

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-805-816

DEVELOPMENT OF AUTOMATION AND CONTROL SOFTWARE FOR CHARGING SYSTEMS OF MULTIROTOR SMALL UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS FOR TASKS OF CARGO SEAPORTS

E. A. Voznesensky¹, N. N. Maiorov¹, A. N. Terekhov²

¹ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

² Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation

The topic of the research is the consideration of the solution of the actual problem of extending the flight mission time of unmanned transport systems of multirotor type with the help of automated charging systems and automation subroutines, which is currently one of the demanded in the field of development and pilot implementations. The paper considers the situation of using an unmanned aircraft system to perform autonomous flights between cargo port areas, for example, to collect data for building digital spatial models or to transfer a certain type of cargo. It is noted that due to the considerable size and remoteness of cargo terminals from each other it is necessary to place a network of automated charging stations. The efficiency of autonomous flights is substantiated and a new model of flight assignment of an unmanned aircraft system is given for solving the routing problem, taking into account the location of charging station sites, for example, in cargo port areas. To solve the set tasks, a new hardware system for charging unmanned aerial systems considering a receiver module with a coil on board and a ground landing system for charging is considered, circuit diagrams are given and constraints for performing the battery charging process are specified. The fragments of programme codes of automation of the graphical interface of the web-server with display of all parameters and calculation of the coefficient of efficiency at charging are resulted. The choice of Arduino IDE software environment is justified. The possibility of using the developed automated station for battery charging for a large class of drones of multirotor type is noted. On the basis of a series of experiments in the flight research field of the laboratory of unmanned aircraft systems of the SUAI, it is established that the charging station together with the receiving module managed to achieve the efficiency of charge transfer at the level of 73.7 %. The obtained values of efficiency allow to draw a conclusion about the possibility of practical use for real transport tasks and the possibility of network deployment, in particular, on the dedicated specialised areas of the cargo port. The developed automation subprogramme for the deployment of a network of charging stations (e. g. in different areas of the port) allows to create an information system for monitoring the operation of charging stations, which significantly increases the controllability and reliability of the system.

Keywords: seaport, automation program, unmanned transportation system, battery charging, routing, cargo delivery, automation and control, aerial logistics, multi-rotor systems, route networks.

For citation:

Voznesensky, Evgeniy A., Nikolai N. Maiorov, and Andrey N. Terekhov "Development of automation and control software for charging systems of multirotor small unmanned aircraft systems for tasks of cargo seaports" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.5 (2024): 805–816. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-805-816.

УДК 681.5, 519.2, 658.5

РАЗРАБОТКА ПОДПРОГРАММЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЗАРЯДКИ МУЛЬТИРОТОРНЫХ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАДАЧ МОРСКИХ ГРУЗОВЫХ ПОРТОВ

Е. А. Вознесенский¹, Н. Н. Майоров¹, А. Н. Терехов²

¹ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является рассмотрение решения актуальной задачи продления времени выполнения полетных заданий беспилотных транспортных систем мультироторного типа с помощью автоматизированных систем зарядки и подпрограммы автоматизации, которая в настоящее время является одной из востребованных в сфере разработок и пилотных внедрений. В статье рассмотрена ситуация применения беспилотной авиационной системы для выполнения автономных полетов между районом грузового порта, например, для сбора данных для построения цифровых пространственных моделей или для передачи определенного типа грузов. Отмечается, что ввиду значительных размеров и удаленности грузовых терминалов друг от друга необходимо размещение сети автоматизированных зарядных станций. Дано обоснование эффективности выполнения автономных полетов и для решения задачи маршрутизации приведена новая модель полетного задания беспилотной авиационной системы с учетом размещения мест зарядных станций, например, в районах грузового порта. Для решения поставленных задач рассмотрен новый аппаратный комплекс для зарядки беспилотных авиационных систем с учетом приемного модуля с катушкой на борту и наземной системой посадки для зарядки, приведены принципиальные схемы и указаны ограничения для выполнения процесса заряда аккумуляторов. Приведены фрагменты программных кодов автоматизации графического интерфейса веб-сервера с отображением всех параметров и расчетом коэффициента полезного действия при зарядке. Обоснован выбор программной среды Arduino IDE. Отмечается возможность использования разработанной автоматизированной станции для заряда аккумуляторов для большого класса беспилотников мультироторного типа. На основе серии экспериментов в летном исследовательском поле лаборатории беспилотных авиационных систем ФГАО ВО ГУАП установлено, что зарядной станции вместе с приемным модулем удалось достигнуть КПД по передаче заряда на уровне 73,7 %. Полученные значения КПД позволяют сделать вывод о возможности ее практического использования для реальных транспортных задач и возможности развертывания сети, в частности, на выделенных специализированных участках грузового порта. Разработанная подпрограмма автоматизации при развертывании сети зарядных станций (например, в разных районах порта) позволяет создать информационную систему мониторинга работы зарядных станций, что значительно повышает управляемость и надежность системы.

Ключевые слова: морской порт, подпрограмма автоматизации, беспилотная транспортная система, заряд аккумулятора, маршрутизация, доставка грузов, автоматизация и управление, аэрологистика, мультироторные системы, маршрутные сети.

Для цитирования:

Вознесенский Е. А. Разработка подпрограммы автоматизации и управления для систем зарядки мультироторных малых беспилотных авиационных систем для задач морских грузовых портов / Е. А. Вознесенский, Н. Н. Майоров, А. Н. Терехов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 805–816. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-805-816.

Введение (Introduction)

Беспилотные транспортные системы в настоящее время определяют новую область научных исследований, опытных разработок, успешных пилотных внедрений, которые можно масштабировать для промышленных, транспортных сфер [1]–[3]. Особое внимание уделяется области беспилотных авиационных систем (БАС), в частности развитию нового направления «аэрологистика» [3], [4]. Исследования в данной области направлены на нахождение решений применения БАС в целях перевозки грузов, обеспечения взаимодействия транспортных компаний, клиентов в регионах, формирования новых систем доставки грузов за счет построения новых моделей маршрутных транспортных сетей. Актуальной сферой новых разработок является применение беспилотных авиационных систем для морских грузовых портов и терминалов. Можно рассматривать вопрос обеспечения взаимодействия отдельных терминалов, например, в морском грузовом порту. Сегодня в Российской Федерации запущены масштабные преобразования в сфере БАС, которые представлены в Распоряжении Правительства Российской Федерации от 21 июня 2023 г. № 1630-р «Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года» и Национальном проекте «Беспилотные авиационные системы» [5]. Среди основных пяти федеральных проектов с позиций новых исследований и разработок можно выделить «Фундаментальные и перспективные исследования в сфере БАС» и «Развитие инфраструктуры, обеспечение безопасности и формирование

специализированной системы сертификации БАС». Особое внимание в данных направлениях уделяется организации серийного производства нового вида средств наземного обслуживания, в том числе стартовых и посадочных средств, включая пусковые установки, парашюты, аэрофинишеры, в том числе тренажеры и их программно-аппаратное обеспечение для подготовки экипажа и обслуживающего персонала с учетом средств транспортирования и жизнеобеспечения, вспомогательных средств, включая аппаратуру и оборудование для пред- и послеполетного контроля БАС, а также для хранения средств комплекса. Одним из наиболее важных средств для поддержания и увеличения времени автономности, а также выполнения полетных заданий являются наземные комплексы автоматизированной системы зарядки батарей мультироторных беспилотных летательных аппаратов. Среди различных видов мультироторных систем [1] востребованы новые решения для малых беспилотных летательных аппаратов ввиду их применения для достаточно большого класса задач производственных процессов, логистических процессов, обеспечения задач внутрипроизводственной логистики и идентификации процессов.

Использование беспилотной авиационной системы в морском порту позволит повысить качество выполнения безопасности судоходства, когда судно в режиме реального времени передает информацию о процессе выполнения швартовки. При создании специализированной инфраструктуры для беспилотных авиационных систем можно сформировать ситуационный центр по представлению динамических данных о работе причалов. Таким образом, разработка в порту инфраструктуры для зарядных станций также является крайне актуальной задачей.

Актуальность темы исследования подтверждается многочисленными результатами выполнения модельных сценариев доставки грузов беспилотными авиационными системами мультироторного типа [6]–[8], когда для выполнения задания автономного полета не хватает базовой зарядки аккумулятора в точке старта. Поэтому широкое использование БАС ограничивается необходимостью зарядки и дозарядки аккумуляторных батарей непосредственно на объекте работ. Проблемой применения БАС является сравнительно небольшое время полета, в среднем составляющее до 20 мин, которое ограничено емкостью аккумуляторной батареи. Установка более мощных аккумуляторов позволяет увеличить время полета, но вследствие большего размера и большей массы аккумулятора, по сравнению с базовым [9], оказывает влияние на аэродинамические свойства и стабильность в полете. Очевидно, проблему можно решить совершенствуя эффективность применяемых аккумуляторов, используя двигатели внутреннего сгорания для мультироторных систем или гибридные схемы. Однако наиболее перспективным решением является использование мобильной системы зарядки мультироторных беспилотных авиационных систем.

Для достижения целей увеличения времени автономного полета мультироторных систем необходимо решение комплекса таких вопросов, как исследование аппаратного обеспечения зарядной станции, выбор моделей квадрокоптеров, для которых применима конструкция зарядной станции, разработка подпрограмм автоматизации и управления системы зарядки, позволяющая отображать как индикацию состояния заряда, так и дополнительную техническую информацию.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Существует несколько вариантов реализации зарядных станций, при этом укрупненно они могут быть разделены на следующие группы: двухконтактный, одноконтактный, бесконтактный, а также двухполюсная схема подключения с помощью матрицы контактных площадок. Обеспечение мобильности использования и расположения может быть достигнуто при помощи использования бесконтактной зарядной станции. Кроме того, имеют место такие гибридные варианты зарядных станций, как лазерная зарядка БАС во время полета, создание «летающей батареи», беспроводная зарядка дронов в полете, дронопорт (станция с механизированной заменой аккумулятора), наземная станция беспроводной зарядки дрона (для морских систем — станция базирования на судне или причале беспроводной зарядки дрона).

С практической точки зрения режим пилотирования беспилотной авиационной системой в ручном режиме выполняется во время заряда аккумулятора. Оператор планирует маршрут либо с учетом возврата беспилотной авиационной системы в точку старта, либо с учетом замены аккумулятора в следующей точке для выполнения возвратного маршрута. В работе [10] приведено программное обеспечение, позволяющее оценить выполнимость полетного маршрута на основе ввода реальных данных по состоянию аккумулятора и оценки массы груза, который необходимо доставить (рис. 1).

Доставка дроном: Максимальный вес груза

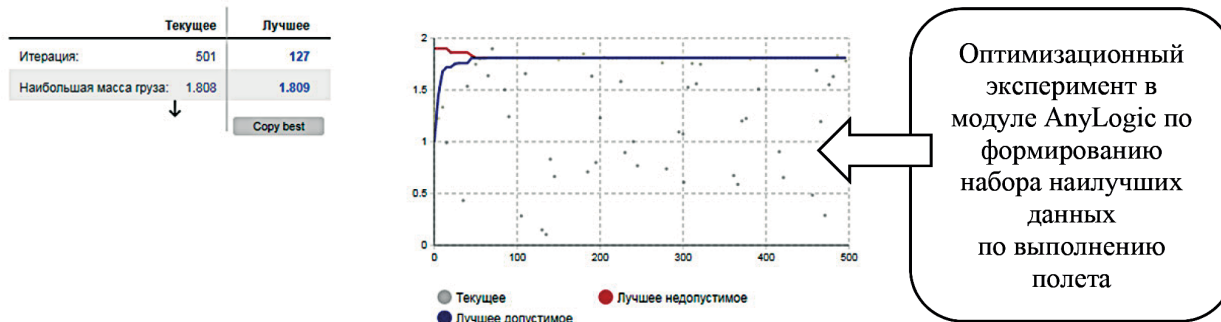


Рис. 1. Прогнозирование выполнения полета беспилотной авиационной системой на основе оценки массы груза и данных о состоянии аккумулятора

Наиболее востребованными являются полетные задания, выполняемые автономно на основе автоматизированных полетных заданий. В табл. 1 приведены уровни автономности беспилотных авиационных систем и автоматизированное программное обеспечение.

Таблица 1

Уровни автономии беспилотных систем для транспортных задач

Уровень автономии	0	1	2	3	4	5
Степень автоматизации	Без автоматизации (ручной режим)	Слабая автоматизация	Частичная автоматизация	Условная автоматизация	Высокая автоматизация	Полная автоматизация
Описание уровня	Ручное управление полетом	Пилот контролирует процесс полета. БАС передает один параметр во время полета	Пилот, остался ответственным за подготовку полета и эксплуатацию. Дрон контролирует направление и высоту при определенных условиях	Оператор действует как резервная система. Беспилотник может выполнять все функции при определенных условиях выполнения полета	Оператор вне системы. У беспилотной авиационной системы есть резервные системы, позволяющие выполнять полет при возникновении ситуаций	Беспилотная система использует элементы ИИ для обработки полетных данных и корректировки выполнения полета системами на борту

На основе анализа табл. 1 видно, что для того, чтобы повысить степень автономности беспилотных авиационных систем мультироторного типа, необходимо создать инфраструктуру, т. е. внедрить такую аппаратную систему с информационным обеспечением, которая может автоматизировать процессы, связанные с зарядом бортового аккумулятора.

Модель маршрутизации выполнения автономных полетов беспилотной авиационной системой для выполнения автономных полетов между районами морского грузового порта или другого порта [11], [12] приведена на рис. 2.

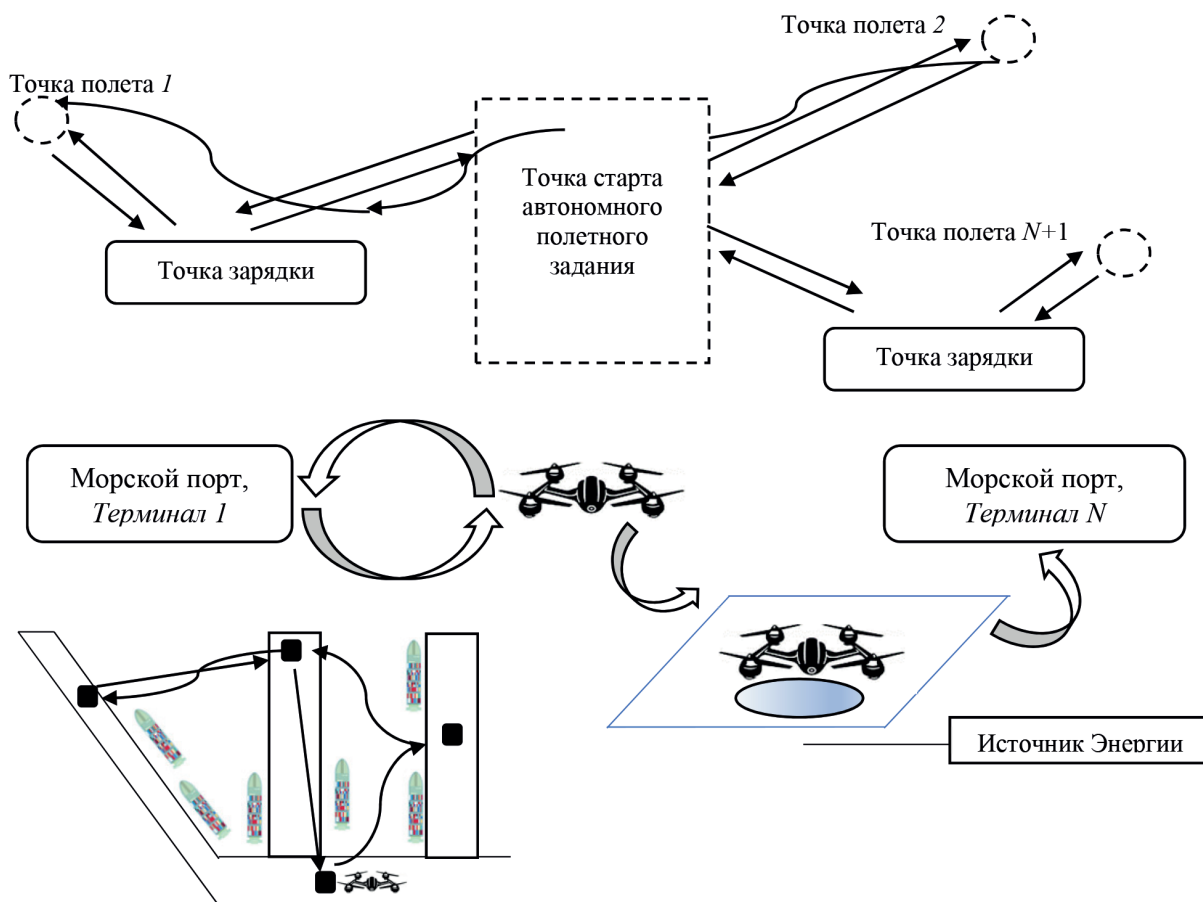


Рис. 2. Модель полетного задания беспилотной авиационной системы при выполнении полетов между районами морского порта с размещением автоматизированных систем зарядки БАС в терминалах

Для увеличения автономности и обеспечения мобильности заряда БАС предлагается использование беспроводной передачи энергии. Для решения задачи автоматической зарядки бортовой аккумуляторной батареи, а также для повышения универсальности применения решения была использована схема с беспроводной передачей энергии, содержащая *приемный модуль*, устанавливаемый на беспилотную систему мультироторного типа, который подключается параллельно бортовой сети, и *передающий модуль*, который отвечает за беспроводную передачу энергии и выполняет передачу данных о статусе зарядки аккумуляторной батареи в центр управления полетами. Основная особенность беспроводной системы зарядки аккумуляторной батареи заключается в относительно небольшом размере как приемной, так и передающей части, отсутствии необходимости выполнения точной посадки с точностью до 1 см с дальнейшей ориентацией дрона на платформе, а также в том, что приемную часть можно установить на различные модели беспилотных систем, тем самым обеспечив применимость для большого класса моделей. Для решения поставленной задачи был разработан аппаратный комплекс для бесконтактной зарядки беспилотной авиационной системы и подпрограммы автоматизации для отображения процесса заряда и управления.

Результаты исследования (Results of the Research)

Для реализации прототипа беспроводной передачи энергии посредством технологии магнитно-резонансной индукции была разработана принципиальная электрическая схема трансмиттера и ресивера. Приемная часть зарядной станции беспилотной системы мультироторного типа состоит из приемной катушки индуктивности, диодного моста, DC–DC преобразователя напряжения, платы управления на базе микроконтроллера ESP8266 [13], а также электролитических

Для мониторинга и управления системы был реализован веб-сервер в локальной сети, который позволяет включать / выключать зарядную станцию, производить мониторинг температуры, напряжения и силы тока как на трансмиттере, так и на ресивере. В программный код включена часть для вычисления КПД в процентах. Программной средой для реализации выбрана Arduino IDE [14] под ESP32. Программа реализована как клиент и сервер, между которыми производится передача пакетов. При программной реализации серверная часть решает следующие задачи:

1. Создает вайфай точку (Wi-Fi), создает веб-сервер для мониторинга и управления станцией.
2. Принимает данные (показания датчиков) с esp12 дрона по протоколу esp-now, проверяет наличие соединения с клиентом.
3. Проверяет подключение датчиков тока, напряжения и температуры.
4. «Сглаживает» значения датчиков с помощью экспоненциального фильтра.
5. Осуществляет управление входным реле в случае пользовательского включения / выключения системы, а также отключает систему до перезагрузки в случае срабатывания одной из защит (по току, напряжению, температуре).
6. Автоматически управляет оборотами вентилятора в зависимости от температуры транзисторов.

В процессе программной реализации клиентская часть решает следующие задачи:

1. Автоматически подключается по протоколу esp-now к серверной части.
2. Отправляет данные (показания датчиков) на esp12 станции по протоколу esp-now.
3. Проверяет подключение датчиков тока, напряжения и температуры.
4. «Сглаживает» значения датчиков с помощью экспоненциального фильтра.

Приведем фрагмент программного кода в среде Arduino IDE под ESP32 на стороне сервера [15], [16]. Функция switchAction () управляет входным реле в случае пользовательского включения / выключения системы, а также отключает систему до перезагрузки в случае срабатывания одной из защит (по току, напряжению, температуре):

```
void switchAction(Control* sender, int value) {  
    if (!systemProtection) {  
        switch (value) {  
            case S_ACTIVE:  
                // Serial.print("Active:");  
                digitalWrite(relayPin, HIGH);  
                break;  
  
            case S_INACTIVE:  
                // Serial.print("Inactive");  
                digitalWrite(relayPin, LOW);  
                break;  
        }  
    }  
}
```

Функция расчета КПД зарядной станции по мощности:

```
float getVolt() {  
    uint32_t aver = 0;  
    for (uint8_t i = 0; i < numSamples; i++) {  
        aver += analogReadMilliVolts(voltPin);  
        delay(0.2);  
    }  
    Filter2.Filter(aver);  
    aver = Filter2.Current();  
    float voltage = (float)aver / numSamples / 1000.0f * coeffVoltDiv + voltOffset;
```

```
// Serial.print("Voltage: ");
// Serial.println(voltage);
return voltage;
}

float getEfficiency(float txAmp, float txVolt, float rxAmp, float rxVolt) {
    if (txAmp / txVolt != 0) {
        return (rxAmp * rxVolt / txAmp / txVolt) * 100.0;
    } else return 0.0;}
}
```

Оконная форма разработанной подпрограммы автоматизации приведена на рис. 5.



Рис. 5. Графический интерфейс веб-сервера с отображением всех параметров и расчетом коэффициента полезного действия

Программная среда выполнена таким образом, что к точке доступа можно подключиться с любого устройства, оборудованного Wi-Fi модулем, осуществляя управление системой и ее контроль.

Обсуждение (Discussion)

Представленный проект автоматизированной системы для бесконтактной зарядной станции имеет ряд достоинств, среди которых наиболее важным является обеспечение мобильности размещения, возможности установки приемного модуля с катушкой на различных моделях БАС мультироторного типа. Эксперименты проводились при выполнении полетов в закрытом исследовательском летном поле лаборатории беспилотных авиационных систем инженерной школы ГУАП. Важным вопросом является обеспечение аэродинамических свойств при установке приемного модуля. Полный вес приемного модуля составил 352 гр. Для малых дронов даже такой вес является существенным, но для выбранного грузового дрона 550-го размера, который был использован для установки этого оборудования, такой вес позволяет разместить существенную дополнительную полезную нагрузку. Выбранный тип дрона и его модификация наиболее подходит для выполнения полетов на определенной территории (например, между районами морского грузового порта или терминалами) с возможностью доставки дополнительной полезной нагрузки. Достаточно плоский тип приемного модуля не вызывает сильного сопротивления при полете и в некоторых случаях его массогабаритными параметрами можно пренебречь.

При выполнении тестовых полетов был установлен 100 %-й заряд аккумулятора. Скорость перемещения беспилотника при выполнении полета оставалась постоянной. На основании серии

экспериментов (см. пример фрагмента выборки) были получены значения, которые приведены в табл. 2 и на рис. 6).

Таблица 2

Экспериментальные значения получения коэффициентов КПД

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Полученное КПД, %	71,89	68,14	75,23	75,87	65,72	73,33	74,12	78,87	72,15

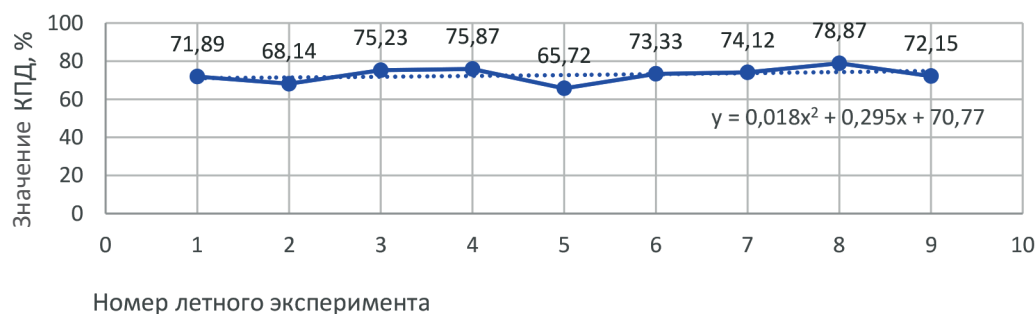


Рис. 6. Результаты исследования КПД при выполнении различных полетных заданий беспилотной авиационной системы

На основании результатов выполненных полетов были установлены особенности выполнения полетных заданий и взаимодействия с зарядной станцией. Зарядная станция вместе с приемным модулем получилась довольно мощной и эффективной, что позволило заряжать аккумуляторы мощностью 75 Вт при КПД 73,7 %. Максимальный ток заряда 4–5 А, наилучшее расстояние между катушками — 25 мм.

Недостатком является то, что корпус данной подсистемы выполнен из деревянных материалов. Несмотря на использованную специализированную влагостойкую пропитку поверхности этого недостаточно при реальных условиях эксплуатации. Необходимо проведение дополнительных исследований и практических экспериментов с другими материалами для корпуса наземной части зарядной станции.

Заключение (Conclusion)

В связи с активным расширением внедрения беспилотным транспортными систем и разработкой новых пилотных решений задача увеличения времени выполнения полета является актуальной. Решение ее имеет противоречие между аппаратными требованиями наземных зарядных станций, параметрами аккумуляторных батарей и аэродинамическими летными характеристиками, что делает данную задачу сложной и неоднозначной. На практике указанное противоречие приводит к достижению одних параметров при ухудшении характеристик других. Разработанный аппаратный комплекс не должен оказывать существенного влияния на массогабаритные характеристики беспилотной авиационной системы.

В проведенном исследовании решена задача обеспечения заряда беспилотной авиационной системы на уровне КПД 73,3 % — время зарядки составляет 1 ч до максимального уровня. При этом обеспечен баланс между эксплуатационными издержками и моделью развертывания сети подобных зарядных станций. Разработанные аппаратные и программные подсистемы позволяют решить задачу мобильности использования, достижения продолжения выполнения полетного задания беспилотной системы и продолжения полета для решения практических задач морских грузовых портов. Несмотря на проектирование полетных заданий предполагается, что представленное решение автоматизированной станции заряда беспилотных авиационных

систем позволит проектировать в том числе новые маршруты полетных заданий беспилотных транспортных систем как для морских терминалов и транспортных объектов, так и для городских транспортных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин А. С. Эксплуатация беспилотных авиационных систем / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Т. Ю. Карпова. — СПб.: ГУАП, 2021. — 169 с.
2. Kostin A. S. Models and methods for implementing the autonomous performance of transportation tasks using a drone / A. S. Kostin // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — IEEE, 2021. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470584.
3. Gonzalez-R P. L. Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning / P. L. Gonzalez-R, D. Canca, J. L. Andrade-Pineda, M. Calle, J. M. Leon-Blanco // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2020. — Vol. 114. — Pp. 657–680. DOI: 10.1016/j.trc.2020.02.030.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615497 Российская Федерация. Программа автономного полета беспилотной авиационной системы для реализации много-адресной доставки грузов / Н. Н. Майоров, А. С. Костин, Е. А. Вознесенский; заяв. и патентообл. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. — № 2022615305; заявл. 31.03.2022; опубл. 31.03.2022, Бюл. № 4.
5. Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года, национальный проект «Беспилотные авиационные системы». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/48875/> (дата обращения 20.07.2024).
6. Outay F. Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges / F. Outay, H. A. Mengash, M. Adnan // Transportation research part A: policy and practice. — 2020. — Vol. 141. — Pp. 116–129. DOI: 10.1016/j.tra.2020.09.018.
7. Костин А. С. Разработка автоматизированных решений для исследования вариантов маршрутов доставки при совместном использовании транспортного средства и беспилотной авиационной системы в границах города / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2022. — № 7. — С. 348–356. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-348-357.
8. Jaller M. Automation, electrification, and shared mobility in urban freight: Opportunities and challenges / M. Jaller, C. Otero-Palencia, A. Pahwa // Transportation Research Procedia. — 2020. — Vol. 46:13–20. — P. 13–20. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.158.
9. Вознесенский Е. А. Алгоритм точной посадки мультироторных беспилотных авиационных систем на станцию автономной зарядки / Е. А. Вознесенский // Системный анализ и логистика. — 2021. — № 4 (30). — С. 3–10. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-3-10.
10. Язвенко М. Р. Моделирование процесса доставки грузов беспилотной авиационной системой в границах района города / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Четвертая Международная научная конференция, Санкт-Петербург, 04–21 апреля 2023 года. Т. Ч. 1. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. — 2023. — С. 211–219. DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-211-219.
11. Силина А. А. Исследование модернизации морского пассажирского порта на основе цифрового двойника и оценка инфраструктуры с помощью динамических данных от беспилотных авиационных систем / Н. Н. Майоров, А. А. Силина, В. А. Фетисов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2024. — № 2. — С. 76–88. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-2-76-88.
12. Pillac V. A review of dynamic vehicle routing problems / V. Pillac, M. Gendreau, C. Guéret, A. L. Medaglia // European Journal of Operational Research. — 2013. — Vol. 225. — Pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.08.015.
13. Engel J. Accurate Figure Flying with a Quadcopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing / J. Engel, J. Sturm, D. Cremers // Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). Vilamoura, Algarve, Portugal. — 2012. — Pp. 43–48.
14. Arduino IDE [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.arduino.cc/en/software/> (дата обращения 01.06.2024).
15. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2022682846 Российская Федерация. Программа автономной базовой станции квадрокоптера для зарядки аккумулятора и передачи данных о дроне с клиентской части в веб интерфейс / А. С. Костин, Е. А. Вознесенский; заяв. и патентообл.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. — № 2022682642; заявл. 28.11.2022; опублик. 28.11.2022. Бюл. № 12.

16. Костин А. С. Информационно-измерительные системы для контроля выполнения траектории авиационной системы / А. С. Костин // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Материалы XXIV Международной научной конференции. — СПб.: ГУАП, 2021. — Т. Ч. 1. — С. 219–226. — EDN HUQLIU.

REFERENCES

1. Kostin, A. S., N. N. Maiorov, and T. Yu. Karpova. *Ekspluatatsiya bespilotnykh aviatsionnykh sistem*. SPb.: GUAP, 2021.
2. Kostin, A. S. “Models and methods for implementing the autonomous performance of transportation tasks using a drone.” *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470584.
3. Gonzalez-R, Pedro L., David Canca, Jose L. Andrade-Pineda, Marcos Calle, and Jose M. Leon-Blanco. “Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 114 (2020): 657–680. DOI: 10.1016/j.trc.2020.02.030.
4. Maiorov, N. N., A. S. Kostin, and E. A. Voznesenskii. RU 2022615497. Programma avtonomnogo poleta bespilotnoi aviatsionnoi sistemy dlya realizatsii mnogoadresnoi dostavki грузов. Russian Federation, assignee. Publ. 31 March 2022.
5. Strategiya razvitiya bespilotnoj aviatsii Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2035 goda, nacional'nyj projekt «Bespilotnye aviatsionnye sistemy». Web. 20 July. 2024. <<http://government.ru/docs/48875/>>.
6. Outay, Fatma, Hanan Abdullah Mengash, and Muhammad Adnan. “Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges.” *Transportation research part A: policy and practice* 141 (2020): 116–129. DOI: 10.1016/j.tra.2020.09.018.
7. Kostin, Anton Sergeyevich, and Nikolai Nikolaevich Maiorov. “Development of automated solutions for the research of delivery route options in the joint use of a vehicle and an unmanned aerial system within the boundaries of the city.” *Izvestiya Tula State University* 7 (2022): 348–356. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-348-357.
8. Jaller, Miguel, Carlos Otero-Palencia, and Anmol Pahwa. “Automation, electrification, and shared mobility in urban freight: opportunities and challenges.” *Transportation Research Procedia* 46 (2020): 13–20. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.158.
9. Voznesensky E. A. “Algorithm for precise landing of multi-rotor UAVs on an autonomous charging station”. *System analysis and logistics*. 4 (30) (2021): 3–10. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-3-10.
10. Yazvenko M. Romanovich, A. S. Kostin, and N. N. Maiorov. “Modeling the process of cargo delivery by unmanned aerial system within the city district boundaries” *Aerospace Instrumentation and Operating Technologies: Fourth International Scientific Conference AIOT*, 2023. DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-211-219.
11. Maiorov N. N., Silina A. A., Fetisov V. A. “Research of modernization of sea passenger port based on digital twin and infrastructure assessment using dynamic data from unmanned aerial systems” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2024): 76–88. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-2-76-88.
12. Pillac V., M. Gendreau, C. Guéret, A. L. Medaglia A review of dynamic vehicle routing problems *European Journal of Operational Research*. 225 (2013): 1–11. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.08.015.
13. Engel, Jakob, Jurgen Sturm, and Daniel Cremers. “Accurate Figure Flying with a Quadrocopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing.” *Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/ RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS)*. (2012): 43–48.
14. Arduino IDE Web. 1 June.2024. <<https://www.arduino.cc/en/software/>>.
15. Kostin A. S., and E. A. Voznesenskii. RU 2022682846. Programma avtonomnoj bazovoj stancii kvadroptera dlya zaryadki akkumulyatora i peredachi dannyh o drone s klientskoj chasti v veb interfejs. Russian Federation, assignee. Publ. 28 November 2022.
16. Kostin, A.S. “Information-measuring systems for monitoring the aircraft trajectory.” *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy. Materialy XXIV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Vol.1. SPb.: GUAP, 2021: 219–226.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вознесенский Евгений Александрович —
аспирант

Научный руководитель:

Майоров Николай Николаевич, д-р техн. наук, доц.
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: voznensensky.evgeny@mail.ru

Майоров Николай Николаевич —

доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Терехов Андрей Николаевич —

доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный
университет
198504, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Петергоф, Университетский проспект, 28
e-mail: Andrey.Terekhov@lanit-tercom.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Voznesensky Evgeniy Aleksandrovich —
Postgraduate

Supervisor:

Maiorov, Nikolai N.
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation
email: voznensensky.evgeny@mail.ru

Maiorov, Nikolai N. —

Dr. of Technical Sciences,
associate professor
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Terekhov Andrey Nikolayevich —

Doctor of Technical Sciences, Professor
Mathematics & Mechanics Faculty,
Saint Petersburg State University
198504, Russian Federation,
St. Petersburg,
Peterhof, Universitetsky Prospekt, 28
e-mail: Andrey.Terekhov@lanit-tercom.com

Статья поступила в редакцию 20 августа 2024 г.

Received: August 20, 2024.