

А. В. Калышина, Д. В. Столяренко

КОНСТРУКТИВНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Ключевые слова: математическая модель, беспилотный летательный аппарат, регулирование, квадрокоптер.

Данное исследование посвящено беспилотным летательным аппаратам, производство которых является одним из самых высокотехнологичных в авиационной отрасли. Перспективным направлением в этой отрасли является производство и использование компактных квадрокоптеров. При их эксплуатации возникает ряд проблем, например, малая эффективность полета, недостаточная жесткость конструкции и др. Одним из перспективных решений этих трудностей является использование диагонально-разновысотной компоновки, которая способна улучшить эффективность полёта, за счет применения увеличенной винто-моторной группы. В данной работе проведено исследование возможности применения диагонально-разновысотной компоновки квадрокоптера. Для решения этой задачи был разработан прототип диагонально-разновысотной компоновки, изготовлено несколько образцов из различных материалов, обеспечена фильтрация и настройка коэффициентов ПИД-регулятора. Детали предлагаемой диагонально-разновысотной компоновки квадрокоптера разработаны методом твердотельного моделирования в системе автоматизированного проектирования Компас-3D. В работе применен метод построения деталей с использованием кессонных сечений. Это позволило сделать главные сечения деталей конструкции наиболее жесткими при использовании минимального количества материала, также применение кессонов снизило аэродинамическое сопротивление в полёте. Таким образом, разработанные детали конструкции обладают достаточным запасом жесткости при минимальном весе конструкции, при этом защита дополнительно усиливает жесткость базовой детали, что недостижимо при использовании X-компоновки. Все разработанные прототипы прошли летные испытания. Во время испытательных полётов различных прототипов, происходила фиксация полученных данных гироскопа для настройки и фильтрации параметров полетного контроллера квадрокоптера. Анализ полученных данных проводился в программе Betaflight Blackbox Explorer. Для управления четырьмя двигателями квадрокоптера использован ПИД-регулятор, на вход которого поступают фильтрованные сигналы с гироскопа. Фильтрация сигнала необходима для того, чтобы сильные вибрационные помехи не нарушили работу ПИД-регулятора. Если это произойдет, двигатели квадрокоптера будут работать в такт вибрационных помех, что вызывает их перегрев. Для стабилизации полёта квадрокоптера использовано три ПИД-регулятора на осях тангажа, крена и рысканья. В данной работе подбор коэффициентов проводился экспериментальным путем с использованием программ-анализаторов необработанных сигналов гироскопа полетного контроллера квадрокоптера.

А. В. Kalyashina, D. V. Stolyarenko

DESIGN AND SOFTWARE FEATURES OF UNMANNED AERIAL VEHICLE MOTION CONTROL

Keywords: mathematical model, unmanned aerial vehicle, control, quadcopter.

This study focuses on unmanned aerial vehicles, the production of which is among the most high-tech in the aviation industry. A promising area in this field is the production and use of compact quadcopters. Their operation poses a number of challenges, including low flight efficiency and insufficient structural rigidity. One promising solution to these challenges is the use of a diagonal, multi-height configuration, which can improve flight efficiency by employing a larger propeller-motor combination. This paper explores the feasibility of using a diagonal, multi-height quadcopter configuration. To address this challenge, a prototype of the diagonal, multi-height configuration was developed, several samples were fabricated from various materials, and filtering and PID controller coefficient tuning were implemented. The components of the proposed diagonal, multi-height quadcopter configuration were developed using solid-state modeling in the Compass-3D computer-aided design system. The work utilized a method for constructing parts using caisson sections. This allowed for the main sections of the structural components to be as rigid as possible while using a minimum amount of material. The use of caissons also reduced aerodynamic drag in flight. Thus, the developed structural components possess sufficient rigidity while minimizing structural weight, while the protection additionally enhances the rigidity of the base component, which is unachievable with an X-configuration. All developed prototypes underwent flight testing. During test flights of various prototypes, gyroscope data was recorded to tune and filter the parameters of the quadcopter flight controller. The obtained data was analyzed using Betaflight Blackbox Explorer. A PID controller, fed with filtered signals from the gyroscope, is used to control the quadcopter's four motors. Signal filtering is necessary to prevent strong vibration interference from disrupting the PID controller. If this occurs, the quadcopter motors will operate in sync with the vibration interference, causing them to overheat. To stabilize the quadcopter's flight, three PID controllers were used on the pitch, roll, and yaw axes. In this study, the coefficients were selected experimentally using software that analyzed the raw signals from the quadcopter's flight controller gyroscope.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) это вид роботизированной авиационной техники. Входят БПЛА в состав авиационных комплексов Российской армии и силовых ведомств, также применя-

ются в гражданском секторе коммерческими предприятиями и физическими лицами. Изготовление БПЛА относится к одним из самых высокотехнологичных производств авиационной отрасли и составляет основу технологической самостоятельности национального авиастроения [1].

Инженерами и дизайнерами ведется активная работа над созданием новых компоновок БПЛА для улучшения эффективности, маневренности и безопасности.

Одним из самых перспективных направлений в этой отрасли является производство и использование компактных квадрокоптеров. При их эксплуатации возникает ряд проблем, например, малая эффективность полета, недостаточная жесткость конструкции и др [2]. Одним из перспективных решений этих трудностей является использование диагонально-разновысотной компоновки, которая способна улучшить эффективность полёта, за счет использования увеличенной винто-моторной группы. [2,3].

Квадрокоптер представляет собой БПЛА, имеющий четыре двигателя с воздушными винтами, создающими тягу. Оси винтов и углы лопастей зафиксированы и регулируются лишь скорости вращения, что существенно упрощает конструкцию [4].

Цель данной работы - исследовать возможность применения диагонально-разновысотной компоновки БПЛА, разработанной методом прочностного анализа деталей конструкции и изготовленной при помощи технологии FFF 3D-печати с химическим упрочнением на этапе постобработки, а также обеспечение устойчивости этой конструкции.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- разработка прототипа диагонально-разновысотной компоновки квадрокоптера;
- изготовление образцов из различных материалов, упрочнение деталей;
- обеспечение фильтрации и настройка коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора квадрокоптера (ПИД-регулятор)
- исследование качества полученной диагонально-разновысотной компоновки на примере квадрокоптера Flex

Как известно, автоматическое регулирование параметров процесса осуществляется математическими законами [1,5]:

- пропорциональный (П-регулятор);
- интегральный (И-регулятор)
- дифференциальный (Д-регулятор)

На практике используются сочетания законов, например: пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор), пропорционально-дифференциальный (ПД-регулятор), пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-регулятор) [1].

Все эти законы регулирования используются в приводных механизмах БПЛА. Необходимо помнить, что пропорциональный и дифференциальный законы являются статическими, то есть не обеспечивают 100% точность из-за наличия статической ошибки. Для устранения статической ошибки и повышения точности регулирования в статический закон добавляют интегральную составляющую, то есть обеспечивают астатизм системы, но при этом несколько снижаются запасы устойчивости по фазе и амплитуде и в переходном процессе возникают колебания [2,6].

Типовая схема компоновки квадрокоптера обычно представляет собой крестообразную фигуру

с широко расставленными пропеллерами [7]. В данном исследовании предложено диагонально сместить пропеллеры на максимально близкое расстояние. Таким образом, две диагональные пары будут располагаться на разной высоте. Данная компоновка при наличии защиты лопастей уменьшает габариты конструкции на 27%.

Благодаря уменьшенным габаритам компоновки, уменьшается вес собранной конструкции, что при аналогичной винто-моторной группе позволяет обеспечить большую эффективность полета [3,8].

Детали предлагаемой диагонально-разновысотной компоновки квадрокоптера разработаны методом твердотельного моделирования в системе автоматизированного проектирования Компас-3Д v20. Конструкция состоит из двух деталей – «база» и «защита». На первой детали размещаются все электрические компоненты, такие как полётный контроллер, регуляторы оборотов, электродвигатели, приемник радиоуправления и видеопередатчик. С помощью болтового соединения, на «базу» устанавливаются крепеж для аккумулятора и «защита», которая предназначена для усиления жесткости конструкции и защиты окружения от лопастей, а также является частью шасси.

Было разработано и исследовано несколько вариантов конструкций. В первых вариантах использовался конический профиль с ребрами жесткости, такое решение обеспечило достаточную жесткость на 5-ти дюймовых прототипах, но при переходе к 3,5-дюймовой конструкции оказалось, что конический профиль с ребрами жесткости не подходит. В последующих поколениях был применен метод построения деталей с использованием кессонных сечений. Это позволило сделать главные сечения деталей конструкции наиболее жесткими при использовании минимального количества материала, также применение кессонов снизило аэродинамическое сопротивление в полёте. Таким образом, разработанные детали конструкции обладают достаточным запасом жесткости при минимальном весе конструкции, при этом защита дополнительно усиливает жесткость базовой детали, что недостижимо при использовании X-компоновки [9]. На рис. 1 представлена окончательная конструкция квадрокоптера Flex.

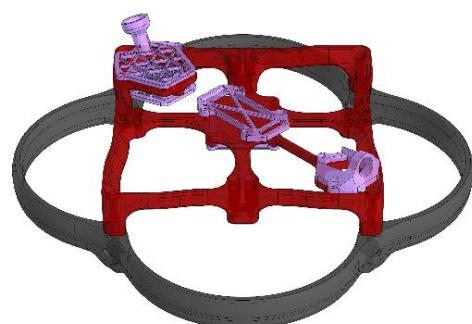


Рис. 1 - Конструкция Flex v6 02.2024

Fig. 1 - Flex v6 02.2024 design

Прототипы деталей изготовлены с использованием 3D-принтера Flying Bear Ghost 5. Это бюджетный принтер, использующий технологию наплавления нитей Fused Filament Fabrication, или сокращенно FFF. В промышленных FDM-установках нагревается весь объем рабочей области, в FFF-принтерах от нагрева избавились, чтобы уменьшить стоимость принтеров и печати.

Таким образом, в FFF-принтерах нет нагревательной камеры и это их главное отличие. Как следствие, материал попадает из горячего экструдера на разогретый стол, следуя через холодную среду.

Чередование горячего и холодного окружений вызывает в изделии остаточные напряжения [3,10]. Из-за этого результаты применения FDM и FFF могут значительно различаться, несмотря на один принцип работы. FDM применяется в промышленности, в то время как технология FFF ориентирована на любителей.

В первых прототипах использовались полимеры PETG, PLA, ASA. В последних прототипах был использован полимер ABS Carbon, превосходящий предыдущие материалы по прочностным показателям.

Все разработанные прототипы прошли летные испытания. Во время испытательных полётов различных прототипов, происходила фиксация гироданных для настройки фильтрации данных с гироскопа полетного контроллера квадрокоптера. В программе Betaflight Blackbox Explorer был проведен анализ полученных гироданных (рис. 2).

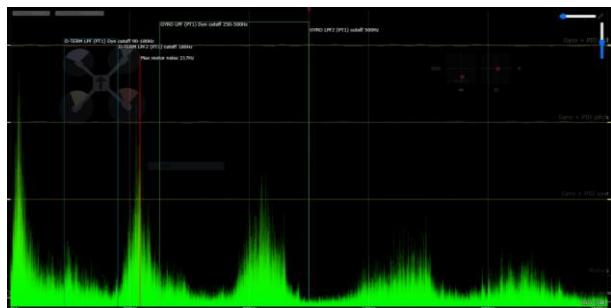


Рис. 2 - График частот сигналов гироскопа ДО настройки

Fig. 2 - Graph of gyroscope signal frequencies before tuning

Особенно выделяется скачок на 217Гц, вызванный вращением электродвигателей. Скачок возникает из-за особенностей материала деталей, жесткости крепления электродвигателей к раме, частоты вращения двигателей. Частота вызывает четыре гармоники, поэтому не остается сомнений, что это резонанс деталей конструкции квадрокоптера при вращении двигателей.

Для настройки параметров фильтрации, в конфигурационной среде Betaflight во вкладке Filterintg было задано нужное количество гармоник и минимальную частоту помех для фильтрации.

После повторных тестов, замечено значительное уменьшение шума в статическом положении квадрокоптера. График частот после полетов показал, что количество шумов, проходящих в цикл ПИД-регуляторов полетного контроллера снизилось (рис. 3).

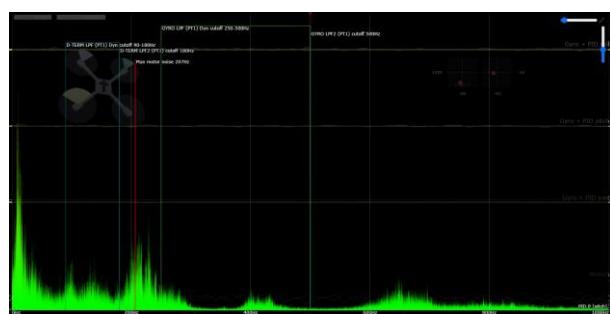


Рис. 3 - График частот сигналов гироскопа после настройки

Fig. 3 - Graph of gyroscope signal frequencies after tuning

Необходимо отметить, что квадрокоптер способен висеть на месте на стандартных настройках, но это не означает, что он абсолютно стабилен. При динамичных перемещениях возможны перерегулирования, приводящие к осциляциям и нестабильному полёту.

Для управления четырьмя двигателями квадрокоптера используется ПИД-регулятор, на вход которого поступают фильтрованный сигнал с гироскопа. Фильтрация сигнала необходима для того, чтобы сильные вибрационные помехи не нарушили работу ПИД-регулятора. [1]. Если это произойдет, двигатели квадрокоптера будут работать в такт вибрационных помех, что вызывает их перегрев. Для стабилизации полёта квадрокоптера используется три ПИД-регулятора на осях тангажа, крена и рысканья.

Во время полёта квадрокоптера, его электродвигатели способны вызывать сильные вибрационные помехи, частота которых растет вместе с оборотами. Это может быть вызвано биением винто-моторной группы или незакрепленными деталями квадрокоптера,ibriрующими в такт. Также, конструкция имеет собственную резонансную частоту, которая не изменяется во время полёта.

Настройка ПИД-регулятора сводится к подбору величин трех коэффициентов для каждой из осей квадрокоптера. В данной работе подбор коэффициентов проводился экспериментальным путем с использованием программ-анализаторов необработанных сигналов гироскопа полетного контроллера квадрокоптера. Задача состоит в том, чтобы ПИД-регулятор регулировал параметры квадрокоптера таким образом, чтобы линия на графике (траектория полета) проходила близко к идеальной. Однако, достичь идеальной линии не представляется возможным, из-за постоянно меняющихся факторов – погодные условия, разряжающаяся батарея во время полёта.

На стандартных настройках ПИД-регулятора поведение квадрокоптера отличалось нестабильностью. Отчетливо наблюдалось перерегулирование от ПИД-регулятора – квадрокоптер дрожжал в полёте. Двигатели грелись и невозможно было обеспечить заданный закон движения (рис. 4)

Из-за различия большей массы на оси крена наклона квадрокоптера было установлено соотношение ПИД-регулирования для осей pitch/roll = 1,2. Коэффициент пропорциональной составляющей (P)

был занижен для возможности подбора дифференциального коэффициента (D). Экспериментальным путём было найдено соотношение Р/D коэффициентов = 1,2. Уменьшение пропорционального коэффициента привело к увеличению задержки регулирования. Увеличение интегрального коэффициента (I) позволило вернуть задержку на прежний уровень.

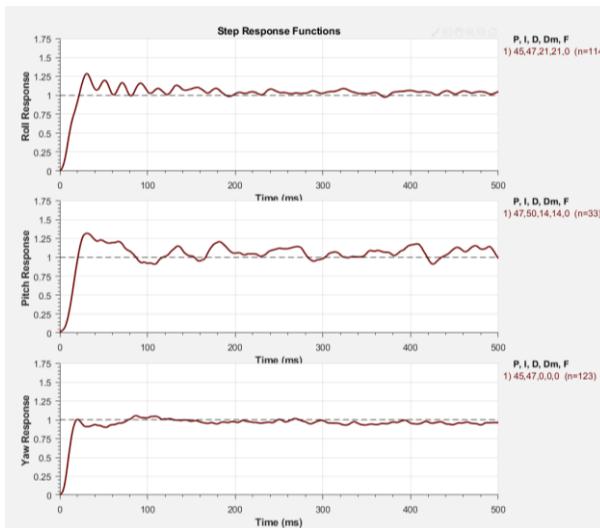


Рис. 4 - График ПИД-регулирования ДО настройки

Fig. 4 - PID control graph before tuning

В таблице 1 представлены коэффициенты ПИД регулятора и задержка регулирования после настройки. График частот сигналов гироскопа после настройки представлен на рисунке 5.

В результате настройки фильтрации сигналов гироскопа и подбора коэффициентов ПИД-регуляторов, квадрокоптер стал летать гораздо стабильнее,

Таблица 2 – Результаты сравнений компоновок

Table 2 – Layout comparison results

X-образная компоновка (классическая)	Диагонально-разновысотная компоновка
<p>Положительные стороны:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Большинство программного обеспечения изначально настроено для работы с данной компоновкой; - Большой рычаг сил при стабилизации; - Уменьшенная проекция улучшает аэродинамику, что позволяет развивать большую скорость; - Хорошее сочетание жесткости и веса; - Более тихий полёт благодаря лучшей аэродинамике винто-моторной группы; <p>Отрицательные стороны:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Относительно дорогая стоимость запчастей рамы; • Широкое распределение масс относительно центра тяжести, большая инерция; 	<p>Положительные стороны:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Большая тяговая вооружённость в аналогичных габаритах; - Полёт на одинаковом АКБ длился на 40% дольше (до 20 минут); - Встроенная защита пропеллеров является силовой частью; • Уменьшенные на 37% габариты понижают вероятность столкновений; • Защита пропеллеров является силовой частью рамы; • Центральное распределение массы увеличивает маневренность; <p>Отрицательные стороны:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Защита пропеллеров направляет звуковые волны и делает полёт дрона громче; • Большая поперечная площадь конструкции увеличивает парусность, не подходит для скоростных полётов;

Х-образная компоновка подходит для использования на просторной местности. Является наиболее аэродинамичной, но из-за сложности установки защиты пропеллеров небезопасна для полётов рядом с препятствиями и людьми.

двигатели не нагревались и значительно снизился шум от работы двигателей.

Было проведено 14 испытаний прототипов квадрокоптера с диагонально-разновысотной компоновкой. Результаты сравнений двух видов компоновок приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты подбора коэффициентов регулятора

Table 1 – Results of selection of regulator coefficients

P	I	D	Задержка (мс)
35	63	23	14
45	80	32	15,5
40	60	0	10

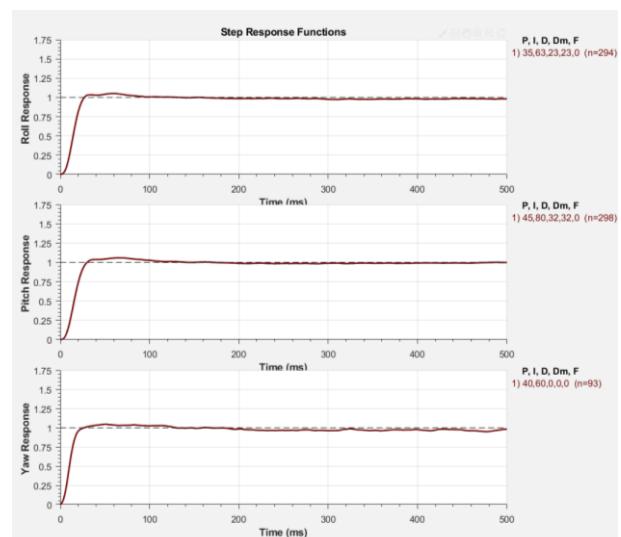


Рис. 5 - График ПИД-регулирования ПОСЛЕ настройки

Fig. 5 - PID control graph after tuning

Диагонально-разновысотная компоновка, благодаря сочетанию уменьшенных габаритов и интегрированной защиты лопастей является безопасной для длительных полётов в небольших пространствах, способна бесперебойно продолжать полёт после непосредственного контакта с препятствием или человеком.

Заключение

В данной научной работе исследована возможность создания конструкции квадрокоптера с диагонально-разновысотной компоновкой и обеспечение устойчивости его работы. Основной целью исследования была проверка возможности работы диагонально-разновысотной компоновки БПЛА, разработанной методом прочностного анализа деталей конструкции и изготовленной при помощи технологии FFF 3D-печати. Детали предлагаемой компоновки квадрокоптера разработаны методом твердотельного моделирования в системе Компас-3D v20.

Все разработанные прототипы прошли летные испытания. Во время испытательных полётов происходила фиксация гироданных для настройки фильтрации данных с гироскопа полетного контроллера квадрокоптера.

Для управления четырьмя двигателями квадрокоптера использован ПИД-регулятор, на вход которого подавался фильтрованный сигнал с гироскопа. Фильтрация сигнала необходима для того, чтобы сильные вибрационные помехи не нарушили работу ПИД-регулятора. Если это произойдет, двигатели квадрокоптера будут работать в такт вибрационных помех, что вызывает их перегрев. Для стабилизации полёта квадрокоптера применено три ПИД-регулятора на осях тангажа, крена и рысканья.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 году Академией наук РТ гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Литература

1. А.В. Каляшина, Ю.С. Смирнов *Вестник Технологического университета*, 28, 5, 99-104. – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_5_99 (2025).
2. В.А. Смирнов *Евразийский союз ученых*, 4-4 (73), 65-70 (2020) - DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2020.4.73.672.
3. М.С. Кубанова *Академическая публицистика*, 2-2, 21-24 (2023).
4. А.Ф. Михайлов, Н.С. Соколова, *Авиационные системы*, 9, 35-37 (2023).
5. В. И. Симашев, М. Г. Нуриев *Международный научно-исследовательский журнал*, 4(154), 1-12. (2025) - DOI 10.60797/IRJ.2025.154.89.
6. Д.В. Желтова, *Вестник науки*. 7(52) 2, 140-143.(2022)
7. В.С. Брусков, В.П. Петручик *Вестник Московского авиационного института*, 18, 2, 9-14 (2011).
8. А.В. Шевченко, Л.А. Муравицкая, *Труды МАИ*, 138, 34-39. (2024).
9. М. Г. Нуриев, Р. М. Гизатуллин, А. А. Мухаммадиев *Журнал радиоэлектроники*, 4, 10-15 (2019) - DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.8.
10. А. С. Катасев, Д. В. Катасева, А. А. Сибгатуллин, Г. Л. Дегтярев, *Вестник Технологического университета*, 27, 12, 130-135. – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_12_130 (2024).
11. З. М. Гизатуллин, Р. М. Гизатуллин, М. Г. Нуриев *Радиотехника и электроника*, 66, 6, 609-613 (2021).
12. Р.А. Мунасыпов, Т.З. Муслимов, *Мехатроника, автоматизация, управление*, 19, 2, 120-125 (2018) - DOI 10.17587/mau.19.120-125.
13. А. В. Башкиров, М. В. Хорошайлова, И. В. Свиридова *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 20, 3, 115-121 (2024) DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.3.017.
14. А.В. Каляшина, Ю.Н. Смирнов *Вестник Технологического университета*, 28, 5, 99-104 (2025) – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_5_99.
15. А. Н. Ващенко, М. Н. Григорьев, Ц. Чжан, *Аэрокосмическая техника и технологии*, 2, 3, 82-97. (2024) - DOI 10.52467/2949-401X-2024-2-3-82-97.

References

1. A.V. Kalyashina, Yu.N. Smirnov *Herald of Technological University*, 28, 5, 99-104. – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_5_99 (2025).
- 2 . V.A. Smirnov, *Eurasian Union of Scientists*, 4-4 (73), 65-70 (2020) - DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2020.4.73.672.
3. M.S. Kubanova, *Academic journalism*, 2-2, 21-24 (2023)
4. A.F. Mikhailov, N.S. Sokolova, *Aviation systems*, 9, 35-37 (2023)
5. V. I. Simashev, M. G. Nureyev, *International Research Journal*, 4(154), 1-12. (2025) - DOI 10.60797/IRJ.2025.154.89.
6. D.V. Zheltova, *Science Bulletin*. 7(52) 2, 140-143.(2022)
7. V.S. Bruskov, V.P. Petruchik *Herald of the Moscow Aviation Institute*, 18, 2, 9-14 (2011)
8. A.V. Shevchenko, L.A. Muravitskaya, *Proceedings of MAI*, 138, 34-39. (2024)
9. M. G. Nuriev, R. M. Gizatullin, A. A. Muhammadiev *Journal of Radio Electronics*, 4, 10-15 (2019) - DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.8.
10. A. S. Katasev, D. V. Kataseva, A. A. Sibgatullin, G. L. Degtyarev, *Herald of Technological University*, 27, 12, 130-135. – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_12_130 (2024).
11. Z. M. Gizatullin, R. M. Gizatullin, M. G. Nuriev, *Radio engineering and electronics*, 66, 6, 609-613 (2021).
12. R.A. Munasypov, T.Z. Muslimov, *Mechatronics, automation, control*, 19, 2, 120-125 (2018) - DOI 10.17587/mau.19.120-125.
13. A. V. Bashkirov, M. V. Khoroshailova, I. V. Sviridova *Herald of the Voronezh State Technical University*, 20, 3, 115-121 (2024) DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.3.017.
14. A.V. Kalyashina, Yu.N. Smirnov, *Herald of Technological University*, 28, 5, 99-104 (2025) – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_5_99.
15. A. N. Vashchenko, M. N. Grigoriev, C. Zhang, *Aerospace engineering and technology*, 2, 3, 82-97. (2024) - DOI 10.52467/2949-401X-2024-2-3-82-97.

© А. В. Каляшина – канд. техн. наук, доцент кафедры Лазерных и аддитивных технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (РУБНЕ им. А.Н. Туполева), Казань, Россия, anna_vik@mail.ru; Д. В Столяренко – магистр Передовой инженерной школы, КНИТУ им. А.Н. Туполева, denstol20020308@gmail.com.

© А. В. Каляшина – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Laser and Additive Technologies, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KNRTU named after A. N. Tupolev), Kazan, Russia, anna_vik@mail.ru; Д. В. Столяренко – Master-student of Advanced Engineering School, KNRTU named after A. N. Tupolev – denstol20020308@gmail.com.

Дата поступления рукописи в редакцию – 23.10.25.

Дата принятия рукописи в печать – 25.10.25.