

УДК 004.896

## **Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами**

**Ронжин А.Л.<sup>1\*</sup>, Нгуен В.В.<sup>2\*\*</sup>, Соленая О.Я.<sup>2\*\*\*</sup>**

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации*

*Российской академии наук, СПИИРАН,*

*14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178, Россия*

*<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Государственный университет аэрокосмического приборостроения, ГУАП, ул. Большая Морская, 67, Санкт-Петербург,*

*190000, Россия*

*\*e-mail: [ronzhin@ias.spb.su](mailto:ronzhin@ias.spb.su)*

*\*\*e-mail: [nguyenvanhvkt@gmail.com](mailto:nguyenvanhvkt@gmail.com)*

*\*\*\*e-mail: [osolenaya@list.ru](mailto:osolenaya@list.ru)*

### **Аннотация**

Добавление бортовой системы манипулирования к беспилотному летательному аппарату (БЛА) существенно усложняет алгоритмы функционирования, конструкцию и ведет к увеличению габаритных размеров. Физическое взаимодействие манипулятора с объектами усложняет процесс стабилизации БЛА, что в свою очередь приводит к трудностям позиционирования БЛА и снижает точность наведения захвата. Кроме того, физическое взаимодействие манипулятора с объектами требует повышенных энергоресурсов БЛА. В статье проводится анализ современных исследований БЛА с манипулятором, в том числе проблем управления полетом, недопущения

контакта с землей, окружающим пространством, а также манипуляций с захватываемым объектом. На основе проведенного анализа сформулирован перечень новых задач, возникающих при физическом взаимодействии БЛА с объектами посредством встроенного манипулятора.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные манипуляторы, БЛМ, беспилотные летательные аппараты, БЛА, мультикоптеры, физическое взаимодействие, коллаборативные роботы.

## **Введение**

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) все больше применяются для решения задач мониторинга различного рода объектов и территорий [1-3]. Также перспективным направлением исследований является транспортировка грузов посредством БЛА, основным преимуществом которых в урбанизированной местности является высокая скорость, при этом предъявляются жесткие требования по безопасности. БЛА должны избегать препятствия, не замедлять и не препятствовать передвижению наземных транспортных средств. В отличие от самолетов с фиксированным крылом, винтокрылые летательные аппараты (ВЛА), такие как вертолеты и мультикоптеры, могут перемещаться по узким проходам. ВЛА также может зависать и наблюдать, что полезно при взаимодействии со стационарными объектами [2]. Некоторые ВЛА способны приземляться в ходе выполнения задания, чтобы продлить время автономной работы и сократить потребление энергии, например, при наблюдении со стационарной площадки. Последние

достижения в области глобальной и локальной навигации, локализации, обнаружения и предотвращения препятствий позволили существенно увеличить автономность БЛА. Стабилизация параметров полета и постоянный контроль окружающих объектов являются важными аспектами в автономных операциях, выполняемых БЛА. Большинство исследований до настоящего времени было сосредоточено на разработке робастных систем автопилотирования, автоматизированных рабочих мест для взаимодействия пилота с самолетом с использованием систем 3D моделирования и виртуальной реальности, а также анализе проблем безопасности полетов, в том числе предотвращении падения БЛА. Также в последних опубликованных работах часто рассматриваются различные варианты двигателей, устанавливаемых на БЛА [3], навигация [4], их точная посадка [5, 6] и продолжительность автономной работы БЛА [7, 8]. В работе [9] проанализированы подходы к решению проблемы увеличения времени работы беспилотных летательных аппаратов в автономных миссиях на основе заряда или замены бортовых аккумуляторов на сопровождающей роботизированной платформе.

Возможность воздушных беспилотных транспортных средств манипулировать или переносить окружающие предметы значительно расширяет типы миссий и области применения, усиливая возможности оператора при выполнении грязных, опасных или монотонных операций, таких как: манипуляция объектами, создание строительных конструкций, ремонт инфраструктур строений, помощь при стихийных бедствиях, погрузка грузов, осмотр и техническое обслуживание промышленных установок, взятие

образцов материалов из труднодоступных районов, осмотр транспортных средств, сельскохозяйственных угодий и другие применения. Подобными типовыми задачами могут выступать: сбор образцов почвы, выполнение технического обслуживания на мосту или на фасаде здания, очистка завалов в опасной зоне. В таких задачах БЛА должен быть способен манипулировать в своей окружающей среде, в том числе устранять препятствия, которые блокируют передвижение к целевой точке. Однако в настоящее время манипуляторами оснащены только наземные роботизированные транспортные средства [10, 11].

Системы управления мультироторными платформами, оснащенными манипулятором с захватом, также имеют название ММ-UAV (Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicles). Разработка беспилотных летательных манипуляторов (БЛМ) сопровождается значительно большим числом трудностей, чем создание традиционных наземных роботов, выполняющих задачи передвижения совместно с манипуляциями. Наиболее сложным вопросом является отсутствие стабильной платформы в воздухе. Наземные транспортные средства могут останавливаться для совершения операций и в стационарном стабильном состоянии производить точные манипуляции, в то время как БЛМ в большинстве случаев не имеют такой возможности. Фактически даже с использованием робастных систем стабилизации полета воздушная платформа БЛМ будет находиться в некоторой области пространства, при этом не имея точных постоянных координат, особенно при функционировании в открытом месте. Отсутствие стабильности воздушной

платформы может быть частично компенсировано управлением манипулятором. Диапазон движений манипулятора и поле датчиков зрения также зависят от стороны, с которой платформа подлетает к предмету. Рабочее пространство манипулятора ограничивается корпусом самой воздушной платформы, поэтому для его увеличения в большинстве случаев манипулятор монтируется непосредственно в нижнюю часть платформы [12].

Таким образом, в центре внимания предыдущих исследований было решение проблемы управления полетом, недопущение контакта с землей и окружающим пространством. Целью данного исследования является физическое взаимодействие БЛА с предметами посредством встроенного манипулятора. Далее приведен обзор основных проблем, с которыми сталкиваются разработчики беспилотных летательных манипуляторов и анализ опубликованных результатов. Надо отметить, что еще довольно редко осуществляются эксперименты на натуральных моделях, в основном это компьютерное или комбинированное моделирование, где натурная модель манипулятора подвешивается в специальную раму, имитирующую свободные движения БЛА. В последнем разделе сформулирован перечень задач, которые возникают при разработке беспилотных летательных манипуляторов, не исследованные ранее при проектировании БЛА и наземных манипуляторов.

### **Проблемы разработки беспилотных летательных манипуляторов и анализ существующих решений**

Взаимодействие с объектами с использованием манипулятора, установленного на беспилотных летательных аппаратах, является важной

задачей, поскольку БЛА могут получить доступ ко многим местам, которые в некоторых случаях недоступны для других наземных транспортных роботизированных платформ [13]. Однако добавление бортовой системы манипулирования к летающему роботу вызывает серьезные проблемы, поскольку операции физического взаимодействия с наземными объектами влияют на общую стабильность всей системы воздушной платформы. Во время полета БЛА с движущейся мобильной манипуляционной системой изменяется распределение масс и возникают дополнительные динамические силы реакции [14]. Конструкция механизма захвата и манипулирования объектами влияет на допустимую массу полезной нагрузки, инерционные и динамические характеристики всего БЛА. Важно, чтобы масса этого механизма была низкой и его центр масс был ближе к основанию БЛА, в этом случае появляющиеся силы реакции и вращающий момент, которые будут возникать во время движения БЛА, существенно не повлияют на его стабильность. Влияние распространяемых контактных сил от конечного захвата к БЛА возможно минимизировать через соединение воздушного манипулятора с основанием БЛА [15]. Подобные аспекты обычно не учитываются в стандартных алгоритмах стабилизации платформы, поэтому необходим новый алгоритм, решающий такие задачи. Также следует учесть, что манипуляторы выполняют различные виды движений поступательные, вращающиеся, с полезной нагрузкой и без, что вызывает различные воздействия на БЛА, нарушающие его стабильность [14].

Также необходимо проанализировать ряд других серьезных проблем, прежде чем появится возможность манипулировать объектами посредством БЛА, среди которых выделяют [13]: 1) платформа БЛА постоянно имеет микродвижения и, соответственно, крайне тяжело выполнить точное позиционирование звеньев манипулятора БЛА относительно представляющего интерес объекта для манипуляций; 2) движения манипулятора влияют на стабильность платформы БЛА, что еще больше усложняет позиционирование.

В работе [12] авторы создали мини-испытательную установку и имитационную среду в трехмерном симуляторе OpenRAVE для двурукого манипулятора БЛА, решающего задачи захвата и операций с объектами двумя руками одновременно. Предполагается, что система с мобильным манипулятором выполняет аналогичные задачи, как и существующие наземные роботы, но с большей степенью автономности, скорости и мобильности. На рисунке 1 представлена конструкция стенда, состоящего из двух манипуляторов, которые установлены на потолке мини-испытательной установки. К манипуляторам прикреплены захваты Melissa с 1 степенью свободы, содержащие пять пальцев.

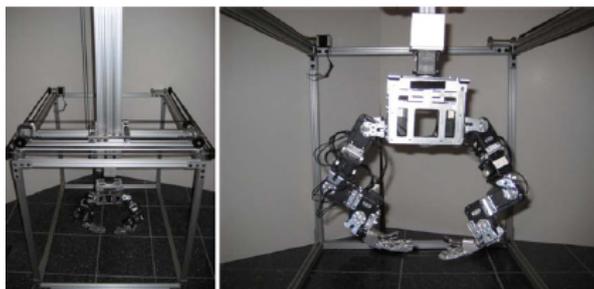
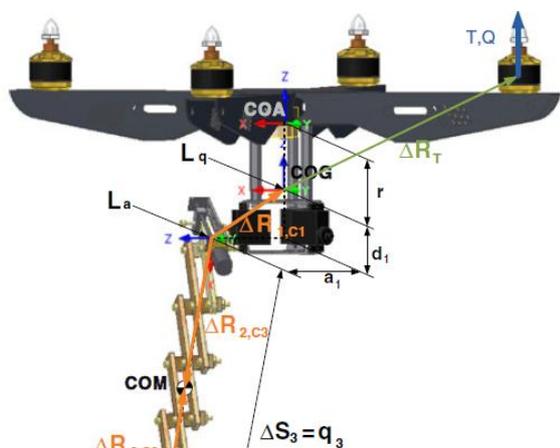


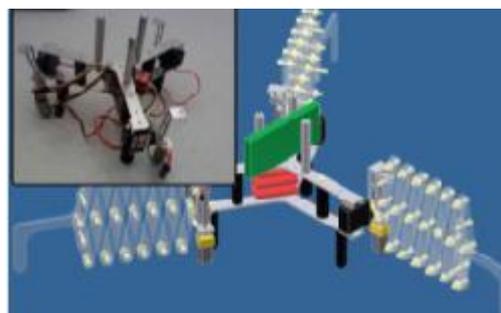
Рис. 1 – Мини-испытательный стенд с двумя прикрепленными манипуляторами [12]

В результате были исследованы силы реакции, которые БЛА испытывает во время манипуляции при наведении на объект. Создана модель компенсации этой силы и обеспечения квазиустойчивости БЛА при контакте с объектом.

В работе [16] прототип БЛМ построен с использованием недорогого квадрокоптера GAUI 330 (рис. 2) и трех манипуляторов (рис. 3). Квадрокоптер GAUI использует четыре равнорасположенных бесколлекторных двигателя, оснащенных 8-дюймовыми пропеллерами для обеспечения подъема и маневренности. Общий диаметр транспортного средства составляет 330 мм, а масса – приблизительно 400 г. с максимальной летящей массой 1100 г. Общий вес квадрокоптера с манипулятором составляет 950 г., что позволяет самолету поднимать мелкие предметы ниже 200 г. Окончательная конструкция показана на рис. 4 и обозначены основные точки конструкции: центр сборки – COA, центр масс манипулятора – COM, центр тяжести квадрокоптера – COG. Также показаны измеренные расстояния между этими точками.



В)



а)

б)

Рис. 2 – Прототип БЛМ [16]: а) конструкторская модель БЛМ (приведен только один манипулятор для наглядности); б) мультикоптер GAUI 330; в) захват с 3 манипуляторами

Каждая рука манипулятора имеет 2 степени свободы. Для дополнительных манипуляционных возможностей на конце манипулятор оснащен крюком, чтобы зацеплять, толкать/тянуть объекты с пола. Результаты моделирования показали, что манипулятор создает наименьшее количество помех БЛА в том случае, когда все звенья движутся одновременно. Тем не менее экспериментальные результаты показывают, что мультикоптер имеет колебания.

В работе [16] также описана разработка прототипа БЛМ второго поколения, показанного на рисунке 5. Эта платформа включает манипуляторы с 4 степенями свободы, более надежную конструкцию мультикоптера с большей полезной нагрузкой и встроенным программируемым автопилотом на базе вычислительного модуля Arduino. Новый прототип БЛМ был модернизирован до мультикоптера серии GAUI 500X и 10-дюймовых пропеллеров. Диаметр транспортного средства составляет 500 мм и оно способно переносить

полезную нагрузку 500 г. Была во многом изменена система шасси, первоначально разработанная для камеры панорамирования и обеспечения беспрепятственного рабочего пространства для манипуляторов. Каждый манипулятор имеет 4 степени свободы с одним параллельным захватом с 1 степенью свободы в качестве конечного эффектора. Микро-сервоприводы управляют каждым соединением и обеспечивают высокую степень точности, чем предыдущий прототип. Кроме того, встроенная электроника была модернизирована для того, чтобы включить Arducopter с открытым исходным кодом для обработки данных низкого уровня и реализации системы управления. 12-канальный сервоконтроллер генерирует сигналы для каждого сервопривода и имеет связь с базовой станцией через специализированный канал Xbee.



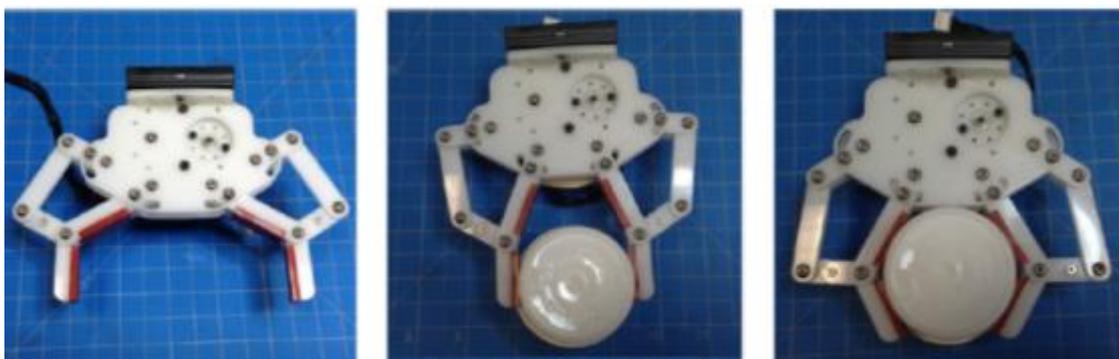
Рис. 5 – Прототип второго поколения БЛМ [16]: а) конструкторская модель; б) прототип

Во втором прототипе была использована операционная система Robot Operating System (ROS) для управления и связи между системой захвата, пользователем и квадрокоптером. Система технического зрения и другие датчики применены для навигации БЛА, наведения манипулятора на объект.

В работе [13] многозвенный манипулятор был установлена на платформу с 3 степенями свободы для имитации линейных движений квадрокоптера Ascending Technologies Pelican. Углы кренами, тангажами и рысканиями не применялись в эмулированных движениях из-за механической сложности реализации. Манипулятор собран из сервомоторов и пассивных элементов, как показано на рисунках 6 и 7. Реконфигурируемый захват с двумя степенями свободы и одним приводом позволяет взять разнообразные объекты с минимальными движениями. Предварительная демонстрация возможностей манипулятора была выполнена на при примере имитации задачи снятия и установки изоляторов с высоковольтных линий электропередач



Рис. 6 – Многозвенный манипулятор для БЛА [13]



а

б

в

Рис. 7 – Реконфигурируемый захват с двумя степенями свободы: а) открытые лопасти; б) обжимный захват; в) пассивно обжимной захват [13]

В работе [15] описана конструкторская документация и результаты экспериментальной проверки миниатюрного антропоморфного однопальцевого захвата весом 40 г., специально разработанного для воздушных манипуляций. Три пассивные сустава пальца приводятся в движение нейлоновым сухожилием, которое свернуто на катушке малого сечения, прикрепленной к валу микромотора (рис. 8). Антропоморфный палец состоит из трех U-образных алюминиевых профилей шириной 8 мм и длиной 45 мм (проксимальная фаланга), 20 мм (средняя фаланга) и 15 мм (дистальная фаланга) соответственно. Последовательность движения в полном сгибании пальца показана на рисунке 9.

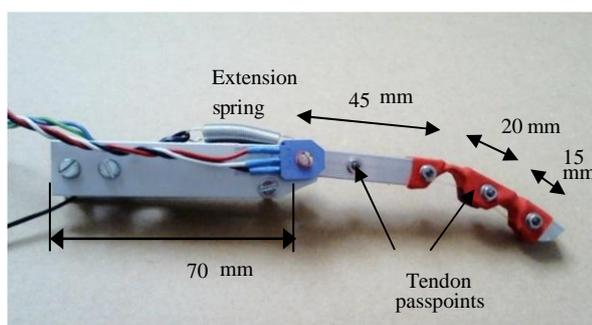


Рис. 8 – Антропоморфный однопальцевый захват с соединенными тремя суставами [15]

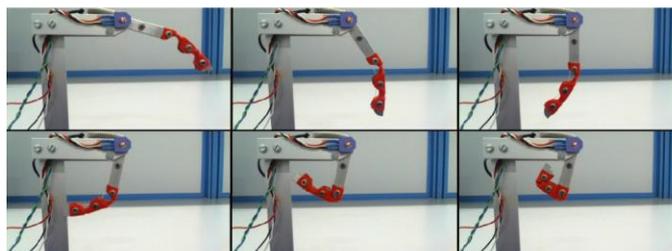


Рис. 9 – Последовательность движений сгибания пальца, выполняемая тремя суставами под управлением одного двигателя [15]

Однопальцевый захват способен самостоятельно брать объекты разных форм без поддержки других пальцев благодаря трем соединенным суставам, которые адаптируют контур пальца к объекту, обеспечивая постоянный крутящий момент на трех суставах при контакте с объектом. На рисунке 10 показаны четыре примера, на которых захватывается бутылка, отвертка, плоскогубцы и шар.

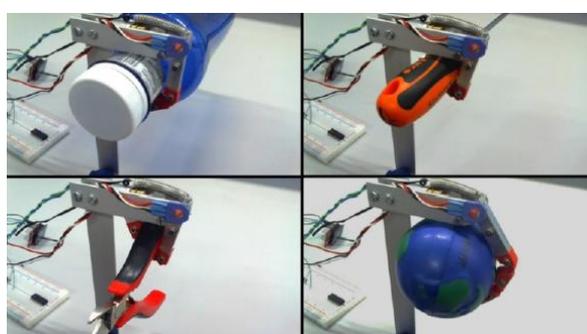


Рис. 10 – Примеры захвата предметов: бутылки, отвертки, плоскогубцев и шара [15]

Если не удастся захватить какой-либо объект, то однопальцевый захват можно использовать для безопасного обнаружения и реагирования на

столкновение манипулятора с окружающей средой, при этом касание приведет к пассивному сжатию выпрямленного изначально пальца. Это может оказаться полезно при навигации на воздушной платформе в ограниченном пространстве.

В работе [17] описан мультикоптер, оснащенный манипулятором весом 200 г, захватывающим полезную нагрузку до 200 г. Сам мультикоптер может нести полезную нагрузку свыше 500 г (больше, чем общий вес манипулятора с полезной нагрузкой). Структура предложенной системы показана на рис. 11. В разработанном контроллере движением БЛА применялись три метода управления: метод линейной обратной связи (FL-PID), метод прямого управления с нечеткой логикой (DFLC) и метод управления с нечеткой моделью (FMRLC). Методы были протестированы при захвате полезной нагрузки и освобождения от нее.



Рис. 11 – 3D-модель мультикоптера с манипулятором [17]

Метод FL-PID не обеспечил стабильность БЛА при увеличении полезной нагрузки и наблюдались задержки при выполнении операций в реальном времени. Метод DFCLC и FMRLC позволили сохранить стабильность БЛА при добавлении/освобождении от полезной нагрузки, при этом метод FMRLC показал более высокую точность позиционирования.

В работе [18] исследовалась проблема точности навигации и управления движением нескольких соединенных БЛА с манипуляторами, разработана общая структура моделирования авиационных транспортных средств с несколькими фюзеляжами. Для демонстрации предложенных моделей в качестве отдельного элемента использовался шестиугольный БЛА, оснащенный простым манипулятором.

В работе [19] описан вертолет SST-Eagle2-GS Long Tail, выпущенной компанией HIROBO, дооснащенный манипулятором. При испытаниях было изучено влияние добавленного веса (манипулятора) на параметры системы управления вертолетом. Учитывая, что добавленный вес манипулятора изменил общий вес вертолета на 25%, автопилот MP2128Helі оснащенный ПИД-регуляторами не обеспечил стабильность и при тестировании вскоре после взлета вертолет кренился в боковые колебания, поэтому алгоритм расчета значений ПИД-регуляторов был модифицирован и с новыми параметрами был обеспечен стабильный полет вертолета с дополнительной массой. Тестирование проводилось при автономном зависании вертолета на высоте 3 м.

После определения параметров системы управления дальнейшие испытания были сосредоточены на оценке уровня механических колебаний, создаваемых плечом манипулятора под давлением воздушного потока, генерируемого главным пропеллером вертолета и вертолетным двигателем. Среди всех параметров манипулятора его размер и масса оказывают наибольшее влияние на поведение платформы в воздухе и стабильность всей системы [14].

## **Анализ новых задач, возникающих при управлении БЛА с манипулятором**

На основе проведенного выше анализа существующих современных решений физического взаимодействия БЛА с окружающими наземными объектами далее сформулируем спектр новых задач, которые возникают при совместном управлении БЛА и установленном на нем манипулятором с захватом при контактных операциях с транспортируемым объектом. В таблице 1 новые задачи перечислены в соответствии с основными этапами разработки и функционирования БЛА при манипуляциях с наземным объектом. На этапе проектирования необходимо рассчитать увеличенные значения параметров БЛА и расширение сенсорной системы для манипуляций и транспортировки объекта.

**Таблица 1. Новые задачи при реализации манипуляций БЛА с наземными объектами**

<b>№</b>	<b>Наименование задачи</b>	<b>Требования</b>
<i>На этапе проектирования</i>		
1.	Выбор места установки манипулятора с захватом на БЛА	1. Обеспечение необходимых углов движения манипулятора и захвата для работы с объектами. 2. Отсутствие пересечения рабочих зон манипулятора с движущимися элементами БЛА.
2.	Выбор и расположение	1. Расположение дополнительных

	сенсорной системы	датчиков и видеокамер для управления манипулятором и захватом при манипуляциях с объектом.
3.	Расчет увеличенных значений параметров БЛА для транспортировки объектов	<p>1. Обеспечение повышенных летных характеристик для полета с манипулятором и полезной нагрузкой.</p> <p>2. Обеспечение дополнительных энергетических ресурсов для полета с манипулятором и полезной нагрузкой.</p>
<i>На этапе взлета</i>		
4.	Выбор положения манипулятора	<p>1. Обеспечение минимального аэродинамического сопротивления манипулятором.</p> <p>2. Обеспечение компактного парковочного положения манипулятора с минимальным увеличением габаритов БЛА.</p> <p>3. Обеспечение стабильного положения БЛА при переводе манипулятора в парковочное положение.</p>

		4. Обеспечение фиксации захвата на корпусе БЛА.
5.	Синхронизация работы БЛА и захвата, использующегося для посадки на наземные стационарные объекты	<p>1. Обеспечение синхронизированного взлета и расжатия захвата с наземного объекта на основе анализа данных с сенсоров.</p> <p>2. Обеспечение перевода манипулятора в парковочное положение.</p>
<i>На этапе захвата объекта</i>		
6.	Подлет к манипулируемому объекту	<p>1. Навигация к объекту на достаточно близкое расстояние для перевода манипулятора в рабочее состояние.</p> <p>2. Поддержание стабильного положения БЛА при переводе манипулятора из парковочного в рабочее положение.</p>
7.	Наведение манипулятора на объект	1. Обеспечение сенсорными данными положения захвата относительно объекта и окружающих предметов с учетом вариативности положения БЛА.

		<p>2. Обеспечение прямой видимости манипулируемого объекта при совместных движениях БЛА и манипулятора.</p> <p>3. Обеспечение достаточного расстояния от БЛА до окружающих предметов.</p> <p>4. Поддержание стабильного положения БЛА при наведении манипулятора</p>
8.	Захват объекта	<p>1. Синхронизация захвата объекта и стабилизации БЛА.</p> <p>2. Обеспечение взлета БЛА с объектом в захвате.</p> <p>3. Перевод манипулятора в положение оптимальное для полета с учетом параметров транспортируемого объекта.</p>
<i>На этапе транспортировки объекта</i>		
9.	Транспортировка	<p>1. Обеспечение безопасной навигации БЛА с учетом габаритов транспортируемого объекта.</p>

<i>На этапе выгрузки объекта</i>		
10.	Подлет к выгрузочной площадке	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Навигация БЛА до выгрузочной площадки с учетом габаритов транспортируемого объекта.</li> <li>2. Перевод манипулятора в положение оптимальное для выгрузки транспортируемого объекта.</li> </ol>
11.	Размещение объекта на посадочной площадке	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обеспечение стабильного положения БЛА при наведении манипулятора.</li> <li>2. Установка объекта в заданной области выгрузочной площадки.</li> <li>3. Расжатие захвата и отведение манипулятора/БЛА от объекта.</li> <li>4. Перевод манипулятора в парковочное положение.</li> </ol>

На этапе взлета требуется выбрать компактное фиксированное парковочное положение манипулятора, обеспечивающее минимальное аэродинамическое сопротивление, а также сохранить стабильное положение БЛА при переводе манипулятора в парковочное положение. В случае если манипулятор использовался для посадки БЛА на наземном объекте требуется обеспечить синхронизацию работы БЛА и захвата при расстыковке и взлете.

На этапе захвата объекта производится навигация БЛА к объекту на достаточно близкое расстояние для перевода манипулятора в рабочее состояние, наведение манипулятора на объект, захват и взлет БЛА с объектом. Основную сложность на данном этапе представляет обеспечение стабильного положения БЛА при движении манипулятора и точное наведение захвата при динамически варьирующемся положении БЛА.

На этапе транспортировки объекта необходимо обеспечение безопасной навигации БЛА с учетом габаритов транспортируемого объекта.

На этапе выгрузки объекта осуществляется полет к выгрузочной площадке, перевод манипулятора в положение оптимальное для выгрузки транспортируемого объекта и размещение объекта на посадочной площадке. После установки объекта в заданной области выгрузочной площадки осуществляется расжатие захвата и отведение манипулятора/БЛА от объекта. Обеспечение стабильного положения БЛА позволяет более точно произвести наведение манипулятора и установку объекта. Перечисленные задачи и требования позволяют определить параметры программно-аппаратного обеспечения БЛА, необходимые для манипуляций и транспортировки наземных объектов, а также взаимодействия с наземными сервисными роботизированными платформами и другими коллаборативными роботами [9, 20, 21].

### **Заключение**

Исторически исследование систем управления БЛА было сосредоточено на предотвращении падения и контакта с окружающими предметами. Это в

основном было связано с недостаточными возможностями использования полезной нагрузки, доступной для БЛА. До сих пор БЛА использовались главным образом для задач наблюдения и мониторинга, например, в поисково-спасательных миссиях. Тем не менее способность воздушных транспортных средств манипулировать и перемещать объекты, с которыми они сталкиваются, может значительно расширить типы миссий, выполняемых беспилотными системами. Летящие роботы, оснащенные манипуляторами, могут привести к существенным изменениям в транспортной логистике в околоземных средах.

На сегодняшний день применение БЛА для непосредственного взаимодействия с окружающей средой по-прежнему ограничено из-за его нестабильности. Был проведен ряд исследований по данной тематике, но большинство из них выполнены на уровне моделирования. Безусловно, работа с объектами с использованием манипулятора, установленного на беспилотных летательных аппаратах, и изучение особенностей управления мультироторными платформами, оснащенными манипуляторным захватом, являются перспективными направлениями дальнейших исследований.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-58-76001\_ЭРА\_а.*

### **Библиографический список**

1. Барбасов В.К., Орлов П.Ю., Фёдорова Е.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования линий электропередачи // Электрические станции. 2016. № 10 (1023). С. 31 - 35.

2. Коротеев А.Ю., Ялпаев А.А., Фимушин Е.С. Конструкция винтокрылого высокоманевренного летательного аппарата // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», Казань, 10-12 августа 2016: сборник докладов в 2-х томах. – Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2016. Т. 1. С. 80 - 85.
3. Минин Н.В. Применение комбинированного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя в качестве двигательной установки для малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. №95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=83960>
4. Залесский Б.А., Шувалов В.Б. Навигация БЛА с помощью бортовой видеокамеры: алгоритм и компьютерная модель // Научная визуализация. 2017. Т. 9. № 2. С. 13 - 25.
5. Кулапин В.И., Князьков А.В., Егорихин А.С., Шевцов П.В. Автоматическая система управления прецизионной посадкой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на наземную платформу беспроводной зарядки // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, Пензенский государственный университет, 2015. Т. 1. С. 244 - 246.
6. Аксенов А.Ю., Зайцева А.А., Кулешов С.В., Ненаусников К.В. Варианты обеспечения посадки при автономном управлении беспилотными мультироторными летательными аппаратами // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85880>

7. Данилов И.Ю., Афанасьев И.М., Магид Е.А. Автоматизированные системы для увеличения длительности полета электрических мультикоптеров // Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект», Красноярск, 11 декабря 2015: сборник трудов. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. С. 19 - 24.
8. Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Дьяченко А.А., Плаксиенко Е.А. Автономное осуществление миссий БЛА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 1 (186). С. 87 - 96.
9. Нго К.Т., Соленая О.Я., Ронжин А.Л. Анализ подвижных роботизированных платформ для обслуживания аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84444>
10. Иванов А.А., Шмаков О.А. Алгоритм определения внутренней геометрии манипулятора змеевидного типа при движении лидирующего звена по наращиваемой траектории // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 49. С. 190 - 207.
11. Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Алтунин А.А., Крючков Б.И., Усов В.М. Эвакуация космонавта в скафандре во время внекорабельной деятельности на поверхности луны с участием аварийно-спасательных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 11. С. 734 - 739.
12. Korpela S.M., Danko T.W., Oh P.Y. MM-UAV: Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012, no. 65, pp. 93 – 101.

13. Danko T.W., Oh P.Y. Design and Control of a Hyper-Redundant Manipulator for Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicles // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, no. 73, pp. 709 – 723.
14. Gardecki S., Kasiński A., Bondyra A., Gąsior P. Multirotor Aerial Platform with Manipulation System - Static Disturbances // ICA 2017: Automation, 2017, pp. 357 - 366.
15. Suarez A., Heredia G., Ollero A. Compliant and Lightweight Anthropomorphic Finger Module for Aerial Manipulation and Grasping. Robot 2015 // Second Iberian Robotics Conference, 02 December 2015, pp. 543-555.
16. Orsag M., Korpela C., Oh P. Modeling and Control of MM-UAV: Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, no. 69, pp. 227 – 240.
17. Khalifa A., Fanni M. A New Quadrotor Manipulation System: Modeling and Point-to-point Task Space Control // International Journal of Control, Automation and Systems, 2017, no. 15(3), pp. 1434 - 1446.
18. Kobilarov M. Nonlinear Trajectory Control of Multi-body Aerial Manipulators // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, no. 73, pp. 679 – 692.
19. Chmaj G., Buratowski T., Uhl T., Seweryn K., Banaszkiwicz M. The Dynamics Influence of the Attached Manipulator on Unmanned Aerial Vehicle // Aerospace Robotics, 19 March 2013, pp. 109 - 119.
20. Кодяков А.С., Павлюк Н.А., Будков В.Ю. Исследование устойчивости конструкции антропоморфного робота Антарес при воздействии внешней

нагрузки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 5. С. 321 - 327.

21. Шляхов Н.Е., Ватаманюк И.В., Ронжин А.Л. Обзор методов и алгоритмов агрегации роя роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 1. С. 22 - 29.