

Р.Н. Набиев, А.А. Абдуллаев, Г.И. Гараев, В.А. Аббасов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КОНВЕРТОПЛАНОВОГО ТИПА

В целях повышения эффективности и безопасности полетов проанализированы результаты исследований определения центра нагрузки, центровки и тяжести летательного аппарата на стадии проектирования и изготовления. Также проанализированы характеристики существующих методов и средств, и на примере беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа разработана методология определения центра тяжести летательного аппарата с применением известного метода «весы-масса». При определении веса спроектированного и разработанного беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа и расчете координат центра тяжести был проведен анализ среднеквадратичного отклонения и вероятной ошибки. Рассмотрены характеристики и возможности практического применения мобильных электронных весов в качестве основного средства измерения нагрузки беспилотного летательного аппарата в стационарных условиях, а также непосредственного взвешивания, позволяющего определить центр тяжести. Описан метод, разработанный для определения центра тяжести летательного аппарата с повышенной точностью, и представлена модель построения предложенной системы. Проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных с целью определению массы и центра тяжести беспилотного летательного аппарата. Для этого в соответствии с методикой плоскость лабораторного стола приводили в горизонтальное положение с уровнем и проверяли погрешности измерения цифровых измерительных весов по результатам измерения эталонной нагрузки. Измерения повторяли, меняя положение весов по часовой стрелке. По результатам измерений, поскольку центр тяжести летательного аппарата принимался по обеим осям по-разному, а промежуточная точка выпадала за пределы центральной оси (вправо или влево, вперед-назад), были проведены повторные измерения путем смещения нагрузки в соответствующем направлении для обеспечения центрирования во время измерений. По окончательным результатам были построены диаграммы центра тяжести на основе расчетных значений координат точек пересечения диагоналей и определены случайные значения наклона. На основании построенных диаграмм с помощью программы был получен итоговый график со среднеквадратической ошибкой отклонения летательного аппарата от оси симметрии, равной $\sigma=0,047$ см.

Центр тяжести; вес; нагрузка; беспилотный летательный аппарат; конвертоплан; взвешивание.

R.N. Nabiyev, Q.I. Qarayev, A.A. Abdullayev, V.A. Abbasov

DETERMINATION OF THE CENTER OF GRAVITY OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE OF A TILTROTOR TYPE

The article analyzes research work in the direction of the correct location of the load center, centering and gravity of the aircraft at the design and manufacturing stage in order to improve the efficiency and safety of flights, as well as the characteristics of existing methods and means, and, using the example of a tiltrotor unmanned aerial vehicle, a methodology for using the known the "scale-graph" method, which is widely used in determining the center of gravity of an aircraft. When determining the mass of the tiltrotor-type unmanned aerial vehicle designed and developed by us and calculating the coordinates of the center of gravity, an analysis of the standard deviation and probable error was carried out. The characteristics and possibilities of practical application of mobile electronic scales as the main means of measuring the load of an unmanned aerial vehicle in stationary conditions, as well as direct weighing, which makes it possible to determine the center of gravity, are considered. A method developed for determining the center of gravity of an aircraft with increased accuracy is described, and a model for constructing the proposed system is presented. The results of theoretical and experimental studies carried out to determine

the mass and center of gravity of an unmanned aerial vehicle are analyzed. To do this, in accordance with the methodology, the plane of the laboratory table was brought to a horizontal position with a level gauge and the measurement errors of digital measuring scales were checked according to the results of measuring the reference load. The measurements were repeated by changing the position of the scales clockwise. According to the measurement results, since the center of gravity of the aircraft was taken differently on both axes, and the intermediate point fell outside the central axis (to the right or left, front to back), repeated measurements were taken by shifting the load in the appropriate direction to ensure centering during measurements. According to the final results, center of gravity diagrams were constructed based on the calculated values of the coordinates of the points of intersection of the diagonals and random slope values were determined. Based on the diagrams constructed using the program, the final graph was obtained with the root-mean-square error of the deviation of the aircraft from the axis of symmetry, equal to $\sigma=0.047$ sm.

Center of gravity; weight; loading, unmanned aerial vehicle; tiltrotor; weighing.

Введение. Вопрос точного определения массы и центра тяжести летательного аппарата (ЛА), а также разработки новых методов и технологий в этом направлении остается актуальным и по сей день. Известно, что координаты центра тяжести планеров можно определить заранее на основании справочников. Однако эти данные соответствуют ненагруженному состоянию и не отвечают последнему оснащению планера.

Центр тяжести (ЦТ) – это «воображаемая» точка, на которую в одинаковой мере влияет вес всех частей летательного аппарата, и в которой пересекаются оси вращения (x , y , z) планера летательного аппарата в трехмерном пространстве (рис. 1). При изменении груза ЛА (например, смена аккумулятора, установка камеры в передней части ЛА и пр.) меняется расположение ЦТ. На этапе изготовления ЦТ ЛА должен располагаться в спроектированном для этого месте. Этот процесс называется «центрированием» модели. Расположение ЦТ для разных ЛА индивидуально. Если для вновь разрабатываемого БПЛА используется готовая модель планера, то расположение ЦТ уже указано в руководстве по эксплуатации этой модели. Центровка ЛА существенно влияет на его стабильность и управляемость. Отклонение расположения ЦТ от предельно допустимого приводит к частичной или полной потере беспилотником своей управляемости [1–3].

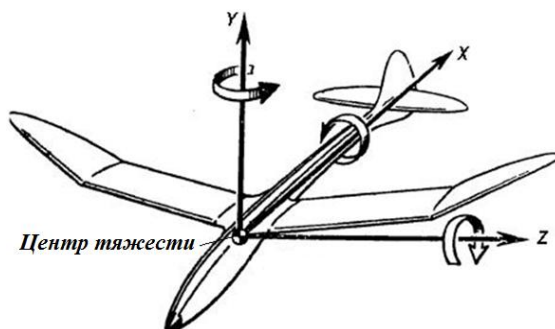


Рис. 1. Модель вращения планера по осям x , y , z , проходящих перпендикулярно центру тяжести ЛА

Существующие методы и средства, применяемые для определения нагрузки и ЦТ, расчета веса, а также подготовки данных центрирования ЛА, имеют ряд недостатков. В некоторых случаях в результате ошибочного анализа специалистами полученных параметров безопасность полетов снижается.

В нашей научно-исследовательской работе были представлены сведения о назначении ЦТ БПЛА «ARAN-04», разработанного на базе неподвижного «летающего крыла» «Skywalker X8 Flying Wing 2120mm», лежащего в основе БПЛА конвертопланового типа, путем смещения на 440 мм. назад и на 5 мм. взад-вперед в направлении центральной оси от передней части [4–8]. Эти значения верны при условии, что планер не комплектуется дополнительными деталями и установками.

Целью работы является определение координат реального ЦТ БПЛА «ARAN-04», разработанного на базе неподвижного «летающего крыла» «Skywalker X8 Flying Wing 2120mm» конвертопланового типа, в статическом режиме по осям x и z .

ЦТ является основным показателем, характеризующим точку центрирования и балансировки ЛА. Сила тяжести, действующая на ЛА со стороны ЦТ, является компенсирующей силой массы всех составляющих его элементов. Общий вес ЛА включает в себя вес планера, источника питания (*топливо или аккумуляторная батарея*), систем управления и движения, а также полезной нагрузки. Расположение ЦТ определяет сбалансированность, устойчивость и управляемость ЛА на земле и в воздухе, а самое главное – степень безопасности полета. Координаты ЦТ определяются следующими известными статическими уравнениями:

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{\sum G_i x_i}{\sum G_i} & a) \\ y_c &= \frac{\sum G_i y_i}{\sum G_i} & b) \\ z_c &= \frac{\sum G_i z_i}{\sum G_i} & c) \end{aligned} \quad (1)$$

где G_i – вес отдельных частей (элементов, грузов) ЛА; x_i , y_i , z_i – координаты их центров тяжести [9]. Ось x совпадает с горизонтальной линией симметрии (также называемой линией симметрии конструкции или структуры) вдоль фюзеляжа (корпуса ЛА), ось y перпендикулярна оси x и направлена вверх, ось z перпендикулярна оси x и направлена в сторону правого крыла [10].

Известно, что центровка ЛА, определяемая как расстояние от ЦТ до начала средней аэродинамической хорды (САХ), определяется длиной этого расстояния, выраженной в процентах, и рассчитывается по следующей формуле (рис. 2):

$$x_{AM}(\%) = \frac{x_{AM}}{b_{OAX}} * 100, \quad (2)$$

где x_{AM} – расстояние от ЦТ до начала САХ; b_{OAX} – длина САХ. Если к ЛА массой « G » с центровкой x_{AM} добавить или снять груз весом ΔG на расстоянии l от центра тяжести, то точка приложения компенсирующей силы ΔG и G сместится на Δx в направлении изменения массы, в результате чего ЦТ ЛА приобретает новое месторасположение [3]. В этом случае линейное смещение ЦТ может быть выражено %-ым значением САХ:

$$\Delta x = \frac{G * l}{(G \pm \Delta G) b_{OAX}} * 100. \quad (3)$$

Таким образом, x_{AM} рассчитывается по следующей формуле:

$$x_{AM\ yeni} = x_{AM} \pm \Delta x. \quad (4)$$

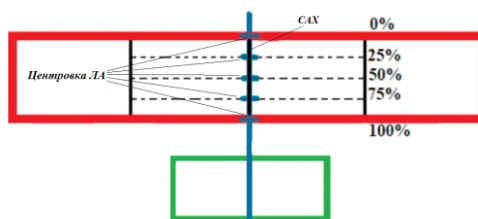


Рис. 2. Характеристика зависимости центровки ЛА от его САХ и ЦТ

На практике расчет центрирования выполняется графически по кривым центрирования для каждого типа и конфигурации ЛА [3]. Однако такие методы расчета недостаточно точны, так как в расчетах учитываются средние массы элементов и агрегатов.

Метод и средства определения ЦТ ЛА. В последние годы перегрузка сверх разрешенного значения, а также нарушение центровки как пилотируемых, так и беспилотных ЛА в гражданской, военной и экспериментальной авиации привело к увеличению числа летных инцидентов. В связи с этим особое внимание следует уделить разработке и применению передовых систем предполетного измерения веса и центровки ЛА [3, 11].

ЦТ следует определять с точностью не более 0,2-0,3% от общей длины ЛА по продольной оси. В противном случае во время полета может возникнуть ряд проблем, а если погрешность превысит 2% от длины ЛА, то это может также стать причиной крушения.

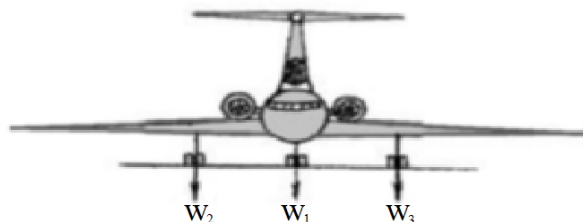


Рис. 3. Схема измерения веса ЛА и ЦТ

Для определения расположения ЦТ ЛА чаще всего используется экспериментальный метод [12], но графические, аналитические и графоаналитические методы также широко распространены.

На рис. 3 представлена схема определения общего веса с помощью системы весов, а также ЦТ посредством трех точек опоры.

В этом случае с помощью весов, расположенных под передним и задним шасси и используемых в качестве опоры, измеряется вес W_1 , W_2 , W_3 , приходящийся на каждое шасси, затем рассчитывается общий вес W ЛА, а затем ЦТ.

При использовании двух опорных точек для измерения массы расстояние ЦТ от переднего шасси рассчитывается по следующему выражению с учетом общей массы и состояния равновесия:

$$W_1 + W_2 = (M_a + M_b)g; W_1 a = W_2 b \rightarrow a = \frac{W_2 b}{W_1}. \quad (5)$$

Рассмотренные методы и средства имеют особенности, создающие ряд трудностей при практическом применении [3, 13].

Как известно, имеются многочисленные примеры электронных весов, а также мобильных электронных весов, разработанных на основе датчиков давления и тензодатчиков, позволяющих определять загрузку и центровку ЛА в стационарных условиях.

Анализ систем весов показывает, что их точность для контроля веса ЛА относительно невелика. По этой причине для определения ЦТ широко используются системы, способные измерять вес ЛА перед полетом, а также хранить, передавать и отображать информацию. Однако такие системы требуют установки в структуре ЛА специальных датчиков и радиопередатчиков [10–12].

Эти дополнительные аксессуары в конечном итоге увеличивают вес ЛА.

В последние годы ряд авторов уделяет особое внимание разработке новых методов и средств создания измерительных систем с более гибкими возможностями и характеристиками применения для определения веса ЛА.

Например, по сигналу датчика давления, установленного на цилиндре амортизатора каждого шасси, можно определить местонахождение ЦТ ЛА. При этом ЦТ ЛА рассчитывается на основе показателя ударной силы, создаваемой сжатым газом в цилиндрах, путем измерения его давления. Преимущество данного метода с точки зрения практического применения заключается в том, что измерение давления газа производится при неподвижном положении ЛА на земле, а расчет средних значений изменения давления газа в цилиндрах производится синхронно во всех амортизаторах шасси с интервалами времени в несколько десятков секунд [1, 3].



Рис. 4. Рабочее место, подготовленное в лаборатории с целью определения ЦТ БПЛА конвертопланового типа

В ходе исследований по определению степени загрузки и центра тяжести ЛА были проанализированы различные авиационные датчики, разработанные в этом направлении и описанные в [9–10]. В результате анализа было установлено, что наиболее предпочтительными являются потенциометрические и индукционные датчики марки ПС-250 и ИС-240. Эти датчики можно использовать для измерения веса ЛА с точностью не более 1%. Системы весов, разработанные на основе этих датчиков для ЛА, имеют относительно простую конструкцию и дают достоверную информацию с приводимой погрешностью не более 1% при температуре от минус 5°C до плюс 50°C.

Анализ возможностей и параметров новой бортовой системы весов, упомянутой и рассмотренной в [1–3], показывает, что все эти системы требуют специального вмешательства в конструкцию ЛА [9, 12–17] и рассчитаны на тяжеловесные ЛА. Центровку легких (например, менее 20 кг.) ЛА может выполнить методом «весы-график».

Методология измерений, проводимых с целью определения центра тяжести БПЛА конвертопланового типа

Инструменты

Лабораторный стол, измеритель балансировки, четыре весов, измеритель длины (*метр*).

Подготовка к работе

- ◆ Берутся 4 цифровых весов марки «B05» с однопроцентной точностью;
- ◆ Точность измерения весов определяется измерением веса эталонного груза;
- ◆ Берется лабораторный стол, и обеспечивается горизонтальность его поверхности. Для этого используется инструмент «уровнемер»;
- ◆ 4 опоры конвертоплана из углеродной трубки заменяются опорами из алюминиевой трубки, на концы которых на одном уровне закреплены упругие стальные пружины;
- ◆ Весы с измерительными поверхностями на одном уровне располагают на столе таким образом, чтобы при размещении БПЛА на весах каждая его опора приходилась на середину измерительных поверхностей весов;
- ◆ Проверяется полная комплектность БПЛА, а также крепление его элементов и агрегатов.

Проведение эксперимента (рис. 4)

- ◆ БПЛА ставят на весы, разместив его опоры посередине измерительных поверхностей;
- ◆ Отмечают показания весов, размещенных под 1-ой и 3-ей опорами (m_1, m_3);
- ◆ Отмечают показания весов, размещенных под 2-ой и 4-ой опорами (m_2, m_4);
- ◆ Точки соединения опор БПЛА с рычагами (точки опоры): расстояние L между 1-ой с 3-ей и 2-ой с 4-ой опорами измеряют по диагонали измерителем длины: $L = a + b$ (рис. 5);
- ◆ По полученным экспериментальным значениям веса, координаты центра тяжести БПЛА по обеим осям рассчитывается по формуле (определяется место) [18–22]:

$$b = \frac{L \cdot m_1}{m_3 + m_1} \quad (6)$$

- ◆ При получении различных центров тяжести по обеим осям по правилу параллелограмма строится их промежуточная точка (ПТ);
- ◆ Если промежуточная точка попадает вправо или влево от центральной оси, то путем смещения грузов производят повторные измерения, и по исходной формуле расчеты производят заново;
- ◆ Измерения повторяются до тех пор, пока центр тяжести не окажется на центральной оси;
- ◆ Для проверки точности результатов измерений испытания повторялись 10–15 раз в различное время.

Результаты измерений. Согласно методологии, плоскость лабораторного стола с помощью уровнемера была приведена в горизонтальное положение, и были проведены погрешности измерения цифровых измерительных весов по результатам измерения груза массой 1 кг в качестве эталонного груза. Измерения повторялись 100 раз с поочередным изменением положения весов по часовой стрелке. По причине получения различных центров тяжести по обеим осям ЛА, и выпадения промежуточной точки за пределы центральной оси (вправо или влево, вперед-назад) по результатам измерений, были проведены повторные измерения путем смещения груза в соответствующем направлении для обеспечения центрирования при измерениях (*таблица 1*). По полученным окончательным результатам были построены схемы ЦТ в программе «AutoCAD-2020» по правилу параллелограмма на основе вычисленных значений координат точек пересечения диагоналей.

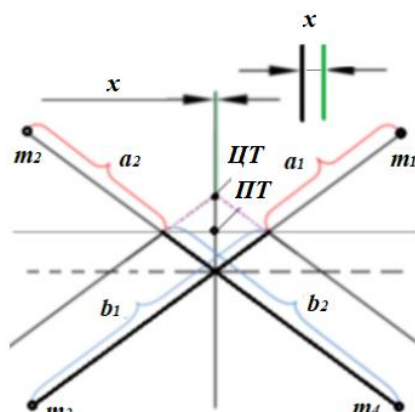


Рис. 5. Схема определения ЦТ БПЛА согласно экспериментальным значениям веса по правилу параллелограмма

На основании построенных диаграмм с помощью программы был получен итоговый график со среднеквадратической ошибкой отклонения ЛА от оси симметрии, равной $\sigma=0,047$ см (рис. 5).

Таблица 1

Параметры, полученные в результате экспериментальных измерений и отчетов на их основе

Номер исследования / Параметры	I	II	III	IV	V	VI	VII	Σ
$m_1(z)$	1887	1900	1900	1893	1897	1900	1896	1896
$m_2(z)$	1897	1885	1885	1891	1887	1885	1889	1888
$m_3(z)$	1081	1079	1080	1079	1081	1088	1081	1081
$m_4(z)$	1094	1082	1082	1086	1083	1078	1085	1084
$b_1(см)$	46.489	46.617	46.533	46.504	46.496	46.463	46.467	46.510
$b_2(см)$	46.280	46.402	46.425	46.395	46.414	46.420	46.423	46.394
$x_i(см)$	0.137	0.173	0.087	0.087	0.066	0.035	0.035	0.00885
σ	0,047							

x_i – случайные значения наклона;

Σ – средние числовые значения величин

Вывод. Координаты ЦТ БПЛА конвертопланового типа были рассчитаны по осям, соединяющим точки опор по диагонали, на основании значений веса, измеренных с помощью электронных весов, размещенных под опорами. С помощью измеренных и рассчитанных значений ЦТ БПЛА был изображен графически в программе «AutoCAD-2020». По причине получения различных координат ЦТ по обеим осям для нахождения ЦТ была построена промежуточная точка по правилу параллелограмма. На основе проведенной оптимизации с использованием среднеквадратического смещения было установлено, что ошибка среднеквадратического отклонения промежуточной точки от центральной оси составляет: $\sigma=0,047$ см. Это свидетельствует о том, что составные элементы БПЛА были распределены с достаточно высокой точностью по весу при проектировании.

При проведении дополнительных инженерных или проектных работ на ЛА с установленным ЦТ целесообразно повторно измерить расстояние между опорами и приходящийся на опоры вес, а также пересчитать и уточнить координаты ЦТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пашаев А.М., Гасанов А.Р., Набиев Р.Н., Искендеров И.А.* Структурная модель системы бесконтактного определения веса и центра тяжести воздушных судов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – С. 156-167.
2. *Askerov C., Nabiyev R., İsgandarov İ.* Цифровой измеритель загруженности // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri. – 2002. – Vol. 2. – Səh. 104-111.
3. *Набиев Р.Н.* Анализ методов измерения загруженности и центровки летательных аппаратов в Аэропортах // Elmi Məcmuələr. – 2005. – Cild 7, № 1. Səh. 74-78.
4. *Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А., Гараев Г.И.* Конструктивное оформление беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа // Авиакосмическое приборостроение. – 2022. – № 6. – С. 3-13. – DOI: 10.25791/aviakosmos. 6.2022. 1274.
5. *Nabiyev R.N., Abdullayev A.A.* Structural emplacement and layout of elements of the developed convertiplane type unmanned aerial vehicle // Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Concepts for the development of society's scientific potential. Prague, Czech Republic, 19-20.05.2022. – P. 325-330. – DOI: 10.51582/interconf. 19-20.05.2022.041.
6. *Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А.* Исследование основных аэродинамических параметров планера беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа // Авиакосмическое приборостроение. – 2022. – № 4. – С. 17-33. – DOI: 10.25791/aviakosmos. 4.2022.1274.
7. *Nabiyev R.N., Garayev G.I., Abdullayev A.A.* Conceptual functional design of hybrid energy source of unmanned convertiplane // IOP Conference Series: Conference Scopos. Materials Science and Engineering. – 2020. – 862. – 022043. – DOI: 10.1088/ 1757-899X/862/2/022043.
8. “Skywalker X8”. Assembly manual. – January 2013. – 35 p. – www.raygrauberger.com (дата обращения: 17.07.2022).
9. *Искендеров И.А.* Аналитико-имитационная модель системы бесконтактного определения массы и центра тяжести самолётов // Измерительная техника. – 2021. – № 12. – С. 35-41. – <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-35-41>.
10. *Пашаев А.М., Гасанов А.Р., Искендеров И.А., Агаев Э.А.* Способ бесконтактного определения степени загруженности и центровки воздушных судов / Патент-изобретение, I2016 0003. Промышленная собственность. Офиц. бюлл. комит. по стандартиз., метрологии и патентам. Азербайджанская Республика. – 2016. – № 5. – С. 51. – URL: http://patent.copat.gov.az/_files/Ixtira_2016_05.pdf (дата обращения: 28.07.2022).
11. Руководство по центровке и загрузке самолетов ГА СССР. РЦЗ-83. Часть 1 и 2. – М., 1983. – 83 с. (168 с).
12. *Марченко Д.* Центровка воздушного судна: мировая практика, актуальные проблемы, перспективы развития. – URL: <http://www.ato.ru/content/centrovka-vozdushnogo-sudna-mirovaya-praktika-ktualnye-problemy-perspektivy-razvitiya>. – 2013 (дата обращения: 29.08.2022).
13. National Aerospace Laboratory NLR-TP-2007-153. Analysis of aircraft weight and balance related safety. – URL: <http://www.skybrary.aero/bookshelf/books/1149.pdf>. EASS, 12- 14.03. – 2007 (дата обращения: 09.09.2022).
14. *Nabiyev R.N., Abdullayev A.A.* Results of measurements carried out for the purpose of determining the center of gravity of a convertiplane-type UAV // Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Current issues and prospects for the Development of Scientific Research». Orleans, France. (October 19-20, 2022). Scientific Collection «InterConf+». – 2022. – No. 26 (129). – P. 197-202. – DOI: 10.51582/interconf.19-20.10.2022.021.
15. *Черепашук Г.А., Потыльчак А.П., Борзенкова А.В.* Повышение точности взвешивания и центровки летательных аппаратов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 1. – С. 66-72.

16. Aircraft Weight and Balance Handbook. FAA-H-8083-1A”, 2007, Washington D.C. U.S. Government Printing Office. – P. 23. – URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/FAA-H-8083-1.pdf (дата обращения: 30.08.2022).
17. Загорский В.А., Киселев Д.Ю., Санчатов В.И. Испытания воздушных судов: электрон. учеб пособие. – Самара: Изд-во СГАУ, 2014. – 75 с.
18. Реутов А.А., Аверченков В.И., Рытов М.Ю., Федоров В.П. Имитационное моделирование релейных систем регулирования скорости и конвейера // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2019. – № 2. – С. 76-90. – <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2019-2-76-90> (дата обращения: 17.07.2022).
19. Петров В.В., Шкавера К.Н. Исследование точности измерения расстояний лазерной рулеткой «DISTO PRO» фирмы «LEICA» // Записки Горного института. – 2004. – Т. 156. – С. 232-234.
20. Локтев Д.А. Методы и моделирование измерительной системы контроля объектов транспорта по их изображениям: дисс. ... д-ра тех. наук. – М.: МИИТ, 2020.
21. Osadchiy S., Tymoshenko G. Methods for determining the weight and the center of gravity of UAV // 2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). – DOI: 10.1109/APUAVD.2017.8308794.
22. Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А., Гараев Г.И. Разработка концептуальной функциональной схемы беспилотного конвертоплана с гибридным источником энергии // Авиакосмическое приборостроение. – 2021. – № 5. – С. 03-18. – DOI: 10.25791/aviakosmos.5.2021.1217.

REFERENCES

1. Pashaev A.M., Gasanov A.R., Nabiev R.N., Iskenderov I.A. Strukturnaya model' sistemy beskontaktnogo opredeleniya vesa i tsentra tyazhesti vozdukhnykh sudov [Structural model of a system for contactless determination of the weight and center of gravity of aircraft], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, pp. 156-167.
2. Askerov C., Nabiyev R., İsgandarov İ. TSifrovoy izmeritel' zagruzhennosti [Digital load meter], *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri* [Scientific Works of the National Aviation Academy], 2002, Vol. 2, pp. 104-111.
3. Nabiev R.N. Analiz metodov izmereniya zagruzhennosti i tsentrovki letatel'nykh apparatov v Aeroportakh [Analysis of methods for measuring the workload and centering of aircraft at Airports], *Elmi Məcmuələr* [Scientific Collections]. 2005, Vol. 7, No. 1, pp. 74-78.
4. Nabiev R.N., Abdullaev A.A., Garaev G.I. Konstruktivnoe oformlenie bespilotnogo letatel'nogo apparata konvertoplanovogo tipa [Constructive design of an unmanned aerial vehicle of a tiltrotor type], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2022, No. 6, pp. 3-13. DOI: 10.25791/aviakosmos. 6.2022. 1274.
5. Nabiyev R.N., Abdullayev A.A. Structural emplacement and layout of elements of the developed convertiplane type unmanned aerial vehicle, *Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Concepts for the development of society's scientific potential. Prague, Czech Republic, 19-20.05.2022*, pp. 325-330. DOI: 10.51582/interconf. 19-20.05.2022.041.
6. Nabiev R.N., Abdullaev A.A. Issledovanie osnovnykh aerodinamicheskikh parametrov planera bespilotnogo letatel'nogo apparata konvertoplanovogo tipa [Investigation of the main aerodynamic parameters of the airframe of an unmanned aerial vehicle of a tiltrotor type], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2022, No. 4, pp. 17-33. DOI: 10.25791/aviakosmos. 4.2022.1274.
7. Nabiyev R.N., Garayev G.I., Abdullayev A.A. Conceptual functional design of hybrid energy source of unmanned convertiplane, *IOP Conference Series: Conference Scopis. Materials Science and Engineering*, 2020, 862, 022043. DOI: 10.1088/1757-899X/862/2/022043.
8. “Skywalker X8”. Assembly manual, January 2013, 35 p. Available at: www.raygrauberger.com (accessed 17 July 2022).
9. Iskenderov I.A. Analitiko-imitatsionnaya model' sistemy beskontaktnogo opredeleniya massy i tsentra tyazhesti samoletov [Analytical and simulation model of a system for contactless determination of the mass and center of gravity of aircraft], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 2021, No. 12, pp. 35-41. Available at: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-35-41>.

10. Pashaev A.M., Gasanov A.R., Iskenderov I.A., Agaev E.A. Sposob beskontaktnogo opredeleniya stepeni zagruzhennosti i tsentrovki vozduzhnykh sudov [A method for contactless determination of the degree of congestion and alignment of aircraft], Patent-invention, I2016 0003. Official Bulletin of the Committee on Standardization, Metrology and Patents. The Republic of Azerbaijan, 2016, No. 5, pp. 51. Available at: http://patent.copat.gov.az/_files/Ixtira_2016_05.pdf (accessed 17 July 2022).
11. Rukovodstvo po tsentrovke i zagruzke samoletov GA SSSR. RTSZ-83 [Guidance on centering and loading aircraft of the USSR GA. RCZ-83]. Part' 1 and 2. Moscow, 1983, 83 p. (168 s).
12. Marchenko D. Tsentrovka vozduzhnogo sudna: mirovaya praktika, aktual'nye problemy, perspektivy razvitiya [Aircraft alignment: world practice, current problems, development prospects]. Available at: <http://www.ato.ru/content/centrovka-vozduzhnogo-sudna-mirovaya-praktika-ktualnye-problemy-perspektivy-razvitiya>, 2013 (accessed 29 August 2022).
13. National Aerospace Laboratory NLR-TP-2007-153. Analysis of aircraft weight and balance related safety. Available at: <http://www.skybrary.aero/bookshelf/books/1149.pdf>. EASS, 12- 14.03, 2007 (accessed 09 September 2022).
14. Nabiyev R.N., Abdullayev A.A. Results of measurements carried out for the purpose of determining the center of gravity of a convertiplane-type UAV, *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Current issues and prospects for the Development of Scientific Research»*. Orleans, France. (October 19-20, 2022). *Scientific Collection «InterConf+»*, 2022, No. 26 (129), pp. 197-202. DOI: 10.51582/interconf.19-20.10.2022.021.
15. Cherepashchuk G.A., Potyl'chak A.P., Borzenkova A.V. Povyshenie tochnosti vzhivaniya i tsentrovki letatel'nykh apparatov [Improving the accuracy of weighing and centering of aircraft], *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace engineering and technology], 2014, No. 1, pp. 66-72.
16. Aircraft Weight and Balance Handbook. FAA-H-8083-1A", 2007, Washington D.C. U.S. Government Printing Office, pp. 23. Available at: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/FAA-H-8083-1.pdf (accessed 30 August 2022).
17. Zagorskiy V.A., Kiselev D.Yu., Sanchutov V.I. Ispytaniya vozduzhnykh sudov: elektron. ucheb posobie [Aircraft testing: electron. textbook]. Samara: Izd-vo SGAU, 2014, 75 p.
18. Reutov A.A., Averchenkov V.I., Rytov M.Yu., Fedorov V.P. Imitatsionnoe modelirovanie releykh sistem regulirovaniya skorosti i konveyera [Simulation of relay systems for speed control and conveyor], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University], 2019, No. 2, pp. 76-90. Available at: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2019-2-76-90> (accessed 17 July 2022).
19. Petrov V.V., Shkavera K.N. Issledovanie tochnosti izmereniya rasstoyaniy lazernoy ruletkoy «DISTO PRO» firmy «LEICA» [The study of the accuracy of measuring distances with a laser tape measure "DISTO PRO" of the company "LEICA"], *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2004, Vol. 156, pp. 232-234.
20. Loktev D.A. Metody i modelirovanie izmeritel'noy sistemy kontrolya ob'ektov transporta po ikh izobrazheniyam: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Methods and modeling of the measuring system for monitoring transport objects by their images: dr. of eng. sc. diss.]. Moscow, 2020.
21. Osadchiy S., Tymoshenko G. Methods for determining the weight and the center of gravity of UAV, *2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. DOI: 10.1109/APUAVD.2017.8308794.
22. Nabiev R.N., Abdullaev A.A., Garaev G.I. Razrabotka kontseptual'noy funktsional'noy skhemy bespilotnogo konvertoplana s gibridnym istochnikom energii [Development of a conceptual functional scheme of an unmanned tiltrotor with a hybrid energy source], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2021, No. 5, pp. 03-18. DOI: 10.25791/aviakosmos.5.2021.1217.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Х.Г. Асадов.

Набиев Расим Насиб оглу – Национальная академия авиации Азербайджана; e-mail: nabiyevrasim@gmail.com; г. Баку, Азербайджан; тел.: +994557547646; начальник отдела авиационной электроники; д.т.н.; профессор.

Абдуллаев Анар Ариф оглу – e-mail: anarcafarov09@mail.ru; тел.: +994777564875; докторант отдела авиационной электроники; к.ф.-м.н.

Гараев Гадир Исахан оглу – e-mail: qedir71@mail.ru; тел.: +994703218115; научный сотрудник отдела авиационной электроники; к.т.н.

Аббасов Вусал Араслы оглу – e-mail: vusal9820@gmail.com; тел.: +994707292258; младший научный сотрудник отдела авиационной электроники; аспирант.

Nabiyev Rasim Nasib – National Aviation Academy of Azerbaijan; e-mail: nabiyevrasim@gmail.com; Baku, Azerbaijan; phone: +994557547646; head of Aviation Electronics department; dr. of eng. sc.; professor.

Abdullayev Anar Arif – e-mail: anarcafarov09@mail.ru; phone: +994777564875; doctorate of Aviation Electronics department; cand.of phis.-math. sc.

Qarayev Qadir Isaxan – e-mail: qedir71@mail.ru; phone: +994703218115. scientific researcher employee of the Aviation Electronics department; cand. of eng. sc.

Abbasov Vusal Arasli – e-mail: vusal9820@gmail.com; phone: +994707292258; junior researcher of Aviation Electronics department; postgraduate student.