

Научная статья
УДК 620.162.4
doi: 10.24143/1812-9498-2021-2-56-63

Проектирование рамы автономного летательного аппарата с применением композиционных материалов

Александр Николаевич Рукавицын^{1✉}, Леон Андреас Сантьяго Мартинез²

^{1,2} Юго-Западный государственный университет,
Курск, Россия, alruk75@mail.ru ✉

Аннотация. Рассматриваются подходы к созданию нового типа беспилотных летательных аппаратов – квадрокоптеров. Отмечается, что эффективность квадрокоптера напрямую зависит от конструкции его рамы и используемых конструкционных материалов. Описаны подходы к проектированию каркаса летательного аппарата с использованием средств автоматизированного проектирования – пакета SolidWorks. Карты напряжений, полученные при исследовании прочности каркасной балки из углеродного волокна, позволяют утверждать, что имеется большой запас прочности конструкции. Проведенный расчет прочности предопределил необходимость учета влияния дополнительных факторов (воздушного потока, создаваемого тяговыми винтами). Существующие ограничения на максимальные размеры от используемых вращающихся винтов предопределили разработку рамы квадрокоптера с учетом максимального количества возможных аэродинамических эффектов, определяющих стабильность летных характеристик, путем минимизации помех от турбулентности воздуха и возможных природных явлений. Разработанная конструкция рамы квадрокоптера имеет специальные аэродинамические поверхности, обеспечивающие стабильную траекторию полета в изменчивой воздушной среде. Создаваемый крутящий момент определяется исходя из характеристик используемых тягово-винтовых двигателей. Оценено влияние изоповерхностного (трехмерного, визуализированного средствами компьютерной графики) воздушного потока на конструкцию квадрокоптера.

Ключевые слова: квадрокоптер, рама, конструкционные материалы, прочность, углепластик, тяговый винт, воздушный поток

Для цитирования: Рукавицын А. Н., Мартинез Л. А. С. Проектирование рамы автономного летательного аппарата с применением композиционных материалов // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2021. № 2 (72). С. 56–63. doi: 10.24143/1812-9498-2021-2-56-63.

Original article

Designing unmanned aircraft frame using composite materials

Alexander N. Rukavitsyn^{1✉}, Leon A. S. Martinez²

^{1,2} Southwest State University,
Kursk, Russia, alruk75@mail.ru ✉

Abstract. The paper considers approaches to creating a new type of unmanned aircrafts - quadcopters. It is stated that the efficiency of a quadcopter directly depends on its frame design and the structural materials used. The approaches to designing the aircraft frame using computer-aided design tools (SolidWorks package) are described. The stress maps obtained during the strength study for the frame beam made of carbon fiber allow asserting a large margin of structural strength. The strength calculation carried out predetermined the need to take into account the influence of additional factors (the air flow created by the traction screws). The existing restrictions on the maximum size of the rotating propellers predetermined the design of the quadcopter frame taking into account the maximum number of possible aerodynamic effects that determine the stability of flight characteristics by minimizing interference from air turbulence, as well as from possible natural phenomena. The designed quadcopter frame has special aerodynamic surfaces that allow for

a stable flight path in a volatile air environment. The generated torque is determined by the characteristics of the traction screw motors. The influence of the isosurface air flow on the design of the quadcopter was evaluated.

Keywords: quadcopter, frame, structural materials, strength, carbon fiber, traction screw, airflow

For citation: Rukavitsyn A. N., Martinez L. A. S. Designing unmanned aircraft frame using composite materials. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2021;2 (72):56-63. (In Russ.) doi: 10.24143/1812-9498-2021-2-56-63.

Введение

В последние годы в мире стремительно развивается новая индустрия мобильных автономных летательных аппаратов – квадрокоптеров, задачи которых заключаются в управлении и мониторинге. Благодаря надежности, простоте конструкции, стабильности, компактности и маневренности квадрокоптеры сегодня уже заменяют спутники, и ожидается дальнейшее развитие применения данных аппаратов [1]. Повышение эффективности использования квадрокоптера достигается за счет обеспечения энергоэффективности двигательной установки, а также оптимизации конструкции в целом, и прежде всего рамы, направленной не только на снижение ее веса, но и на рациональное размещение всех узлов беспилотного летательного аппарата. Важно отметить, что на конструкцию рамы квадрокоптера накладывается ряд конструктивных ограничений по прочности, жесткости и весу. Создаваемая конструкция должна иметь относительно небольшую массу, обеспечивающую достаточную грузоподъемность и выполнение задач даже в экстремальных погодных условиях. При этом каркас должен быть достаточного размера для установки необходимого оборудования и иметь невысокую стоимость.

Целью настоящей работы является разработка новых подходов и методов проектирования конструкции несущего каркаса (рамы) квадрокоптера, выполняющего функции автономного беспилотного летательного аппарата для мониторинговых операций. Являясь базовой конструкцией квадрокоптера, рама несет на себе все его компоненты, включая двигатели, аккумулятор, цепи управления, навесное оборудование и т. д. По этой причине его конструкция становится важным параметром, влияющим на эффективность летательного аппарата в целом [1].

Проведем исследование многомодульной конструкции каркаса квадрокоптера на основе пакета приложений SolidWorks с учетом требуемой прочности и грузоподъемности, а также минимизации собственного веса. Достижение поставленной цели требует всестороннего анализа существующих конструктивных решений различных схем квадрокоптеров для определения требуемых размеров и геометрии, используемых конструкционных материалов при обеспечении условий сборки и возможности расширения используемого бортового оборудования. На основе разработанной конструктивной схемы каркаса проведен расчет на прочность, позволяющий выбрать оптимальные материалы с точки зрения соотношения прочности и веса и оценить наличие, расположение и критичность слабых мест конструкции. Расчет на прочность позволит оценить не только пригодность созданной конструкции в практическом применении, но и ее технологичность в условиях современного автоматизированного производства.

Материалы и методы исследования

Проектирование квадрокоптера и его основных конструкционных элементов начинается с выбора концепции создаваемой модели, которая закладывается при разработке технического задания на проектирование соответствующим выбором функциональных и летно-технических характеристик. При этом выбор подходов к проектированию должен опираться на основы аэродинамики, технологии конструкции и конструкционных материалов, используемых в авиационной промышленности.

Обзор и анализ существующих в обозначенной области исследования информационных источников дают основание утверждать, что в качестве основных конструкционных материалов для изготовления рамных конструкций летательных аппаратов применяются композиты (стекло- или углепластики), ABS- и PLA-пластики, металлопрокат (в основном алюминиевый профиль) и древесно-стружечная плита [2]. В работе [3] представлены характеристики указанных выше материалов, а также результаты их применения в уже существующих конструкциях. Следует отметить, что металлопрокат имеет невысокую стоимость и обладает достаточной прочно-

стью, что делает его наиболее часто используемым материалом. Второй широко используемый для изготовления рам материал – композитные пластики, которые обладают повышенной прочностью при малом значении массы, что позволяет использовать их для изготовления цельнолитых конструкций, обладающих большой прочностью и обтекаемостью. Прочность углепластика превосходит прочность стали и алюминия, что дает возможность снизить вес при тех же пропорциях поверхности и объема. Углепластики устойчивы к коррозии, пожару, химической инерции и электрической проводимости. Кроме того, в условиях колебаний температуры углеродное волокно сохраняет форму и поэтому является наиболее предпочтительным материалом.

Исходя из проведенного анализа, выбор был сделан в пользу среднегабаритных квадрокоптеров с межосевым расстоянием 50–100 см по причине их достаточной маневренности, грузоподъемности и габаритов центральной платформы [4]. При проектировании рамы квадрокоптера, которая является основополагающим фактором при создании беспилотного летательного аппарата, была принята X-образная конфигурация, характеризующаяся простотой конструкции, симметричностью, удобством монтажа дополнительного оборудования. Основные составляющие рамы конвертоплана: лучи рамы, на концах которых крепятся электродвигатели; сопрягающая лучи центральная платформа, на которой располагаются электронные компоненты и дополнительные функциональные модули. При определении длины лучей рамы конвертоплана были учтены, во-первых, вибрация, которая зависит как от геометрических размеров самих лучей, так и от характеристик материала изготовления; во-вторых, размер вращающихся винтов, которые создают подъемную силу и при этом не должны соприкасаться между собой и с корпусом.

Определение размеров рамы конвертоплана основано на методических рекомендациях по конструированию малогабаритных беспилотных летательных аппаратов данного типа, а также на опытно-экспериментальной работе [5]. Разработка велась в программном обеспечении системы автоматизированного проектирования SolidWorks. При разработке конструкции рамы учитывались все геометрические характеристики форм и размеров размещаемой на борту аппаратуры, разрабатывалась геометрия основных посадочных мест для электродвигателей. При этом ставился акцент на обеспечении малого веса рамы с одновременным сохранением необходимой жесткости и прочности. Кроме того, рама конвертоплана должна быть приспособлена к устранению возможных вибраций, возникающих во время полета, не деформироваться и противостоять отрицательным силам, появляющимся в результате работы винтов электродвигателей [6]. Следует учитывать, что увеличение веса рамы повышает устойчивость конвертоплана с одновременным увеличением энергопотребления. Расчетная схема проектируемой рамной конструкции и действующих на нее в процессе эксплуатации силовых факторов представлена на рис. 1, б. На схеме указаны подъемная сила $F_{\text{тяги}}$, сила тяжести от электродвигателей винтов $m_{\text{дв}}g$, а также сила тяжести от полезной нагрузки $m_{\text{нагр}}g$, которая для упрощения сосредоточена строго в центре всей конструкции.

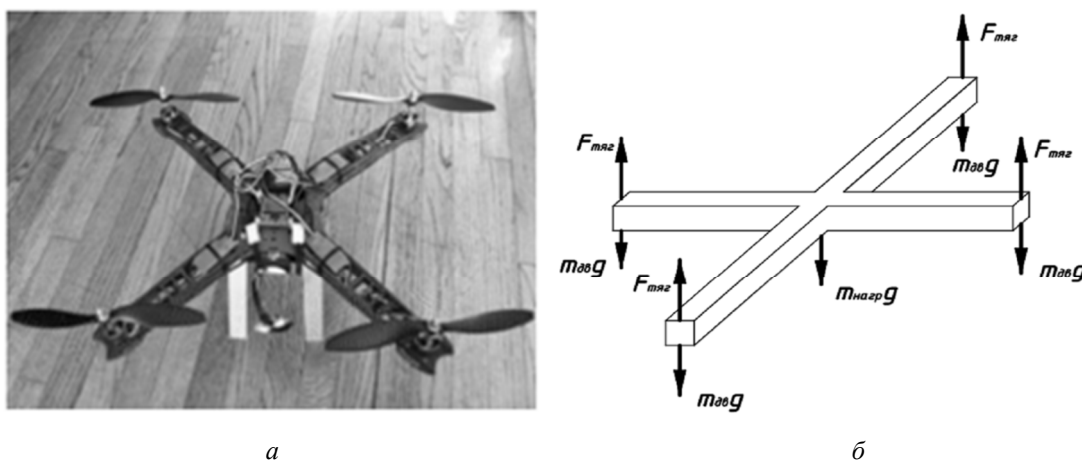


Рис. 1. Квадрокоптер (а) и расчетная схема его рамы (б)
 Fig. 1. Quadcopter (a) and a design diagram of its frame (b)

Дополнительно считалось, что рама и приложенные к ней нагрузки идеально симметричны, что позволило в дальнейшем рассматривать отдельно только один луч с приложенными к нему усилиями и центральную платформу. В соответствии со стандартными допущениями сопротивления материалов предполагалось, что нагружающие силовые факторы сохраняют свое направление и после возникновения деформаций (идеализация сил), и применялись гипотезы о сплошности и однородности материала.

Основная часть

Одним из ключевых факторов работоспособности является обеспечение необходимой прочности, т. е. способности выдерживать нагрузки без разрушения. В данном случае было важно обеспечить прочность конструкции не только в стандартных условиях эксплуатации, но и в условиях непредвиденных ситуаций, наиболее неблагоприятная из которых – перегрузка в результате нагружения чрезмерно большим дополнительным весом и, как следствие, возможная поломка и выход рамы из строя. Для моделирования подобной ситуации было предложено приложить в центре конструкции бесконечную массу. В этом случае рама не может подняться в воздух и работает на изгиб, по причине чего можно заменить бесконечную массу в центре на заделку. Практически это олицетворяет тот факт, что лучу рамы не дают сдвинуться в горизонтальной плоскости остальные лучи (поскольку на них действуют такие же нагрузки, а конструкция симметрична). В данной ситуации передаваемые на луч нагрузки будут максимально возможными, т. к. они ограничены тягой на конце луча, в любой реальной ситуации нагрузки будут гораздо меньшими. Значит, при обеспечении прочности рамы в моделируемой ситуации автоматически обеспечивается и прочность в любом практическом применении.

Статический анализ лучей рамы проводился в пакете SolidWorks/Simulation для определения текущих значений напряжения и деформации материала. При этом жестко фиксировался один конец луча с одновременным заданием внешней сосредоточенной силы на другом. Результаты моделирования лучей рамы приведены на рис. 2, а.

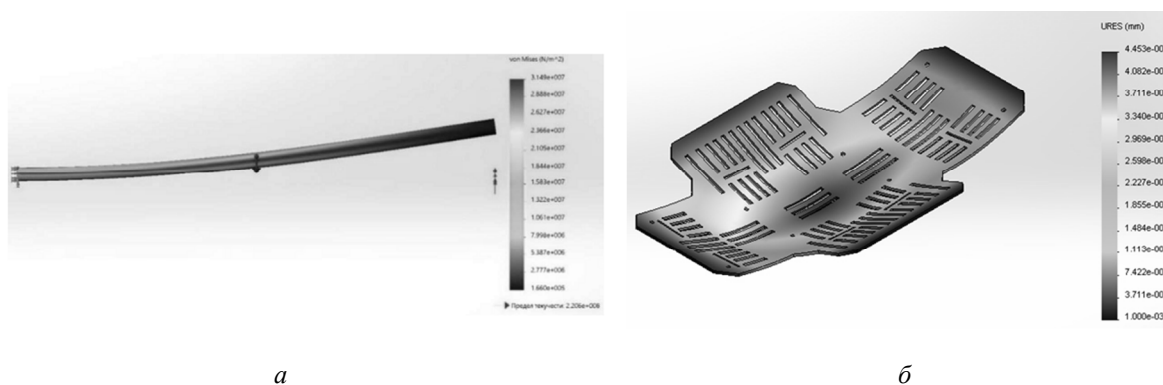


Рис. 2. Анализ на прочность рамы квадрокоптера: а – лучей; б – центральной платформы

Fig. 2. Strength analysis of the quadcopter frame: а - beams; б - central platform

При использовании углепластика в качестве конструкционного материала полученные при исследовании на прочность карты напряжений для луча рамы позволяют утверждать о наличии большого запаса прочности конструкции, поскольку величина напряжения на самом напряженном участке ($\sigma_{\max} = 51,5$ МПа) значительно меньше предела текучести ($\sigma_T = 220,6$ МПа). Аналогично проводилось исследование центральной платформы, которая также изготавливается из углепластика и используется как для сопряжения лучей, несущих подъемные двигатели, так и для размещения полезного груза.

Результаты проведенных исследований представлены в таблице.

Помимо рассмотрения прочностных параметров получаемой конструкции, также нужно учитывать массу получающейся конструкции и максимальные деформации в ней при использовании.

Прочностные характеристики углепластиковых элементов рамы квадрокоптера
Strength characteristics of carbon fiber elements of the quadcopter frame

Элемент	Предел текучести, МПа	Напряжения растяжения, МПа	Напряжения сжатия, МПа	Деформации, м
Луч	220,6	Max: 31,49 Min: 0,16	Max: 1,42 Min: 0,001	Max: $1,41 \cdot 10^{-4}$ Min: $8,98 \cdot 10^{-7}$
Платформа	62,3	Max: 15,56 Min: 0,23	Max: 0,64 Min: 0,005	Max: $1,23 \cdot 10^{-5}$ Min: $7,32 \cdot 10^{-7}$

Квадрокоптер со слишком тяжелой рамой не сможет взлететь, а чрезмерные деформации в лучах способны ухудшить его аэродинамические характеристики. На последние могут оказать влияние разнонаправленные потоки ветра, генерируемые тяговыми винтами электродвигателей. Следовательно, необходимо учесть влияния аэродинамических эффектов отрицательных сил на возможную деформацию рамы. На размеры рамы квадрокоптера оказывает влияние расстояние между тяговыми винтами электродвигателей. Размеры самого винта и его угловая скорость будут определять величину воздушного потока и создаваемой тяги. Изменения воздушного потока (рис. 3) вызывают неожиданные аэродинамические силы из-за изменений условий тяги и немодельной динамики взмахов лопастей [7].

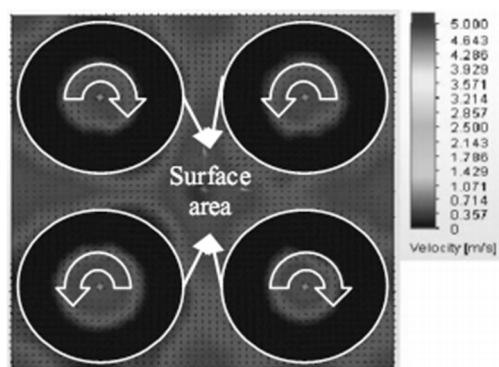


Рис. 3. Воздушный поток вокруг тяговых винтов
Fig. 3. Air flow around the traction screws

Существуют ограничения на максимальный размер используемых вращающихся винтов, исходя из максимального крутящего момента и величины воздушного потока, создаваемого каждым из них. Для достижения устойчивости полета квадрокоптера по отношению к пространству следует разрабатывать раму квадрокоптера, учитывая максимальное число возможных аэродинамических эффектов, определяющих стабильность летных характеристик. Данная процедура может быть выполнена путем минимизации помех от турбулентности воздуха, а также от возможных природных явлений. Конструкция рамы квадрокоптера должна иметь специальные аэродинамические поверхности, которые позволяют обеспечивать устойчивую траекторию полета в изменчивой воздушной среде. Генерируемый крутящий момент может быть определен на основе характеристик используемых электродвигателей тяговых винтов [8].

Для оценки влияния изоповерхностного воздушного потока, создаваемого тяговыми винтами, проводилось специальное компьютерное моделирование для двух значений угловой скорости винтов (рис. 4). Моделирование проводилось с использованием приложения имитации воздушного потока SolidWorks. При находящемся воздушном потоке вокруг вращающегося винта находится воздушная масса, скорость которой параллельна горизонтальной оси, и поэтому она не имеет составляющей по вертикальной оси ординат.

Скорость воздушного потока между двумя вращающимися винтами на рис. 4 отмечена окружностью. При угловой скорости $\omega = 12\,000 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 4, а) между вращающимися винтами создается до 50 % от максимальной скорости воздушного потока. Такое большое количество воздушного потока может быть вызвано как винтом большого размера, так и большим значением угловой скорости его вращения. Полученные численные значения свидетельствуют о суще-

ственном влиянии наличия вихревых скоростей в поле воздушного потока на эффективность векторизации сил тяги каждого винта, что приводит к ее нестабильности, поскольку на скорость воздушного потока оказывает влияние поток воздуха, создаваемый соседним винтом.

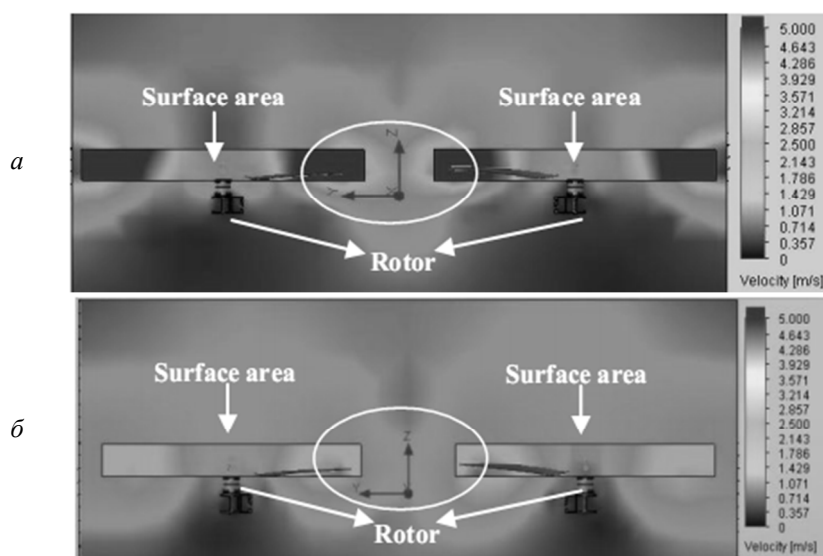


Рис. 4. Изоповерхностный воздушный поток между тяговыми винтами:
 $a - \omega = 12\,000 \text{ мин}^{-1}$; $b - \omega = 7\,700 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 4. Isosurface air flow between the traction screws: $a - \omega = 12,000 \text{ min}^{-1}$; $b - \omega = 7,700 \text{ min}^{-1}$

Сравнение данных результатов с результатами моделирования при $\omega = 7\,700 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 4, б) подтверждает, что создаваемая скорость воздушного потока менее 20 % от ее максимального значения. Таким образом, можно утверждать, что скорости воздушных потоков, создаваемые соседними тяговыми винтами, не оказывают влияния друг на друга.

Выводы

1. Беспилотные летательные аппараты постепенно входят в жизнь современного человека, исполняя целый ряд технологических операций, ранее выполнение которых было либо совсем невозможно, либо требовало значительных дополнительных затрат. Использование квадрокоптеров для мониторинга не только повышает эффективность данных операций, но иногда становится единственно возможным способом решить задачи контроля и управления без непосредственного участия человека в зоне наблюдения в неблагоприятных условиях среды. Повышение эффективности самих квадрокоптеров напрямую зависит от использования современных высокотехнологичных материалов и внедрения новейших методов проектирования на основе современных компьютерных технологий.

2. Применение современных средств автоматизированного проектирования SolidWorks позволило осуществить разработку эффективной конструкции рамы квадрокоптера, способной выдержать любые эксплуатационные нагрузки и нести при этом дорогостоящее оборудование. Исследования на прочность позволили провести выбор конструкционных материалов, обеспечивая высокую технологичность и низкую себестоимость конструкции. Специфика работы квадрокоптера предопределяет выполнение дополнительных исследований влияния аэродинамических процессов на конструкцию рамы. При этом требуется учет не только расстояния между вращающимися тяговыми винтами, но и их угловой скорости. Последняя предопределяет интенсивность воздушного потока, создаваемого тяговыми винтами, работающими одновременно, и способного оказывать дополнительное динамическое воздействие на раму квадрокоптера, вызывая дополнительные нагрузки и вибрации всего летательного аппарата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ермаченков Д. И., Фазли Т. Г. К., Петренко Е. О. Разработка конструкции рамы квадрокоптера для мониторинга объектов // *Науковедение*. 2016. Т. 8. № 6. С. 1–18.
2. Абрамзон С. С., Рукавицын А. Н. Разработка боевого коптера с модулем обнаружения и распознавания объекта и системой стабилизации носимого вооружения // Школа юных инноваторов: сб. науч. ст. Итог. конф. проекта (Курск, 10–17 декабря 2018 г.). Курск: Университетская книга, 2018. С. 20–23.
3. Стуканева С. П., Mosquera M. L. M., Савельева Е. В. Стенд для определения динамических параметров конвертоплана на основе трикоптерной схемы // Молодежь и системная модернизация страны: сб. науч. ст. III Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых (Курск, 22–23 мая 2018 г.). Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2018. С. 55–60.
4. Пат. РФ № 2018147097. Двигатель воздушный с изменяемым вектором тяги / Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Мартинез Л. А. С., Емельянова О. В.; 19.03.2019.
5. Яцун С. Ф., Емельянова О. В., Савин А. И. Моделирование полета конвертоплана в различных режимах движения // Изв. Юго-Запад. гос. ун-та. 2015. № 1. С. 55.
6. Емельянова О. В., Поляков Р. Ю., Ефимов С. В. Мобильный летательный комплекс для раннего обнаружения очагов возгорания // *Фундаментал. и приклад. проблемы техники и технологии*. 2018. № 3 (329). С. 136–141.
7. Jatsun S., Emelyanova O., Leon A. S. M. Control flighth of a uav type tricopter with fuzzy logic controller // 11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines”, Dynamics. 2017. P. 1–5.
8. Kuantama E., Kuantama E., Craciun D., Tarca R. Design, Analysis and quadcopter body frame model and analysis. *Annals of the University of Oradea*, 2016. P. 71–74.

REFERENCES

1. Ermachenkov D. I., Fazli T. G. K., Petrenko E. O. Razrabotka konstruktсии ramy kvadrokoptera dlia monitoringa ob"ektov [Designing quadcopter frame for monitoring objects]. *Naukovedenie*, 2016, vol. 8, no. 6, pp. 1-18.
2. Abramzon S. S., Rukavitsyn A. N. Razrabotka boevogo koptera s modulem obnaruzheniia i raspoznavaniia ob"ekta i sistemoi stabilizatsii nosimogo vooruzheniia [Designing combat copter with object detection and recognition module and wearable weapon stabilization system]. *Shkola iunykh innovatorov: sbornik nauchnykh statei Itogovoi konferentsii proekta (Kursk, 10–17 dekabria 2018 g.)*. Kursk, Universitetskaia kniga Publ., 2018. Pp. 20-23.
3. Stukaneva S. P., Mosquera M. L. M., Savel'eva E. V. Stend dlia opredeleniia dinamicheskikh parametrov konvertoplana na osnove trikopternoii skhemy [Rack for determining dynamic parameters of tiltrotor based on tricopter circuit]. *Molodezh' i sistemnaia modernizatsiia strany: sbornik nauchnykh statei III Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov i molodykh uchennykh (Kursk, 22–23 maia 2018 g.)*. Kursk, Izd-vo Iu-ZGU, 2018. Pp. 55-60.
4. Iatsun S. F., Mishchenko V. Ia., Martinez L. A. S., Emel'ianova O. V. *Dvizhitel' vozdushnyi s izmeniaemym vektorom tiagi* [Air mover with variable thrust vector]. Patent RF, no. 2018147097, 19.03.2019.
5. Iatsun S. F., Emel'ianova O. V., Savin A. I. Modelirovanie poleta konvertoplana v razlichnykh rezhimakh dvizheniia [Simulation ofa tiltrotor flight in various modes of motion]. *Izvestiia Iugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 1, p. 55.
6. Emel'ianova O. V., Poliakov R. Iu., Efimov S. V. Mobil'nyi letatel'nyi kompleks dlia rannego obnaruzheniia ochagov vozgoraniia [Mobile flying complex for early detection of fires]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2018, no. 3 (329), pp. 136-141.
7. Jatsun S., Emelyanova O., Leon A. S. M. Control flighth of a uav type tricopter with fuzzy logic controller. *11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines”, Dynamics*. 2017. Pp. 1-5.
8. Kuantama E., Kuantama E., Craciun D., Tarca R. Design, Analysis and quadcopter body frame model and analysis. *Annals of the University of Oradea*, 2016. Pp. 71-74.

Статья поступила в редакцию 02.11.2021; одобрена после рецензирования 09.11.2021; принята к публикации 19.11.2021.
The article was submitted 02.11.2021; approved after reviewing 09.11.2021; accepted for publication 19.11.2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Николаевич Рукавицын – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники; Юго-Западный государственный университет; 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94; alruk75@mail.ru

Леон Андреас Сантьяго Мартинез – аспирант механики, мехатроники и робототехники; Юго-Западный государственный университет; 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94; newteormeh@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander N. Rukavitsyn – Candidate of Technical Science, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics; Southwest State University; 305040, Kursk, 50th Anniversary of October St., 94; alruk75@mail.ru

Leon Andreas Santiago Martinez – Postgraduate Student of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics; Southwest State University; 305040, Kursk, 50th Anniversary of October St., 94; newteormeh@inbox.ru

