

Былинцев Алексей Глебович

*Студент института автоматизации и электронного приборостроения,
Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет
им. А.Н. Туполева - КАИ,
E-mail: alekseibylintsev@yandex.ru*

Bylintsev Aleksei Glebovich

*Student of the Institute of Automation and Electronic Instrumentation
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI
E-mail: alekseibylintsev@yandex.ru*

Автоматизация полета мультимоторных беспилотных авиационных систем Automation of flight for multi-engine unmanned aerial systems

Аннотация:

В данной статье рассматриваются актуальные вопросы автоматизации полета мультимоторных беспилотных авиационных систем (БАС). Проанализированы ключевые технологические компоненты системы автоматического управления (САУ), включая сенсорный комплекс, бортовой вычислитель и алгоритмы управления. Особое внимание уделено задачам стабилизации, навигации и управления полетом в различных режимах, включая взлет, посадку и выполнение миссий. Рассмотрены современные подходы к построению отказоустойчивых систем, обеспечивающих безопасную эксплуатацию мультимоторных БАС при частичном выходе из строя силовой установки. Приводятся перспективные направления развития, такие как интеграция искусственного интеллекта для автономного принятия решений и роевые взаимодействия.

Ключевые слова:

Беспилотный летательный аппарат, мультимоторный БПЛА, автоматизация, система автоматического управления

Abstract:

This article discusses the current issues of flight automation for multi-engine unmanned aerial systems (UAS). It analyzes the key technological components of the automatic control system (ACS), including the sensor suite, onboard computer, and control algorithms. Special attention is given to the tasks of stabilization, navigation, and flight control in various modes, including takeoff, landing, and mission execution. The article also explores modern approaches to building fault-tolerant systems that ensure the safe operation of multi-engine UAS in the event of partial failure of the power plant. Promising areas of development are presented, such as the integration of artificial intelligence for autonomous decision-making and swarm interactions.

Keywords:

Unmanned aerial vehicle, multi-engine UAV, automation, automatic control system

Введение:

Беспилотные авиационные системы мультимоторного типа (мультикоптеры, конвертопланы) получили широкое распространение в различных сферах человеческой деятельности: от мониторинга и картографии до логистики и аэрофотосъемки. Их ключевыми преимуществами являются способность к вертикальному взлету и посадке (VTOL), зависанию в заданной точке и высокая маневренность. Однако управление таким аппаратом, имеющим несколько степеней свободы и сложную динамику, является нетривиальной задачей для оператора-человека.

Это обуславливает необходимость глубокой автоматизации процессов управления. Автоматизация не только снижает нагрузку на оператора и минимизирует влияние человеческого фактора, но и позволяет выполнять сложные миссии с высокой точностью, повышает безопасность полета за счет реализации алгоритмов отказоустойчивости и обеспечивает стабилизацию аппарата в неблагоприятных внешних условиях (порывы ветра).

Целью данной работы является систематизированный анализ архитектуры и ключевых технологий автоматизации полета мультимоторных БАС.

Основная часть

Современная САУ мультимоторного БПЛА представляет собой многоуровневую систему, в которую входят: Сенсорный комплекс: Набор датчиков, предоставляющих данные о состоянии аппарата и окружающей среде. Основными являются:

1. Инерциальная измерительная система (IMU): включает акселерометры и гироскопы, измеряющие линейные ускорения и угловые скорости.
2. Магнитометр: определяет ориентацию аппарата в пространстве относительно магнитного поля Земли.
3. ГНСС-приемник (GPS/ГЛОНАСС): обеспечивает данные о местоположении, скорости и высоте.
4. Барометр: используется для точного определения высоты.
5. Опционально: дальнометры, лидары, камеры машинного зрения для задач одновременной локализации и картографирования (SLAM).

Бортовой вычислитель (полетный контроллер): Является «мозгом» системы. На нем работает программное обеспечение (например, PX4, ArduPilot), которое реализует алгоритмы оценки состояния и управления. Контроллер обрабатывает данные с сенсоров, вычисляет необходимые управляющие воздействия и передает команды на исполнительные механизмы. Исполнительные механизмы: Электронные регуляторы хода (ESC), которые получают сигналы от контроллера и управляют оборотами бесколлекторных двигателей, тем самым изменяя тягу каждого винта.

Алгоритмы управления и навигации

Основой автоматизации являются алгоритмы, работающие в режиме реального времени.

1. **Оценка состояния (Filtering):** Для получения точной и отфильтрованной от шумов информации о ориентации (крене, тангаже, рыскании) и положении аппарата используется фильтр Калмана или его нелинейные модификации (Complementary Filter, Extended Kalman Filter - EKF). EKF интегрирует данные от IMU, ГНСС, барометра и магнитометра, компенсируя дрейф и погрешности каждого датчика.
2. **Контур стабилизации (Stabilization):** Реализуется с помощью ПИД-регуляторов (Пропорционально-Интегрально-Дифференциальных). Существует каскад регуляторов:

1. **Внутренний контур:** Отвечает за стабилизацию угловой скорости. Быстрый и высокочастотный.
 2. **Внешний контур:** Отвечает за стабилизацию углов ориентации (крена, тангажа). Получает задание от контура управления положением.
 3. **Контур управления положением:** Удерживает аппарат в заданной точке в пространстве или следует по заданному маршруту, используя данные ГНСС и барометра.
3. **Выполнение миссии (Mission Management):** Пользователь через наземную станцию управления (GCS) задает миссию — набор путевых точек. Бортовое ПО автоматически строит маршрут, рассчитывает траекторию и последовательно выполняет полет от точки к точке, стабилизируя аппарат на каждом отрезке пути.

Обеспечение отказоустойчивости

Для мультимоторных БАС критически важна возможность продолжать полет или безопасно завершить его при отказах. Алгоритмы распределения управления (Control Allocation). Для мультикоптеров с количеством моторов более четырех (гексакоптеры, октокоптеры) разработаны алгоритмы, которые при отказе одного или нескольких двигателей переназначают управляющие моменты на исправные моторы. Это позволяет компенсировать дисбаланс тяги и сохранить управляемость, хотя и с потерей грузоподъемности и маневренности. Резервирование систем: Использование дублированных сенсоров (например, двух IMU и двух ГНСС-приемников) позволяет системе идентифицировать и исключать неисправный датчик, продолжая полет. Одним из наиболее значимых трендов в развитии автоматизации БПЛА является переход от навигации, исключительно reliant на спутниковые системы, к комплексным решениям, основанным на данных компьютерного зрения и лидаров. Навигация в условиях отсутствия GPS: Для полетов внутри помещений, в городских каньонах или под густым лесным пологом, где сигнал ГНСС недоступен или нестабилен, используются алгоритмы Visual Inertial Odometry (VIO). VIO комбинирует данные с камеры и инерциальных датчиков (IMU) для оценки положения и ориентации аппарата относительно окружающего пространства. Это позволяет БПЛА с высокой точностью отслеживать свои перемещения без внешних reference-систем. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping): Алгоритмы SLAM решают две взаимосвязанные задачи: построение карты неизвестной среды и одновременное определение местоположения аппарата на этой карте. Реализация SLAM на борту мультимоторного БПЛА открывает возможности для полной автономии в неструктурированной среде. Например, аппарат может самостоятельно обследовать здание, составляя его 3D-карту, или перемещаться по сложному промышленному объекту, избегая столкновений с новыми, ранее неизвестными препятствиями.

Планирование оптимальных траекторий

Простого следования по путевым точкам недостаточно для сложных миссий. Современные системы автоматизации решают задачу **планирования оптимальных траекторий**. Вместо прямолинейных отрезков между точками генерируются гладкие, динамически feasible траектории, которые учитывают:

1. **Кинематические ограничения аппарата:** Минимальные радиусы разворота, максимальные углы крена.

2. **Динамические ограничения:** Максимальные ускорения и скорости.
3. **Критерии оптимальности:** Часто используется минимизация **производной тяги (snap)** — четвертой производной положения по времени. Траектории с минимальным snap являются плавными и энергоэффективными, что напрямую увеличивает время полета и снижает износ конструкций.

Заключение

Автоматизация полета мультимоторных БАС является зрелой, но продолжающей активно развиваться областью. Современные открытые программно-аппаратные платформы, такие как PX4 и ArduPilot, предоставляют надежные и проверенные решения для стабилизации, навигации и управления миссией. Дальнейшие исследования и разработки в этих направлениях позволят создать новые интеллектуальные и надежные беспилотные системы, способные решать еще более сложные задачи с минимальным вмешательством человека.

Список литературы

1. Bresciani, T. (2008). Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter.
2. PX4 Autopilot User Guide. (2023). PX4 Development Team
3. Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S. L., & Tomlin, C. J. (2007). Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment. In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit.
4. Mahony, R., Kumar, V., & Corke, P. (2012). Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control of Quadrotor. IEEE Robotics & Automation Magazine, 19(3), 20-32.
5. Mellinger, D., & Kumar, V. (2011). Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
6. Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. Princeton University Press.
7. Сафонов, К. А., & Иванов, Д. В. (2020). Алгоритмы отказоустойчивого управления для мультироторных беспилотных летательных аппаратов. Известия ЮФУ.


АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАЙМСТВОВАНИЙ


ИИТЦ МГУ

ТАРИФЫ
 Демо ⚠️
 ИЗМЕНИТЬ

ПРОВЕРКИ
 1 в 6 минут ⌚
 ПРОВЕРИТЬ ДОКУМЕНТ

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ 🔔
 alekseibylintsev@yandex.ru
 ВОЙТИ В КАБИНЕТ


МЕНЮ

ru ▼

ГЛАВНАЯ / КАБИНЕТ

Кабинет

ПРОВЕРИТЬ

ПРИМЕР ОТЧЕТА

ПАПКИ

Все документы

Корневая папка 1

🔍 Поиск по названиям документов

🗑 УДАЛЕННЫЕ ДОКУМЕНТЫ

1/1

📄 ПЕРЕМЕСТИТЬ
 🗑 УДАЛИТЬ
 📋 ИСТОРИЯ ОТЧЕТОВ

Название	Статус	Дата загрузки	Оригинальность
☐ .PDF Былинцев Статья	✅	05 Окт 2025 20:00	100%

ПОСМОТРЕТЬ РЕЗУЛЬТАТЫ

⚠️ Титульный лист, библиография и приложения искажают результат? Подключите учет структуры документа и проверяйте только нужные разделы.

КУПИТЬ ПРОВЕРКИ

