

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Красноярский государственный аграрный университет»

На правах рукописи

МИТРАЩУК ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ УНИ-
ВЕРСАЛЬНОГО БПЛА НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Направление подготовки: 35.06.04 Технологии средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве

Направленность (профиль): Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Красноярск – 2021

Работа выполнена на кафедре «Системознергетики» в ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

Научный руководитель:

Баранова Марина Петровна
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный
аграрный университет», г. Красноярск,
зав. кафедрой «Системознергетики»

Рецензенты:

Бастрон Андрей Владимирович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный
аграрный университет», г. Красноярск,
зав. кафедрой «Электроснабжения сельского
хозяйства»

Пантелеев Василий Иванович
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
зав. кафедрой «Электроэнергетики»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Сельское хозяйство (СХ) является важной составляющей любого государства. Эффективность СХ влияет на состояние экономики страны в целом и благополучие каждого гражданина в отдельности, потому что от качества и стоимости продуктов питания зависит здоровье и уровень жизни всей нации. На международных площадках активно рассматриваются вопросы, направленные на повышение эффективности СХ при помощи внедрения технологий нового поколения.

Перспективной технологией для применения в СХ являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Ожидается, что эффект от качественного их внедрения будет сопоставим с появлением плуга, трактора и комбайна в свое время. БПЛА позволяют решать большое количество различных задач СХ в области точного земледелия, обработки полей, мониторинга и диагностики, транспортировки, регулирования климата (например, высева облаков), в животноводстве и других областях.

В данной работе рассматриваются электрические БПЛА, которые являются экологически чистыми и не причиняют вреда окружающей среде. Благодаря своим небольшим размерам, дистанционному управлению, простоте эксплуатации, доступности и дешевизне элементов конструкции электрические БПЛА позволяют решать множество проблем СХ без существенных затрат на обслуживающую инфраструктуру и ремонт. Учитывая территориальные и транспортные проблемы Европейского Северо-Востока, Урала, Сибири, а именно суровый климат, сложный рельеф местности, заснеженность, вечная мерзлота труднодоступность территорий, недостроенные проекты Баренцкомурской, Белкомурской, Северо-Сибирской и Трансконтинентальной железных дорог и др., для развития сельского хозяйства в данных регионах необходимо масштабное внедрение малой авиации, которая не требует взлетно-посадочной полосы и является надежной и не дорогой в эксплуатации. Наиболее эффективным решением в данном направлении является развитие технологии БПЛА, в том числе, электрических.

Экономическим, территориальным и транспортным проблемам Европейского Северо-Востока, Урала и Сибири посвящены работы М.К. Бандмана, В.Ю. Малова, К.И. Зубкова, В.Я. Ткаченко, А.А. Арбатова, В.Н. Лившица, В.Ю. Пленкина и др. Вопросам конструкций, моделей и алгоритмов БПЛА посвящены работы Tommaso Bresciani, Bernard Michini, Brian Borra, J. Kaneshige, Keith Hayward, Reg Austin, R. W. Beard, T. W. McLain, Д. Сайфеддина, О.С. Салычева, Б.В. Казбекова, К.Е. Шилова и др. Вопросам применения БПЛА в СХ и смежных областях посвящены работы Krishna K.R., А.А. Кортаева, Л.А. Новопашина, О.А. Старовойтова, А.А. Мамохин, М.Г. Даниловских, Л.И. Винника и др. Вопросам защиты канала связи и алгоритмам шифрования посвящены работы О.Н. Жданова, А.В. Соколова.

Цель диссертации: определение универсальной конструкции, технических возможностей и разработка системы управления БПЛА на основе проблем сельского хозяйства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить существующий опыт применения БПЛА для решения проблем сельского хозяйства, сформулировать требования к универсальной конструкции БПЛА, провести анализ общих технических возможностей электрических БПЛА, провести сравнение универсальной конструкции с существующими вариантами универсальных БПЛА.

2. Обосновать применение БПЛА универсальной конструкции в растениеводстве, сравнить преимущества и недостатки использования БПЛА универсальной конструкции с альтернативными технологиями в растениеводстве, определить технических возможности БПЛА при обработке полей.

3. Определить базовые уравнения кинематики БПЛА универсальной конструкции, разработать на их основе математическую модель процесса полета БПЛА универсальной конструкции

с алгоритмами управления и стабилизации, с возможностью в режиме реального времени прогнозировать характер движения БПЛА и на основании этого принимать решения об оптимальных параметрах работы алгоритмов в зависимости от условий эксплуатации БПЛА.

4. Исследовать защищенный протокол дистанционного управления БПЛА. Проанализировать существующие защищенные протоколы передачи информации. Разработать блок-схему защищенного протокола. Определить алгоритмы шифрования для защищенного протокола. Разработать программу алгоритма шифрования и исследовать ее работу.

Объект исследований – беспилотный летательный аппарат.

Предмет исследований – система управления БПЛА: алгоритмы защищенной дистанционной связи, алгоритмы движения и стабилизации. Технические возможности универсальной конструкции, математическая модель процесса полета и оптимальные параметры. Универсальная конструкция БПЛА. Применение БПЛА в сельском хозяйстве.

Методы исследований. В работе использованы, как теоретически, так и экспериментальные методы исследования, а именно: метод восхождения от абстрактного к конкретному, методы идеализации и формализации, эксперимент, сравнение, наблюдение, абстрагирование, индукции и дедукции, математическое моделирование, численные методы решения уравнений. Методы математической статистики, методы криптоанализа.

Научная новизна работы:

1. Обоснование применения БПЛА универсальной конструкции для комплексного решения проблем сельского хозяйства. Определение технических возможностей и методики применения БПЛА универсальной конструкции в растениеводстве в автономном, проводном и гибридном вариантах.

2. Универсальная конструкция БПЛА. Базовые уравнения движения, которые описывают основные особенности поведения БПЛА универсальной конструкции. Формулы регулирования ШИМ сигнала характеризующие особенности управления винтовыми моторами БПЛА универсальной конструкции. Алгоритмы системы управления движением и стабилизацией БПЛА универсальной конструкции. Математическая модель процесса полета БПЛА универсальной конструкции с алгоритмами управления и стабилизации, которая позволяет в режиме реального времени прогнозировать характер движения БПЛА и на основании этого принимать решения об оптимальных параметрах работы алгоритмов в зависимости от условий эксплуатации БПЛА.

3. Алгоритм шифрования с наибольшим количеством свободных входных параметров для использования в протоколе дистанционного управления БПЛА. Программная реализация с генератором случайных ключей и тестированием на случайность шифртекстов на выходе для данного алгоритма. Блок-схема протокола защищенного дистанционного обмена информацией с БПЛА на основе алгоритма шифрования с наибольшим количеством свободных входных параметров.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, вычислительными экспериментами и практическими результатами.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1 Предложенная конструкция БПЛА является универсальной и может быть применима в различных сферах деятельности сельского хозяйства. Разработанная методика и расчеты в ней показывают эффективность использования БПЛА универсальной конструкции в растениеводстве.

2. Базовые уравнение кинематики БПЛА универсальной конструкции.

3. Математическая модель процесса полета БПЛА универсальной конструкции с алгоритмами управления и стабилизации, которая в режиме реального времени прогнозирует характер движения БПЛА с возможностью изменения параметров работы алгоритмов в зависимости от условий эксплуатации БПЛА.

4. Блок-схема защищенного протокола обмена информацией, основанная на алгоритме шифрования с большим количеством свободных входных параметров.

5. Алгоритм шифрования с большим количеством свободных входных параметров и его программная реализация с генератором случайных ключей.

Теоретическая значимость заключается в систематизации существующего опыта применения БПЛА в растениеводстве, животноводстве и других областях сельского хозяйства. Обобщены и проанализированы технические возможности электрических БПЛА. Определена универсальная конструкция БПЛА на основе проблем сельского хозяйства. Получены базовые уравнения кинематики БПЛА универсальной конструкции. Дано обоснование и проведены расчеты, которые показывают эффективность применения БПЛА универсальной конструкции в растениеводстве. Обосновано использование и дано описание защищенному протоколу дистанционного управления универсального БПЛА. Обосновано использование и дано описание алгоритм шифрования для алгоритма дистанционного управления. Данная работа вносит вклад в развитие элементов и устройств вычислительной техники и систем управления исследованием системы управления и ее компонентов для БПЛА универсальной конструкции.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Разработана математическая модель процесса полета БПЛА универсальной конструкции, которая позволяет в режиме реального времени прогнозировать характер движения БПЛА и на основании этого определять оптимальные параметры и режимы работы алгоритмов стабилизации в зависимости от условий эксплуатации, выполняемых функций и задач в СХ (воздействие ветра, масса БПЛА, необходимая скорость передвижения, аэродинамическое сопротивление конструкции, грузоподъемность, крутящий момент, приемистость мотора с винтом, приемистость поворотных механизмов, характеристики аккумуляторных батарей, параметры электрокабеля питания, потребляемая мощность, критичный угол для максимальной стабилизации, коэффициенты нарастания скорости стабилизации, регулировка распределения диапазонов ШИМ между стабилизацией двух осей БПЛА и управлением движением вперед, подъемом, вращением, и др.).

Создан программный комплекс для поиска оптимальных режимов работы алгоритма шифрования с учетом требуемой скорости работы канала передачи данных и генерации, тестирования качества симметричных ключей и шифртекстов.

Результаты работы могут быть распространены на предприятия сельского хозяйства, МВД России, МО России, ФСБ России, МЧС России и использованы для решения различных задач малой авиации, геодезии, мониторинга, инспекции, транспортировки и других областях. Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет».

Апробация диссертационной работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских научно-технических и научно-практических конференциях:

XII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики «Актуальные проблемы авиации и космонавтики». Секция «Проектирование и производство летательных аппаратов». – Красноярск, 11-15 апреля 2016г.;

XVI Международной научной конференции бакалавров, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации». – Красноярск, 17 мая 2017г.;

III Всероссийской (национальной) научной конференции «Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий». – Новосибирск, 2018.

Международной научной конференции «Проблемы современной аграрной науки». – Красноярск, 15 октября 2018.

XIV Международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике». – Барнаул, 2019.

XII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные тенденции развития российской науки». – Красноярск, 2019.

II International scientific conference «MIP: Engineering-2020: Modernization, innovations, progress: Advanced technologies in material science, mechanical and automation engineering». – Krasnoyarsk, 2020.

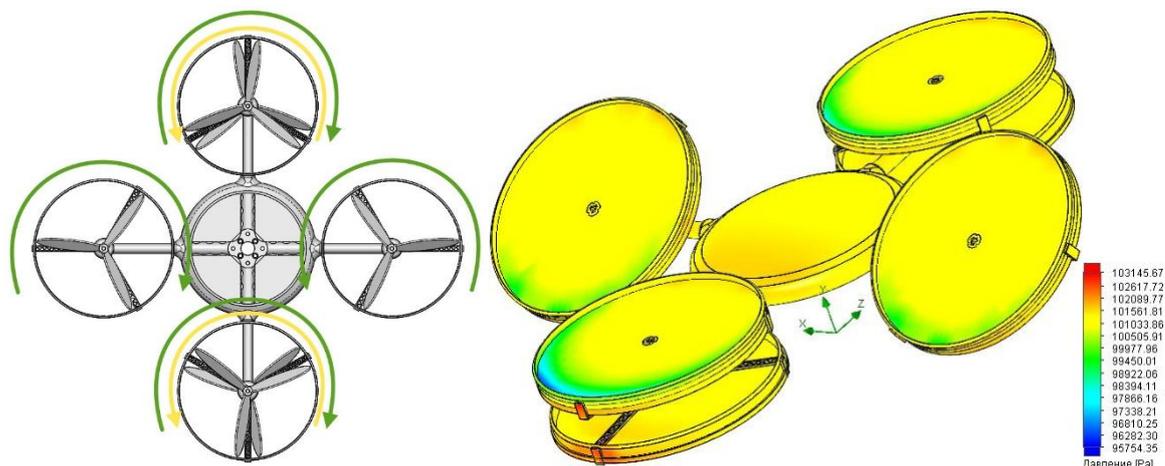
Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 4 работы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ для публикации основных научных результатов, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 124 наименований; содержит 126 страниц машинописного текста, 44 рисунка, 13 таблиц и 3 приложения на 11 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведено исследование проблем сельского хозяйства. Установлено, что их решение требует комплексного подхода использования БПЛА. Задачи мониторинга и лазерной обработки растений требуют высоких показателей продолжительности полета, скорости и стабильности платформы для точности измерений. Задачи распыления гербицидов, пестицидов, жидких удобрений, воды; применение гипсовых гранул для опыления почв и др., – требуют от БПЛА высоких показателей грузоподъемности, маневренности, возможности полета на низкой высоте. Анализ состава почвы; защита стада на свободном выпасе от диких животных; масштабная посадка саженцев деревьев в целях восстановления лесов; установка, проверка улова, забор сетей и ловушек на рыбу с удерживающим поплавком, – требует от БПЛА возможности полета на низкой скорости и зависание в воздухе. В итоге, сделан вывод, что решить комплексные проблемы сельского хозяйства способен только БПЛА гибридного типа.

В качестве гибридной конструкции предложен БПЛА состоящий из 6 моторов. Одна ось моторов состоит из двух вращающихся винтовых моторов и шаговых двигателей, вторая – из двух пар соосных моторов. Данная конструкция лучше других решений гибридного типа обеспечивает стабильность работы благодаря размещению моторов на одинаковом расстоянии от центра масс, прикреплению аппаратуры к центру масс БПЛА, отсутствию крыльев, параллельности платформы БПЛА земле при движении в любых комбинация (в том числе, по спирали вверх и вниз).



Кроме этого, в данной главе сформулированы требования к защищенному протоколу дистанционного управления БПЛА. Представлены требования и описание к схеме электрооборудования и вариантов осуществления дистанционной связи. Определены габариты платформы БПЛА. Все это послужило формированию представления о конструкции БПЛА для проведение дальнейших исследований его технических возможностей.

Подробно описан механизм перемещения в пространстве платформы БПЛА и определена конструкция поворотного механизма на шаговых двигателях. Произведено сравнение данной конструкции с вариантом на сервоприводе, который легче в 2 раза, быстрее поворачивается и не

требует наличия гироскопа, но менее стабилен. В связи с последним решено использовать для исследований более стабильный вариант.



По результатам анализа аэродинамики корпуса, сделан вывод о необходимости модификации внешней стороны кольца винтов из плоской в округлую форму.

Обосновано использования в качестве источника энергии для БПЛА – электричество, как наиболее доступный, возобновляемый и недорогой способ. Предложена альтернатива в виде водородного топлива с большей энергетической плотностью, что увеличит продолжительность полета БПЛА в 3-5 раз, при этом, оно также является экологическим, как и электричество.

Определены технические возможности электрических БПЛА: максимальная скорость передвижения от 700 до 950 км/ч и более; высота полета более 10 км; дальность связи скоростного Wi-Fi 300м со скоростью 600 Мбит/с; дальность связи на частоте 433МГц до 20 км со скоростью от 2 до 19 килобит/с; устойчивость к ветру и порывам ветра со скоростью 10-15 м/с и более с повышением электропотребления; разрешение снимков около 0.5-10см, поле зрения 50-500м; простота обеспечения влагозащиты и режима работы под водой; эффективный тип аккумуляторов – Li-ion.

Во второй главе представлены характеристики БПЛА универсальной конструкции, которые были получены в результате математического моделирования процесса полета БПЛА, включая время разгона до 54 км/ч, максимальную скорость (при 5 кг полезной нагрузки не менее 90 км/ч, при 10 кг полезной нагрузки не менее 255 км/ч), вес аккумуляторов, продолжительность полета и др. Использование водорода из баллона для генерации электроэнергии повысить продолжительность полета БПЛА в 3-5 раз.

Контроллер ESC принимает на входе от 18 В до 25.2 В, работает при скважности ШИМ более 55%. Все двигатели T-Motor MN7005-KV230.

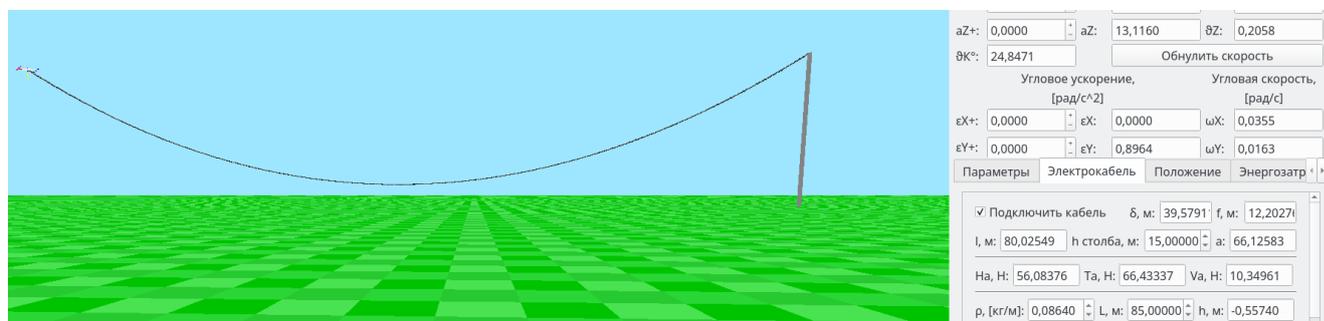
Li-ion, 21.6 В, 4.26 гр/Втч	Общий вес БПЛА, гр	25 656 (3 656)	20 656 (3 656)
	Вес полезной нагрузки, гр	10 000	5 000
	Вес аккумулятора, гр	12 000	
	Работа аккумулятора до полного разряда, Втч	2 817	
	Продолжительность полета	48 мин	56 мин
	Максимальная скорость, км/ч	90	255
	Время разгона до 54 км/ч, с	57	6
	Токоотдача	Свыше 100А	

Кроме этого, в главе изложена методика использования БПЛА в растениеводстве на единичном поле размером 1 Га. БПЛА универсальной конструкции, способен распылить над полем размером в 1 гектар около 360 кг вещества за час или 8.64 т за день, что подтверждается расчетами и математическим моделированием процесса полета БПЛА универсальной конструкции.



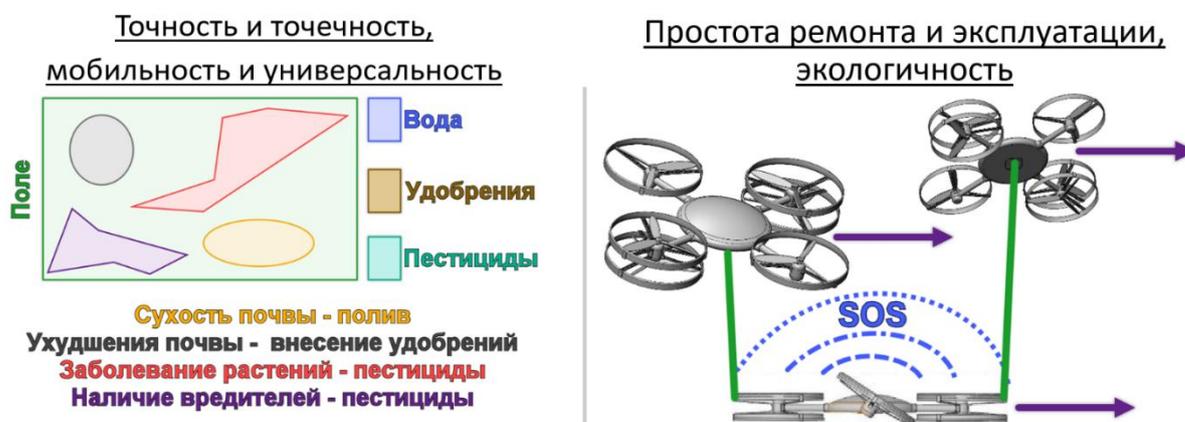
Подтверждена при помощи математического моделирования возможность стабильного полета БПЛА универсальной конструкции с прикрепленным к нему кабелем. Кроме этого, при помощи математического моделирования установлено, что БПЛА универсальной конструкции способен стабильно (сохраняя платформу параллельно земле) вытягивать вбок и поднимать вверх электрический и другие виды кабелей (шланг с реагентами), что позволяет использовать его при прокладке электросетей и обработке полей.

Например, указано, что БПЛА со сбрасываемой грузоподъемностью в 10 кг способен растягивать вбок на 80м и поднимать полностью вверх кабель длиной 85 метров с массой 1 метра 0.0864кг. А длина кабеля в 12м позволяет БПЛА без соприкосновения кабеля с землей обслуживать полосу шириной 20м, если закрепить кабель не на столбе, а на подвижной платформе.



Отмечено, что БПЛА универсальной конструкции в рабочем состоянии теоретически способен самотеком производит автоматическую заправку реагентами и производить замену аккумуляторов при помощи бесконтактной зарядной станции, имея на борту два сменных аккумулятора без простоя на время зарядки.

В результате сравнения с другими технологиями сельского хозяйства, сделан вывод, что технология электрического БПЛА обладает следующими преимуществами: точность и точечность проводимых операций, мобильность и универсальность, простота ремонта и эксплуатации, экологичность.



Точное земледелие с использованием БПЛА способно уменьшить применение вредных химических веществ (фунгициды, гербициды, инсектициды, бактерициды и др.) за счет использования более дорогих и качественных средств с их внесением только на те участки, где они необходимы.

Во третьей главе определены основные методики расчета изменения угла вращения и перемещения БПЛА относительно глобальной системы координат, методики расчета момента инерции и аэродинамического сопротивления, которые послужили основой для создания математической модели процесса полета с алгоритмами системы управления движением и стабилизацией.

Получены базовые уравнения движения БПЛА универсальной конструкции: формулы расчета зависимости поступательного движения и углового ускорения от силы тяги винтовых моторов.

$$a_z = \frac{1}{m} ((F_{TC11} + F_{TC12}) + (F_{TC21} + F_{TC22}) + (F_{TK1} \sin \alpha + F_{TK2} \sin \alpha))$$

$$a_x = \frac{1}{m} (F_{TK1} \cos \alpha + F_{TK2} \cos \alpha)$$

$$\varepsilon_x = \frac{r_c}{I_x} [(F_{TK1} \sin \alpha - F_{TK2} \sin \alpha) + \frac{1}{d_b} (M_{BK1} \cos \alpha - M_{BK2} \cos \alpha)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{r_c}{I_y} [(F_{TC11} + F_{TC12}) - (F_{TC21} + F_{TC22})]$$

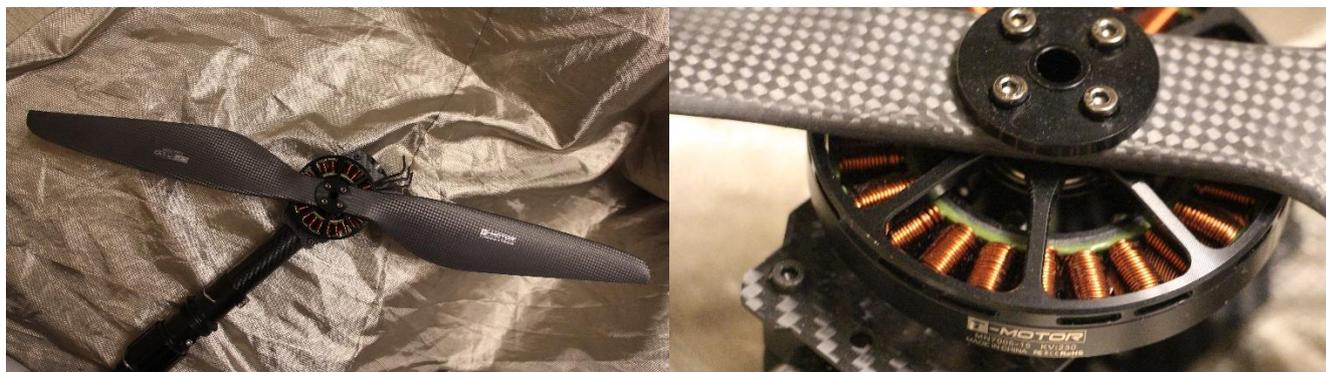
$$\varepsilon_z = \frac{r_c}{I_z} [(F_{TK1} \cos \alpha - F_{TK2} \cos \alpha) +$$

$$+ \frac{1}{d_b} \{((M_{BC11} - M_{BC12}) - (M_{BC21} - M_{BC22})) + (M_{BK1} \sin \alpha - M_{BK2} \sin \alpha)\}]$$

Представленные базовые уравнения движения БПЛА описывают в виде формул основные особенности поведения БПЛА универсальной конструкции и являются неотъемлемой частью необходимой для работы созданной математической модели.

Приведены стандартные значения и краткая характеристика наиболее важных дополнительно задаваемых пользователем параметров (в отдельности или как сумма нескольких значений), которые необходимы для расчета математической модели: длина и вес винта, вес мотора, диаметр вала мотора, приемистость и частота обновления контроллера, диапазон и минимальный шаг ШИМ, масса шагового двигателя и время поворота шагового двигателя на 90 градусов.

Представлена таблица с характеристиками винтового мотора MN7005-KV230-24V (ШИМ, крутящий момент, грузоподъемность, мощность), по дискретным данным которой при помощи метода аппроксимации получены формулы зависимостей: ШИМ от грузоподъемности, ШИМ от крутящего момента, ШИМ от потребляемой мощности.

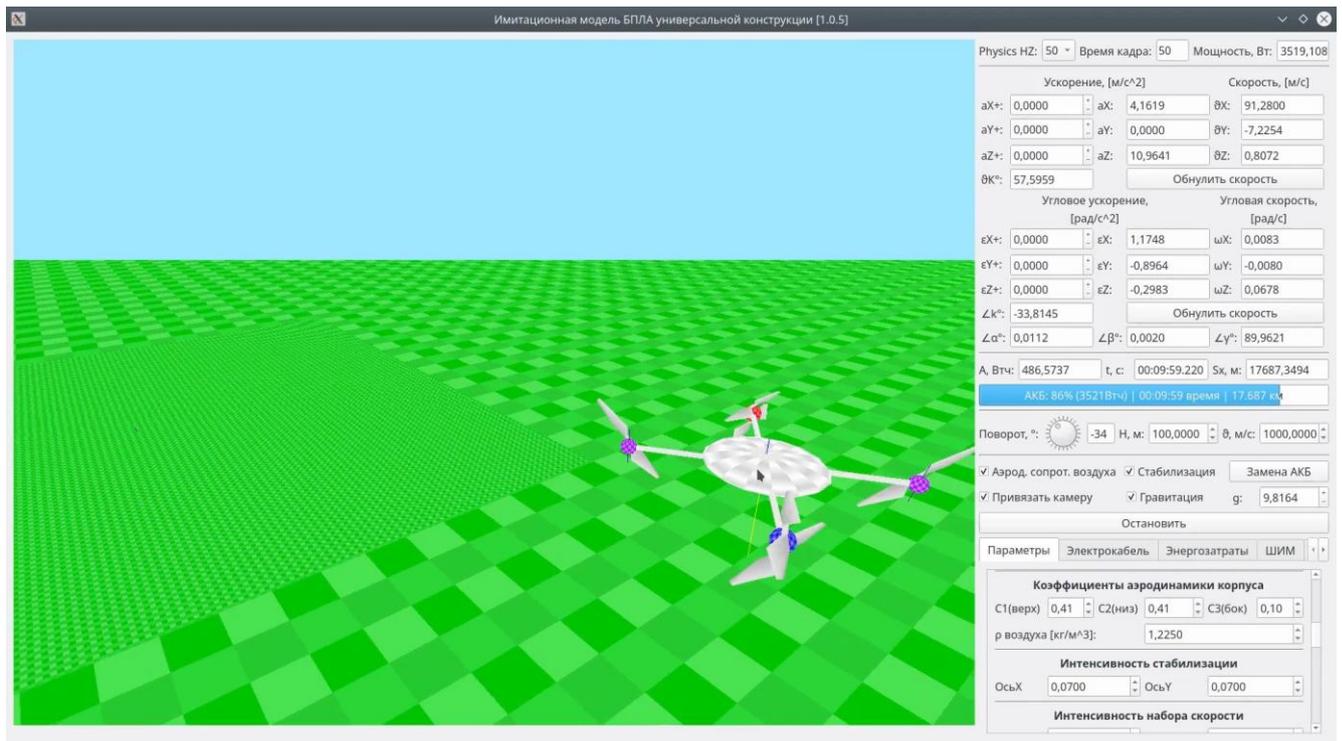


Характеристики мотора MN7005-KV230-24V							
ШИМ	M, Н*М	Trust, кг	W, Вт	ШИМ	M, Н*М	Trust, кг	W, Вт
0.40	0.39	1,407	104.60	0.60	0.65	2,491	241.40
0.42	0.42	1,501	113.88	0.62	0.69	2,605	258.50
0.44	0.43	1,592	123.19	0.64	0.72	2,708	273.39
0.46	0.46	1,698	135.63	0.66	0.75	2,841	297.29
0.48	0.49	1,837	152.48	0.68	0.78	2,948	317.15
0.50	0.52	1,951	167.01	0.70	0.81	3,060	335.87
0.52	0.54	2,063	181.11	0.75	0.89	3,344	386.77
0.54	0.57	2,153	193.69	0.80	0.96	3,632	438.46
0.56	0.60	2,261	208.71	0.90	1.12	4,184	550.60
0.58	0.63	2,378	225.12	1.00	1.28	4,691	670.20

Наименьшая ошибка получена при помощи аппроксимации кубической регрессией. Полученные аппроксимированные формулы важны для математической модели – они дают возможность непрерывного расчета математической модели в реальном времени, являясь максимально приближенными к действительным характеристикам винтового мотора.

Создана программная реализация математической модели процесса полета с алгоритмами системы управления движением и стабилизацией. Она позволяет в режиме реального времени прогнозировать характер движения БПЛА и на основании этого определять оптимальные параметры и режимы работы алгоритмов системы управления и стабилизации в зависимости от условий эксплуатации, выполняемых функций и задач.

При помощи программы конфигурируется или определяется следующее: устойчивость конструкции к воздействию ветра; масса и инертность БПЛА; скорость передвижения; аэродинамическое сопротивление конструкции; грузоподъемность; крутящий момент; приемистость мотора с винтом; приемистость поворотных механизмов; критичный угол для максимальной стабилизации; коэффициенты нарастания скорости стабилизации; регулировка распределения диапазонов ШИМ между стабилизацией двух осей БПЛА и управлением движением вперед, подъемом, вращением; мощность потребляемая БПЛА, его суммарное энергопотребление и отдельно по каждому мотору; продолжительность полета БПЛА в зависимости от характеристики и массы АКБ; необходимый по характеристикам АКБ в зависимости от решаемой задачи; необходимые параметры длины, массы, высоты подвеса для электрического кабеля при питания БПЛА от него и др.



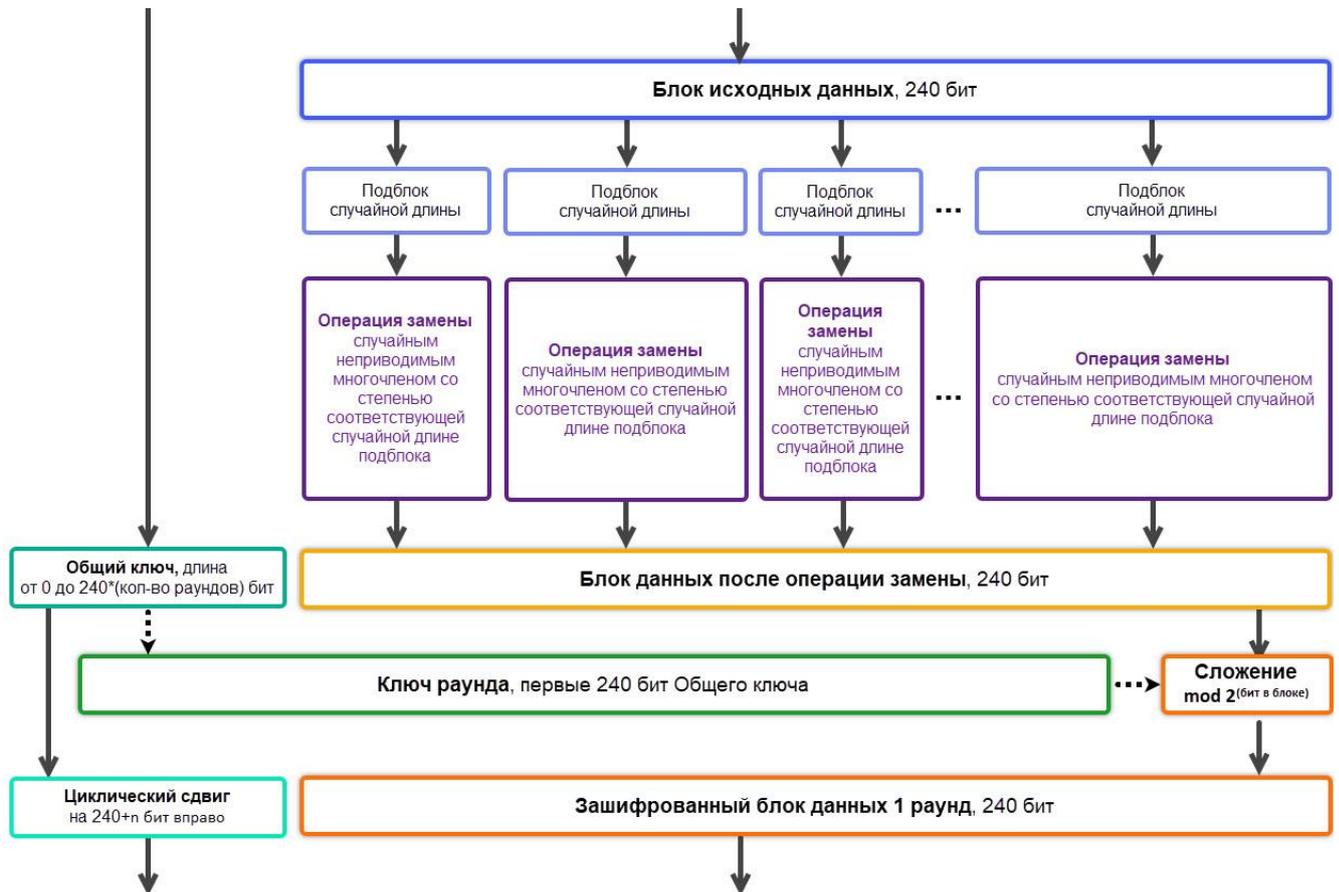
В том числе, модель позволяет подобрать эффективную массу, аэродинамику корпуса, винтомоторную пару, аккумуляторные батареи, кабель электропитания до момента их приобретения с учетом воздействия ветра в процессе эксплуатации. Модель определяет энергозатраты БПЛА в процессе полета от каждого из 6 двигателей. Благодаря этому, сложив данные показатели и вычислив энергетическую емкость аккумуляторной батареи из регулируемых массы АКБ и коэффициента энергетической плотности аккумуляторной батареи, вычисляется текущий расход батареи, пройденный путь и продолжительность полета БПЛА с учетом заданных в данный момент параметров модели БПЛА.

Получен первый рабочий вариант алгоритма системы управления движением и стабилизацией, проверенный в программной реализации математической модели процесса полета с алгоритмами системы управление движением и стабилизацией (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020612620 от 27.02.20). В том числе, получены формулы регулирования ШИМ сигнала характеризующие особенности поведения винтовых моторов БПЛА универсальной конструкции, а также, алгоритмы удержания скорости, высоты, углов.

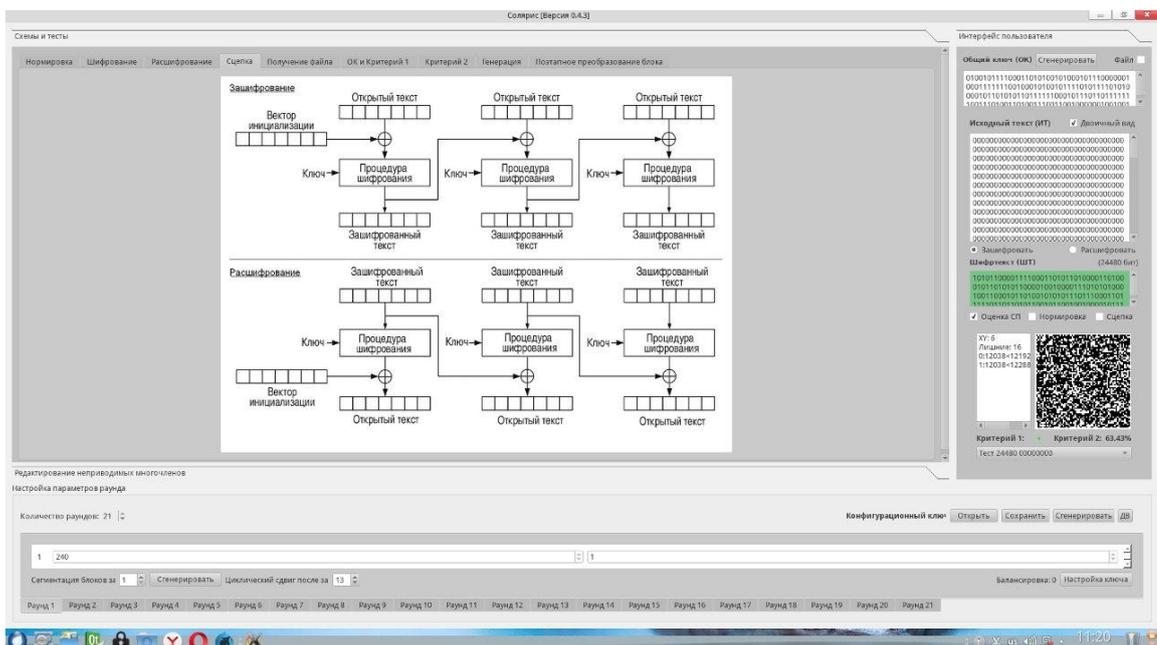
$$\begin{aligned}
 PWM_{K_1} &= (PWM_{max} - PWM_{ksryb}^{max}) + \left(-\frac{PWM_{ks}^{max}}{2} + PWM_{ks} \right) \\
 PWM_{K_2} &= (PWM_{max} - PWM_{ksryb}^{max}) + \left(-\frac{PWM_{ks}^{max}}{2} - PWM_{ks} \right) \\
 PWM_{C_{11}} &= (PWM_{min} + PWM_H) + \left(\frac{PWM_k^{max}}{2} + PWM_k \right) + \left(\frac{PWM_s^{max}}{2} + PWM_s \right) \\
 PWM_{C_{12}} &= (PWM_{min} + PWM_H) + \left(\frac{PWM_k^{max}}{2} - PWM_k \right) + \left(\frac{PWM_s^{max}}{2} + PWM_s \right) \\
 PWM_{C_{21}} &= (PWM_{min} + PWM_H) + \left(\frac{PWM_k^{max}}{2} - PWM_k \right) + \left(\frac{PWM_s^{max}}{2} - PWM_s \right) \\
 PWM_{C_{22}} &= (PWM_{min} + PWM_H) + \left(\frac{PWM_k^{max}}{2} + PWM_k \right) + \left(\frac{PWM_s^{max}}{2} - PWM_s \right)
 \end{aligned}$$

В четвертой главе определен алгоритм шифрования «Шифратор 125» с наибольшим количеством свободных входных параметров для использования в протоколе дистанционного управления БПЛА. Он показал устойчивость к стандартным методам криптоатак на блочные симметричные шифры лучше, чем другие распространенные решения, благодаря использованию

случайной фрагментации подблоков и генерации случайных неприводимых многочленов со степенью соответствующей случайной длине подблока. В лучших образцах аналогов задействованы лишь таблицы замен, причем, небольших размером (4, 8 битные таблицы, против 240 битной).



Получен программный комплекс шифрования файлов и текстов «Шифратор 125» с модулями автоматических тестов случайности выходных шифртекстов и генератор случайных ключей, который позволил провести более подробные исследования алгоритма шифрования, в том числе на процессорах Intel и ARM.



В результате, представлена первая оценка скорости «Шифратора 125» без распараллеливания шифрования и использования оптимизированных библиотек (IPP/MKL Intel, mediaLib/Perflib Oracle, ACML/APL AMD, EML Эльбрус и др.). Программа на данный момент позволяет шифровать текстовые сообщения и любые файлы со средней скоростью 120 килобайт/с на Intel i7 3537U. Результат расчета скорости на BeagleBone Black ARM Cortex-A8 (BeaglePocket) с 1GHz 512 MB составляет свыше 5 килобайт/с (свыше 43 килобит/с). Шифратор со случайно сгенерированным ключом в среднем выдает скорость 12 килобайт/с (около 97 килобит/с, стандартная скорость UART от 9.6 до 115.2 килобит/с).

Определена скорость генерации случайного неприводимого многочлена. Алгоритм (основан на алгоритме Берлекемпа) способен генерировать многочлен любой степени, но скорость генерации исследована до степени полинома 241 и в среднем составляет от 3 до 15 минут для одного многочлена.

Проведено тестирование работы шифратора в двух тестах: на месяц и 3 дня. В результате определено отсутствие утечек памяти в течение 3 дней непрерывной работы шифра. Шифр показал стабильности работы шифрования/расшифрования в течении месяца работы и энергопотребление шифратора при работе на процессоре ARM Cortex-A8 платы BeagleBone Black (BeaglePocket) на уровне 0.5-0.7 Ah.

Проведен анализ существующих распространенных протоколов защищенной передачи информации. Обоснована необходимости разработки нового протокола с учетом всех достоинств существующих решений и необходимых требований для обеспечения защищенной связи с БПЛА.

Протокол	TCP/UDP	Скорость UART	Только симметричный шифр	Авторизация новым ключом по объему данных	Имитация шифра	Защита от отказа в обслуживании	Защита от коллизий служебных полей	Лучшая защита от атаки перебором
WEP								Взлом перехватом 200000 пакетов
PPTP								Подбор ключа за 23 часа
GSM A5/1, A5/3								Известны способы взлома
IPsec	Сетевой уровень	Достаточно	Диффи-Хеллман	Отсутствует	По хэшу	Да	Нет	DES, 3DES
OpenVPN	Транспортный уровень	Достаточно	Возможно	Отсутствует	По хэшу	Да	Нет	Могут быть использованы передовые шифры
HTTPS	Прикладной	Достаточно	Сертификат	Отсутствует	Отсутствует	Нет	Нет	Могут быть использованы передовые шифры
WPA2/PSK	Канальный	Достаточно	Да	Отсутствует	Отсутствует	Нет	Нет	Использованы передовые шифры
SSH	Прикладной	Достаточно	Диффи-Хеллман	Отсутствует	По хэшу	Да	Нет	Могут быть использованы передовые шифры
Протокол 125	Транспортный уровень	120 килобайт/с	Да	Да	Да	Да	Да	Да

Составлена блок-схема инициализации сессии и подробное описание для «Протокола 125», полностью удовлетворяющего требованиям необходимым защищенного дистанционного управления специализированного БПЛА универсальной конструкции.



ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В итоге проделанной работы, получены следующие результаты:

1. В качестве специализированного электрического устройства для комплексного решения проблем сельского хозяйства представлен гибридный БПЛА универсальной конструкции, состоящий из 6 моторов. Одна ось моторов состоит из двух вращающихся винтовых моторов и шаговых двигателей, вторая – из двух пар соосных моторов. Данный БПЛА обладает максимальной стабильностью работы благодаря размещению моторов на одинаковом расстоянии от центра масс, прикреплению аппаратуры к центру масс БПЛА, отсутствию крыльев, параллельности платформы БПЛА земле при движении в любых комбинация (в том числе, по спирали вверх и вниз), что позволяет выполнять поставленные перед ним задачи наиболее эффективно. Кроме этого, среди обыкновенных квадрокоптеров он отличается высокой скоростью передвижения.

2. Гибридный высокоскоростной и стабильный БПЛА универсальной конструкции, способен распылить над полем размером в 1 гектар около 360 кг вещества за час или 8.64 т за день, что подтверждается расчетами и математическим моделированием процесса полета БПЛА универсальной конструкции.

3. Подтверждена возможность стабильного полета БПЛА универсальной конструкции с прикрепленным к нему кабелем, при помощи математического моделирования. Работая в таком режиме, он способен стабильно (сохраняя платформу параллельно земле) вытягивать вбок и поднимать вверх электрический и другие виды кабелей (шланг с реагентами), что позволяет использовать его при прокладке электросетей и обработке полей.

4. В отличие от других технологий сельского хозяйства БПЛА обладает следующими преимуществами: точность и точечность проводимых операций, мобильность и универсальность, простота ремонта и эксплуатации, экологичность.

5. Создана программная реализация математической модели процесса полета с алгоритмами системы управления движением и стабилизацией (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020612620 от 27.02.20). Она позволяет в режиме реального времени прогнозировать характер движения БПЛА и на основании этого определять оптимальные параметры и режимы работы алгоритмов системы управления и стабилизации в зависимости от условий эксплуатации, выполняемых функций и задач. В том числе, модель позволяет подобрать эффективную массу, аэродинамику корпуса, винтомоторную пару, аккумуляторные батареи, кабель электропитания до момента их приобретения с учетом воздействия ветра в процессе эксплу-

атации и других факторов. Модель определяет энергозатраты БПЛА в процессе полета от каждого из 6 двигателей. Благодаря этому вычисляется текущий расход батареи, пройденный путь и продолжительность полета БПЛА с учетом заданных в данный момент параметров модели БПЛА.

6. Получен первый рабочий вариант алгоритма системы управления движением и стабилизацией, проверенный в программной реализации математической модели процесса полета с алгоритмами системы управления движением и стабилизацией (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020612620 от 27.02.20).

7. Определен алгоритм шифрования «Шифратор 125» параметров для использования в протоколе дистанционного управления БПЛ, который показал наибольшее количество свободных входных по сравнению с широкораспространенными решениями.

8. Получен программный комплекс шифрования файлов и текстов «Шифратор 125» с модулями автоматических тестов случайности выходных шифртекстов и генератор случайных ключей (случайных неприводимых многочленов). Программа на данный момент позволяет шифровать текстовые сообщения и любые файлы со средней скоростью 120 килобайт/с на Intel i7 3537U.

9. Доказана эффективность использования генератора неприводимых случайных многочленов для генерации ключей алгоритма шифрования. Алгоритм (основан на алгоритме Берлекемпа) способен генерировать многочлен в среднем составляет от 3 до 15 минут для одного многочлена со степенью меньшей 241.

10. Обоснована необходимости разработки нового защищенного протокола дистанционной связи с БПЛА. Разработана блок-схема алгоритма работы протокола защищенной связи с БПЛА.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Митрашук, В. В. Разработка, тестирование и оценка шифратора с переменной фрагментацией блока для протокола безопасного обмена информацией // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – Москва: Научные технологии, 2018. – № 7. – С. 118-125.

2. Митрашук, В. В. Программно-аппаратный комплекс защиты телеметрии и телеуправления, специализированного беспилотного летательного аппарата / В. В. Митрашук, М. П. Баранова // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – Красноярск: СФУ, 2019. – Т. 12. – № 5. – С. 585–598.

3. Mitrashchuk, V. V. Control algorithms and capabilities of universal UAV / V. V. Mitrashchuk, M. P. Baranova // MIP: Engineering-2020. IOP Conf. Series: Materials Science Engineering 862 032062. – 2020. (Scopus, Web of Science)

4. Митрашук, В. В. Конструкция беспилотного летательного аппарата для применения в сельском хозяйстве / В. В. Митрашук, М. П. Баранова // АПК России. – Челябинск: Южно-Уральский государственный аграрный университет (ЮУрГАУ), 2020. – Т. 27. – № 2. – С. 333–338. (AGRIS)

Разработка, зарегистрированная в Реестре программ для ЭВМ РФ:

5. Митрашук, В.В. Математическая модель процесса полета беспилотного летательного аппарата универсальной конструкции с алгоритмами управления и стабилизации. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020612620 от 27.02.20.

Прочие публикации по теме диссертации:

6. Митрашук, В. В. Разработка беспилотного летательного аппарата по типу квадрокоптера с обеспечением передвижения параллельно земле платформы со сменными модулями приборов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики в 2 т. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2016. – Т. 1. – С. 299-301.

7. Митрашук, В.В. Протокол безопасного обмена данными на основе алгоритма шифрования с переменной фрагментацией блока // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2017. – С. 299-301.

8. Митрашук, В. В. Возможность использования малых электрических беспилотников в агропромышленном и лесном комплексе Сибири / В. В. Митрашук, М. П. Баранова // Сборник III Всероссийской (национальной) научной конференции Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий. – Новосибирск: Новосибирский государственный аграрный университет (НГАУ), 2018. – С. 625-628.

9. Митрашук, В. В. Применение беспилотного летательного аппарата в агропромышленном комплексе с целью автоматизации процессов на фермерских производствах / В. В. Митрашук, М.П. Баранова // Проблемы современной аграрной науки. – Красноярск: КГАУ, 2018. – С. 107–110.

10. Митрашук, В.В. Устройство телеметрии и телеуправления с защитой передаваемой информации для сельскохозяйственного БПЛА / В.В. Митрашук // Инновации в науке и практике. – Барнаул: Вестник науки, 2019. – С. 152-160.

11. Митрашук, В. В. Анализ технических возможностей сельскохозяйственного БПЛА для повышения качества процесса выращивания растений / В. В. Митрашук, М. П. Баранова // XII Международная научно-практическая конференция молодых ученых Инновационные тенденции развития российской науки. – Красноярск: Красноярский Государственный Аграрный Университет (КГАУ), 2019. – Т. 1. – С. 171-173.

12. Mitrashchuk, V. V. Determining the requirements to the security protocol of the data transmission of the agricultural UAV / V. V. Mitrashchuk // XII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists Innovative Trends in the Development of Russian Science. – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University (KSAU), 2019. – Т. 2. – С. 278-280.