7.3 Процедуры действий в критических ситуациях**

### **7.3.1 Алгоритмы принятия решений**

Принятие решений в критических ситуациях должно основываться на заранее разработанных алгоритмах, учитывающих приоритеты безопасности. Основной принцип - обеспечение безопасности людей на земле и в воздухе имеет приоритет над сохранностью БАС и выполнением полетного задания.

Оценка ситуации должна выполняться быстро, но без паники. Оператор должен проанализировать доступную информацию, определить характер и серьезность проблемы, оценить доступные варианты действий и их последствия. Время на принятие решения может быть критически ограничено.

Приоритизация действий основывается на иерархии угроз безопасности. Первоочередными являются действия по предотвращению столкновения с людьми, зданиями, другими воздушными судами. Вторичными - действия по сохранению управляемости БАС и возможности контролируемой посадки.

Коммуникация с диспетчерскими службами и службами экстренного реагирования должна осуществляться при любых серьезных инцидентах. Оператор должен сообщить о характере проблемы, местоположении БАС, предпринимаемых действиях, потенциальных угрозах.

Документирование инцидента должно начинаться немедленно после его возникновения. Важно зафиксировать время, обстоятельства, действия оператора, показания приборов, внешние условия. Эта информация необходима для расследования и предотвращения подобных инцидентов в будущем.

### **7.3.2 Действия при потере связи**

Потеря радиосвязи с БАС может произойти из-за выхода за пределы дальности связи, отказа передатчика или приемника, электромагнитных помех, разряда батареи пульта управления. Современные автопилоты имеют предустановленные алгоритмы действий при потере связи.

Режим "Failsafe" автоматически активируется при потере сигнала управления на заданное время (обычно 3-10 секунд). В зависимости от настроек БАС может перейти в режим зависания, возврата домой или контролируемой посадки. Важно правильно настроить параметры Failsafe перед полетом.

Восстановление связи может произойти при приближении БАС к оператору, устранении источников помех, замене батареи пульта управления. При восстановлении связи оператор должен немедленно оценить ситуацию и при необходимости скорректировать действия автопилота.

Поиск БАС после потери связи может потребоваться, если автоматический возврат домой не сработал или БАС совершил посадку в неизвестном месте. Важно знать последние известные координаты БАС и направление его движения. Могут использоваться системы слежения, звуковые сигналы, визуальный поиск.

Предотвращение потери связи включает регулярную проверку оборудования связи, мониторинг уровня сигнала, избегание полетов за пределы

надежной дальности связи, использование систем усиления сигнала, резервных каналов связи.

### **7.3.3 Экстренная посадка и аварийные процедуры**

Выбор места экстренной посадки должен осуществляться с учетом безопасности людей на земле. Приоритет отдается открытым пространствам, удаленным от людей и строений. При невозможности выбора идеального места следует минимизировать потенциальный ущерб.

Подготовка к экстренной посадке включает снижение скорости полета, выбор оптимального угла снижения, предупреждение людей на земле об опасности, отключение несущественных систем для экономии энергии. Если позволяет время, следует передать информацию о местоположении и характере проблемы.

Техника экстренной посадки зависит от характера неисправности. При отказе двигателей следует использовать режим авторотации (если возможно) или планирующий спуск. При частичной потере управляемости важно поддерживать максимально возможный контроль траектории.

Действия после аварийной посадки включают немедленное отключение всех систем БАС, оценку повреждений, оказание первой помощи при необходимости, уведомление соответствующих служб, ограждение места происшествия, сохранение вещественных доказательств для расследования.

Пожарная безопасность критически важна при авариях с Li-Po батареями. Поврежденные батареи могут воспламениться или взорваться. Необходимо иметь соответствующие огнетушители и знать методы тушения литиевых батарей. Людей следует удалить на безопасное расстояние.

## **Лекция 7.4 Поисково-спасательные операции и взаимодействие со службами**

### **7.4.1 Организация поиска БАС после аварийной посадки**

Немедленные действия после потери БАС включают фиксацию времени и обстоятельств инцидента, определение последних известных координат, анализ возможных мест посадки на основе траектории полета и оставшегося заряда батареи. Важно не паниковать и действовать систематически.

Использование телеметрических данных может существенно упростить поиск. Многие современные БАС записывают полетные данные в бортовую память и могут передавать координаты последней известной позиции. Анализ журналов полета помогает восстановить траекторию движения БАС.

Организация поисковой группы должна учитывать размер поисковой зоны, сложность местности, количество доступных людей. Поиск следует проводить систематически, разделив зону на секторы и обеспечив их полное покрытие. Использование GPS-навигаторов помогает координировать действия поисковых групп.

Технические средства поиска включают радиопеленгаторы для обнаружения сигналов от БАС, тепловизоры для поиска горячих батарей, металлодетекторы для обнаружения металлических частей. Звуковые сигналы от сигнализации БАС могут помочь в поиске, если БАС остался включенным.

Привлечение авиации для поиска может быть эффективным при больших зонах поиска или труднодоступной местности. Поиск с воздуха позволяет быстро обследовать большие территории, но требует координации с авиационными властями и может быть дорогостоящим.

#### **7.4.2 Взаимодействие с экстренными службами**

Уведомление служб экстренного реагирования необходимо при любых серьезных инцидентах, особенно если есть угроза для людей или имущества. Следует сообщить о характере инцидента, местоположении, потенциальных опасностях, принятых мерах.

Пожарная служба должна быть уведомлена при возможности возгорания БАС, особенно если используются Li-Po батареи большой емкости. Пожарные должны знать о специфических опасностях литиевых батарей и методах их тушения.

Полиция может потребоваться для ограждения места происшествия, регулирования движения, обеспечения безопасности. При авариях в населенных пунктах или вблизи важных объектов может потребоваться эвакуация людей из опасной зоны.

Медицинские службы необходимы при получении травм людьми или при подозрении на воздействие токсичных веществ от поврежденных батарей. Важно обеспечить быстрый доступ медицинских служб к месту происшествия.

Авиационные власти должны быть уведомлены о любых инцидентах, которые могут повлиять на безопасность воздушного движения. Это особенно важно при авариях вблизи аэропортов или на маршрутах пилотируемой авиации.

#### **7.4.3 Расследование инцидентов и извлечение уроков**

Сохранение места происшествия критически важно для объективного расследования. Не следует перемещать обломки БАС или изменять обстановку

до прибытия следователей. Важно зафиксировать первоначальное состояние места аварии фотографиями или видео.

Сбор доказательств включает извлечение данных из бортовых регистраторов, анализ телеметрических записей, опрос свидетелей, изучение метеорологических условий, анализ технического состояния БАС. Все доказательства должны быть задокументированы и сохранены.

Техническое расследование направлено на определение причин инцидента и разработку мер по предотвращению подобных случаев. Могут анализироваться конструктивные недостатки, ошибки в эксплуатации, влияние внешних факторов, эффективность систем безопасности.

Составление отчета о расследовании должно включать описание обстоятельств инцидента, анализ причин, оценку действий оператора, рекомендации по предотвращению подобных случаев. Отчет может использоваться для улучшения процедур безопасности и обучения операторов.

Извлечение уроков и распространение опыта помогает предотвратить повторение подобных инцидентов. Информация о типичных ошибках и их последствиях должна включаться в программы обучения операторов БАС. Производители могут использовать результаты расследований для улучшения конструкции БАС.

## ПРАКТИКА ПО ТЕМЕ 7

### Практическое занятие 7.1

#### **Отработка действий при возникновении неподготовленных ситуаций (3 часа)**

**Цель:** Научиться быстро и правильно реагировать на различные неподготовленные ситуации, возникающие в полете.

#### **Теоретическая часть (30 минут):**

Классификация неподготовленных ситуаций по степени опасности. Алгоритмы принятия решений в стрессовых условиях. Приоритеты действий при различных типах неподготовленных ситуаций.

#### **Практическая работа (2,5 часа):**

##### **Модуль 1: Технические неисправности (1 час 15 минут):**

###### *Имитация отказа одного двигателя (20 минут):*

- Распознавание признаков отказа двигателя
- Оценка управляемости БАС при частичной потере тяги
- Выбор места для экстренной посадки
- Выполнение контролируемой посадки с отказавшим двигателем

###### *Проблемы с системой навигации (25 минут):*

- Действия при потере GPS-сигнала
- Переход на резервные методы навигации
- Ручное пилотирование без GPS
- Поиск места для безопасной посадки

###### *Неисправности системы связи (15 минут):*

- Диагностика проблем с радиосвязью
- Попытки восстановления связи
- Действия при полной потере связи
- Использование резервных каналов связи

###### *Проблемы с энергоснабжением (15 минут):*

- Мониторинг состояния батареи
- Действия при быстром разряде батареи
- Экстренное возвращение на базу
- Подготовка к аварийной посадке при критическом заряде

##### **Модуль 2: Внешние факторы (45 минут):**

###### *Резкое ухудшение погодных условий (15 минут):*

- Оценка возможности продолжения полета
- Поиск укрытия от неблагоприятных условий
- Экстренная посадка при ухудшении видимости
- Действия при усилении ветра выше допустимых пределов

*Появление препятствий на маршруте (15 минут):*

- Обнаружение неожиданных препятствий
- Оценка возможности их облета
- Изменение маршрута в реальном времени
- Экстренное маневрирование для избежания столкновения

*Вмешательство посторонних лиц (15 минут):*

- Действия при появлении людей в зоне полета
- Предупреждение о опасности
- Изменение района полетов
- Координация с наземными службами

**Модуль 3: Комплексные сценарии (50 минут):**

*Множественные отказы (25 минут):*

- Одновременный отказ нескольких систем
- Приоритизация действий при множественных проблемах
- Использование резервных систем
- Принятие решений в условиях ограниченной информации

*Критические ситуации (25 минут):*

- Неконтролируемое снижение БАС
- Потеря ориентации в пространстве
- Столкновение с препятствием
- Пожар на борту БАС

Каждый сценарий отрабатывается на симуляторе с последующим обсуждением правильности действий и альтернативных решений.

## **Практическое занятие 7.2**

**Информирование органов ЕС ОрВД об отклонениях от плана полета (2 часа)**

**Цель:** Освоить процедуры взаимодействия с органами управления воздушным движением при возникновении нештатных ситуаций.

**Теоретическая часть (20 минут):**

Структура системы ОрВД и ее функции. Обязанности оператора БАС по информированию о нештатных ситуациях. Форматы сообщений и каналы связи.

**Практическая работа (1 час 40 минут):**

**Модуль 1: Изучение процедур связи (30 минут):**

- Изучение радиопротоколов и стандартной фразеологии
- Определение соответствующих служб для различных ситуаций
- Подготовка шаблонов сообщений для типовых ситуаций

- Изучение каналов экстренной связи

## **Модуль 2: Практические упражнения по радиосвязи (50 минут):**

### *Плановые сообщения (15 минут):*

- Уведомление о начале и окончании полетов
- Сообщение об изменениях в плане полета
- Запрос разрешения на изменение параметров полета
- Подтверждение получения указаний диспетчера

### *Сообщения о нештатных ситуациях (20 минут):*

- Уведомление о технических проблемах
- Сообщение о вынужденном отклонении от маршрута
- Запрос помощи при поиске места посадки
- Информирование об экстренной посадке

### *Экстренные сообщения (15 минут):*

- Передача сигнала бедствия
- Сообщение об аварии БАС
- Запрос экстренных служб
- Координация поисково-спасательных операций

## **Модуль 3: Ролевые игры и симуляция (20 минут):**

Студенты работают в парах, один играет роль оператора БАС, другой - диспетчера ОрВД. Отрабатываются различные сценарии взаимодействия при нештатных ситуациях.

## **Практическое занятие 7.3**

### **Имитация отказов систем БАС и отработка действий оператора (3 часа)**

**Цель:** Отработать навыки диагностики отказов и правильных действий оператора при различных типах неисправностей.

### **Теоретическая часть (20 минут):**

Методы имитации отказов в учебных целях. Безопасные способы моделирования критических ситуаций. Анализ действий оператора и критерии их оценки.

### **Практическая работа (2 часа 40 минут):**

#### **Модуль 1: Отказы системы управления (1 час):**

##### *Отказ полетного контроллера (15 минут):*

- Симуляция зависания или некорректной работы автопилота
- Переход в полностью ручной режим управления
- Поддержание управляемости без автоматической стабилизации
- Выполнение экстренной посадки в ручном режиме

*Сбои инерциальных датчиков (15 минут):*

- Имитация неправильных показаний гироскопов/акселерометров
- Распознавание некорректной работы датчиков
- Использование альтернативных источников информации
- Повторная калибровка датчиков в полете

*Отказ системы GPS (15 минут):*

- Симуляция потери GPS-сигнала
- Переход на альтернативные методы навигации
- Ручная навигация по визуальным ориентирам
- Поиск открытой местности для посадки

*Проблемы с высотомером (15 минут):*

- Имитация некорректных показаний высоты
- Использование альтернативных методов определения высоты
- Визуальная оценка высоты полета
- Осторожное снижение без точных данных о высоте

**Модуль 2: Отказы силовой установки (1 час):**

*Отказ одного двигателя (20 минут):*

- Имитация полного отказа одного двигателя
- Оценка остаточной управляемости БАС
- Компенсация дисбаланса тяги
- Выполнение аварийной посадки

*Частичная потеря тяги (15 минут):*

- Симуляция снижения мощности двигателей
- Оценка возможности поддержания полета
- Снижение полезной нагрузки для уменьшения веса
- Поиск ближайшего места для посадки

*Повреждение винтов (15 минут):*

- Имитация дисбаланса или поломки винта
- Распознавание проблемы по вибрациям и звуку
- Снижение оборотов для уменьшения вибраций
- Экстренная посадка с поврежденным винтом

*Перегрев двигателей (10 минут):*

- Мониторинг температуры двигателей
- Снижение нагрузки при перегреве
- Поиск места для охлаждения двигателей
- Принятие решения о продолжении или прекращении полета

**Модуль 3: Отказы системы энергоснабжения (40 минут):**

*Быстрый разряд батареи (15 минут):*

- Симуляция ускоренного разряда основной батареи
- Оценка оставшегося времени полета
- Экстренное возвращение к точке взлета
- Поиск ближайшего места для посадки

*Отказ элементов батареи (10 минут):*

- Имитация отказа части элементов батареи
- Мониторинг напряжения и тока
- Оценка безопасности продолжения полета
- Немедленная посадка при критическом состоянии батареи

*Перегрев батареи (15 минут):*

- Контроль температуры батареи
- Снижение нагрузки для уменьшения нагрева
- Оценка пожарной опасности
- Экстренная посадка и отключение систем

Все упражнения выполняются на учебных БАС с системами безопасности, исключающими реальную опасность.

#### **Практическое занятие 7.4**

#### **Поиск БВС после аварийной посадки (2 часа)**

**Цель:** Освоить методы организации и проведения поисковых операций при потере БАС.

**Теоретическая часть (15 минут):**

Принципы организации поисковых операций. Использование технических средств поиска. Координация действий поисковых групп.

**Практическая работа (1 час 45 минут):**

**Модуль 1: Планирование поисковой операции (30 минут):**

*Анализ исходных данных (10 минут):*

- Определение последней известной позиции БАС
- Анализ направления и скорости ветра
- Оценка оставшегося заряда батареи на момент потери связи
- Изучение топографии района поиска

*Определение зоны поиска (10 минут):*

- Расчет возможной дальности полета БАС
- Построение круга вероятного местонахождения
- Учет влияния ветра на траекторию полета
- Корректировка зоны поиска с учетом препятствий

*Организация поисковых групп (10 минут):*

- Разделение зоны поиска на секторы
- Распределение людей по поисковым группам
- Назначение руководителей групп и координатора
- Определение методов связи между группами

**Модуль 2: Технические средства поиска (45 минут):**

*GPS-навигация (15 минут):*

- Использование GPS-навигаторов для координации поиска
- Отметка обследованных участков на карте
- Определение оптимальных маршрутов поиска
- Навигация к точкам интереса

*Радиоленгажация (15 минут):*

- Использование радиоприемников для поиска сигналов БАС
- Определение направления на источник сигнала
- Триангуляция для определения местоположения
- Ограничения метода и способы их преодоления

*Визуальный поиск (15 минут):*

- Техника систематического визуального поиска
- Использование биноклей и оптических приборов
- Поиск по характерным признакам (отражения, цвета)
- Поиск следов воздействия БАС на местность

**Модуль 3: Практическая поисковая операция (30 минут):**

*Имитация потери БАС:*

Инструкторы заранее размещают имитатор БАС (макет или реальный БАС) в заданном районе. Студенты должны организовать и провести поисковую операцию:

- Анализ "полетных данных" для определения зоны поиска
- Организация поисковых групп и распределение секторов
- Систематический поиск с использованием технических средств
- Координация действий групп через радиосвязь
- Документирование процесса поиска

*Анализ эффективности поиска:*

- Оценка времени, затраченного на обнаружение объекта
- Анализ эффективности различных методов поиска
- Выявление ошибок в организации поиска
- Разработка рекомендаций по улучшению процедур

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ 7

1. Как классифицируются нештатные и аварийные ситуации при эксплуатации БАС?
2. Какие основные причины приводят к инцидентам с БАС?
3. Как диагностировать отказ одного из двигателей мультироторного БАС?
4. Какие действия должен предпринять оператор при потере радиосвязи с БАС?
5. Как выбрать место для экстренной посадки БАС?
6. Какие службы необходимо уведомить при серьезном инциденте с БАС?
7. Как организовать поиск БАС после аварийной посадки?
8. Какие меры безопасности необходимо соблюдать при работе с поврежденными Li-Ро батареями?
9. Как взаимодействовать с органами ОрВД при отклонении от плана полета?
10. Какая информация должна быть зафиксирована при расследовании инцидента?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ТЕМЕ 7

### **Основные источники:**

1. Руководство по расследованию авиационных происшествий и инцидентов. Doc 9756 AN/965. – ИКАО, 2020.
2. Руководство по предотвращению авиационных происшествий. Doc 9422 AN/923. – ИКАО, 2019.
3. Федеральные авиационные правила "Расследование авиационных происшествий и инцидентов с гражданскими воздушными судами в Российской Федерации" (утв. Приказом Минтранса России от 26.09.2012 N 362).

### **Дополнительные источники:**

4. Emergency Response Guidance for Aircraft Incidents Involving Lithium Batteries. – FAA, 2021.
5. Unmanned Aircraft System (UAS) Service Demand 2015-2035. – FAA, 2013.
6. Руководство по эксплуатации в аварийных ситуациях конкретных моделей БАС - официальная документация производителей
7. Search and Rescue Procedures. – ICAO Annex 12, 2018.
8. Портал безопасности полетов БАС. – Режим доступа: <https://www.faa.gov/uas/resources/safety/>

## ТЕМА 8. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ БАС

### Лекция 8.1 Виды авиационных работ, выполняемых с помощью БАС

#### 8.1.1 Аэрофотосъемка и картографирование

Аэрофотосъемка является одним из наиболее распространенных применений беспилотных авиационных систем в гражданской сфере. Современные БАС позволяют получать высококачественные изображения с разрешением, достаточным для создания детальных карт, планов, трехмерных моделей местности и объектов.

Плановая аэрофотосъемка выполняется с целью создания ортофотопланов - геометрически точных изображений земной поверхности. Камера при этом направлена строго вниз, а БАС движется по параллельным маршрутам с заданным перекрытием снимков. Высота полета выбирается исходя из требуемого разрешения на местности и характеристик используемой камеры.

Перспективная съемка применяется для получения изображений объектов под различными углами, что необходимо для создания трехмерных моделей зданий, сооружений, памятников архитектуры. При такой съемке камера может наклоняться под различными углами, а БАС выполняет облет объекта по сложным траекториям.

Стереофотограмметрическая съемка обеспечивает получение пар снимков одной и той же местности с разных точек, что позволяет определять высоты объектов и создавать цифровые модели рельефа. Для стереосъемки требуется точное соблюдение параметров полета и высокая точность позиционирования БАС.

Крупномасштабная съемка выполняется на малых высотах для получения детальных изображений небольших объектов. Такая съемка требует особой точности пилотирования и стабилизации камеры, поскольку любые колебания БАС приводят к смазыванию изображения.

Многовременная съемка предполагает повторную съемку одной и той же территории через определенные интервалы времени для мониторинга изменений. Это требует высокой точности воспроизведения параметров съемки и может использоваться для контроля строительства, мониторинга сельскохозяйственных культур, наблюдения за природными процессами.

#### 8.1.2 Мониторинг и инспекция объектов

Техническое обследование промышленных объектов с помощью БАС позволяет выявлять дефекты и повреждения в труднодоступных местах без

необходимости остановки производства или использования дорогостоящих подъемных механизмов. БАС могут обследовать высотные сооружения, мосты, трубопроводы, резервуары, линии электропередач.

Инспекция линий электропередач включает визуальный контроль состояния опор, проводов, изоляторов, выявление механических повреждений, коррозии, нарушений изоляции. Термовизионная съемка позволяет обнаруживать места перегрева, свидетельствующие о плохих контактах или перегрузке элементов. БАС должны поддерживать безопасное расстояние от токоведущих частей.

Обследование мостов и путепроводов с помощью БАС позволяет детально осмотреть все элементы конструкции, включая труднодоступные места под мостовыми пролетами. Высокое разрешение современных камер позволяет выявлять трещины, коррозию, деформации элементов конструкции на ранней стадии их развития.

Контроль состояния трубопроводов особенно важен для магистральных нефте- и газопроводов, проходящих через большие территории. БАС могут обнаруживать утечки, механические повреждения, несанкционированные врезки, состояние защитных покрытий. Использование специализированных датчиков позволяет обнаруживать даже небольшие утечки газа.

Мониторинг промышленных объектов включает контроль соблюдения экологических норм, выявление несанкционированных выбросов, контроль состояния промышленных площадок. Мультиспектральная съемка может выявлять загрязнения, невидимые в обычном спектре.

### **8.1.3 Поисково-спасательные операции**

Поиск пропавших людей с помощью БАС значительно расширяет возможности спасательных служб, позволяя быстро обследовать большие территории, включая труднодоступные районы. Термовизионные камеры позволяют обнаруживать людей даже в условиях ограниченной видимости или под растительным покровом.

Мониторинг чрезвычайных ситуаций включает оценку масштабов бедствий, контроль развития ситуации, координацию действий спасательных служб. БАС могут работать в условиях, опасных для пилотируемой авиации - при сильном задымлении, над зонами радиоактивного заражения, в районах активных боевых действий.

Доставка грузов в труднодоступные районы или зоны бедствий может осуществляться с помощью грузовых БАС. Это особенно важно для доставки

медикаментов, средств связи, продуктов питания в районы, отрезанные от транспортных коммуникаций наводнениями, землетрясениями, другими стихийными бедствиями.

Координация спасательных операций с воздуха позволяет руководителям операций получать актуальную информацию о ситуации, координировать действия наземных групп, обеспечивать связь между различными службами. БАС могут служить ретрансляторами сигналов связи в районах с разрушенной инфраструктурой.

Морские спасательные операции включают поиск людей в море, мониторинг состояния судов в бедствии, координацию действий спасательных судов. БАС могут сбрасывать спасательные средства, обеспечивать связь между судном в бедствии и спасательными службами.

## Лекция 8.2 Технология аэрофотосъемки

### 8.2.1 Планирование аэрофотосъемочных работ

Техническое задание на аэрофотосъемку должно содержать четкие требования к масштабу съемки, разрешению на местности, точности геопривязки, формату получаемых материалов. От качества технического задания зависит правильность планирования полетов и соответствие результатов требованиям заказчика.

Выбор масштаба съемки определяется целями использования получаемых материалов. Для общего планирования территории достаточно масштаб 1:5000-1:10000, для детального проектирования требуется масштаб 1:500-1:2000. Масштаб съемки связан с высотой полета и характеристиками используемой камеры формулой  $M = H \times p/f$ , где  $M$  - знаменатель масштаба,  $H$  - высота полета,  $p$  - размер пикселя матрицы,  $f$  - фокусное расстояние объектива.

Расчет разрешения на местности (GSD - Ground Sample Distance) выполняется по той же формуле. Для топографических работ обычно требуется разрешение 2-10 см/пиксель, для архитектурных обмеров - 1-2 см/пиксель, для общих обзорных съемок может быть достаточно 10-50 см/пиксель.

Планирование перекрытий снимков критически важно для успешной обработки материалов съемки. Продольное перекрытие (вдоль направления полета) должно составлять 70-80% для плановой съемки и до 90% для сложных объектов. Поперечное перекрытие (между соседними маршрутами) обычно составляет 60-70%. Недостаточное перекрытие приводит к появлению "мертвых зон" без стереопокрытия.

Выбор времени съемки влияет на качество получаемых изображений. Оптимальным является время с 10:00 до 14:00, когда солнце находится высоко над горизонтом и тени минимальны. При съемке в другое время необходимо учитывать направление теней и их влияние на видимость деталей объектов.

Метеорологические условия существенно влияют на качество аэрофотосъемки. Облачность не должна превышать 2-3 балла, видимость должна быть не менее 10 км, скорость ветра - не более допустимой для данного типа БАС. Дымка и туман значительно снижают контрастность изображений.

### **8.2.2 Выполнение аэрофотосъемочных полетов**

Подготовка съемочного оборудования включает калибровку камеры, настройку параметров съемки, проверку синхронизации с системой навигации БАС. Камера должна быть откалибрована для определения элементов внутреннего ориентирования - фокусного расстояния, координат главной точки, коэффициентов дисторсии.

Настройка параметров съемки зависит от условий освещения и требований к качеству изображений. Выдержка должна быть достаточно короткой для исключения смазывания при движении БАС. ISO должно быть минимальным для снижения шумов. Диафрагма выбирается для обеспечения необходимой глубины резкости.

Контроль качества съемки в процессе полета включает мониторинг резкости изображений, правильности экспозиции, отсутствия пропусков в покрытии территории. Современные системы позволяют оператору видеть получаемые изображения в режиме реального времени и при необходимости корректировать параметры съемки.

Ведение полевого журнала съемки обязательно для документирования условий выполнения работ. В журнале фиксируются время начала и окончания съемки каждого маршрута, метеорологические условия, особенности полета, замеченные проблемы, номера снимков.

Контроль перекрытий в процессе съемки может осуществляться автоматически современными системами планирования полетов. При обнаружении недостаточного перекрытия необходимо выполнить дополнительные маршруты для обеспечения полного покрытия территории.

### **8.2.3 Особенности съемки различных объектов**

Съемка протяженных линейных объектов (дорог, трубопроводов, ЛЭП) требует особого подхода к планированию маршрутов. Маршруты должны

следовать вдоль объекта с учетом его поворотов и изгибов. Ширина съемочной полосы должна обеспечивать захват не только самого объекта, но и прилегающей территории.

Архитектурная съемка зданий и сооружений часто требует комбинирования плановой и перспективной съемки. Плановая съемка обеспечивает получение планов кровель и общей ситуации, перспективная - фасадов зданий. Для сложных архитектурных объектов может потребоваться съемка с нескольких высот и под различными углами.

Съемка в условиях плотной городской застройки осложняется наличием высотных препятствий, ограниченностью воздушного пространства, влиянием зданий на GPS-навигацию. Необходимо тщательно планировать маршруты с учетом препятствий и обеспечивать резервные варианты полета.

Съемка промышленных объектов может требовать соблюдения особых требований безопасности, получения специальных разрешений, координации с службами безопасности предприятий. Необходимо учитывать наличие источников электромагнитных помех, опасных веществ, ограничений по времени работы.

Съемка в условиях сложного рельефа требует изменения высоты полета для поддержания постоянного расстояния до поверхности. Это обеспечивает равномерное разрешение снимков по всей территории съемки. В горных районах необходимо учитывать влияние рельефа на ветровые условия и безопасность полетов.

## **Лекция 8.3 Мониторинг и инспекция с применением БАС**

### **8.3.1 Техническая диагностика инженерных сооружений**

Визуальная инспекция с помощью БАС позволяет детально обследовать состояние конструкций без необходимости использования дорогостоящих подъемных средств или остановки эксплуатации объектов. Высокое разрешение современных камер позволяет выявлять дефекты размером менее 1 мм с расстояния нескольких метров.

Тепловизионная диагностика обеспечивает выявление скрытых дефектов, не видимых при визуальном осмотре. Места нарушения теплоизоляции, внутренние повреждения конструкций, дефекты электрических соединений проявляются как аномалии температурного поля. Тепловизионная съемка особенно эффективна при обследовании электрооборудования и трубопроводов.

Ультразвуковая дефектоскопия с борта БАС позволяет выявлять внутренние дефекты материалов - трещины, пустоты, расслоения. Однако этот

метод требует контакта датчика с поверхностью объекта, что ограничивает его применение на БАС специальными случаями.

Лазерное сканирование обеспечивает получение точных трехмерных моделей сооружений с точностью до нескольких миллиметров. Это позволяет выявлять деформации конструкций, отклонения от проектных размеров, контролировать геометрию сложных сооружений.

Мультиспектральная съемка может применяться для выявления коррозионных процессов, оценки состояния защитных покрытий, обнаружения утечек различных веществ. Различные материалы имеют характерные спектральные характеристики, что позволяет их идентифицировать и оценивать состояние.

### **8.3.2 Экологический мониторинг**

Мониторинг качества воздуха с помощью БАС позволяет получать данные о концентрации загрязняющих веществ в различных точках и на различных высотах. Это особенно важно для контроля выбросов промышленных предприятий, оценки экологической ситуации в городах, мониторинга природных пожаров.

Контроль водных объектов включает оценку качества воды, выявление источников загрязнения, мониторинг цветения водорослей, контроль береговой эрозии. Мультиспектральная съемка позволяет оценивать прозрачность воды, содержание взвешенных веществ, биологическую активность.

Мониторинг растительности обеспечивает оценку состояния лесов, сельскохозяйственных культур, городских зеленых насаждений. Индексы вегетации, рассчитываемые по мультиспектральным снимкам, позволяют оценивать биомассу, состояние здоровья растений, прогнозировать урожайность.

Контроль несанкционированных свалок и загрязнений территории может эффективно осуществляться с помощью БАС благодаря их мобильности и возможности обследования больших территорий. Регулярные облеты позволяют выявлять новые очаги загрязнения на ранней стадии.

Радиационный мониторинг с помощью БАС обеспечивает безопасность персонала при обследовании зараженных территорий. Специализированные датчики позволяют измерять уровень радиации, строить карты загрязнения, контролировать эффективность дезактивации.

### **8.3.3 Мониторинг чрезвычайных ситуаций**

Лесные пожары представляют особую опасность из-за быстрого распространения и высокой температуры. БАС позволяют контролировать развитие пожара, определять направление его распространения, оценивать эффективность тушения, обеспечивать координацию действий пожарных подразделений.

Наводнения требуют быстрой оценки масштабов бедствия, определения затопленных территорий, поиска пострадавших. БАС могут работать в условиях, недоступных для наземного транспорта, обеспечивать связь с отрезанными районами, доставлять необходимые грузы.

Техногенные аварии на промышленных объектах могут сопровождаться выбросом опасных веществ, пожарами, взрывами. БАС позволяют оценить масштабы аварии, контролировать распространение загрязнений, обеспечивать безопасность спасательных операций.

Землетрясения и их последствия требуют быстрой оценки разрушений, поиска пострадавших под завалами, планирования спасательных операций. БАС могут обследовать разрушенные здания, оценивать их состояние, выявлять места возможного нахождения людей.

Координация спасательных операций с использованием БАС включает обеспечение связи между различными службами, передачу видеинформации в центры управления, навигационное обеспечение наземных групп, доставку средств связи в отдаленные районы.

## **Лекция 8.4 Сельскохозяйственное применение БАС**

### **8.4.1 Мониторинг сельскохозяйственных культур**

Оценка состояния посевов с помощью БАС обеспечивает получение объективной информации о развитии растений, выявление проблемных участков, планирование агротехнических мероприятий. Мультиспектральная съемка позволяет рассчитывать различные индексы вегетации, характеризующие биомассу, содержание хлорофилла, водный стресс растений.

Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) является наиболее распространенным показателем состояния растительности. Он рассчитывается по формуле  $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ , где NIR - отражение в ближнем инфракрасном диапазоне, RED - отражение в красном диапазоне. Здоровая растительность имеет высокие значения NDVI (0.7-0.9).

Выявление болезней и вредителей на ранней стадии позволяет принимать своевременные меры защиты растений. Пораженные участки имеют характерные спектральные особенности, отличающие их от здоровых растений.

Тепловизионная съемка может выявлять водный стресс, часто предшествующий развитию болезней.

Оценка урожайности может выполняться на основе анализа биомассы растений, определяемой по спектральным характеристикам. Это позволяет планировать уборочные работы, оптимизировать логистику, прогнозировать экономические показатели.

Контроль качества выполнения агротехнических операций включает проверку равномерности посева, внесения удобрений, обработки пестицидами. БАС позволяют быстро обследовать большие площади и выявлять нарушения технологии.

#### **8.4.2 Точное земледелие**

Картирование неоднородности полей обеспечивает основу для дифференцированного применения удобрений, семян, средств защиты растений. Создание карт урожайности, содержания питательных веществ в почве, влажности позволяет оптимизировать использование ресурсов.

Переменное внесение удобрений основано на данных о потребности растений в различных участках поля. БАС могут не только получать информацию для составления карт внесения, но и непосредственно вносить удобрения с использованием специализированного оборудования.

Прецизионная обработка средствами защиты растений позволяет применять пестициды только на пораженных участках, снижая экологическую нагрузку и экономические затраты. БАС могут обеспечивать высокую точность внесения препаратов благодаря GPS-навигации и автоматическому управлению.

Мониторинг эффективности мероприятий включает контроль результатов внесения удобрений, обработки пестицидами, проведения мелиоративных работ. Регулярная съемка одних и тех же участков позволяет оценивать динамику изменений.

## ПРАКТИКА ПО ТЕМЕ 8

### Практическое занятие 8.1

#### **Планирование и выполнение авиационных работ (3 часа)**

**Цель:** Освоить полный цикл планирования и выполнения авиационных работ от получения технического задания до сдачи результатов.

#### **Теоретическая часть (30 минут):**

Структура технического задания на авиационные работы. Этапы выполнения проекта. Контроль качества на каждом этапе. Оформление результатов работ.

#### **Практическая работа (2,5 часа):**

##### **Модуль 1: Анализ технического задания и планирование работ (45 минут):**

###### *Получение и анализ ТЗ (15 минут):*

Студенты получают реальное техническое задание на выполнение аэрофотосъемки участка местности площадью 50 га с требованиями:

- Разрешение на местности: 3 см/пиксель
- Точность геопривязки:  $\pm 30$  см
- Формат результата: ортофотоплан в формате GeoTIFF
- Срок выполнения: 5 рабочих дней

###### *Расчет параметров съемки (15 минут):*

- Выбор высоты полета исходя из требуемого разрешения
- Расчет количества маршрутов и снимков
- Определение перекрытий снимков
- Оценка времени полета и количества батарей

###### *Планирование полетов (15 минут):*

- Создание полетного задания в программе планирования
- Выбор точек взлета и посадки
- Планирование опорных точек для геопривязки
- Составление календарного плана работ

##### **Модуль 2: Подготовка к выполнению полетов (30 минут):**

###### *Подготовка оборудования (15 минут):*

- Калибровка камеры и настройка параметров съемки
- Проверка синхронизации камеры с GPS
- Подготовка запасных батарей и карт памяти
- Проверка работоспособности всех систем БАС

###### *Рекогносцировка района работ (15 минут):*

- Обследование участка съемки

- Выбор и закрепление опорных точек
- Оценка препятствий и ограничений
- Координация с местными властями при необходимости

**Модуль 3: Выполнение съемочных полетов (1 час 15 минут):**

*Полевые работы (1 час):*

- Разворачивание оборудования на местности
- Выполнение полетов по запланированным маршрутам
- Контроль качества получаемых снимков
- Ведение полевого журнала работ
- Измерение координат опорных точек

*Контроль качества материалов (15 минут):*

- Проверка покрытия всей территории съемки
- Контроль перекрытий между снимками
- Оценка резкости и экспозиции изображений
- Проверка геопривязки снимков

Каждая группа студентов (2-3 человека) выполняет съемку своего участка и готовит полевые материалы для последующей обработки.

**Практическое занятие 8.2.**

**Настройка полезной нагрузки для различных задач**

**Цель:** Научиться настраивать различные типы полезной нагрузки для решения специфических задач мониторинга и инспекции.

**Теоретическая часть (20 минут):**

Типы полезной нагрузки и их применение. Особенности настройки различных датчиков. Калибровка специализированного оборудования.

**Практическая работа (1 час 40 минут):**

**Модуль 1: Настройка фотограмметрической съемки (30 минут):**

*RGB-камера для картографирования:*

- Калибровка камеры для определения дисторсии
- Настройка параметров съемки (ISO, выдержка, диафрагма)
- Синхронизация с GPS для геопривязки снимков
- Тестирование качества получаемых изображений

*Настройка интервальной съемки:*

- Расчет интервала съемки исходя из скорости полета
- Настройка автоматического управления камерой
- Проверка объема получаемых данных
- Тестирование в полетных условиях

## **Модуль 2: Настройка тепловизионной съемки (35 минут):**

### *Калибровка тепловизора:*

- Настройка диапазона измеряемых температур
- Калибровка по эталонным источникам тепла
- Настройка цветовой палитры отображения
- Компенсация влияния внешних факторов

### *Практическая тепловизионная съемка:*

- Обследование электрооборудования
- Поиск утечек тепла в зданиях
- Выявление скрытых дефектов конструкций
- Анализ полученных термограмм

## **Модуль 3: Настройка мультиспектральной системы (35 минут):**

### *Калибровка мультиспектральной камеры:*

- Настройка спектральных каналов
- Калибровка по эталонным отражающим поверхностям
- Синхронизация каналов съемки
- Проверка качества регистрации каналов

### *Съемка тестовых объектов:*

- Съемка растительности для расчета индексов
- Съемка различных материалов
- Анализ спектральных характеристик объектов
- Расчет вегетационных индексов

Студенты работают с реальным оборудованием, изучая особенности настройки и эксплуатации различных типов датчиков.

## **Практическое занятие 8.3**

### **Выполнение полетов для решения практических задач (4 часа)**

**Цель:** Выполнить полный цикл авиационных работ для решения конкретных практических задач различных отраслей.

### **Теоретическая часть (20 минут):**

Специфика выполнения работ для различных отраслей. Требования заказчиков и стандарты качества. Особенности работы в различных условиях.

### **Практическая работа (3 часа 40 минут):**

**Задача 1: Техническая инспекция промышленного объекта (1 час 20 минут):**

*Объект:* Промышленное здание с технологическим оборудованием

**Цель:** Выявление дефектов кровли, фасадов, технологического оборудования

*Планирование инспекции (20 минут):*

- Анализ объекта и выявление критических зон
- Планирование маршрутов облета здания
- Выбор ракурсов съемки для различных элементов
- Координация с администрацией объекта

*Выполнение съемки (45 минут):*

- Детальная съемка кровли в плановом ракурсе
- Перспективная съемка фасадов здания
- Инспекция технологического оборудования
- Тепловизионная съемка для выявления дефектов

*Анализ результатов (15 минут):*

- Выявление дефектов и повреждений
- Классификация дефектов по степени опасности
- Подготовка рекомендаций по устраниению
- Составление отчета об инспекции

**Задача 2: Мониторинг сельскохозяйственных культур (1 час 20 минут):**

*Объект:* Поле с сельскохозяйственными культурами площадью 10 га

*Цель:* Оценка состояния посевов, выявление проблемных зон

*Планирование мониторинга (15 минут):*

- Выбор оптимального времени съемки
- Планирование маршрутов для полного покрытия поля
- Настройка мультиспектральной камеры
- Подготовка эталонных участков для калибровки

*Выполнение съемки (50 минут):*

- Мультиспектральная съемка всего поля
- Детальная съемка проблемных участков
- Наземные измерения для контроля
- Фотодокументирование характерных участков

*Обработка и анализ (15 минут):*

- Расчет индексов вегетации (NDVI, GNDVI)
- Построение карт состояния посевов
- Выявление зон стресса растений
- Рекомендации по агротехническим мероприятиям

**Задача 3: Поисково-спасательная операция (1 час):**

*Сценарий:* Поиск условно пропавшего человека в лесном массиве

*Цель:* Организация и проведение поисковой операции

*Планирование поиска (15 минут):*

- Анализ района поиска и определение приоритетных зон
- Планирование маршрутов поискового полета
- Настройка тепловизионного оборудования
- Координация с наземными поисковыми группами

*Выполнение поиска (35 минут):*

- Систематический облет поисковой зоны
- Детальное обследование перспективных участков
- Тепловизионный поиск в условиях ограниченной видимости
- Передача координат обнаруженных объектов

*Координация спасательных действий (10 минут):*

- Наведение наземных групп на обнаруженные объекты
- Мониторинг продвижения спасательных групп
- Обеспечение связи между различными службами
- Документирование хода операции

Все задачи выполняются в реальных условиях с использованием профессионального оборудования. Студенты работают в группах, выполняя различные роли - оператор БАС, специалист по обработке данных, координатор операции.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ 8

1. Какие основные виды авиационных работ выполняются с помощью БАС?
2. Как рассчитать параметры аэрофотосъемки для получения требуемого разрешения?
3. Какие типы перекрытий используются при аэрофотосъемке и зачем они нужны?
4. Какие преимущества дает использование БАС для технической инспекции сооружений?
5. Как настроить тепловизионную камеру для инспекции электрооборудования?
6. Что такое индекс NDVI и как он рассчитывается?
7. Какие особенности имеет мониторинг чрезвычайных ситуаций с помощью БАС?
8. Как организовать поисково-спасательную операцию с использованием БАС?
9. Какие требования предъявляются к качеству аэрофотосъемочных материалов?
10. Как обеспечить безопасность при выполнении авиационных работ в населенных пунктах?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов (ГКИНП (ГНТА)-02-036-02). – М.: ЦНИИГАиК, 2002.
2. Руководство по аэрофотосъемке и фотограмметрии при инженерных изысканиях для строительства. – М.: Стройиздат, 2009.
3. *Лобанов А.Н.* Фотограмметрия: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
4. *Берлянт А.М.* Картография: Учебник для вузов. – М.: Аспект Пресс, 2001. – 336 с.
5. *Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.* Аэрокосмические методы географических исследований: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
6. Руководство по применению беспилотных авиационных систем в различных отраслях экономики. – М.: Росавиация, 2019.
7. Pix4D Knowledge Base. – Режим доступа: <https://support.pix4d.com/>

8. Agisoft Metashape User Manual. – Режим доступа:  
<https://www.agisoft.com/support/>

9. Портал "Геоинформационные технологии". – Режим доступа:  
<https://gis-lab.info/>

7. Международная ассоциация фотограмметрии и дистанционного зондирования (ISPRS). – Режим доступа: <https://www.isprs.org/>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное учебное пособие представляет собой комплексный курс подготовки операторов мульти rotorных беспилотных авиационных систем, охватывающий все основные аспекты профессиональной деятельности - от нормативно-правовых основ до практического выполнения авиационных работ.

Программа курса построена по принципу последовательного усложнения материала: от изучения теоретических основ к практическому освоению навыков пилотирования и выполнения специализированных задач. Особое внимание уделено вопросам безопасности полетов, действиям в нештатных ситуациях, что критически важно для формирования ответственного отношения к эксплуатации БАС.

Практическая направленность курса обеспечивается большим объемом практических занятий (88 часов из 144), включающих работу с реальным оборудованием, выполнение полетов в различных условиях, отработку навыков в условиях, максимально приближенных к реальной профессиональной деятельности.

Междисциплинарный подход к обучению позволяет сформировать у слушателей комплексное понимание всех аспектов эксплуатации БАС - технических, правовых, методических, что необходимо для успешной профессиональной деятельности в быстро развивающейся отрасли беспилотной авиации.

Постоянное обновление нормативной базы и технических решений в области БАС требует от операторов непрерывного профессионального развития. Данное пособие закладывает фундаментальные знания и навыки, на основе которых специалисты смогут успешно адаптироваться к изменениям в отрасли и осваивать новые технологии.

## **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 в информационных технологиях, систем виртуального моделирования.

*Электронное учебное издание  
сетевого распространения*

**Кокунин Петр Анатольевич  
Чикрин Дмитрий Евгеньевич  
Шиндор Ольга Владимировна  
Егорчев Антон Александрович**

## **ОПЕРАТОР МУЛЬТИРОТОРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**Учебное пособие**

Корректор **Н.М. Корюков**

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