

Пути разработки высокоманевренных мультироторных летательных аппаратов для нужд агропромышленного комплекса

А.А. Андропова, В.Р. Матасова, С.А.К. Диане

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация – Интенсификация агропромышленного производства требует внедрения адаптивных и маневренных летательных аппаратов, способных в автономном режиме выполнять различные технологические операции. В настоящем исследовании анализируются перспективы разработки и применения мультироторных летательных аппаратов с реконфигурируемой аэродинамической схемой для задач осмотра сельскохозяйственных территорий, прецизионной обработки растений и мониторинга выпаса скота на пастбищах. Дается схема аппаратного и информационно-управляющего обеспечения летательного аппарата повышенной маневренности для нужд агропромышленного комплекса. Рассмотрена взаимосвязь научных методов для комплексного моделирования подобных систем. Предложены критерии оценки эффективности высокоманевренного летательного аппарата для ключевых сельскохозяйственных задач.

Ключевые слова – Мультироторный летательный аппарат, агропромышленный комплекс, высокоманевренные БПЛА, конвертоплан, адаптивное управление, реконфигурируемая аэродинамическая конструкция.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный агропромышленный комплекс (АПК) столкнулся с непростой дилеммой на пути непрерывной интенсификации сельскохозяйственных (с/х) работ: как обеспечить продовольственную безопасность в условиях минимизации негативного воздействия на окружающую среду [1]. Эта задача выходит за рамки простой механизации и требует внедрения принципиально новых адаптивных, и в том числе интеллектуальных технологий. Конструктивной базой для них служат беспилотные летательные аппараты (БПЛА), особенно мультикоптеры, которые уже неоднократно доказали свою полезность. Однако их массовое применение в реальных, зачастую сложных и неоднородных сельхозугодьях, выявило серьезные ограничения. К таковым относятся низкая крейсерская скорость, чувствительность даже к умеренным ветровым нагрузкам и, что критично, ограниченная продолжительность полета, обусловленная высоким энергопотреблением. Все это существенно снижает их экономическую целесообразность при решении типовых агропромышленных задач. Речь идет о мониторинге протяженных границ полей, садовых участков, инспекции труднодоступных зон вроде оврагов,

лесополос, береговых линий водоемов, или оперативном управлении перемещением скота на обширных пастбищах [2]. В этом контексте взгляды исследователей и практиков все чаще обращаются к более совершенным мультироторным платформам нового поколения – конвертопланам и реконфигурируемым БПЛА.

Их фундаментальное преимущество – уникальная способность сочетать вертикальный взлет и посадку, необходимую для работы в поле, со скоростным и энергоэффективным горизонтальным полетом, как у самолета [3]. Именно эти качества открывают путь к качественному скачку в автоматизации ключевых сельскохозяйственных операций.

Стоит отметить, что направление разработки мультироторных БПЛА, не является новым для мировой инженерии: первый мультироторный аппарат был создан ещё в 1907 году [4], а первый автономный мультикоптер под названием "Curtis Wright VZ-7" – в 1958 году [5].

Цель данного обзора – дать всестороннюю оценку потенциала, существующих технических решений и нормативных аспектов применения таких высокоманевренных БПЛА для трех критически важных направлений АПК: детального осмотра обширных территорий со сложным рельефом и препятствиями; прецизионной обработки разнотипных угодий (от открытых пашен до садов с плотными насаждениями древесно-кустарникового типа); а также для эффективного управления движением животных на открытых пастбищах. На Рис.1 представлены основные направления развития высокоманевренных дронов. Среди них – разработка малогабаритных конвертопланов и адаптивных алгоритмов стабилизации дронов, позволяющих зависать в точке, стыковаться с подвесной зарядной станцией, а также динамически формировать модульные структуры.

Эксплуатация БПЛА в сельском хозяйстве России на сегодняшний день происходит в рамках динамично развивающейся и институционально структурированной нормативно-правовой базы. Основную нагрузку несут несколько ключевых документов [6]:

1. Воздушный кодекс РФ: Задаёт правовые основы использования воздушного пространства, обязательные для всех воздушных судов, включая беспилотные.
2. Федеральные авиационные правила ФАП-137: Это уже более конкретная инструкция по эксплуатации

БПЛА. Данные правила детально прописывают требования к регистрации аппаратов, порядок согласования полетов, ограничения по высоте и другие нюансы, специфичные для применения в сельской местности.



Рис. 1. Ключевые направления развития дронов повышенной маневренности

3. Национальные стандарты (ГОСТы): например, ГОСТ Р 60.6.0.1-2021, который помогает классифицировать БПЛА по уровню их самостоятельности (автономности) [7], или ГОСТ Р 59653-2021, устанавливающий конкретные технические требования к мониторингу садов именно с использованием дронов. Эти стандарты важны для обеспечения качества и безопасности выполняемых работ.

Однако, несмотря на существующие регламенты, применение именно высокоманевренных БПЛА, и особенно конвертопланов, сталкивается с уникальными проблемами, которые недостаточно полно проработаны как в правовом, так и в научно-техническом отношении [8]. Эти проблемы порождены высокой степенью непредсказуемости рабочих сред при решении задач АПК (в силу вариативности природно-климатических условий), а также технологическими ограничениями по времени автономной работы БПЛА, точности их позиционирования и энергопотреблению.

Открытые сельскохозяйственные угодья попадают под воздействие различных метеорологических факторов, которые могут существенно влиять на эксплуатационные характеристики беспилотных летательных аппаратов. В частности, порывистый ветер, достигающий в степных районах скорости до 15-20 метров в секунду, а также внезапные изменения направления ветра создают значительные аэродинамические возмущения. Рельеф местности также оказывает значительное влияние на выполнение полетов БПЛА. Сельскохозяйственные поля зачастую характеризуются наличием перепадов высот, склонов, террас и оврагов, что требует от автономных дронов постоянной адаптации высоты и траектории полета.

Работа БПЛА в условиях сложной ландшафтной обстановки, такой как сады, лесополосы, ягодники или территории вблизи сельскохозяйственных построек, сопряжена с риском столкновения с различными препятствиями, включая ветви деревьев, столбы, элементы конструкций и даже животных. В таких ситуациях использование обычных квадрокоптеров с

открытыми винтами может привести к повреждению оборудования и снижению эффективности выполнения задач.

Ограниченная емкость аккумуляторов является еще одним фактором, ограничивающим возможности использования классических БПЛА для мониторинга и обработки больших сельскохозяйственных площадей.

Это становится критически важным параметром для обеспечения продолжительности и эффективности выполнения задач. Указанные трудности, присущие сфере цифрового сельского хозяйства, делают столь перспективными реконфигурируемые воздушные платформы и конвертопланы [9]. Их ключевые преимущества выглядят весьма убедительно:

1. Скорость и дальность полета: в самолетном режиме эти БПЛА могут развивать скорость 50-300 км/ч, что значительно выше, чем у традиционных мультикоптеров (20-100 км/ч). Благодаря уменьшению аэродинамического сопротивления они способны быстрее преодолевать большие расстояния [10].

2. Энергоэффективность: горизонтальный полет с использованием подъемной силы крыла требует на 30-40% меньше энергии, чем у квадрокоптера аналогичной массы. Это увеличивает продолжительность полета или позволяет перевозить более тяжелые и функциональные грузы, такие как камеры и устройства для распыления агрохимикатов.

3. Устойчивость к ветру: обтекаемая конструкция корпуса не только обеспечивает подъемную силу, но и стабилизирует полет. Аэродинамические качества крыловидного профиля помогают точно поддерживать курс и высоту даже при сильном ветре и турбулентности, в отличие от БПЛА, которые стабилизируются только за счет тяги винтов.

4. Защищенность и адаптивность: возможность ручного и автоматического складывания элементов конструкции (убирание лучей, поворот двигателей или маскировка винтов) значительно уменьшает габариты БПЛА и снижает риск повреждений в ограниченном пространстве, особенно при эксплуатации вблизи земли или среди препятствий [11].

II. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ МАНЕВРЕННОСТИ БПЛА

Чтобы БПЛА могли уверенно работать в сложных условиях АПК, требуется комплексный подход, объединяющий передовые разработки сразу в нескольких областях: аэродинамике, системах управления, компьютерном моделировании и искусственном интеллекте [12].

Наиболее эффективными представляются пять взаимодополняющих направлений:

1. Разработка платформ с реконфигурируемой аэродинамической схемой. Это направление предполагает создание БПЛА, способных динамически изменять свою форму в полете для оптимизации летных характеристик под конкретную фазу миссии или задачу при помощи системы управления, обобщенная структура которой показана на Рис. 2. Разновидности таких реконфигурируемых платформ

перечислены ниже.

1.1. Конвертопланы представляют собой аппараты с поворотными двигателями или винтами. Они взлетают и садятся по вертолетному принципу, а основной маршрут преодолевают в режиме самолета, что обеспечивает высокую скорость и экономичность. Такие дроны идеально подходят для задач, требующих быстрого перемещения к удаленной точке и последующей прецизионной работы на месте.

1.2. Дроны со складными крыльями, такие как Transwing и его аналоги, позволяют компактно взлетать и приземляться, а затем разворачивать крылья для эффективного полета на значительные расстояния. Подобная схема удобна для операторов дронов, осуществляющих их запуск в полевых условиях.

1.3. Грузовые дроны со складными или поворотными лучами могут уменьшать свои габариты при взлете, посадке или работе в ограниченном пространстве, защищая винты, и увеличивать базу для повышения стабильности при зависании.

1.4. Модульные реконфигурируемые дроны способны оперативно менять полезную нагрузку, такую как камеры, распылители или датчики [11, 13]. Кроме того, существует возможность объединения дронов в комплексные летательные системы, что важно для организации грузоперевозок, спасения людей, пожаротушения и т.д.

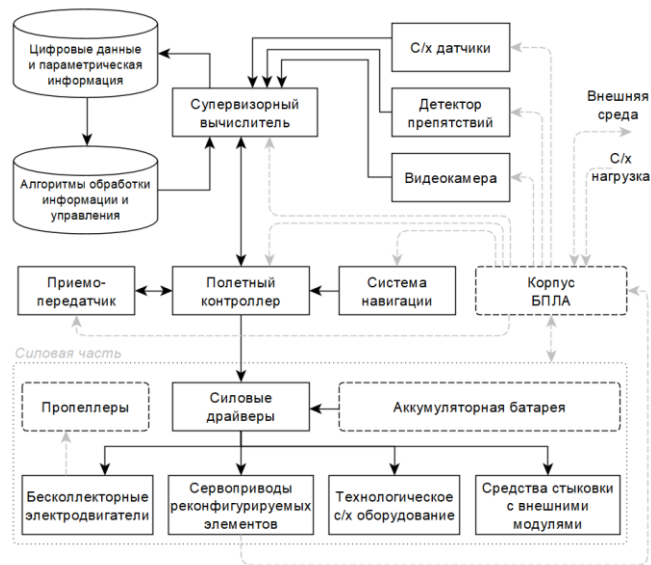


Рис. 2. Схема аппаратного и информационно-управляющего обеспечения реконфигурируемого БПЛА для нужд АПК

2. Исполнение высокоманевренных дронов с применением передовых материалов и современных аппаратных компонент. В том числе:

2.1. Оснащение прецизионными инерциальными датчиками, энергоэффективными сервоприводами рулевых и конструктивных элементов, высокоскоростными бесколлекторными двигателями, энергоёмкими аккумуляторами. В долгосрочной перспективе интерес представляют сверхточные квантовые гироскопы и акселерометры, потенциально способные обеспечить надежное резервирование систем GPS/ГЛОНАСС [14].

2.2. Обеспечение совместимости аппаратных комплектующих от разных производителей; взаимная интеграция сенсоров, актуаторов и вычислителей; обеспечение требуемой частоты обработки разнородной сенсорной информации и принятия управляющих решений.

2.3. Использование композитов с переменной жесткостью или интеллектуальных актуаторов позволит достичь эффекта адаптивного крыла, которое автоматически меняет свой профиль в полете, оптимизируя аэродинамику под текущую скорость, нагрузку и режим.

3. Реализация алгоритмов локализации и картографирования. Современные системы технического зрения на борту дрона ушли далеко вперед от простого обнаружения препятствий. Теперь это сложные системы, способные в реальном времени не только "видеть", но и понимать сцену: различать конкретные объекты, строить детальные трехмерные карты. Ключевым элементом здесь являются алгоритмы SLAM (одновременная локализация и построение карты), которые позволяют дрону ориентироваться там, где сигнал GPS пропадает или становится ненадежным – под густым пологом сада или в лесополосе [15].

4. Реализация адаптивного управления дроном. Стандартные линейные регуляторы (вроде хорошо известного ПИД-регулятора) часто не справляются с сильными и неожиданными возмущениями, типичными для сельхозавиации: резкий порыв ветра, изменение веса аппарата при выбросе удобрений, столкновения с кронами деревьев. Решение – в применении более интеллектуальных и гибких систем управления, некоторые классы которых перечислены ниже.

4.1. Робастные (высокоустойчивые) и адаптивные алгоритмы, построенные по аналитическим законам, обеспечивают стабильную работу и требуемое качество управления даже при значительной неопределенности в параметрах модели дрона или при сильных внешних воздействиях [16].

4.2. Нечеткие регуляторы эффективно справляются с ситуациями, в которых параметры сложно измерить точно, но обстановку можно описать качественно, например, "сильный ветер", "густая листва" или "близко к препятствию" [17].

4.3. Нейросетевые регуляторы обладают хорошей способностью обучаться на данных, получаемых как в симуляциях, так и в реальных полетах, что позволяет им адаптировать свое поведение в зависимости от изменяющихся характеристик дрона и окружающей среды [18].

Достижение требуемого уровня маневренности БПЛА вышеуказанными способами позволит сосредоточить внимание научно-технического сообщества на ряде смежных научно-технических направлений, обеспечивающих повышение эффективности и снижение рисков нештатных ситуаций:

– модульность и стандартизация: разработка универсальных интерфейсов (механических, электрических, программных) для быстрой замены полезной нагрузки прямо в полевых условиях или же

для оперативной подзарядки БПЛА;

- цифровые двойники сельхозугодий: создание высокоточных динамических цифровых моделей с/х территорий, которые позволят перейти к предиктивному планированию миссий БПЛА, через заблаговременную оптимизацию маршрутов и режимов работы под ожидаемые условия [19];

- гетерогенные группы БПЛА: исследование методов совместной работы разных типов дронов в одном рое.

Говоря о последнем из перечисленных направлений, отметим, что скоростной конвертоплан способен оперативно обследовать огромное пастбище или доставить груз (например, агрохимикат) на удаленный участок, а небольшой, но очень маневренный мультикоптер может с высокой точностью перемещаться и выполнять технологические операции в локальной зоне – в густом саду, среди лесополосы или даже внутри коровника. Координация движений БПЛА в такой группе должна осуществляться единой интеллектуальной системой.

III. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОМАНЕВРЕННЫХ БПЛА

Имитационное моделирование, проведенное различными исследователями для сравнения гибридного конвертоплана (архитектура типа Transwing) и классического квадрокоптера сопоставимой массы в виртуальных средах, имитирующих типичные для АПК условия, показало существенные преимущества платформы с реконфигурируемой схемой. Исследованные свойства описаны ниже.

1. Оценивалась устойчивость к ветру. В одном из ключевых тестов моделировалось зависание аппарата на месте (необходимое для детальной съемки или точечного опрыскивания) при боковом ветре 10 м/с. Результат: конвертоплан отклонился от заданной точки в среднем на 0,48 м (RMS), тогда как квадрокоптер – на 0,65 м. Улучшение устойчивости составило 26% [20]. Это напрямую влияет на качество получаемых данных и точность выполнения операций у земли.

2. Определялась энергетическую эффективность. На виртуальном маршруте патрулирования периметра поля длиной 15 км конвертоплан, выполнив взлет/посадку как вертолет, а основную часть пути пролетев как самолет, потратил 1820 Вт·ч. Квадрокоптер, вынужденный весь путь лететь в энергозатратном вертолетном режиме, потратил 2750 Вт·ч. Экономия энергии достигла 34% [21]. Эта разница означает либо на 40% больше времени в воздухе, либо возможность установки значительно более мощной полезной нагрузки.

3. Оценивалась отказоустойчивость в ограниченном пространстве. При моделировании полета в виртуальном саду с плотной структурой крон реконфигурируемый конвертоплан (со сложенными лучами и защищенными винтами) "столкнулся" с

ветвями на 42% реже, чем квадрокоптер с открытыми винтами [22].

4. Проводились тесты на скорость выполнения задач. Благодаря высокой крейсерской скорости в самолетном режиме (65 км/ч против 35 км/ч у коптера), время полного обследования виртуального участка в 100 гектар (включая все этапы: взлет, полет, сбор данных, посадку) сократилось с 82 до 36 минут [23].

Примеры виртуальных моделей мультироторных БПЛА с базовой функциональностью, созданных авторами настоящей статьи, приведены на (Рис. 3).

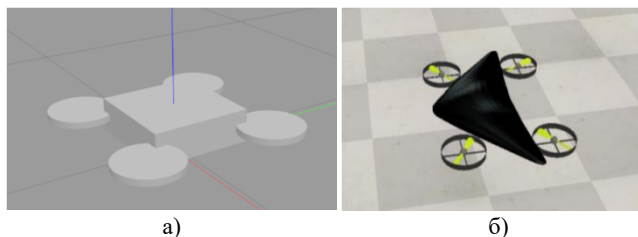


Рис. 3. Виртуальные модели БПЛА: а) модель квадрокоптера; б) модель конвертоплана

Для объективной оценки потенциала и отработки технологий управления высокоманевренными БПЛА для агропромышленного комплекса недостаточно проведения простых расчетов или натурных испытаний отдельных их узлов. Необходимо комплексное моделирование, которое интегрирует несколько уровней объективной реальности, при построении которых используются различные научные методы, взаимосвязь которых представлена на Рис. 4.



Рис. 4. Научные методы для моделирования БПЛА

Методика комплексного моделирования представляет собой итеративный процесс. Сначала необходимо формализовать реальную сельхоззадачу, затем создаются цифровые двойники дрона и окружающей среды с использованием специализированных симуляторов.

Для аэродинамики и динамики полета применяются программные комплексы MATLAB/Simulink, ANSYS Fluent и OpenFOAM. Для робототехники и окружения используются Gazebo + ROS, CoppeliaSim (V-REP) и

NVIDIA Isaac Sim [24, 25]. Для моделирования работы сенсоров применяются камеры, лидары и ИК-датчики в виртуальном мире.

На практике первым шагом компьютерного моделирования является создание цифрового двойника БПЛА. Он должен являть собой детальную математическую копию летательного аппарата, включающую в себя его константы, переменные состояния и силовую часть.

Силовая часть – это модели двигателей, пропеллеров, а для конвертопланов – дополнительно системы поворота тяги. Для конвертопланов и дронов-трансформеров особенную важность приобретает моделирование перехода между режимами полета.

Вторым ключевым элементом является цифровой двойник окружающей среды. Виртуальная среда должна достоверно воспроизводить рельеф местности, препятствия, атмосферу и свойства целей. Для рельефа местности требуется высокоточная цифровая модель рельефа. Препятствия должны быть представлены в виде 3D-моделей с учетом их формы, плотности и свойств видимости для сенсоров [19]. Требуется учитывать как растения отражают свет в различных спектральных диапазонах для камер и лидаров.

Третий элемент – это модель технологического процесса, которая включает конкретную задачу (мониторинг всходов на пашне, опрыскивание сада и т.д.) и критерии успеха, а также алгоритмы выполнения миссии. Критерии успеха должны быть четкими и измеримыми, такими как полнота осмотра площади, точность удержания позиции при ветре, равномерность распыления препарата, время реакции, а также расход энергии или химикатов.

После создания цифровых двойников разрабатываются, отлаживаются и проверяются внутри симуляции алгоритмы управления полетом, навигации, обработки данных с сенсоров, принятия решений и планирования миссий. Завершающим этапом является верификация и оценка результатов виртуальных испытаний по указанным критериям эффективности. Проводится сравнение с теоретическими расчетами, данными более простых моделей или, в идеале, с результатами реальных полетов.

В Табл. I представлены ключевые критерии оценки эффективности высокоманевренных БПЛА для типовых задач АПК. Обобщенная формула оценки дрона на основе данных критериев выглядит следующим образом:

$$Q = k_1 \cdot V_e + k_2 \cdot W + k_3 \cdot t + k_4 \cdot n + k_5 \cdot m + k_6 \cdot r + k_7 \cdot V_n, \quad (1)$$

где $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8$ - весовые коэффициенты, которые определяют относительную значимость каждого критерия.

Примером использования данной формулы может служить анализ конвертоплана, изображенного на Рис. 3. Для этого в Табл. II были сведены значения его параметров (в задаче осмотра ландшафта) и соответствующих им с точки зрения авторов статьи весовых коэффициентов.

По указанным данным оценка эффективности составила $Q = 0,89$.

ТАБЛИЦА I
КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ БПЛА ДЛЯ
ТИПОВЫХ ЗАДАЧ АПК

Задача АПК	Приоритетные критерии эффективности	Метод оценки / единицы измерения
Осмотр ландшафта	Скорость покрытия площади (V_n)	га/ч
	Полнота картографирования (m)	% от заданной площади
	Точность обхода препятствий (r)	кол-во инцидентов на 100 км пути
Прецизионная обработка посевных площадей	Равномерность распыления (Коэффициент вариации CV)	% ($CV < 20\%$ - отлично)
	Экономия агрохимикатов	% от расчетной нормы
	Сохранность культур	визуальная оценка / % поврежденных растений
Управление выпасом	Время реакции на перемещение стада	минуты
	Точность идентификации животных/состояния	% (по сравнению с эталоном)
Общие эксплуатационные характеристики	Продолжительность полета (t)	минуты
	Удельный расход энергии (W)	Вт·ч / га
	Максимальная допустимая скорость ветра (V_e)	м/с
	Надежность / отказоустойчивость в среде (n)	% успешно выполненных миссий

ТАБЛИЦА II
ЗНАЧЕНИЯ И ВЕСА ПАРАМЕТРОВ КОНВЕРТОПЛАНА

Парам.	V_e	W	t	n	m	r	V_n
	12	120	60	90	95	2	5
Кoeff.	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
	0,01	10	0,0025	0,0025	0,0025	0,025	0,005

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Посредством проведенного анализа подтверждается, что высокоманевренные мультироторные БПЛА, в особенности конвертопланы и реконфигурируемые системы, перестают быть экзотической разработкой и постепенно переходят в раздел технологий с реальным потенциалом для преобразования АПК. Их ключевое преимущество – способность эффективно работать в условиях неопределенности внешних условий и высоких требований по оперативности осмотра местности.

Результаты предварительного компьютерного моделирования подтверждают значительное превосходство таких платформ над традиционными мультикоптерами по основным эксплуатационным показателям: скорость выполнения типовых задач возрастает на 50-70%, энергопотребление снижается примерно на треть, а отказоустойчивость аппаратов в сложной среде повышается на 40% и более [26]. Это создает серьезные предпосылки для существенного повышения экономической эффективности целого ряда

операций: мониторинга состояния посевов и почв на огромных площадях, прецизионного (точечного) внесения средств защиты растений и удобрений, управления выпасом скота на обширных пастбищах, а также инспекции лесных массивов и водных объектов.

Однако путь от успешных симуляций и лабораторных прототипов к массовому внедрению требует преодоления ряда существенных барьеров:

1. технико-экономические: необходимость разработки надежных, ремонтпригодных и доступных по цене модульных конструкций, способных выдерживать ветровые нагрузки, дождь, загрязнение;

2. инфраструктурные: наладка связи и навигации, создание сетей зарядных/посадочных площадок в удаленных полевых условиях и обеспечение оперативной технической поддержки;

3. нормативные: развитие нормативно-правовой базы, которая должна всецело учитывать специфику высокоманевренных БПЛА и их способы их безопасной эксплуатации;

4. интеграционные: глубокая интеграция БПЛА в общую цифровую экосистему умных ферм, обеспечивающая как распределенный сбор данных [27], так и их преобразование в конкретные агрономические решения.

Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на повышении уровня автономности и интеллектуальности реконфигурируемых летательных аппаратов, обеспечении их надежности и отказоустойчивости в полевых условиях, а также на детальном анализе экономической целесообразности внедрения таких систем для различных по масштабу и специализации предприятий АПК. Успешное решение этих задач позволит сделать высокоточное, адаптивное и ресурсосберегающее сельское хозяйство не просто многообещающей концепцией, а повседневной практикой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Peksa, D. Mamchur, "UAV capabilities and technology trends in modern agriculture: a state-of-the-art review," *Agronomy*, vol. 14, pp. 370-375, 2024.
- [2] A. GreenField, M. Rodriguez, "Economic viability of UAV fleets for large-scale farm monitoring," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 194, pp. 106770-106781, 2023.
- [3] G.B. Thompson, H. Davis, "Hybrid VTOL drones: bridging the gap between speed and precision in crop scouting," *Precision Agriculture*, vol. 25, pp. 210-229, 2024.
- [4] E. Abouselima, "Design, manufacturing and position control of a quadrotor helicopter," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 57, pp. 45- 59, 2016.
- [5] K. Kakaes, F. Greenwood, M. Lippincot, "Drones and aerial observation: new technologies for property rights, human rights, and global development a primer," *New America*, vol. 10, pp. 115-123, 2015.
- [6] ГОСТ Р 58888-2020. Воздушные суда беспилотные гражданские. Термины и определения.
- [7] ГОСТ Р 60.6.0.1-2021. Робототехника. Сервисные мобильные роботы. Уровни автономности.
- [8] А.А. Иванов, С.В. Петренко, "Правовое регулирование применения БПЛА в сельском хозяйстве: проблемы и перспективы," *Право и экономика*, № 2, С. 45-53, 2024.
- [9] S. Lee, J. Kim, H. Park, "Aerodynamic performance and transition control of a folding-wing VTOL UAV (Transwing)," *Journal of Aircraft*, vol. 61, pp. 156-170, 2024.
- [10] C.A. Miller, D.J. Wilson, "Environmental uncertainty modeling for

robust agricultural UAV operations," *Transactions of the ASABE*. vol. 66, pp. 741-752, 2023.

- [11] B. Anderson, R. Clark, "Design and field testing of a reconfigurable quadplane UAV for orchard inspection," *Drones*, vol. 8, pp. 11-15, 2024.
- [12] Y. Zhang, L. Wang, Z. Liu, "A Framework for digital twin-based simulation and optimization of UAV operations in smart farming," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, pp. 4567-4580, 2024.
- [13] J.T. Smith, A.R. Brown, "Modular Payload Systems for Versatile Agricultural UAV Operations," *Drones*, vol. 8, pp. 40-48, 2024.
- [14] B. Stray, A. Lamb, A. Kaushik, "Quantum sensors for high-precision inertial navigation in GNSS-denied environments," *Nature Reviews Physics*, vol. 5, pp. 712-733, 2023.
- [15] J.M. Santos, D. Portugal, R.P. Rocha, "An evaluation of ROS-enabled SLAM algorithms for GPS-denied orchard navigation," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 108, pp. 59- 65, 2023.
- [16] H.K. Khalil, "Robust control of VTOL UAVs subject to wind disturbances and payload variations," *Automatica*, vol. 159, pp. 111429-111432, 2024.
- [17] R. Martinez, P.J. Herrera, G. Lopez, "Fuzzy logic wind gust rejection controller for quadrotors in precision agriculture applications," *Applied Soft Computing*, vol. 142, pp. 110365-110372, 2023.
- [18] F. Paredes-Valles, J. Hagenaaers, J. Dupeyroux, S. Stroobants, Y. Xu and G. Croon de, "Fully neuromorphic vision and control for autonomous drone flight," *arXiv:2303.08778*, pp. 1-18, 2023
- [19] R.A. White, B.D. Green, "High-Resolution digital terrain models for UAV path planning and simulation in agricultural landscapes," *remote sensing*, vol. 15, pp. 4556-4563, 2023.
- [20] E.G. Wilson, L.F. Thompson, "CFD simulation of wind effects on VTOL UAVs in typical farmland environments," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 244, pp. 105565-105572, 2024.
- [21] H.D. Nguyen, R. Patel, V. Kumar, "Energy consumption models and optimization strategies for agricultural UAVs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, pp. 1982-1995, 2024.
- [22] P. Davis, M. Roberts, "Modeling wind and obstacle interactions in orchards for UAV flight simulation," *Biosystems Engineering*, vol. 234, pp. 178-192, 2023.
- [23] M. Brown, K. Davis, "Energy efficiency analysis of hybrid VTOL vs. multirotor drones for long-range agricultural missions," *International Journal of Sustainable Aviation*, vol. 9, pp. 289-305, 2023.
- [24] M. Rossi, R. Passama, A. Crosnier, "Simulation of LiDAR-based perception for UAV navigation in dense orchards using Gazebo," *Robotics*, vol. 12, pp. 156-163, 2023.
- [25] N. Koenig, A. Howard, "Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, vol. 3, pp. 2149-2154, 2023.
- [26] M. Green, T. Roberts, "Simulation-based performance comparison of hybrid VTOL and multirotor UAVs for farm surveillance," *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, vol. 12, pp. 1-15, 2024.
- [27] Д.В. Кутузов, А.В. Осовский, О.В. Стукач, "Модель генерации и обработки трафика IoT параллельными коммутационными системами," *Вестник СибГУТИ*, № 4, С. 78-87, 2019.

Информация об авторах

Андропова Алина Александровна, магистрант РТУ МИРЭА, Москва, Россия, alina.andronova02@mail.ru.

Матасова Валерия Равильевна, магистрант РТУ МИРЭА, Москва, Россия, e-mail: matasova.valeriya2002@gmail.com.

Диане Секу Абдель Кадер, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ИПУ РАН, доцент кафедры проблем РТУ МИРЭА, Москва, Россия, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422.

Ways to develop highly maneuverable multirotor aerial vehicle for the needs of the agro-industrial complex

A. A. Andronova, V. R. Matasova, S. A. K. Diane

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract – The intensification of agricultural production requires the deployment of adaptive and maneuverable aerial vehicles capable of autonomously performing various technological operations. This study analyzes the prospects for the development and application of multirotor aerial vehicles with reconfigurable aerodynamic scheme for agricultural land surveying, precision crop processing, and livestock grazing monitoring. A diagram of the hardware and information control system for a highly maneuverable aerial vehicle for the needs of the agricultural sector is presented. The interrelationships between scientific methods for the integrated modeling of such systems are examined. Criteria for evaluating the effectiveness of highly maneuverable aerial vehicles for key agricultural applications are also proposed.

Keywords – Multirotor aircraft, agro-industrial complex, highly maneuverable UAVs, convertiplane, adaptive control, reconfigurable aerodynamic scheme.

References

- [1] J. Peksa, D. Mamchur, "UAV capabilities and technology trends in modern agriculture: a state-of-the-art review," *Agronomy*, vol. 14, pp. 370-375, 2024.
- [2] A. GreenField, M. Rodriguez, "Economic viability of UAV fleets for large-scale farm monitoring," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 194, pp. 106770-106781, 2023.
- [3] G.B. Thompson, H. Davis, "Hybrid VTOL drones: bridging the gap between speed and precision in crop scouting," *Precision Agriculture*, vol. 25, pp. 210-229, 2024.
- [4] E. Abouselima, "Design, manufacturing and position control of a quadrotor helicopter," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 57, pp. 45- 59, 2016.
- [5] K. Kakaes, F. Greenwood, M. Lippincot, "Drones and aerial observation: new technologies for property rights, human rights, and global development a primer," *New America*, vol. 10, pp. 115-123, 2015.
- [6] GOST R 58888-2020. Civil unmanned aircraft. Terms and definitions. (In Russ).
- [7] GOST R 60.6.0.1-2021. Robotics. Service mobile robots. Autonomy levels. (In Russ).
- [8] A.A. Ivanov, S.V. Petrenko, "Legal regulation of the use of UAVs in agriculture: problems and prospects," *Law and Economics*, vol. 2, pp. 45-53, 2024. (In Russ).
- [9] S. Lee, J. Kim, H. Park, "Aerodynamic performance and transition control of a folding-wing VTOL UAV (Transwing)," *Journal of Aircraft*, vol. 61, pp. 156-170, 2024.
- [10] C.A. Miller, D.J. Wilson, "Environmental uncertainty modeling for robust agricultural UAV operations," *Transactions of the ASABE*, vol. 66, pp. 741-752, 2023.
- [11] B. Anderson, R. Clark, "Design and field testing of a reconfigurable quadplane UAV for orchard inspection," *Drones*, vol. 8, pp. 11-15, 2024.
- [12] Y. Zhang, L. Wang, Z. Liu, "A Framework for digital twin-based simulation and optimization of UAV operations in smart farming," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, pp. 4567-4580, 2024.
- [13] J.T. Smith, A.R. Brown, "Modular Payload Systems for Versatile Agricultural UAV Operations," *Drones*, vol. 8, pp. 40-48, 2024.
- [14] B. Stray, A. Lamb, A. Kaushik, "Quantum sensors for high-precision inertial navigation in GNSS-denied environments," *Nature Reviews Physics*, vol. 5, pp. 712-733, 2023.
- [15] J.M. Santos, D. Portugal, R.P. Rocha, "An evaluation of ROS-enabled SLAM algorithms for GPS-denied orchard navigation," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 108, pp. 59- 65, 2023.
- [16] H.K. Khalil, "Robust control of VTOL UAVs subject to wind disturbances and payload variations," *Automatica*, vol. 159, pp. 111429-111432, 2024.
- [17] R. Martinez, P.J. Herrera, G. Lopez, "Fuzzy logic wind gust rejection controller for quadrotors in precision agriculture applications," *Applied Soft Computing*, vol. 142, pp. 110365-110372, 2023.
- [18] F. Paredes-Valles, J. Hagenaaers, J. Dupeyroux, S. Stroobants, Y. Xu and G. Croon de, "Fully neuromorphic vision and control for autonomous drone flight," *arXiv:2303.08778*, pp. 1-18, 2023.
- [19] R.A. White, B.D. Green, "High-Resolution digital terrain models for UAV path planning and simulation in agricultural landscapes," *remote sensing*, vol. 15, pp. 4556-4563, 2023.
- [20] E.G. Wilson, L.F. Thompson, "CFD simulation of wind effects on VTOL UAVs in typical farmland environments," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 244, pp. 105565-105572, 2024.
- [21] H.D. Nguyen, R. Patel, V. Kumar, "Energy consumption models and optimization strategies for agricultural UAVs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, pp. 1982-1995, 2024.
- [22] P. Davis, M. Roberts, "Modeling wind and obstacle interactions in orchards for UAV flight simulation," *Biosystems Engineering*, vol. 234, pp. 178-192, 2023.
- [23] M. Brown, K. Davis, "Energy efficiency analysis of hybrid VTOL vs. multirotor drones for long-range agricultural missions," *International Journal of Sustainable Aviation*, vol. 9, pp. 289-305, 2023.
- [24] M. Rossi, R. Passama, A. Crosnier, "Simulation of LiDAR-based perception for UAV navigation in dense orchards using Gazebo," *Robotics*, vol. 12, pp. 156-163, 2023.
- [25] N. Koenig, A. Howard, "Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, vol. 3, pp. 2149-2154, 2023.
- [26] M. Green, T. Roberts, "Simulation-based performance comparison of hybrid VTOL and multirotor UAVs for farm surveillance," *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, vol. 12, pp. 1-15, 2024.
- [27] D. Kutuzov, A. Osovskiy , O. Stukach , "IoT traffic generation and processing model with parallel switching systems," *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*, vol. 4, pp. 78-87, 2019 (In Russ.).