



АНАЛИЗ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Ю. А. Силин, Н. Н. Майоров

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В исследовании проводится сравнительный анализ конфигураций беспилотных авиационных систем (БАС) с целью поиска оптимального решения задачи доставки грузов в условиях городской среды. В работе обосновывается выбор соосной мультироторной схемы беспилотной авиационной системы как наиболее предпочтительной благодаря преимуществам, позволяющим использовать указанный тип в условиях городской среды. Кроме того, рассматривается аппаратная часть беспилотной системы, включая сравнительный анализ конкретных комплектующих: рамы, полетного контроллера, двигателей, регуляторов оборотов и системы радиосвязи. Особое внимание уделено анализу полетного контроллера и гироскопа для обеспечения стабильной работы соосной системы. Помимо этого, представлен сравнительный анализ различных типов грузовых контейнеров, включая решения с активным охлаждением, для транспортировки грузов, требующих соблюдения специального температурного режима.

Ключевые слова: доставка грузов, городская логистика, беспилотные авиационные системы, соосная схема, доставка грузов с помощью БАС.

Для цитирования:

Силин, Ю. А. Анализ аппаратного обеспечения беспилотной авиационной системы для решения доставки грузов в условиях городской среды / Н. Н. Майоров, Ю. А. Силин // Системный анализ и логистика. – 2025. – № 4(47). – с. 40-48. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-4-40-48.

HARDWARE ANALYSIS OF AN UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM FOR CARGO DELIVERY SOLUTIONS IN AN URBAN ENVIRONMENT

Yu. A. Silin, N. N. Maiorov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The study provides a comparative analysis of configurations of unmanned aircraft systems (UAV) in order to find the optimal solution to the problem of cargo delivery in an urban environment. The paper substantiates the choice of a coaxial multicopter scheme for an unmanned aircraft system as the most preferable due to the advantages that allow using this type in an urban environment. In addition, the hardware of the unmanned system is being considered, including a comparative analysis of specific components: the frame, flight controller, engines, speed controls and radio communication system. Special attention is paid to the analysis of the flight controller and gyroscope to ensure stable operation of the coaxial system. In addition, a comparative analysis of various types of cargo containers, including actively cooled solutions for the transportation of goods requiring special temperature conditions, is presented.

Keywords: cargo delivery, urban logistics, unmanned aircraft systems, coaxial scheme, cargo delivery using UAV.

For citation:

Silin, Yu. A. Hardware analysis of an unmanned aircraft system for cargo delivery solutions in an urban environment/ Yu. A. Silin, N. N. Maiorov // System analysis and logistics. – 2025. – № 4(47). – p. 40-48. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-4-40-48.

Введение

Современные мегаполисы сталкиваются с возрастающей нагрузкой на транспортную инфраструктуру, что особенно остро проявляется в сфере грузоперевозок. Традиционные методы доставки, зависящие от человеческого фактора и ограниченные пропускной способностью дорог, зачастую не справляются с растущими потребностями городской логистики. Особую сложность представляет транспортировка специальных грузов – медицинских препаратов, опасных веществ, ценных или хрупких предметов, требующих строгого соблюдения условий перевозки, безопасности и точных сроков доставки [1]. На текущий момент проблема несохранности грузов при транспортировке из-за несоблюдения



температурного режима остается одной из самых актуальных. Чаще всего подвергаются порче медикаменты, так как допустимая температура для транспортировки может иметь диапазон всего лишь 1°C. Доставка при помощи беспилотных авиационных систем активно развивается, благодаря чему расстояние осуществления доставки могут достигать сотни километров. Несмотря на высокую скорость доставки, термоизоляционные контейнеры могут уже не справляться с поддержанием груза в кондиционном состоянии.

Беспилотные авиационные системы способны обеспечить оперативную транспортировку товаров первой необходимости, включая предметы медицинского назначения, фармацевтические и биологические средства, продукты питания, посылки и другие малогабаритные грузы [2,3,4]. Сроки доставки с помощью беспилотных авиационных систем гораздо ниже по сравнению с перевозкой наземным транспортом, поскольку исключаются факторы бездорожья и затрудненного движения [5]. Ключевой задачей при организации городских грузоперевозок с помощью беспилотных авиационных систем является точный подбор аппаратного обеспечения, исходя из целевых параметров доставки. Особое внимание необходимо уделить детальному рассмотрению аппаратного и приборного обеспечения, как приведено в работах [6,7,8]. Эффективность всей логистической цепи напрямую зависит от корректного выбора дронов по таким критериям, как грузоподъемность, дальность полета, тип двигателя, энергоемкость батареи, отказоустойчивость и способность работать в сложных погодных условиях.

Модели и методы.

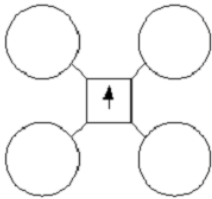
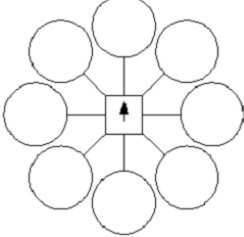
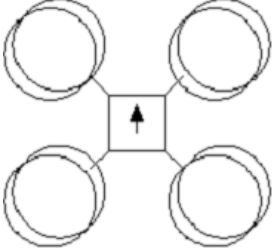
2.1 Сравнительный анализ конфигураций беспилотных авиационных систем

Популярность соосных мультироторных беспилотных авиационных систем обусловлена их компактностью при заданной конфигурацией грузоподъемности и высокой стабильности полета [3,9,10]. Внедрение беспилотной системы, к примеру, в транспортный процесс, или отдельный технологической процесс, создает новую практику, успешность которой непременно приводит к полноценному последующему внедрению беспилотной авиационной системы. Для задач логистики, городских систем, новые решения находятся в сфере применения мультироторных беспилотных систем, при том, что за счет возможности размещения различных моделей полезной нагрузки, беспилотная авиационная система может передавать данные между различными участками систем связи, выступать определенным мостом в информационных сетях. Одним из таких решений является использование беспилотной авиационной системы в задачах «Бесшовной связи», когда беспилотник встроен в единое пространство обмена данными [11]. Другим примером может служить построение систем доставки грузов в городах, мегаполисах, на основе беспилотных авиационных систем, задачи аэрологистики. В данном случае крайне важной задачей будет определение необходимых грузопотоков, моделей полезной нагрузки, аппаратных комплексов, которые обеспечат сохранность грузов на борту во время полета и необходимые объемы доставок.

Несмотря на сложность конструкции, данные системы востребованы в задачах аэросъемки, мониторинга и при решении задач, где требуется значительная тяга при ограниченных габаритах дрона. Общий сравнительный анализ основных конфигураций представлен в таблице 1.



Таблица 1 – Сравнение квадрокоптеров, октокоптеров и соосных октокоптеров

	Квадрокоптеры	Октокоптеры	Соосные октокоптеры
Принципиальная схема			
Преимущества	простота сборки; доступность комплектующих; небольшие габариты	большая грузоподъемность; длительное время полета	небольшие габариты; большая грузоподъемность; высокая устойчивость во время полета; устойчивы к падениям; длительно время полета
Недостатки	небольшая грузоподъемность; недостаточная длительность полета	большие габариты; сложность в изготовлении; низкая маневренность	сложность в изготовлении; сложность настройки
Особенности	При небольших габаритах имеют высокую маневренность	Могут совершить безопасную посадку при отказе 4-х двигателей. В отдельных случаях при отказе 5-ти.	

Исходя из представленной выше таблицы 1, можно сделать вывод, что октокоптеры соосного типа являются наиболее оптимальными для решения задачи доставки грузов в условиях городской среды. Высокая грузоподъемность, длительное время полета, небольшие габариты и возможность осуществления безопасной посадки в случае отказа до 60% бортового оборудования дает преимущество над другими типами БАС.

2.2 Сравнительный анализ комплектующих беспилотных авиационных систем

Наиболее оптимальной конфигурацией для выполнения поставленных задач является БАС мультироторного типа с соосной схемой расположения двигателей X2. В первую очередь, необходимо выбрать основную силовую установку - раму. Рама должна иметь возможность установки соосной системы, быть прочной и легкой. Наиболее оптимальным вариантом для реализации проекта является карбоновая рама под 10-ти дюймовый пропеллер Diatone kn-104 (рис.1).



Рис. 1. Рама Diatone kn-104

Размер пропеллера 10 дюймов соответствует 450-му классу квадрокоптеров. Выбор данного класса обусловлен оптимальным соотношением габаритов и тяги. Кроме того, важную роль играет доступность комплектующих.

На рамы более 10-ти дюймов, например, 13 и 17 ставят двигатели с потреблением выше 65а. Ближайший доступный регулятор оборотов t-motor flame выдает 90а [12, 13], но имеет вес в 12 раз больше, чем регулятор на 65а для 10-ти дюймов, что делает на данный момент не выгодным сборку 13 и 17 дюймового квадрокоптера. А квадрокоптеры под пропеллер больше 17 дюймов уже слишком большие для городской среды. Квадрокоптеры под пропеллер меньше 10-ти дюймов имеют недостаточную грузоподъемность. Именно поэтому использование 450-го класса являются оптимальными для данного проекта.

Рама Diatone kn-104 имеет несколько важных преимуществ:

- 1) Возможность установки двух аккумуляторов. Позволит использовать 2 параллельно подключенных аккумулятора, что позволит получить максимальное время полета.
- 2) Лучи, изготовленные из карбоновых труб. Такие лучи имеют хорошую прочность и обтекаемость, по сравнению с лучами, выпиленными из карбонового листа.
- 3) Внешнее расположение регуляторов оборотов. Позволяет установить по 2 регулятора на луч, а также обеспечивает хорошее охлаждение во время работы.

2.3 Полетный контроллер

Для надежности всей сборки большинство компонентов дублируются. Моторы, регуляторы оборотов, видеосистема, радиосвязь. Полетный контроллер является связующим звеном для всей периферии, и его дублирование на данный момент не представляется возможным. Поэтому необходимо выбрать полетный контроллер, который находится в премиальном ценовом сегменте и соответствует необходимым требованиям. Соосные двигатели, расположенный на одном луче, имеют разное направление вращения, что создает ряд высокочастотных и низкочастотных колебаний, которых нет в других типах БАС. Данные колебания являются шумами, так как перегружают гироскоп и усложняют работу ПИД-регулятора [14]. Если не уделить внимание данной особенности, то при запуске на стандартных настройках, беспилотник может начать неконтролируемый полет. Кроме того, может произойти перегрев двигателей и возгорание регуляторов оборотов.

Во избежание данных последствий необходимо выбрать качественный полетный контроллер, гироскоп которого не будет перегружаться от лишних шумов, а центральный процессор сможет обеспечить нормальную работу ПИД – регулятора.

На данный момент наиболее распространены гироскопы серии MPU6000, BMI270 и



ICM42688. Наиболее стабильно показывает себя гироскоп MPU6000, но, к сожалению, данный гироскоп с 2017 года компании, производящие электронику, объявили его нежелательным, так как не поддерживает частоты считывания данных до 32 КГц, как например ICM42688. Для БАС не нужны такие частоты. На частотах свыше 8 КГц идет слишком сильная нагрузка на ЦП (центральный процессор) и ПИД-регулятор не может справиться с таким количеством данных. Даже не смотря на все положительные характеристики, MPU6000 практически не встретить в новых моделях полетных контроллеров. Гироскопы серий ИМС и ВМІ очень восприимчивы к электронным помехам. Именно поэтому полетные контроллеры с данными гироскопами очень сложно настраивать, а в некоторых случаях практически невозможно. Данные гироскопы требуют очень качественного понижающего преобразователя на 3.3 В, что, к сожалению, встречается только в полетных контроллерах премиального ценового сегмента. Таким образом, для сборки БАС соосного типа необходимо использовать только полетные контроллеры с гироскопом MPU6000. Наиболее подходящие модели: Diatone Mamba F405MK2 V2, Matek h743 slim v3 [15,16], приведенные на рис. 2, holybro kakute h7 v1.3. Данные модели имеют практически схожие характеристики, однако Matek h743 slim v3 имеет преимущества:

- 1) Наличие двух гироскопов MPU6000 и ICM20602, что позволяет получить максимально чистые данные, на обработку которых ЦП потратит минимум времени, что благоприятно отразится на летных характеристиках.
- 2) Возможность переключения между двумя камерами, что в дальнейшем будет полезно для реализации автономного полета.

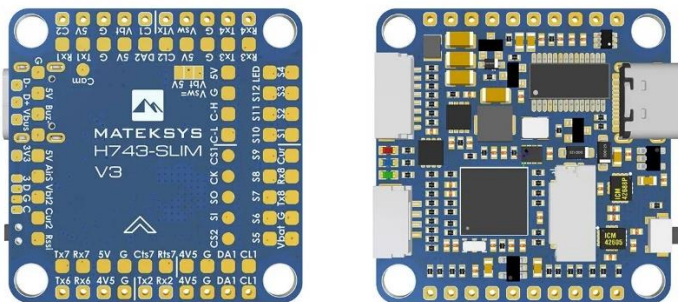


Рис. 2. Полетный контроллер Matek h743 slim v3

Подходящим и доступными являются регуляторы оборотов diatone kn, как приведено на рис. 3. Данные регуляторы поддерживают ток 65а и напряжение от 16 до 26в, что делает их подходящими для данной сборки.

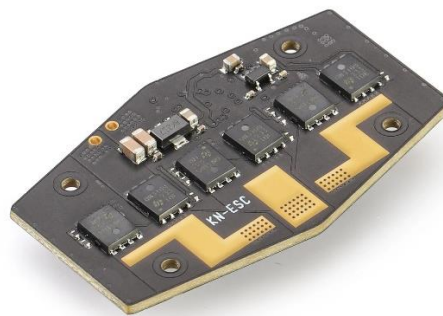


Рис. 3. Регулятор оборотов Diatone Kn



Двигатель под данную раму выбран Diatone kn-3214 730kv (рис. 4). Данный двигатель рассчитан под пропеллер 10 дюймов. Имеет запас тяги 4 кг при потреблении тока 59а, что делает его подходящим для данной сборки.



Рис. 4. Мотор Diatone kn-3214 730kv

2.4 Системы радиосвязи

На данный момент актуальны 2 пользовательские системы радиосвязи ExpressLRS и TBS Crossfire. Сравнительный анализ представлен в таблице 2.

Таблица 2 – сравнение TBS Crossfire и ExpressLRS

Параметр	TBS Crossfire	ExpressLRS
Основная частота	868 МГц, 915 МГц	868 МГц, 915 МГц, 2.4 ГГц
Дальность	До 40+ км (LQ 100%)	До 20+ км (2.4 ГГц), 40+ км (900 МГц)
Помехоустойчивость	Очень высокая (низкая частота)	Высокая (2.4 ГГц чуть хуже в городе)
Количество пакетов	4, 50, 100, 150	50, 100, 150, 250, 333, 500, 1000
Максимальная мощность радиопередатчика	2 Ватта	1 Ватт
Мощность передачи телеметрии	500 мВатт	500 мВатт

Исходя из представленной выше таблицы, можно сделать вывод, что TBS Crossfire больше подходит для реализации проекта. Возможность динамического изменения числа передающихся пакетов существенно повышает дальность полета.

Заключение

Анализ полезной нагрузки для решения доставки грузов

Полностью готовых решений модулей, отвечающих требованиям доставки грузов, имеющих особые требования к температурному режиму, на данный момент не существует, поэтому в работе будут рассмотрены возможные варианты универсальных и узкоспециальных модулей для доставки различных грузов при помощи квадрокоптера. Контейнеры для грузов, требующих соблюдения специального температурного режима, являются узкоспециальными и используются для транспортировки медикаментов и скоропортящихся продуктов и подразделяются на 3 основных типа: термоизоляционные контейнеры; контейнеры с сухим льдом; контейнеры с наличием охлаждающего элемента. Сравнительный анализ грузовых контейнеров для беспилотных авиационных систем представлен в таблице 3.



Таблица 3 – Сравнение грузовых контейнеров для БАС.

Параметр	Контейнер с активным охлаждением	Аналог компании Zipline	Изотермические контейнеры
Точность доставки	Квадрокоптер точно приземлится в указанную точку	Контейнер сбрасывается на парашюте, что значительно снижает точность	Контейнер сбрасывается на парашюте, что значительно снижает точность
Возможность регулирования температуры	Есть	Нет	Нет
Время автономной работы	Зависит от аккумулятора	Зависит от количества сухого льда	2-10 часов
Диапазон создаваемых температур	От 23 °С до -6 °С	До -70 °С	До -70
Материал корпуса	Пластик	Картон	Пластик, металл
Охлаждающий элемент	Элементы Пельтье	Сухой лёд	-

Анализ конфигураций мультироторных БАС показал, что соосные октокоптеры обладают оптимальными характеристиками для городской среды: высокой грузоподъемностью, устойчивостью, длительным временем полета и возможностью безопасной посадки при частичном отказе двигателей. В качестве базовой платформы выбрана карбоновая рама Diatone KN-104 под 10-дюймовые пропеллеры, обеспечивающая баланс между габаритами, тягой и.

Для управления БАС рекомендован полетный контроллер Matek H743 Slim V3 с гироскопом MPU6000, обладающий высокой помехоустойчивостью и возможностью переключения между камерами. В качестве силовой установки выбраны двигатели Diatone KN-3214 730KV и регуляторы оборотов Diatone KN, поддерживающие ток до 65А. Для осуществления радиосвязи выбрана TBS Crossfire, которая обеспечивает надежную передачу данных на дальние расстояния.

В качестве полезной нагрузки рассмотрены универсальные и специализированные модули, включая термоизолированные контейнеры с элементами Пельтье, что может быть необходимым для доставки медикаментов и скоропортящихся продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Добровольская А. А.* Исследование применения данных от беспилотных систем для развития микромобильности и модернизации городской инфраструктуры / А. А. Добровольская // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXIV Международной научной конференции. В 3-х частях, часть 1. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 189-194.
2. *Силин Ю. А.* Разработка изотермического контейнера для реализации доставки специальных грузов при помощи беспилотной авиационной системы / А. С. Костин, Ю. А. Силин, А. В. Бахмутская // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXV Международной научной конференции. В 3-х частях,



- часть 3. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 187-194.
3. *Костин А. С.* Модели и методы формирования маршрута движения беспилотной системы с учетом зон ограничений / А. С. Костин, А. И. Болотова, Е. А. Вознесенский // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXVIII Международной научной конференции. В 3-х частях. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 164-168.
 4. *Майоров Н. Н.* Модели маршрутизации автономной беспилотной системы для решения задач идентификации объектов на складе / Н. Н. Майоров, А. С. Костин // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXVIII Международной научной конференции. В 3-х частях. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 174-178.
 5. *Костин А. С.* Моделирование процесса доставки грузов беспилотной авиационной системой в границах района города / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Четвертая Международная научная конференция. Часть 1. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 211-219. – DOI 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-211-219.
 6. *Костин А. С.* Исследование аппаратных комплексов и программных методов автономной идентификации мест посадки беспилотных авиационных систем / А. С. Костин // Датчики и системы. – 2023. – № 4-1(269). – С. 10-16. – DOI: 10.25728/datsys.2023.4.1.2.
 7. *Outay F.* Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges / F. Outay, H. A. Mengash, M. Adnan // Transportation research part A: policy and practice. – 2020. – Vol. 141. – P. 116–129.
 8. *Wei X.* Distributed path planning of unmanned aerial vehicle communication chain based on dual decomposition / X. Wei, J. Xu // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2021. – Vol. 2021. – № 2. – P. 1-12. – DOI: 10.1155/2021/6661926.
 9. *Dobrovolskaia A. A.* Research the application of data from unmanned systems for the development of micromobility and modernization of urban infrastructure // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – St. Petersburg, 2021. – 4 p. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470674.
 10. *Kostin A.S.* Models and methods for implementing the autonomous performance of transportation tasks using a drone // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – St. Petersburg, 2021. – 4 p. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470584.
 11. *Olenev V. L.* Broadcast Propagation Time in SpaceFibre Networks with Various Types of Spatial Redundancy / V. L. Olenev, E. A. Suvorova, N. Chumakova // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 13. – 29 p. – DOI 10.3390/s23136161.
 12. *Silin Y. A., Silina A. A.* Achieving Optimal Flight Characteristics for Coaxial-Type Unmanned Aircraft Systems by Adjusting the Pid-Controller // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – St. Petersburg, 2025. – p. 1-5.
 13. Modelavia. T-motor flame [Электронный ресурс]. – URL: <https://modelavia.pro/regulatoryi-skorosti/t-motor/regulyator-skorosti-t-motor-flame-60a-12s-v2.0-esc.html> (дата обращения: 24.05.2025).
 14. Конфигуратор Betaflight [Электронный ресурс]. – URL: <https://betaflight.com> (дата обращения: 15.02.2025).
 15. Mateksys. Контроллер полета Matek H743 Slim V3 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mateksys.com/?portfolio=h743-slim> (дата обращения: 17.02.2025).
 16. *Костин А. С., Силин Ю. А.* Особенности доставки специальных грузов в изотермическом контейнере при помощи беспилотных авиационных систем //



Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXV Международной научной конференции. В 3-х частях, часть 3. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 195-202.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Силин Юрий Андреевич

Аспирант кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: foto2001u@mail.ru

Майоров Николай Николаевич

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: nnm@guap.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Silin Yuri Andreevich

Postgraduate student of the Department of System Analysis and Logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaja str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: foto2001u@mail.ru

Maivorov Nikolai Nikolaevich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of System Analysis and Logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaja str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: nnm@guap.ru

Дата поступления: 16.09.2025

Дата принятия: 29.09.2025