



Вестник РГАТУ, 2023, т.15, №1, с.168-174
Vestnik RGATU, 2023, Vol.15, №1, pp 168-174

Научная статья
УДК 629.735
DOI: 10.36508/RSATU.2023.17.18.022

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МУЛЬТИКОПТЕРОВ-ОПРЫСКИВАТЕЛЕЙ

Николай Константинович Толочко¹✉, Николай Николаевич Романюк², Валерий Николаевич Еднач³, Дмитрий Валериевич Виноградов⁴, Кирилл Дмитриевич Сазонкин⁵

^{1,2,3}Белорусский государственный аграрный технический университет, г Минск, Республика Беларусь

^{4,5}Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г Рязань, Россия

¹N.tolochko@hotmail.com

²romanyuk-nik@tut.by

³val-e@mail.ru

⁴vdv-rz@rambler.ru

⁵kirill.sazonkin@mail.ru

Аннотация.

Проблема и цель. Существующие технические новшества в области беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) постепенно внедряются, а для некоторых агротехнических операций уже используются в современном сельскохозяйственном цикле выращивания растений. Дроны – новый вид агрегатов для мониторинга и обработок полей, однако из-за низкой разработанности вопроса их широкого применения необходимо проводить исследования по улучшению их конструкции и расширению области применения. Целью исследований являлось рассмотрение проблемы проектирования мультикоптеров-опрыскивателей с учетом возможности их изготовления посредством аддитивных технологий с упором на повышение грузоподъемности мультикоптеров.

Методология. Исследования были проведены в Белорусском государственном аграрном техническом университете с помощью расчетного метода.

Результаты. Результаты исследований показывают, что при изготовлении деталей мультикоптеров-опрыскивателей посредством аддитивных технологий возможно выпускать широкий спектр разнообразных моделей, в зависимости от области использования.

Заключение. В результате исследования были установлены технические моменты, корректируя которые на этапе производства мультикоптеров с помощью аддитивных технологий, возможно производить специализированные БПЛА.

Ключевые слова: мультикоптер, опрыскивание, грузоподъемность, проектирование, аддитивные технологии

Для цитирования: Толочко Н.К., Романюк Н.Н., Еднач В.Н., Виноградов Д.В., Сазонкин К.Д. Особенности проектирования мультикоптеров-опрыскивателей // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2023. Т15, №1. С 168-174 <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.17.18.022>

Original article

DESIGN FEATURES OF MULTICOPTER SPRAYERS

Nikolai K. Tolochko¹✉, Nikolai N. Romanyuk², Valery N. Ednach³, Dmitry V. Vinogradov⁴, Kirill D. Sazonkin⁵

¹Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia

¹N.tolochko@hotmail.com

²romanyuk-nik@tut.by

³val-e@mail.ru

⁴vdv-rz@rambler.ru



⁵kirill.sazonkin@mail.ru

Abstract.

Problem and purpose. The existing technical innovations in the field of unmanned aerial vehicles are gradually being introduced, and for some agrotechnical operations are already being used in the modern agricultural cycle of growing plants. Drones are a new type of equipment for monitoring and post-treatment, however, due to the low development of the issue of their widespread use, it is necessary to conduct various studies to improve their design and expand their scope. The aim of the research was to consider the problems of designing multicopter sprayers, taking into account the possibility of their manufacture using additive technologies, with an emphasis on increasing the carrying capacity of multicopters.

Methodology. The studies were carried out at the Belarusian State Agrarian Technical University using the calculation method.

Results. The research results show that when manufacturing parts for multicopter sprayers using additive technologies, it is possible to produce a wide range of different-sized models, depending on the area of use.

Conclusion. As a result of the study, technical points were established, correcting which at the stage of production of multicopters using additive technologies, it is possible to produce specialized UAVs.

Key words: multicopter, spraying, carrying capacity, design, additive technologies

For citation: Tolochko N.K., Romanyuk N.N., Ednach V.N., Vinogradov D.V., Sazonkin K.D. Design features of multicopter sprayers// Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev. 2023; 15(1). P 168-174 (in Russ.). <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.17.18.022>

Введение

С каждым годом в сельском хозяйстве все шире применяются беспилотные летательные аппараты (дроны). Особая роль отводится дронам-опрыскивателям, обеспечивающим высокоэффективную обработку полей жидкофазными пестицидами. Среди них видное место занимают мультикоптеры.

Один из важнейших функциональных параметров дронов – грузоподъемность, которая характеризуется возможностью использования максимальной полезной нагрузки. В случае дрона-опрыскивателя полезной нагрузкой является распыляемая рабочая жидкость.

Грузоподъемность дронов зависит от особенностей их конструкции, которые определяются на этапе проектирования с учетом поставленных эксплуатационных задач. Как правило, на конструкции проектируемых дронов накладываются различные ограничения, обусловленные спецификой применяемых технологий их изготовления. При изготовлении дронов по традиционным технологиям эти ограничения могут создавать существенный барьер на пути повышения грузоподъемности. В последние годы для изготовления дронов применяются аддитивные технологии (технологии 3D-печати), которые не только снимают значительную часть ограничений по их проектированию, связанных с традиционными технологиями, но также открывают принципиально новые возможности проектирования [8].

В данной статье рассмотрены некоторые методические аспекты проектирования мультикоптеров-опрыскивателей (МО), в том числе с учетом возможностей их изготовления с помощью аддитивных технологий. Особое внимание уделено повышению грузоподъемности МО.

Объекты и методы исследований

Объектами исследований явились составные части мультикоптера. Основой научных исследований явилось обобщение теоретических результатов по изучаемому вопросу и проведение физико-математических расчетов по общепринятым методикам и законам.

Результаты исследований

В состав типовой конструкции МО входят следующие основные компоненты: рама; двигатели, снабженные пропеллерами; система опрыскивания; система управления; источник энергопитания; бак для рабочей жидкости.

Рама является главной корпусной деталью, она несет на себе все остальные компоненты конструкции МО. Двигатели с пропеллерами размещаются на концах стержнеобразных элементов рамы, называемых лучами.

Система опрыскивания содержит распылительные форсунки, которые, как и двигатели, размещаются на концах лучей рамы, и насос, который нагнетает рабочую жидкость из бака к форсункам по трубопроводам. Возможны варианты систем опрыскивания, содержащих не один, а несколько насосов (в отдельности для каждой форсунки). Также системы опрыскивания могут содержать расходомеры, регуляторы скорости потока, фильтры и т.п.

Система управления содержит полетный контроллер, к которому подключен набор разных датчиков: акселерометр (отслеживает линейное перемещение МО), барометр (определяет высоту нахождения МО); гироскоп (определяет ориентацию МО в пространстве); GPS-модуль (определяет местоположение МО на основе сигналов от спутников) и др. Контроллер имеет проводную связь с двигателями, что позволяет давать им управляющие сигналы для пилотирования. Система управления может обеспечивать автономную работу МО либо управлять им дистанционно с помощью оператора, для чего МО снабжается приемопередающим радиоустройством.

В качестве источника энергопитания обычно используется аккумуляторная батарея, которая является сменным компонентом: в случае разрядки она заменяется новой, заряженной батареей.

Бак для рабочей жидкости также является сменным компонентом: в случае опорожнения во время работы МО он при необходимости заменяется новым, заполненным баком. Бак обычно подвешивается к раме с помощью подвесного приспособления (захвата) или устанавливается во



встроенном в раму гнезде. Рабочая жидкость подается из бака к форсункам насосом.

Грузоподъемность МО представляет собой отношение массы полезной нагрузки, $m_{пн}$, к полной (взлетной) массе МО, m_o :

$$Q = m_{пн} / m_o \quad (1)$$

Полная масса МО определяется выражением $m_o = m_o^* + m_{пн}$,

где m_o^* – масса всех компонентов конструкции МО без учета массы полезной нагрузки.

Как отмечалось выше, полезной нагрузкой МО является рабочая жидкость, которой заполняется бак. Однако иногда к полезной нагрузке, кроме рабочей жидкости, относят сам бак, а также некоторые элементы конструкции, например, насос. Для определенности будем рассматривать в качестве полезной нагрузки только рабочую жидкость.

Выражение (1) с учетом (2) можно представить в виде

$$Q = \left(\frac{m_o^*}{m_{пн}} + 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

откуда следует, что грузоподъемность тем больше, чем больше отношение массы полезной на-

грузки, т.е. массы рабочей жидкости, максимально заполняющей бак, $m_{пн}$, к массе всех компонентов конструкции МО, включая массу бака, m_o^* .

Типичные значения грузоподъемности различных МО, а также других видов дронов показаны в табл. 1 [1]. Как видно из таблицы, доля полезной нагрузки в общей массе дрона сравнительно невелика и, следовательно, ее повышение является актуальной задачей.

Рассматривая возможные пути повышения полезной нагрузки, следует исходить из необходимости выполнения условия

$$F_t > P_o, \quad (4)$$

где $P_o = m_o g$ – полный (взлетный) вес МО, g – ускорение свободного падения, F_t – сила тяги, создаваемая вращающимися пропеллерами МО [15]. Поскольку дрон движется по горизонтали относительно земной поверхности достаточно медленно, то можно считать, что сила тяги F_t приблизительно равна подъемной силе. При выполнении условия $F_t > P_o$ дрон поднимается вверх; если $F_t = P_o$, то он зависает над землей на некоторой фиксированной высоте; если $F_t < P_o$, то он опускается вниз.

Таблица 1 - Технические характеристики мультикоптеров

№п/п	Модель, тип	$m_{пн}$, кг	m_o , кг	q ($m_{пн} / m_o$)	Целевая нагрузка
1	JT10L-404QC (4)	14	27	0,52	Рабочая жидкость
2	JT16L-404QC (4)	22	40	0,55	- // -
3	JT30L-606 (6)	38,5	67	0,57	- // -
4	A60-X (4)	17	55	0,31	- // -
5	A20-X (6)	10	21	0,48	СН
6	A10-X (4)	2	12	0,17	- // -
7	A9-X (4)	2,5	9	0,28	- // -

Примечания: 1. Условные обозначения: (4) – квадрокоптер; (6) – гексакоптер; СН – специальная нагрузка (мониторинговое оборудование); 2. Производство: Joyance Tech, Китай (№ = 1...3) и Китайско-Белорусское ЗАО АТК, Беларусь (№ = 4...7)

С учетом изложенного выше, можно указать два основных способа повышения полезной нагрузки $m_{пн}$: 1) за счет уменьшения m_o^* при сохранении неизменного значения F_t и 2) за счет увеличения F_t при сохранении неизменного значения m_o^* . Также возможно объединение обоих способов, а именно: повышение $m_{пн}$ за счет одновременного уменьшения m_o^* и увеличения F_t .

Уменьшение m_o^*

Значение m_o^* может быть уменьшено в результате уменьшения массы отдельных компонентов конструкции МО, прежде всего, рамы и системы управления.

Рама может быть облегчена благодаря использованию более легких, но вместе с тем достаточно прочных материалов, в частности, полимерных композитов [7]. Так, для изготовления рамы, а также некоторых других компонентов конструкции МО широко используется карбон. Также раму можно облегчить, если изготавливать ее не складной (что нередко делается для удобства транспортировки МО), а цельной.

Значительное уменьшение массы МО можно обеспечить, объединяя раму и бак в единый конструктивный компонент в соответствии с принципами фюзеляжного дизайна [4]. При этом стенки бака могут служить в качестве несущих элементов рамы, от которых отходят лучи для крепления двигателей. В этом случае можно отказаться от опорных стоек (шасси), так как их роль будет играть донная часть бака (при условии использования специальных площадок для взлета и посадки МО). Примером подобного подхода к оптимизации конструкции МО является проектирование малогабаритного квадрокоптера для борьбы с вредителями растений в теплицах, в котором для уменьшения общего веса дрона бак для жидкости служит в качестве фюзеляжа.

Система управления может быть облегчена благодаря оптимизации состава, а именно путем оснащения ее ограниченным набором элементов, необходимых для выполнения задач конкретных полетов МО [2]. Для снижения массы аккумуляторных батарей предлагается изготавливать их на



основе перспективных, в частности, литий-полимерных материалов, обеспечивающих повышение их электрической емкости [6]. Дополнительное снижение массы аккумуляторных батарей возможно за счет использования гибридных систем энергоснабжения, включающих не только аккумуляторные батареи, но и бензиновые двигатели внутреннего сгорания [6].

Следует заметить, что согласно (3) повышение $m_{пн}$ в принципе не исключает повышения массы m_0^* . Однако значительное повышение массы и, соответственно, объема конструкции МО может привести к ухудшению аэродинамических свойств, большому расходу энергии и, как следствие, меньшему полетному времени.

Увеличение F_t

Сила тяги МО определяется выражением $F_t = NF_t i$, (5)

где N – количество пропеллеров (равно количеству двигателей), $F_t i$ – сила тяги одного пропеллера [14]. Отсюда следует, что увеличение силы тяги МО можно обеспечить соответствующим увеличением количества пропеллеров. Так, гексакоптеры ($N = 6$) и октокоптеры ($N = 8$) обладают большей грузоподъемностью, чем квадрокоптеры ($N = 4$). Следует, однако, учитывать, что с увеличением количества пропеллеров растет не только тяга, но и общая масса МО.

Для увеличения силы тяги МО можно применять соосное расположение двигателей, что в случае квадрокоптера, например, даёт 8 моторов и 8 пропеллеров, расположенных попарно на четырех несущих лучах.

Значение $F_t i$ можно определить по формуле $F_t i = [2\pi R^2 \rho (c_p n v k)^2]^{1/3}$, (6)

где R – радиус пропеллера, ρ – плотность воздуха, c_p – константа пропеллера, v – число оборотов пропеллера в единицу времени, k – коэффициент мощности (отношение потребляемой двигателем мощности к полной мощности).

Число оборотов v рассчитывается на основе электрического напряжения U , подаваемого на двигатель от аккумулятора: $v = n U$, где n – число оборотов в минуту на единицу напряжения согласно характеристике двигателя. Константа пропеллера c_p зависит от размеров и формы пропеллера.

$F_t i$ увеличивается с увеличением количества лопастей [16]. Однако применение многолопастных пропеллеров ограничено из-за высокой стоимости их изготовления.

Также $F_t i$ увеличивается с увеличением диаметра пропеллера и угла наклона лопастей и скорости вращения: $F_t i = K_t \omega^2$, где K_t – коэффициент тяги, зависящий от формы пропеллера, ω – угловая скорость пропеллера [10]. Однако все это создает более высокую нагрузку на двигатель.

Кроме того, $F_t i$ зависит от формы лопастей (от формы профилей их поперечных сечений). Особое значение имеет форма оконечной части лопастей, влияющая не только на силу тяги, но и на уровень шума, создаваемого вращающимся пропеллером.

Учет полетного времени

При решении задач повышения полезной нагрузки МО в ходе проектирования важно учитывать полетное время t . С одной стороны, МО способен летать до тех пор, пока не разрядится аккумулятор (t_A). С другой стороны, полет МО целесообразно проводить до тех пор, пока не опорожнится бак с рабочей жидкостью (t_J). Соответственно, полетное время можно рассчитывать двумя способами:

$$t_A = C/W \quad (7)$$

$$\text{и } t_J = V/q, \quad (8)$$

где C – электрическая емкость аккумуляторной батареи МО, W – потребляемая электрическая мощность, V – начальный объем рабочей жидкости в баке МО, q – расход рабочей жидкости.

После разрядки аккумулятора или после опорожнения бака МО должен возвращаться на установленное место, где оператор проводит смену аккумулятора или бака, соответственно. При этом для повышения производительности работы МО желательно так организовать эту работу, чтобы смена и аккумулятора, и бака проводилась в одно и то же время. Для этого надо задавать такие значения параметров C , W , V и q , при которых значения времени t_A и t_J оказываются кратными. Например, при работе МО марки Agrab фирмы DJI (Китай) одного заряда батареи хватает примерно на две загрузки бака при опрыскивании с расходом 2 галлонов на акр [17]. Определяя оптимальное значение t_J путем соответствующего подбора параметров V и q , надо исходить из того, что значение t_A для аккумуляторов МО обычно не превышает 30-40 минут, а возможности увеличивать t_A за счет использования аккумуляторных батарей большей емкости не безграничны: чем больше C , тем тяжелее и дороже батарея [5].

Отличительной особенностью работы МО является уменьшение полезной нагрузки во времени (по мере опорожнения бака). Это обстоятельство следует учитывать при управлении полетом МО, в частности, для поддержания МО на постоянной высоте надо соответствующим образом регулировать скорость вращения пропеллеров.

Применение аддитивных технологий. Изготовление деталей дронов с помощью аддитивных технологий позволяет широко применять методы генеративного дизайна и топологической оптимизации при проектировании деталей, благодаря чему достигается значительное уменьшение их массы при обеспечении требуемой прочности [11]. При этом в конструкцию деталей можно вносить такие радикальные изменения, которые нельзя осуществить, изготавливая детали по традиционным технологиям.

Так, благодаря аддитивному изготовлению рама дронов может приобретать сверхлегкую конструкцию каркасного (скелетного) типа либо дискретную (ячеистую, решетчатую) внутреннюю структуру [13-18]. Кроме того, за счет использования аддитивных технологий можно делать раму в виде единой детали вместо обычного узла, состоящего из отдельных деталей, что приводит к сни-



жению массы за счет отказа от соединительных элементов [9]. В случае изготовления МО подобным образом можно объединять в единую деталь раму и бак, о чем упоминалось выше. Оптимизация конструкции с целью снижения массы проводится и в отношении других деталей дронов, например, шасси [12].

Особенно перспективно применять аддитивные технологии для изготовления пропеллеров дронов ввиду большой сложности формы их лопастей.

В аддитивном производстве важная роль отводится выбору исходных материалов. Для изготовления деталей дронов широко применяются пластики: ABS, PLA, полиамид, поликарбонат, нейлон, Ultem 9085 и др. [3, 9]. Соответственно, среди разных видов аддитивных технологий для изготовления деталей дронов наибольшее распространение получили технологии 3D-печати полимерных материалов. Это, прежде всего, FDM-технология [3], а также SLS-технология. На сегодняшний день набор полимерных материалов, служащих для 3D-печати деталей дронов, довольно ограничен, поэтому ведется поиск новых материалов, в частности, уделяется внимание использованию переработанных и биоразлагаемых пластиков.

Заключение

Существуют различные методические подходы к проектированию мультикоптеров-опрыскивателей, направленные на повышение их грузоподъемности. Среди них наиболее важными являются такие подходы, реализация которых обеспечивает возможности повышения полезной нагрузки мультикоптеров, что, в частности, достигается за счет уменьшения массы компонентов их конструкции и за счет увеличения силы тяги, создаваемая вращающимися пропеллерами. С учетом специфики работы мультикоптеров при решении задач повышения их полезной нагрузки (рабочей жидкости) следует учитывать фактор полетного времени.

Для изготовления мультикоптеров-опрыскивателей перспективно использовать аддитивные технологии, благодаря чему открываются широкие возможности по привлечению современных методов проектирования, позволяющих проводить оптимизацию их конструкции. С помощью аддитивных технологий можно особенно эффективно изготавливать малогабаритные мультикоптеры, предназначенные для работы с небольшим разовым запасом рабочей жидкости, например, в условиях ограниченного пространства теплиц. Следует заметить, что применение аддитивных технологий для изготовления дронов началось сравнительно недавно, в основном в последние 3-5 лет, так что можно ожидать, что в ближайшие годы оно существенно активизируется.

Список источников

1. Авиационные технологии и комплексы. [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://aerotexsys.by/kompaniya/>. – Дата доступа: 8.02.2023.

2. Брагин Н.И. Применение квадрокоптеров для систем оповещения в чрезвычайных ситуациях / Н.И. Брагин, А.С. Муженко, С.А. Химишев

// Студ. науч. весна – 2016: матер. регион. науч.-тех. конф. студ., асп. и молодых ученых вузов Ростов. области, г. Новочеркасск, 25–26 мая 2016 г. / Южно-Рос. гос. политех. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2016. – С. 5-6.

3. Жукова А.А. Возможности FDM-технологии для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов / А.А. Жукова, С.О. Стойко, А.К. Сухоцкий // Сб.: Авиация: история, современность, перспективы развития : матер. IV междунар. научно-практ. конф. уч. обр. Бел. гос. акад. авиации» Минск, 24 окт. 2019 г. Минск: Нац. библ. Беларуси, 2020. – С. 6-8.

4. Кривяков В.Б. Высокоманевренный мультикоптер / В.Б. Кривяков [и др.] // Сб.: Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами : мат. ежег. науч.-практ. конф. Коломна, 2016 г. – С. 141-147.

5. Костин, А.С. Методы доставки грузов при помощи беспилотных летательных аппаратов / А.С. Костин, Д.В. Еленин // Системный анализ и логистика. СПб.: ГУАП. – 2019. – №1. – С. 55-64. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42492437&ysclid=led96syuem252646778>

6. Кузяков, Б.А. Система передачи оптических сигналов с ретрансляцией / Б.А. Кузяков // Науч. форум: Тех. и физ.-мат. науки: сб. ст. XXIX междунар. науч.-практ. конф. – № 10. – М.: Изд. «МЦНО», 2019. – С. 9-19.

7. Овечкин, А.В. Необходимость автоматизации проектирования квадрокоптеров для конкретной задачи / А.В. Овечкин [и др.] // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2018. – Т.1. – С. 36-40.

8. Толочко, Н.К. Проектирование и аддитивное производство деталей машин / Н.К. Толочко [и др.] // Агропанорама. – 2020. – №4. – С. 2-7. URL: <https://rep.bsatu.by/handle/doc/11122?ysclid=led99ez2tt691852545>

9. Additive manufacturing is helping accelerate the drone revolution. Bralco Advanced Materials. [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://www.amchronicle.com/insights/additive-manufacturing-is-helping-accelerate-the-drone-revolution/>. – Дата доступа: 8.02.2023.

10. Ahmad, F. Estimation of the thrust coefficient of a quadcopter propeller using computational fluid dynamics / F. Ahmad [et al] // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – 1116 012095.

11. Agarwal, H. 3D printed quadcopter / H. Agarwal, A. Singhal, K. H. Raj // Springer Nature Singapore Pte Ltd. Adv. Syst. Eng. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021. – P. 491-499.

12. Anutha, M.A. Optimization of the UAV landing gear to minimize the weight / M.A. Anutha, M. Dheeraj, S.S. Lakshmi // Int. J. Innov. Sci., Eng. & Tech. –2019. –V. 6. – Iss.12. – P. 85-93.

13. Bright, J. Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame / J. Bright [et al] // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – V.1012. – P. 1-11.

14. Dai X. An analytical design-optimization method for electric propulsion systems of multicopter UAVs with desired hovering endurance / X. Dai [et al]



// IEEE/ASME Trans. Mechatronics. – 2019. – V. 24. – No 1. – P. 228-239.

15. Dickey, J. Static thrust calculation. [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://quadcopterproject.wordpress.com/static-thrust-calculation/>. – Дата доступа: 8.02.2023.

16. D. Estimation of aerodynamic loads of a propeller through improved blade element and momentum theory and propeller design optimization. Master's Thesis. Ankara, Middle East Tech. Univ.,

2021. – 128 pp.

17. FAQ – Agri Spray Drones. [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://agrispraydrones.com/faq/>. – Дата доступа: 8.02.2023.

18. Guo, H. Lightweight and maintainable rotary-wing UAV frame from configurable design to detailed design / H. Guo [et al] // Adv. Mech. Eng. – 2021. –V. 13. – P. 1-10.

Вклад авторов:

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

1. Aviacionnye tekhnologii i kompleksy. [Elektronnyj resurs]. – 2023. – Rezhim dostupa: <https://aerotexsys.by/kompaniya/>. – Data dostupa: 8.02.2023.

2. Bragin N.I. Primenenie kvadropteroi dlya sistem opoveshcheniya v chrezvychajnyh situacijah / N.I. Bragin, A.S. Muzhenko, S.A. Himishev // Stud. nauch. vesna – 2016: mater. region. nauch.-tekhn. konf. stud., asp. i molodyh uchenyh vuzov Rostov. oblasti, g. Novochoerkassk, 25–26 maya 2016 g. / YUzhno-Ros. gos. politekh. un-t (NPI). – Novochoerkassk: YURGPU(NPI), 2016. – С. 5-6.

3. ZHukova A.A. Vozmozhnosti FDM-tekhnologii dlya izgotovleniya detalej bespilotnyh letatel'nyh apparatov / A.A. ZHukova, S.O. Stojko, A.K. Suhockij // Sb.: Aviaciya: istoriya, sovremennost', perspektivy razvitiya : mater. IV mezhdunar. nauchno-prakt. konf. uch. obr. Bel. gos. akad. aviatsii» Minsk, 24 okt. 2019 g. Minsk: Nac. bibl. Belarusi, 2020. – S. 6-8.

4. Krovnyakov V.B. Vysokomanevrennyj mul'tikofter / V.B. Krovnyakov [i dr.] // Sb.: Perspektivy razvitiya i primeneniya kompleksov s bespilotnymi letatel'nymi apparatami : mat. ezheg. nauch.-prakt. konf. Kolomna, 2016 g. – S. 141-147.

5. Kostin, A.C. Metody dostavki gruzov pri pomoshchi bespilotnyh letatel'nyh apparatov / A.S. Kostin, D.V. Elenin // Sistemnyj analiz i logistika. SPb.: GUAP. – 2019. – №1. – S. 55-64. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42492437&ysclid=led96syuem252646778>

6. Kuzyakov, B.A. Sistema peredachi opticheskikh signalov s retranslyaciej / B.A. Kuzyakov // Nauch. forum: Tekh. i fiz.-mat. nauki: sb. st. XXIX mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – № 10. – M.: Izd. «MCNO», 2019. – S. 9-19.

7. Ovechkin, A.V. Neobhodimost' avtomatizatsii proektirovaniya kvadropteroi dlya konkretnoj zadachi / A.V. Ovechkin [i dr.] // Innovacionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika. – 2018. – T.1. – S. 36-40.

8. Tolochko, N.K. Proektirovanie i additivnoe proizvodstvo detalej mashin / N.K. Tolochko [i dr.] // Agropanorama. – 2020. – №4. – S. 2-7. URL: <https://rep.bsatu.by/handle/doc/11122?ysclid=led99ez2tt691852545>

9. Additive manufacturing is helping accelerate the drone revolution. Bralco Advanced Materials. [Elektronnyj resurs]. – 2023. – Rezhim dostupa: <https://www.amchronicle.com/insights/additive-manufacturing-is-helping-accelerate-the-drone-revolution/>. – Data dostupa: 8.02.2023.

10. Ahmad, F. Estimation of the thrust coefficient of a quadcopter propeller using computational fluid dynamics / F. Ahmad [et al] // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – 1116 012095.

11. Agarwal, H. ZD printed quadcopter / H. Agarwal, A. Singhal, K. H. Raj // Springer Nature Singapoge Pte Ltd. Adv. Syst. Eng. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021. – P. 491-499.

12. Anutha, M.A. Optimization of the UAV landing gear to minimize the weight / M.A. Anutha, M. Dheeraj, S.S. Lakshmi // Int. J. Innov. Sci., Eng. & Tech. –2019. –V. 6. – Iss.12. – P. 85-93.

13. Bright, J. Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame / J. Bright [et al] // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – V.1012. – P. 1-11.

14. Dai X. An analytical design-optimization method for electric propulsion systems of multicopter UAVs with desired hovering endurance / X. Dai [et al] // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. – 2019. – V. 24. – No 1. – P. 228-239.

15. Dickey, J. Static thrust calculation. [Elektronnyj resurs]. – 2023. – Rezhim dostupa: <https://quadcopterproject.wordpress.com/static-thrust-calculation/>. – Data dostupa: 8.02.2023.

16. D. Estimation of aerodynamic loads of a propeller through improved blade element and momentum theory and propeller design optimization. Master's Thesis. Ankara, Middle East Tech. Univ., 2021. – 128 pp.

17. FAQ – Agri Spray Drones. [Elektronnyj resurs]. – 2023. – Rezhim dostupa: <https://agrispraydrones.com/faq/>. – Data dostupa: 8.02.2023.

18. Guo, H. Lightweight and maintainable rotary-wing UAV frame from configurable design to detailed design / H. Guo [et al] // Adv. Mech. Eng. – 2021. –V. 13. – P. 1-10.



Contribution of the authors:

All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Информация об авторах

Толочко Николай Константинович, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры технологий и организации технического сервиса, Белорусский государственный аграрный технический университет, N.tolochko@hotmail.com

Романюк Николай Николаевич, канд. техн. наук, доцент, ректор, Белорусский государственный аграрный технический университет, romanyuk-nik@tut.by

Еднач Валерий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой механики материалов и деталей машин, Белорусский государственный аграрный технический университет, val-e@mail.ru

Виноградов Дмитрий Валериевич, д-р биол. наук, профессор, профессор кафедры агрономии и агротехнологий, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, vdv-rz@rambler.ru

Сазонкин Кирилл Дмитриевич, аспирант, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, kirill.sazonkin@mail.ru

Author Information

Tolochko Nikolai K., Doctor of Science in Physics, Professor, Professor of the Department of Technology and Organization of Technical Service, Belarusian State Agrarian Technical University, N.tolochko@hotmail.com

Romaniuk Nikolai N., Candidate of Science tech., Associate Professor, Rector, Belarusian State Agrarian Technical University, romanyuk-nik@tut.by

Ednach Valery N., Candidate of Science tech., Associate Professor, Head of the Department of Mechanics of Materials and Machine Parts, Belarusian State Agrarian Technical University, val-e@mail.ru

Vinogradov Dmitry V., Doctor of Biol. in Science, Professor, Professor of the Department of Agronomy and Agrotechnologies, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostycheva, vdv-rz@rambler.ru

Sazonkin Kirill D., Postgraduate student, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, kirill.sazonkin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.02.2023; одобрена после рецензирования 20.02.2023; принята к публикации 10.03.2023.

The article was submitted 07.02.2023; approved after reviewing 20.02.2023; accepted for publication 10.03.2023.

