



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЁТА И ПОСАДКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

А. М. Боряшнев, А. С. Костин

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье рассматривается сравнительный анализ беспилотных авиационных систем мультироторного типа гибридной конструкции для решения логистических задач. Проведен анализ конструкций гибридных систем, их особенностей, выполнено сравнение между классическими беспилотными авиационными системами мультироторного и самолетного типов. Приведены сферы применения данного типа беспилотных систем.

Ключевые слова: беспилотные системы, БАС, сферы применения, сравнение типов VTOL, конструкция VTOL.

Для цитирования:

Боряшнев, А. М. Сравнительный анализ конструкций беспилотных систем вертикального взлёта и посадки для решения логистических задач / А. М. Боряшнев, А. С. Костин // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 5(43). – с. 99-105. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-5-99-105.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESIGNS OF UNMANNED VERTICAL TAKEOFF AND LANDING SYSTEMS FOR SOLVING LOGISTICS PROBLEMS

A. M. Boryshnev, A. S. Kostin

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The article considers a comparative analysis of unmanned aircraft systems of a multicopter type of hybrid design for solving logistics problems. The analysis of hybrid systems designs, their features, a comparison between classic unmanned aircraft systems of multicopter and aircraft types is carried out. The areas of application of this type of unmanned systems are given.

Keywords: unmanned systems, UAS, applications, VTOL types comparison, VTOL design.

For citation:

Boryshnev, A. M. Comparative analysis of designs of unmanned vertical takeoff and landing systems for solving logistics problems / A. M. Boryshnev, A. S. Kostin // System analysis and logistics. – 2024. – № 5(43). – p. 99-105. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-5-99-105.

Введение

Независимо от сферы их применения, современные беспилотные авиационные системы в основном относятся к самолётному или мультироторному типам. Оба эти класса имеют свои особенности, слабые и сильные стороны. Пожалуй, главным преимуществом самолётных БАС является возможность эффективно преодолевать значительные расстояния и доставлять тяжелые грузы [1,2]. Мультироторные же дроны отличает возможность вертикального взлёта и посадки, что упрощает их применение вне открытых пространств.

Современные транспортные компании и службы доставки лишь экспериментируют с применением дронов, однако потенциал гибридных систем, способных как перемещаться в стеснённых пространствах городской застройки, так и пролетать большие расстояния, неоценим. Такие беспилотные системы часто называются VTOL (англ. Vertical Takeoff and Landing) и зачастую представляют из себя гибрид самолёта и квадрокоптера. Однако конструкторские решения, существующие в данной сфере, не ограничиваются лишь этим.

Определение VTOL и СВВП

Английский термин VTOL может относиться к любому летательному аппарату, имеющему возможность вертикального взлёта и посадки. Подпадают под это определение не только дроны, но и полноразмерные воздушные суда: от вертолётов до палубных истребителей.



Куда более узкий список устройств обозначает аналог английского термина VTOL в русском языке – СВВП, что расшифровывается как «самолёт вертикального взлёта и посадки». Это понятие исключает технику, не способную создавать подъёмную силу с помощью неподвижного крыла. Таким образом вертолёты, мультироторные системы, махолёты и некоторые другие виды воздушных судов, не имеющие неподвижного крыла, но способные взлетать и садиться вертикально, являются VTOL, но не являются СВВП.

В дальнейшей работе речь пойдёт только про дроны-СВВП, чтобы исключить системы, не способные к планированию и, как следствие, к эффективному преодолению больших расстояний по воздуху.

Анализ сфер применения БАС гибридного типа

К сожалению, как и большинство универсальных и гибридных систем, СВВП, объединяя преимущества самолётных и мультироторных БАС, теряют их в некоторой мере. То есть гибрид, летящий горизонтально, будет уступать обычному самолёту в дальности и эффективности из-за аэродинамических особенностей и наличия избыточного количества моторов, а при вертикальном полёте обычный мультироторный дрон окажется маневреннее и компактнее. Далее рассмотрим основные типы БАС и их особенности [3,4].

БАС самолетного типа имеют фиксированные крылья и используют двигатели для создания подъемной силы и тяги, что позволяет им развивать высокую скорость и дальность полета. Однако они нуждаются в длинных взлетно-посадочных полосах для взлета и посадки, что ограничивает их использование в городских условиях или на ограниченных площадках. Их основной недостаток — невозможность вертикального взлета и посадки, что делает такие аппараты непригодными для работы в ограниченных пространствах.

Мультироторные БАС, такие как квадрокоптеры, используют несколько двигателей для создания подъемной силы, что позволяет им вертикально взлетать и садиться. Эти аппараты имеют высокую маневренность и могут работать в ограниченных пространствах. Однако их дальность полета и скорость ограничены, а также они потребляют большое количество энергии из-за работы нескольких двигателей, что снижает их продолжительность полета [4].

VTOL (Vertical Take-Off and Landing) совмещают преимущества как самолетных, так и мультироторных аппаратов. Они могут взлетать и садиться вертикально, а также переходить в режим горизонтального полета, что позволяет им развивать большую дальность и скорость. Это делает их универсальными для работы как в городских, так и в сельских условиях. При этом они сохраняют маневренность, аналогичную мультироторным моделям, но обладают преимуществами самолетных БАС в плане дальности и скорости [5,6].

Из-за этих особенностей выбор гибрида для какой-либо задачи – это всегда компромисс. Однако существует ряд применений, для которых решающим критерием устройства является универсальность. В основном БАС вертикального взлёта и посадки применяются при транспортировке грузов на средние и короткие расстояния.

Также СВВП являются единственным видом техники, способным эффективно транспортировать груз на дальние расстояния, если взлёт и/или посадка производятся в городских условиях. Такой дрон сможет набрать высоту или снизиться, маневрируя между домов, деревьев, проводов, и прочих препятствий, встречающихся в нижней полосе воздушного пространства города. Поднявшись же на высоту порядка 200 метров, беспилотник сможет продолжить полёт горизонтально, эффективно преодолевая необходимое расстояние [7].

Помимо этого, СВВП способны садиться на раскачивающиеся поверхности, например на палубы кораблей. Благодаря современным системам стабилизации и наличию датчиков, анализирующих поверхность под дроном, посадка возможна даже в шторм. Это открывает для СВВП ещё одно применение – доставка грузов на корабли для пополнения их припасов или выполнение наблюдательных полётов с борта корабля. Подобным образом сейчас используются БАС вертолётного типа, патрулирующие побережья и пляжи некоторых



южных стран под управлением спасателей и сотрудников береговой охраны.

В целом, можно выделить следующие сферы применения БАС типа VTOL:

1. Городской воздушный транспорт (Urban Air Mobility) — одна из наиболее перспективных сфер, включающая как пассажирские перевозки, так и доставку грузов. Применение VTOL в этом сегменте позволяет решить проблемы с транспортной инфраструктурой в мегаполисах.
2. Мониторинг и инспекция инфраструктуры — БАС типа VTOL идеально подходят для инспекции мостов, линий электропередач, ветряных турбин и других объектов, поскольку они могут работать в ограниченных пространствах и быстро перемещаться по заданной территории.
3. Сельское хозяйство — для мониторинга сельскохозяйственных угодий, опрыскивания и сбора данных, где высока потребность в точности и маневренности.
4. Спасательные и экстренные операции — данный тип БАС могут использоваться для доставки медикаментов, эвакуации людей из труднодоступных мест и выполнения других экстренных задач.
5. Геодезия и картография — благодаря способности VTOL БАС работать в ограниченных пространствах и высокой маневренности, их используют для создания карт и 3D моделей местности.

На диаграмме ниже представлено распределение по частоте применения VTOL в указанных сферах [3,4,5]:



Рис. 1. Сферы применения БАС гибридного типа

На данной диаграмме представлено распределение использования беспилотных авиационных систем типа VTOL, как можно заметить, основное распределение представлено в городском воздушном транспорте и связано это с тем, что для организации пассажирских перевозок и перевозок грузов, в последнее время стали применять и разрабатывать именно гибридные системы. Связано это с тем, что на текущий момент времени происходит активное развитие систем связи, навигации и управления, что в свою очередь упрощает проектирование и применения подобного типа БАС в различных сферах деятельности.



Анализ конструкций беспилотных СВВП

Поскольку дроны обладают куда меньшими массой и размерами, чем представители полноразмерной авиации, обеспечить им необходимую для нормальной работы жёсткость конструкции намного проще. Это привело к появлению множества вариантов конструкций, невозможных для воплощения в полноразмерной авиации, однако более эффективных или практичных [8,9].

Самой примитивной конструкцией СВВП является упомянутая ранее смесь самолёта и квадрокоптера. Существуют даже отдельно производимые накладки на крыло самолётных БАС, способные добавить последним возможность взлетать и садиться вертикально. Однако чаще встречаются более надёжные и аэродинамичные конструкции в едином корпусе. Пример такого гибрида представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Гибрид самолётной и мультироторной БАС

Более интересной и более эффективной является вариант самолётной БАС с возможностью наклона моторов в вертикальное положение. При этом наклоняться могут лишь некоторые из них. Пример такой БАС с двумя поворачивающимися моторами на рисунке 3.



Рис. 3. БАС с поворачивающимися передними моторами

В качестве примера конструкции, реализация которой невозможна в полноразмерной авиации может служить БАС с поворачивающимися консолями крыла. При переходе от



вертикального полёта к горизонтальному сегменты крыла совершают сложное движение, принимая привычное для самолёта положение. Пожалуй, главным преимуществом такой конструкции является её лучшая аэродинамичность. Пример представлен на рисунке 4.



Рис. 4. БАС со складывающимся крылом

Главным недостатком всех описанных выше конструкций является постоянное наличие в воздушном потоке, обтекающем аэродинамические поверхности СВВП при горизонтальном полёте, нескольких винтов. Обычно модели самолёта для полёта достаточно 1 винта, а использование нескольких, пусть и направленных вперёд пропеллеров одновременно негативно сказывается на аэродинамической характеристике. Эту проблему решает БАС с убирающимися в короб винтами. Вертикальные моторы такого дрона находятся в специальных мотогондолах, герметично закрывающихся при горизонтальном полёте. Пример такой БАС с открытыми коробами винтов представлен на рисунке 5.

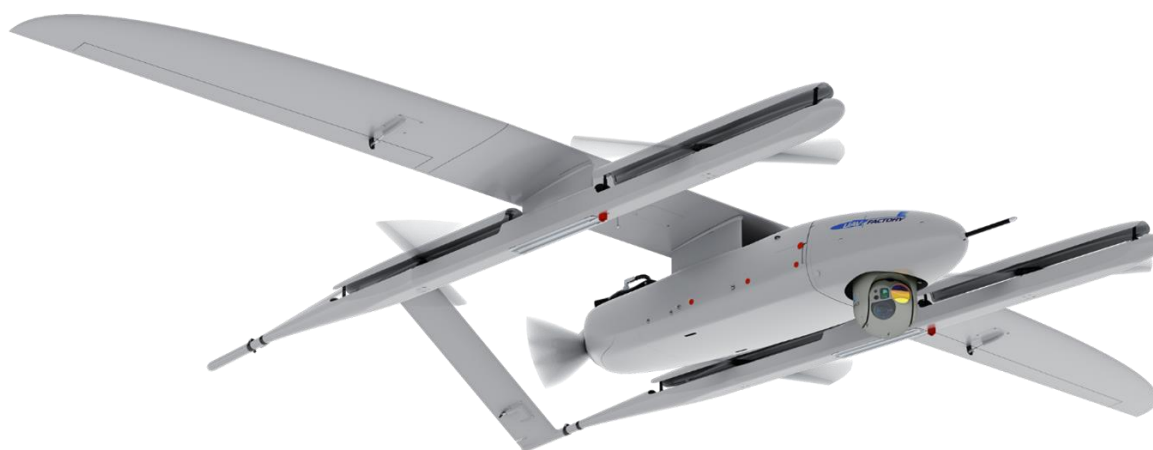


Рис. 5. СВВП с коробами для винтов

Сравнение беспилотных СВВП различных конструкций

Рассмотрев существующие конструкции СВВП, можно проанализировать их характеристики относительно классических, не гибридных БАС.



Первое, что стоит отметить – высокую техническую сложность. Наличие в любой конструкции множества подвижных элементов приводит к её удорожанию и усложнению обслуживания.

С точки зрения аэродинамики горизонтального полёта, безусловным фаворитом является СВВП с коробами для винтов. Небольшое добавочное лобовое сопротивление от мотогондол с избытком компенсируется отсутствием в воздушном потоке более одного пропеллера. В итоге беспилотники такой схемы по эффективности полёта могут сравниться с некоторыми самолётами.

Менее аэродинамически эффективной схемой является СВВП со складывающимся крылом. В полёте он не отличим по форме от обычного самолёта, однако 4 пропеллера, одновременно используемых для создания горизонтальной тяги ухудшают энергоэффективность. Современные электромоторы достаточно мощны, чтобы для горизонтального полёта БАС хватало лишь одного. При использовании большего количества на меньших оборотах уменьшается скорость полёта и растёт потребление энергии [8,9].

Остальные рассмотренные конструкции имеют постоянно находящиеся в воздушном потоке лопасти вертикальных моторов, что еще больше ухудшает их аэродинамические характеристики.

Наконец, стоит рассмотреть СВВП с точки зрения компактности и эффективности при вертикальном полёте. Отсутствие в плоскости вращения винтов больших плоских поверхностей (в частности, крыла) делает полёт классического мультироторного БАС сравнительно энергоэффективным. Наиболее близко к ним подошла конструкция СВВП со складным крылом. Перейдя в вертикальное положение, крыло не мешает воздушному потоку от винтов. Также эта система сильно уменьшается в размерах при трансформации.

Все остальные варианты конструкции обладают неподвижным крылом, что даёт им преимущество в жёсткости, при этом, однако снижая эффективность вертикального полёта, а габариты таких систем могут превышать несколько метров.

Заключение

В качестве итога произведённого анализа можно сделать вывод, что СВВП зачастую не способны превзойти по конкретным характеристикам, будь то эффективность при дальних перелётах или компактность и удобство посадки специализированную технику – самолёты и вертолёты или мультироторные БАС. Однако комбинация дальности действия и возможности точного позиционирования в вертикальном режиме полёта делают их перспективными для доставки грузов и решения других задач в городских условиях. С развитием систем автопилота и навигации, а также с появлением более энергоёмких батарей такие дроны смогут занять свою нишу в городской инфраструктуре, а наличие разнообразных вариантов их конструкций обеспечит широкий спектр применения. Представленное исследование и практическая реализация выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищённых систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Костин, А. С.* Исследование моделей и методов маршрутизации и практического выполнения автономного движения беспилотными транспортными системами для доставки грузов / Н. Н. Майоров, А. С. Костин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 524-536.
2. *Calabrò, G.* Modelling the dynamics of fragmented vs. consolidated last-mile e-commerce deliveries via an agent-based model / G. Calabrò, M. Le Pira, N. Giuffrida, M.



- Fazio, G. Inturri, M. Ignaccolo // *Transportation Research Procedia*. – 2022. – Vol. 62. – P. 155-162. – DOI: 10.1016/j.trpro.2022.02.020.
3. *Kwon, D.* Design of secure handover authentication scheme for urban air mobility environments / D. Kwon, S. Son, Y. Park, H. Kim, Y. Park, S. Lee, Y. Jeon // *IEEE Access*. – 2022. – p. 42529-42541. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3168843.
 4. *Flämig, H.* Autonomous Vehicles and Autonomous Driving in Freight Transport / H. Flämig, M. Maurer // *Autonomous Driving*, Eds.; Springer: Germany. – 2016. – P. 365-385. – DOI: 10.1007/978-3-662-48847-8_18.
 5. *Kim, J.* Accurate Modeling and Robust Hovering Control for a Quad-rotor VTOL Aircraft / J. Kim, M.-S. Kang, S. Park // *Journal of Intelligent Robotics Systems*. – 2010. – Vol. 57. – № 1-4. – P. 9–26. – DOI: 10.1007/978-90-481-8764-5_2.
 6. *Костин, А. С.* Разработка автоматизированных решений для исследования вариантов маршрутов доставки при совместном использовании транспортного средства и беспилотной авиационной системы в границах города / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2022. – № 7. – С. 348-357.
 7. *Костин, А. С.* Построение модели полетного задания для многоадресной доставки грузов на основе беспилотных авиационных систем / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // «Логистика: современные тенденции развития»: Материалы XXI Международной научно-практической конференции. – СПб.: ВШЭ, 2022. – С. 183-190.
 8. T-Drones. VTOL Drone. Everything You Need to Know. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.t-drones.com/blog/VTOL-drone-guide.html> (дата обращения: 30.11.2024).
 9. Coming to Terms. Taxonomy of VTOL Aircraft Configuration Types [Электронный ресурс]. – URL: <https://evtol.news/news/coming-to-terms-taxonomy-of-vtol-aircraft-configuration-types-part-1> (дата обращения: 30.11.2024).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Борышнев Арсений Маркович

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

Костин Антон Сергеевич

заведующий лабораторией беспилотных авиационных систем, доцент кафедры
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: anton13258@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boryshnev Arseniy Markovich

master's student of the department of systems analysis and logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: boryshnevam@yandex.ru

Kostin Anton Sergeevich

head of the laboratory of unmanned aircraft systems, associate professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: anton13258@mail.ru