

*А.Г. Панкратов<sup>1</sup>, Н.В. Решетникова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ**

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности и алгоритмы управления автономным беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) роторного типа. Приведен перечень основных задач, решаемых встроенным автопилотом. Рассмотрена архитектура автономной системы управления БПЛА.

**Ключевые слова:** автономная система управления, квадрокоптер, БПЛА, компьютерное зрение, системы автоматического управления.

*A. G. Pankratov<sup>1</sup>, N. V. Reshetnikova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

## **FEATURES OF DESIGNING AN AUTONOMOUS CONTROL SYSTEM FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE**

**Abstract.** The article discusses the features and algorithms of automatic control of a rotary-type unmanned aerial vehicle (UAV). The list of the main tasks solved by the built-in autopilot is given. The architecture of the autonomous UAV control system is considered.

**Keywords:** autonomous control system, quadcopter, UAV, computer vision, control theory.

### **Введение**

В настоящее время на рынке представлен большой выбор систем управления беспилотными летательными аппаратами, определяемых типом и перечнем решаемых задач. В силу научно-технического прогресса все чаще человеческий труд заменяется машинным. Большинство сфер применения не просто нуждаются в постоянном использовании летательных аппаратов, но и предъявляют высокие технические требования к эксплуатационным свойствам.

Активное применение дистанционно-пилотируемых аппаратов способствовало выявлению ряда проблем, таких как: недостаточная маневренность, малая полезная нагрузка, невозможность автономного пилотирования. Необходимость решения данных вопросов приводит к совершенствованию алгоритмов управления БПЛА.

Актуальность работы обусловлена тем, что предварительное рассмотрение уже имеющихся типов управления беспилотными летательными аппаратами облегчает и структурирует дальнейшее моделирование и проектирование системы управления.

### **Классификация БПЛА**

Дистанционно-пилотируемые аппараты имеют несколько классификаций, основной является разделение по виду крыла, выделяются следующие типы [1]:

1. самолетного типа – представляет собой конструкцию «жесткого крыла», подъемная сила создается неподвижным каркасом БПЛА, сила тяги с помощью ротора;
2. мультироторного типа – все моменты создаются при помощи одного или нескольких роторов;
3. аэростатического типа – подъемной является Архимедова сила, действующая на баллон с газом;

4. гибридного типа – является гибридом между фиксированным (самолетного типа) и поворотным (мультироторного типа) крылом.

В зависимости от типа БПЛА варьируется система управления и технические характеристики машины. Дистанционно-пилотируемые аппараты самолетного и гибридного типа отличаются высокой грузоподъемностью и скоростью, аэростатический тип примечателен своей дальностью полета и надежностью, мультироторные беспилотники обладают хорошей маневренностью [2].

Для дальнейшего рассмотрения систем управления был выбран БПЛА мультироторного типа с четырьмя двигателями (квадрокоптер) [3] в связи с легкостью моделирования и контроля.

### Режимы полета

С развитием технологий происходит модернизация и автоматизация режимов полета, изначально спроектированные системы управления подлежат изменениям и корректировкам. Общая схема системы управления беспилотным летательным аппаратом представляет из себя программно-аппаратный комплекс [4], защищенную линию для передачи сигнала и сам дистанционно-пилотируемый аппарат (рис. 1).

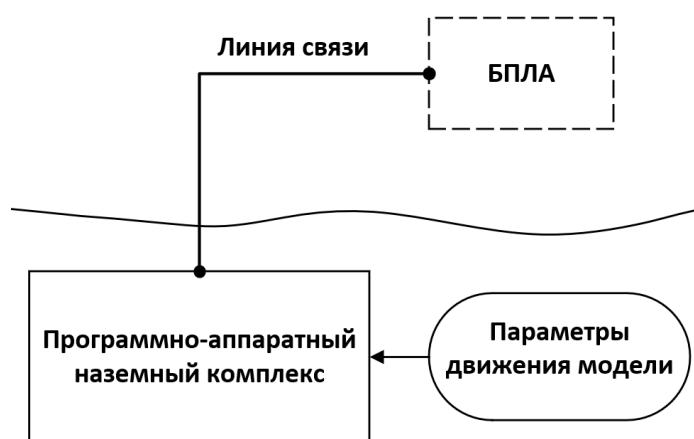


Рис. 1. Блок-схема системы управления беспилотным летательным аппаратом

В качестве линии связи может выступать засекреченная спутниковая или радиосвязь [5]. Беспилотный летательный аппарат состоит из автоматизированной системы управления и подходящих к нему вспомогательных датчиков и блоков [6], таких как приемо-передающий, исполнительный, навигационный, обеспечивающих позиционное управление и стабилизацию в пространстве (рис. 2).

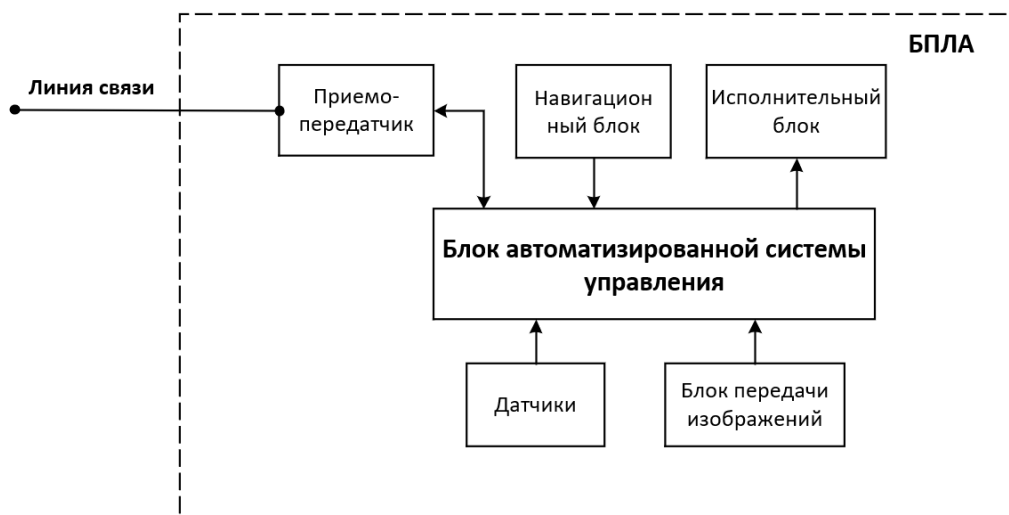


Рис. 2. Блок-схема архитектуры беспилотного летательного аппарата

В качестве основных режимов полета выделяют [7, 8]:

1. Ручной режим – оператор управляет беспилотником;
2. Режим удержания высоты – на основании информации, полученной с датчиков, блок автоматизированной системы управления, обеспечивает поддержание высоты, набранной на момент включения режима;
3. Режим стабилизации – блок автоматического управления обеспечивает удержание в воздухе за счет стабилизации угла курса, нулевого крена и тангажа;
4. Режим поддержания позиции по *GPS* - блок автоматического управления обеспечивает удержание позиции используя данные *GPS*;
5. Режим возврата на исходную точку – блок автоматического управления обеспечивает возврат на точку взлета с поддержанием позиции;
6. Режим автономного полета по точкам – блок автоматического управления обеспечивает прохождение по заранее заданному маршруту;
7. Режим автоматического взлета и посадки.

Наиболее предпочтительным для рассмотрения и дальнейшего проектирования является режим полета по точкам с автоматическим взлетом и посадкой, обеспечивающий полную автономность беспилотного летательного аппарата даже в сложных эксплуатационных условиях.

### Автономная система управления

Полностью автономная система управления беспилотным летательным аппаратом способствует исключению оператора из процесса пилотирования, уменьшает вероятность перехвата и обнаружения летательного средства. Наличие полного автопилота не требует наземной инфраструктуры, снижает эксплуатационные издержки и требования к персоналу.

Прежде чем перейти к рассмотрению архитектуры автономной системы управления дистанционно-пилотируемого аппарата необходимо выполнить обзор, сравнительный анализ открытых систем, обеспечивающих автоматическое управление. В качестве рассматриваемых вариантов были выбраны следующие системы:

- *ArduPilot Mega 2.5+*;
- *MultiWii SE v2.5*;
- *Openpilot CC3D*.

*ArduPilot Mega 2.5+* спроектирована на основе *Arduino*, оснащена производителем микроконтроллером *ATMEGA2560*, акселерометром, гироскопом, барометром и компасом [9]. Система *MultiWii SE v2.5* также основана на *Arduino*, с похожим микроконтроллером *ATMega*

328P. *Openpilot CC3D* имеет более мощный микроконтроллер *stm32f103c8t6*, но ограничена в количестве датчиков (акселерометр и гироскоп).

Характеристики и возможности данных контроллеров приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики открытых систем			
Характеристика	<i>ArduPilot Mega 2.5+</i> ;	<i>MultiWii SE v2.5</i>	<i>Openpilot CC3D</i>
Микроконтроллер	<i>ATMEGA2560</i>	<i>ATMega 328P</i>	<i>stm32f103c8t6</i>
Датчики	Акселерометр-гироскоп, барометр, компас	Акселерометр-гироскоп, барометр, компас	Акселерометр-гироскоп
Вес	28 грамм	10 грамм	8 грамм
Автономность	есть	есть	нет
Полет по точкам	есть	есть	нет
Автовозврат	есть	есть	есть
Наличие ПО	<i>Windows/Mac/Linux</i>	<i>Windows/Mac/Linux</i>	<i>Windows/Mac/Linux</i>

Для проектирования автономного управления комплекс *ArduPilot Mega 2.5+* является лучшим из открытых систем в связи со своей невысокой стоимостью и подходящими техническими возможностями.

Система автоматического управления беспилотного летательного аппарата, построенная на основе комплекса *ArduPilot Mega 2.5+* включает в себя радиостанцию для вспомогательного ручного управления, блок автопилота *ArduPilot*, дополнительный бортовой компьютер *PandaBoard* для анализа изображений и данных с датчиков, *USB*-камеру (рис. 3). *PandaBoard* был выбран в качестве компьютерной платформы для анализа, в связи с возможностью поддержки кода *Simulink* при моделировании и наличием слотов для подключения камеры [10]. *ArduPilot Mega 2.5+* в своем составе содержит флэш память, блок инерциальных измерителей (трехосевой акселерометр, гироскоп и магнитометр) для определения рысканья, барометр для измерения высоты полета и *GPS*-приемник для определения положения в пространстве, поэтому дополнительные блоки навигации и датчиков не требуются. Связь между автопилотом *ArduPilot Mega 2.5+* и встроенным дополнительным бортовым компьютером *PandaBoard* обеспечивается посредством *Ethernet*.

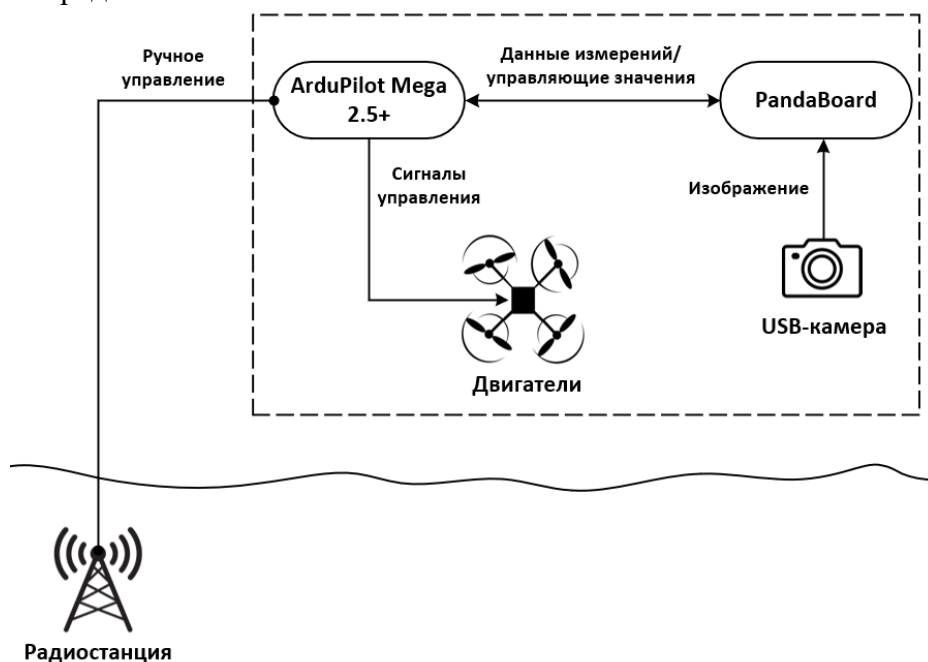


Рис. 3. Блок-схема системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом

В ручном режиме пилотирования регулирование положения (крен, тангаж) и силы тяги осуществляется наземной радиостанцией (оператором). При автономном управлении беспилотным летательным устройством данные измерений с датчиков автопилота *ArduPilot* посылаются на дополнительный бортовой компьютер *PandaBoard*, где происходит анализ и распознавание заранее заданных объектов, генерируются управляющие значения. Данные, полученные с дополнительного бортового компьютера, используются для настройки ПИД-регулятора [11, 12] в блоке *ArduPilot Mega 2.5+* (рис. 4).

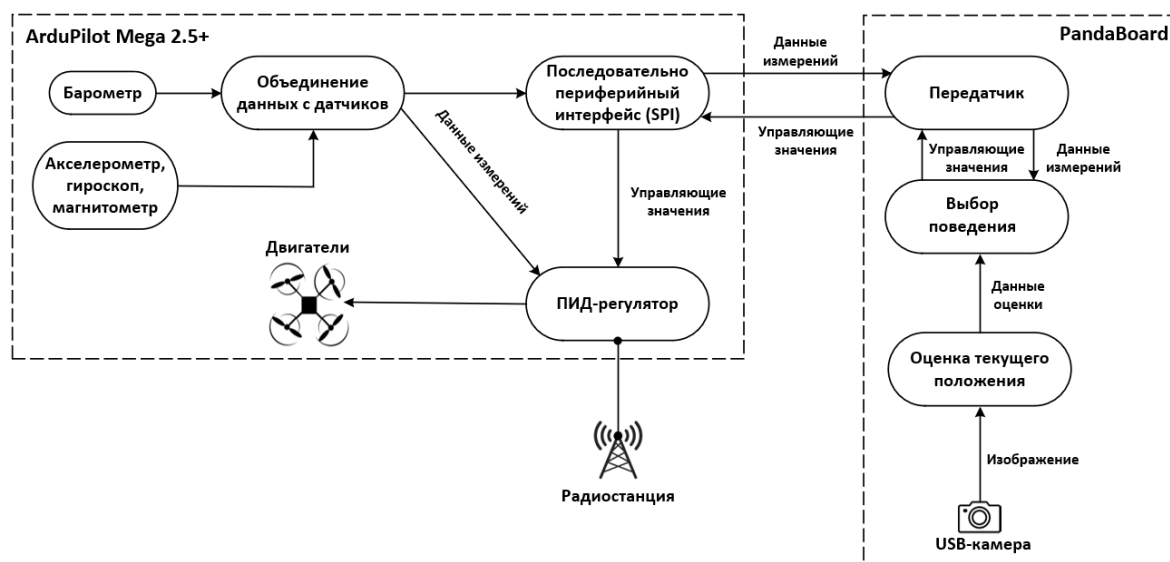


Рис. 4. Блок-схема функционирования автопилота и дополнительного бортового компьютера

Основными требованиями, предъявляемыми к данной системе, являются минимальное время переходного процесса и отсутствие перерегулирования (апериодический процесс) при выполнении моделирования ПИД-регулятора [13].

Архитектура приведенной выше системы автономного управления беспилотным летательным аппаратом удовлетворяет всем предъявляемым требованиям [14]:

- автоматическое пилотирование;
- точное следование траектории;
- стабилизация углов ориентации;
- простота в использовании.

**Заключение.** Из результатов анализа систем управления беспилотных летательных аппаратов видно, что при большом выборе дистанционно-пилотируемых устройств их применение ограничено функционалом, принадлежность к определенному классу определяет область применения беспилотника.

Большинство ныне используемых БПЛА пилотируются оператором, функции автономности присутствуют в единичных случаях. Полностью автономный беспилотный аппарат позволил бы исключить фактор человеческой ошибки при управлении, снизить вероятность обнаружения и перехвата летательного средства. Ограниченность применения автопилота связана с пониженной точностью, недостаточным уровнем стабилизации дистанционно-пилотируемого устройства. Данные условия требуют доработки и проектирования полностью автономной системы управления беспилотным летательным аппаратом.

Автономные системы управления БПЛА в большинстве случаев имеют похожую архитектуру и отличаются лишь комплектующими. В данной статье была рассмотрена система управления, строящаяся преимущественно на не дорогих и точных датчиках и блоках. Основ-

ной особенностью данной структуры является возможность доработки и корректировки позиционного расположения благодаря настройке ПИД-регулятора. Контроллер воздействует пропорционально отклонению, интегралу от этого отклонения и скорости изменения настраиваемой величины, передает поправку на соответствующие роторы [15].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безруков С. И., Гумелев В. Ю., Пархоменко А. В., Филиппов Д. А., Классификация беспилотных летательных аппаратов (в контексте современных войн в арабском мире). – Рязань: РВВДКУ имени генерала армии В.Ф. Маргелова, 2020. – 16 с.
2. Каршов Р. С., Классификация беспилотных летательных аппаратов. – Зеленоград: МИЭТ, 2018. – 3 с.
3. Kotarski, D.; Pranjić, M.; Piljek, P.; Vjažić, T. Multirotor UAV – a Multidisciplinary Platform for Teaching Mechatronics Engineering. Preprints 2023
4. Савёлов П. И., Гу Пэнхао, Лобатый А. А., Особенности моделирования операторного управления беспилотным летательным аппаратом и его целевой нагрузкой. – Минск: БНТУ, 2022. – 6 с.
5. Barua, N. SATCOM, The Future UAV Communication Link. Preprints 2022
6. Семенец В. О., Трухин М. П., Основные параметры систем управления беспилотными аппаратами. – Екатеринбург: УрТИСИ СибГУТИ, 2018. – 6 с.
7. Mesut Bilici1, Mehmet Karali. Modeling and Control of a Fixed-Wing High-Speed Mini-UAV. International Journal of Aviation Science and Technology, Volume 3, Issue 1, 2022, 35-44.
8. Z. Zuo, C. J. Liu, Q.-L. Han, and J. Song, “Unmanned aerial vehicles: Control methods and future challenges,” IEEE/CAA J. Autom. Sinica, vol. 9, no. 4, pp. 601–614, Apr. 2022
9. Denis Kotarski, Petar Piljek, Josip Kasać, Design Considerations for Autonomous Cargo Transportation Multirotor UAVs, Self-driving Vehicles and Enabling Technologies 2020.
10. Tripicchio, P.; Unetti, M.; D’Avella, S.; Avizzano, C.A. Smooth Coverage Path Planning for UAVs with Model Predictive Control Trajectory Tracking. Electronics 2023, 12, 2310.
11. Aminurrashid Noordin; Mohd Arifanan Mohd Basri; Zaharuddin Mohamed; Izzuddin Mat Lazim, Adaptive PID Controller Using Sliding Mode Control Approaches for Quadrotor UAV Attitude and Position Stabilization, Arabian Journal for Science and Engineering 2020.
12. Tang, W.; Wang, L.; Gu, J.; Gu, Y. Single neural adaptive PID control for small UAV micro-turbojet engine. Sensors 2020, 20, 345.
13. Баранов О. В., Алгоритм настройки стабилизирующего ПИД-регулятора квадрокоптера. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2021. – 10 с.
14. Набиев Р. Н., Требования к беспилотным летательным аппаратам на мультиротационной основе. Авиакосмическое приборостроение. - 2018. - №9, с. 3-11
15. Citation: Melo, A.G.; Andrade, F.A.A.; Guedes, I.P.; Carvalho, G.F.; Zachi, A.R.L.; Pinto, M.F. Fuzzy Gain-Scheduling PID for UAV Position and Altitude Controllers. Sensors 2022, 22, 2173.

### REFERENCES

1. Bezrukov S. I. I., Gumelev V. Yu. V. V., Filippov D. A., Classification of unmanned aerial vehicles (in the context of modern wars in the Arab world). - Ryazan: RVVDKU named after Army General V.F. Margelov, 2020. - 16 с.
2. Karshov R. S., Classification of unmanned aerial vehicles. - Zelenograd: MIET, 2018. - 3 с.
3. Kotarski, D.; Pranjić, M.; Piljek, P.; Vjažić, T. Multirotor UAV – a Multidisciplinary Platform for Teaching Mechatronics Engineering. Preprints 2023
4. Savelov P. I., Gu Penghao, Lobatyi A. A., Features of modeling of operator control of unmanned aerial vehicle and its target load. - Minsk: BNTU, 2022. - 6 с.
5. Barua, N. SATCOM, The Future UAV Communication Link. Preprints 2022

6. Semenets V. O., Trukhin M. P., Basic parameters of control systems for unmanned vehicles. - Ekaterinburg: UrTISI SibGUTI, 2018. - 6 с.
7. Mesut Bilici1, Mehmet Karali. Modeling and Control of a Fixed-Wing High-Speed Mini-UAV. International Journal of Aviation Science and Technology, Volume 3, Issue 1, 2022, 35-44.
8. Z. Zuo, C. J. Liu, Q.-L. Han, and J. Song, "Unmanned aerial vehicles: Control methods and future challenges," IEEE/CAA J. Autom. Sinica, vol. 9, no. 4, pp. 601–614, Apr. 2022
9. Denis Kotarski, Petar Piljek, Josip Kasać, Design Considerations for Autonomous Cargo Transportation Multirotor UAVs, Self-driving Vehicles and Enabling Technologies 2020.
10. Tripicchio, P.; Unetti, M.; D'Avella, S.; Avizzano, C.A. Smooth Coverage Path Planning for UAVs with Model Predictive Control Trajectory Tracking. Electronics 2023, 12, 2310.
11. Aminurrashid Noordin; Mohd Arifanan Mohd Basri; Zaharuddin Mohamed; Izzuddin Mat Lazim, Adaptive PID Controller Using Sliding Mode Control Approaches for Quadrotor UAV Attitude and Position Stabilization, Arabian Journal for Science and Engineering 2020.
12. Tang, W.; Wang, L.; Gu, J.; Gu, Y. Single neural adaptive PID control for small UAV micro-turbojet engine. Sensors 2020, 20, 345.
13. Baranov, O. V., Algorithm of adjustment of stabilizing PID controller of quadrocopter. - St. Petersburg: SPBSU, 2021. - 10 с.
14. Nabiev R. N., Requirements for unmanned aerial vehicles on a multirotation basis. Aerospace Instrumentation. - 2018. - №9, с. 3-11
15. Citation: Melo, A.G.; Andrade, F.A.A.; Guedes, I.P.; Carvalho, G.F.; Zachi, A.R.L.; Pinto, M.F.. Fuzzy Gain-Scheduling PID for UAV Position and Altitude Controllers. Sensors 2022, 22, 2173.

#### **Информация об авторах**

Панкратов Аркадий Геннадьевич – студент кафедры управления в технических системах, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, e-mail: arkadipan@mail.ru

Решетникова Наталия Викторовна – старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, e-mail: bessonnica\_90@mail.ru

#### **Authors**

Pankratov Arkady Gennadyevich - student of the Department of Management in Technical Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, e-mail: arkadipan@mail.ru.

Reshetnikova Natalia Viktorovna - Senior Lecturer, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, e-mail: bessonnica\_90@mail.ru