

**РАЗВИТИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОДНОПЛОСКОСТНОЙ БАЛАНСИРОВКИ
В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ МОДЕЛИ**

А. В. Ключников

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И. Забабахина
Российская Федерация, 456770, г. Снежинск, ул. Васильева, 13, а. я. 245
E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

Одной из задач, решаемых изготовителем на завершающем этапе общей сборки высокоскоростных летающих моделей для снижения вероятности появления аномальных режимов полёта, является приведение параметров массо-инерционной асимметрии к нормативам, заданным в эксплуатационной документации на модель. Определение параметров и уравнивание модели выполняют с использованием специализированного контрольно-измерительного оборудования. Рассматривается алгоритм балансировочного расчёта, проводимый при уравнивании модели в одной плоскости коррекции на вертикальном динамическом балансировочном стенде и позволяющий за один шаг балансировки либо привести параметры массо-инерционной асимметрии летающей модели к заданным нормативам, либо диагностировать невозможность для конкретной конструкции модели обеспечить указанные параметры. Верификация расчёта, проведённая по результатам балансировочного эксперимента, показала высокую точность полученных формул и возможность использования алгоритма при балансировке летающих моделей, обладающих единственной плоскостью коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс модели.

Ключевые слова: вектор, тело вращения, ось симметрии, ось инерции, центр масс, плоскость коррекции, дисбаланс, балансировочный расчёт.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 411–416**DEVELOPING AND REFINING THE ALGORITHM OF SINGLE-PLANE DYNAMIC BALANCING
OF A HIGH-SPEED FLYING PROTOTYPE**

A. V. Klyuchnikov

Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research Institute of Technical Physics
named after academician E. I. Zababakhin
P.b. 245, 13, Vassilyeva Str., Snezhinsk, 456770, Russian Federation
E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

One of the major tasks that challenges manufacturer at a final assembly stage, aimed to reduce abnormal modes of flying for high-speed models of vehicles, is matching parameters of mass-inertia asymmetry with values, specified in operational documentation for the model. Both characterization and model's balancing are made with special check-out gauging equipment on final part of the common model's assemblage. Using of methods and equipment of dynamic balancing permits to increase accuracy of the parameters' measurements. In the paper the algorithm of balancing analysis is considered, when counterpoising the model within the only correction plane on the vertical balancing stand. And the correction plane is being on considerable distance from model's center of mass. It enables in a single step either bringing mass-inertia asymmetry parameters to predetermined values or diagnosing impossibility of meeting the above values for every specified model of flying model. The parameters are controlled under dynamic conditions. The flying machine is counterbalanced being a part of assembled rotor. The rotor supports are gas bearings, which has a great staunchness to wear and tear. Vertical position of rotation axis allows to exclude deformations of the body of flying model during the experiment. For measure of nonbalances of the model uses piezo-electric sensors. Processing of measuring signals conducts with use the methods of analogue filtering and digital filtering. Tuning the balancing stand fulfill with use of test weights, which mass are known, and which corner positions in planes of correction are known, too. Using of the algorithm allows to exclude of intermediate steps during the balancing experiment and to cut duration of this process. Verification of calculations, made after the results of balancing experiment, demonstrated high accuracy of obtained formulas and usability of the algorithm for precision balancing the flying models of the only correction plane that locates at a distance well removed from the center-mass of the model.

Keywords: vector, solid of rotation, symmetry axis, axis of inertia, center of mass, plane of correction, unbalance, balancing analysis.

Введение. Реализация аномальных режимов полёта высокоскоростной осесимметричной летающей модели (ЛМ), например, выполненной в виде стабилизированного вращением вокруг своей геометрической оси длинномерного конического модуля, приводит к снижению точности траекторного движения модели, сбоям и отказам в работе бортовых приборов и систем. Одним из условий движения ЛМ с заданной точностью по расчётной траектории, а также надёжного функционирования бортовой аппаратуры является определение и приведение на завершающем этапе общей сборки параметров её массо-инерционной асимметрии к значениям, не превышающим заданных в эксплуатационной документации предельно допустимых значений. В последнее время наблюдается тенденция к ужесточению требований по точности определения и обеспечения параметров, определяющих асимметрию распределения масс относительно оси симметрии наружной поверхности (или геометрической оси) ЛМ, существенно влияющих на лётно-технические характеристики модели. К числу параметров массо-инерционной асимметрии относится величина поперечного смещения центра масс с геометрической оси и угол отклонения продольной главной центральной оси симметрии (ГЦОИ) относительно той же оси [1].

Зачастую при проектировании, конструировании и изготовлении высокоскоростной ЛМ стремятся обеспечить симметричность формы корпуса модели и совпадение оси её массовой симметрии с осью симметрии наружной поверхности, которая обычно принимается в качестве строительной. Однако невысокая точность теоретического расчёта параметров массо-инерционной асимметрии, как правило проводимого на этапе проектирования, делает актуальной задачу измерения этих параметров [1–3]. Измерения выполняют экспериментальным или расчётно-экспериментальным путём и с применением специализированного контрольно-измерительного оборудования. При этом симметричность формы обуславливает близость к нулю номинальных значений параметров массо-инерционной асимметрии, что, в свою очередь, определяет трудности процесса экспериментального определения этих параметров, например, по сравнению с контролем таких массо-центровочных и массо-инерционных характеристик (МЦИХ), как масса, продольное положение центра масс, моменты инерции, также определяемых экспериментально после изготовления и сборки модели. Ряд характерных особенностей высокоскоростных ЛМ, таких, в частности, как значительные габаритные размеры, неметаллическая наружная поверхность, наличие нежестких элементов конструкции, отсутствие удобной технологической базы для закрепления на рабочем органе измерительного стенда, наличие единственной плоскости коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс модели, налагают дополнительные ограничения на использование измерительного оборудования и способы выполнения измерений. Процедуру приведения значений параметров массо-инерционной асимметрии к заданным нормативам выполняют путём прикрепления корректирующих

грузов к штатной плоскости коррекции, как правило конструктивно располагаемой вблизи торца корпуса модели, после её изготовления и сборки.

Для определения массы ЛМ обычно используют стандартные, например, платформенные весы, а определение других МЦИХ выполняют с применением контрольно-измерительных стендов, учитывающих конструктивные и технологические особенности контролируемых объектов и обеспечивающих требуемую точность измерений и безопасность проводимых работ. Координаты центра масс обычно определяют на центровочных стендах, реализующих весовой метод измерений, а для определения моментов инерции используют стенды, реализующие метод физического или крутильного маятника [2–4]. При этом расчёт величины поперечного смещения центра масс и угол перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси контролируемой модели выполняют по специальным методикам с использованием результатов измерений МЦИХ. Однако низкая точность стендового оборудования обоих перечисленных типов и малая производительность являются основными факторами, сдерживающими дальнейшее повышение точности определения и обеспечения параметров массо-инерционной асимметрии ЛМ.

В работах [4–6] отмечается, что в последнее время для определения параметров массо-инерционной асимметрии высокоскоростных летающих моделей наметилась тенденция к использованию методов и средств динамической балансировки, что обусловлено высокими характеристиками точности динамических балансировочных станков (стендов).

Расчётная схема балансировочного эксперимента. Для прецизионной низкочастотной (рабочая частота вращения не превышает 2 Гц) балансировки осесимметричных ЛМ конической формы в динамическом режиме спроектирована и изготовлена автоматизированная система контроля, построенная на базе вертикального дорезонансного динамического балансировочного стенда с жесткими опорами, представляющими собой конические газостатические подшипники [7–10]. В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий из заводской пневмосети низкого давления. Контролируемая модель, расчётная схема которой приведена на рис. 1, балансируется на стенде в составе сборного ротора, образуемого собственно ЛМ и специальным защитным технологическим переходником, выполненным в виде усечённого конуса и загружаемого непосредственно на газовые опоры.

Модель устанавливается на внутренние опоры переходника торцом вверх и фиксируется в одном из двух угловых положений относительно переходника, отличающихся друг от друга на 180° [4; 11]. Применение переходника обеспечивает материализацию второй (нижней, обозначаемой символом «Н») плоскости коррекции и необходимо для настройки измерительной системы стенда и проведения балансировочного расчёта. При этом в качестве первой (верхней, обозначаемой символом «В») плоскости коррекции используется штатная плоскость коррекции ЛМ. В процессе балансировочного эксперимента выполняют

серию пусков сборного ротора как с пробными грузами, установленными в плоскостях коррекции, так и с ЛМ, установленной внутри технологического переходника в исходном положении. Измерения в исходном состоянии выполняют дважды для двух взаимно противоположных угловых положений ЛМ относительно технологического переходника с последующим усреднением результатов измерений, что позволяет исключить влияния собственных дисбалансов переходника на результаты измерений [11; 12]. В каждом пуске определяют амплитуды и фазы вибраций газовых опор на рабочей частоте вращения сборного ротора. При этом обработку измерительных сигналов выполняют с использованием комбинированного аналого-цифрового фильтра [13; 14].

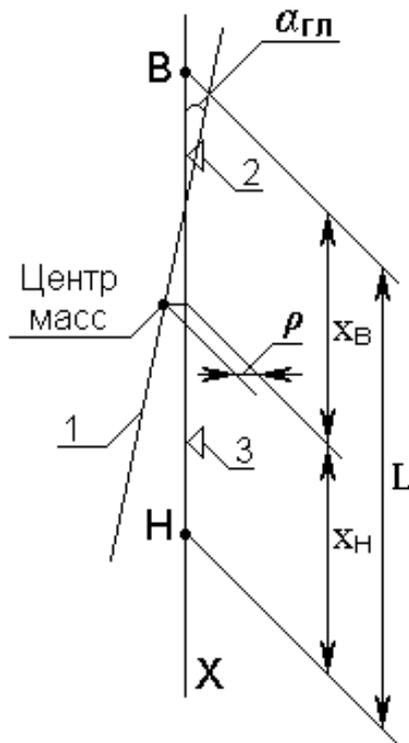


Рис. 1. Расчётная схема:
1 – продольная ГЦОИ; 2 и 3 – соответственно верхняя и нижняя опоры, выполненные в виде конических газостатических подшипников

По результатам измерений вибраций опор в пусках с пробными грузами рассчитывают коэффициенты чувствительности измерительной системы к дисбалансам и коэффициенты взаимовлияния плоскостей коррекции [15]. С использованием указанных коэффициентов, по результатам измерений вибраций опор в пусках сборного ротора с ЛМ, находящейся в исходном положении, определяют векторные параметры (значения и углы) начальных дисбалансов \vec{D}_B и \vec{D}_H , действующих соответственно в верхней и нижней плоскостях коррекции, и рассчитывают начальные параметры радиуса-вектора $\vec{\rho}$ поперечного смещения центра масс и вектор-угла $\vec{\alpha}_{ГЛ}$ перекоса продольной

ГЦОИ модели относительно её геометрической оси по формулам [4; 11]

$$\vec{\rho} = \frac{\vec{D}_B + \vec{D}_H}{M}; \quad \vec{\alpha}_{ГЛ} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(\vec{D}_B x_B - \vec{D}_H x_H)}{I_3 - I_a},$$

где M – масса ЛМ; I_3 и I_a – соответственно её экваториальный и аксиальный моменты инерции.

Применение метода динамической балансировки позволило достигнуть погрешностей определения указанных параметров массо-инерционной асимметрии, не превышающих соответственно 0,01 мм и 1 угловой минуты, что в 5–6 и более раз превышает погрешности определения тех же параметров на стендах, реализующих методы статической балансировки.

В случае если начальное значение хотя бы одного из параметров, характеризующих асимметричность в распределении масс ЛМ, превышает соответствующее предельно допустимое значение, заданное в эксплуатационной документации на модель, выполняют корректировку её массы. При этом использование коэффициентов взаимовлияния плоскостей коррекции позволяет расчётным путём определить массу и угловое положение балансировочного груза для его прикрепления к штатной плоскости коррекции модели либо показать невозможность обеспечения одновременно двух контролируемых параметров массо-инерционной асимметрии по заданным нормативам (в этом случае балансировка завершается, а модель направляется на перекомпоновку). Следует отметить, что балансировочный расчёт может быть проведён с оптимизацией по критерию достижения минимального значения любого из параметров без выполнения дополнительных шагов балансировки. Учитывая, что на практике балансировщики стремятся достичь минимального значения поперечного смещения центра масс, обеспечивая при этом допустимое по документации на модель значение угла перекоса продольной ГЦОИ, рассмотрим вариант балансировочного расчёта с оптимизацией параметров по критерию достижения минимального поперечного смещения центра масс.

Алгоритм обеспечения параметров асимметрии масс. Сначала ЛМ расчётным путём приводят к режиму квазистатической неуравновешенности, когда её геометрическая ось и продольная ГЦОИ пересекаются не в центре масс, для чего с учётом взаимовлияния плоскостей коррекции моделируют устранение действия начального дисбаланса в штатной (верхней) плоскости коррекции введением в этой плоскости коррекции равного ему по значению, но противоположного по направлению компенсирующего дисбаланса $\vec{D}_B^{КОМП}$ [6]. Эта процедура позволяет упростить последующие вычисления и перейти при расчётах коллинеарных векторов дисбалансов к операциям с одномерными величинами. Затем с учётом взаимовлияния плоскостей коррекции моделируют введение в штатной плоскости коррекции корректирующего дисбаланса $\vec{D}_B^{КОРР}$, равного по значению, но противоположного по направлению дисбалансу $\vec{D}_H^{КОМП}$, сформировавшемуся в нижней плоскости коррекции в результате предыдущего шага моделирования. Это позволяет

устранить поперечное смещение центра масс с геометрической оси и виртуально перевести ЛМ в режим моментной неуравновешенности, когда геометрическая ось и продольная ГЦОИ пересекаются в центре масс. Оценивают угол перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси ЛМ, который будет предположительно образован в результате моделирования компенсирующего и корректирующего дисбалансов, по формуле

$$\alpha_{ГЛ}^{КОРР} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2D_B^{КОРР} L}{I_3 - I_a},$$

где $L = x_B + x_H$ – соответственно расстояние между верхней и нижней плоскостями коррекции; $D_B^{КОРР}$ – значение дисбаланса, смоделированного в верхней плоскости коррекции, для перевода контролируемой модели в состояние моментной неуравновешенности с учётом взаимовлияния плоскостей коррекции.

В случае если значение $\alpha_{ГЛ}^{КОРР}$ не превышает предельно допустимого значения данного параметра $\alpha_{ГЛдоп}$, то значение и угол балансирующего вектора $\vec{D}_B^{БАЛ}$ рассчитывают как геометрическую сумму компенсирующего и корректирующего дисбалансов в верхней плоскости коррекции по формулам

$$D_B^{БАЛ} = \sqrt{D_B^{КОМП2} + D_B^{КОРР2} + 2D_B^{КОМП} D_B^{КОРР} \cos(\alpha_B^{КОМП} - \alpha_B^{КОРР})};$$

$$\alpha_B^{БАЛ} = \arctg \frac{\sin \alpha_B^{КОМП} + \sin \alpha_B^{КОРР}}{\cos \alpha_B^{КОМП} + \cos \alpha_B^{КОРР}},$$

где $\alpha_B^{КОМП}$ – угловое положение дисбаланса $\vec{D}_B^{КОМП}$; $\alpha_B^{КОРР}$ – угловое положение дисбаланса $\vec{D}_B^{КОРР}$. А затем по законам статики рассчитывают массу и угол установки балансирующего груза в штатной плоскости коррекции и корректируют массу ЛМ. В противном случае рассчитывают предполагаемое (одновременно являющееся минимально возможным для данного варианта компоновки контролируемой модели) значение поперечного смещения центра масс, задавая значение угла перекоса продольной ГЦОИ равным предельно допустимому значению, по формуле

$$\rho_{мин} = \frac{D_H^{КОМП} + \frac{(I_3 - I_a) \sin 2\alpha_{ГЛдоп} - D_H^{КОМП} x_H}{x_B + K_{НВ} x_H} (K_{НВ} - 1)}{M},$$

где $K_{НВ}$ – коэффициент влияния верхней (штатной) плоскости коррекции на нижнюю плоскость коррекции при наличии дисбаланса в верхней плоскости коррекции; $D_H^{КОМП}$ – значение дисбаланса, действующего в нижней плоскости коррекции, после компенсации начального дисбаланса, действующего в верхней плоскости коррекции. Далее, в случае если значение $\rho_{мин}$ будет превышать предельно допустимое значение параметра $\rho_{доп}$, то балансирующий

эксперимент прекращают, а контролируемую модель бракуют и направляют на перекомпоновку. В ином случае определяют значение вектора дисбаланса $\vec{D}_{Вмин}^{КОРР}$, сонаправленного вектору $\vec{D}_B^{КОРР}$ и обеспечивающего достижение минимально возможного смещения центра масс для варианта, когда угол перекоса продольной ГЦОИ равен $\alpha_{ГЛдоп}$, по формуле

$$D_{Вмин}^{КОРР} = D_H^{КОМП} + \frac{(I_3 - I_a) \frac{\sin 2\alpha_{ГЛдоп}}{2} - D_H^{КОМП} x_H}{x_B + K_{НВ} x_H} (K_{НВ} - 1).$$

Затем определяют значение и угол балансирующего вектора по формулам

$$D_{Вмин}^{БАЛ} = \sqrt{D_B^{КОМП2} + D_{Вмин}^{КОРР2} + 2D_B^{КОМП} D_{Вмин}^{КОРР} \cos(\alpha_B^{КОМП} - \alpha_{Вмин}^{КОРР})};$$

$$\alpha_{Вмин}^{БАЛ} = \arctg \frac{\sin \alpha_B^{КОМП} + \sin \alpha_{Вмин}^{КОРР}}{\cos \alpha_B^{КОМП} + \cos \alpha_{Вмин}^{КОРР}},$$

где $\alpha_{Вмин}^{КОРР}$ – угловое положение дисбаланса $\vec{D}_{Вмин}^{КОРР}$. После чего по законам статики рассчитывают массу и угловое положение балансирующего груза и корректируют массу ЛМ.

На рис. 2 показаны расчётные дисбалансы, действующие в плоскостях коррекции в процессе и по окончании приведения значений параметров массо-инерционной асимметрии ротора к значениям, не превышающим заданных предельно допустимых значений.

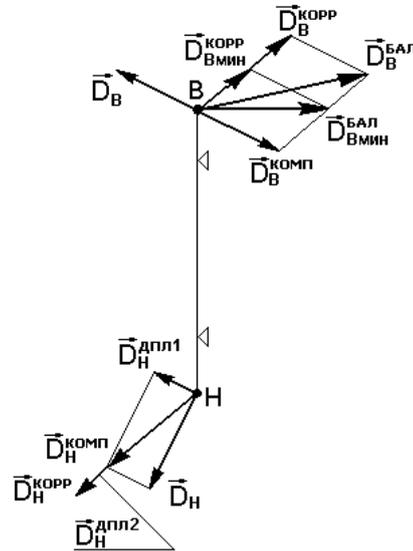


Рис. 2. Диаграмма балансирующего расчёта

При проведении расчёта дополнительные дисбалансы $D_H^{ДПЛ1}$, $D_H^{ДПЛ2}$ и $D_H^{ДПЛ3}$ (не показан), появляющиеся в нижней плоскости коррекции в результате влияния на неё верхней плоскости коррекции, при формировании в ней соответствующих компенсирующего и корректирующих дисбалансов, вычисляют по формулам

$$D_H^{ДПЛ1} = D_B^{КОМП} K_{НВ};$$

$$D_H^{ДПЛ2} = D_B^{КОРР} K_{НВ};$$

$$D_H^{ДПЛ3} = D_{ВМин}^{КОРР} K_{НВ}.$$

Заключение. Рассмотренный алгоритм обеспечивает прецизионное приведение одновременно двух контролируемых параметров массо-инерционной асимметрии к значениям, не превышающим соответствующих предельно допустимых значений, с оптимизацией по критерию достижения минимального смещения центра масс с геометрической оси модели. При этом сокращается число шагов балансировки и время балансировочного эксперимента. Точность приведения контролируемых параметров асимметрии к заданным нормативам обеспечивается точностью измерений сигналов дисбалансов [13], а также точностью вычисления массы и углового положения балансировочного груза в ходе балансировочного расчёта. Алгоритм и способ балансировки роторного объекта в единственной плоскости коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс объекта контроля, защищён патентом РФ на изобретение [16]. Экспериментальное опробование расчётного алгоритма и способа балансировки, проведённого на вертикальном балансировочном стенде с опорами, выполненными в виде конических газостатических подшипников, подтвердило его высокую точность и эффективность.

Библиографические ссылки

1. Правдин В. М., Шанин А. П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. Снежинск : РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999. 496 с.
2. Миронов А. Д., Владычин Г. П., Кондратов А. А. Методы исследований на летающих моделях. М. : Машиностроение, 1988. 144 с.
3. Основы балансировочной техники. Т. 1. Уравновешивание жестких роторов и механизмов / под ред. В. А. Щепетильникова. М. : Машиностроение, 1975. 527 с.
4. Технология обеспечения качества при изготовлении высокоскоростных неуправляемых летающих моделей / В. В. Ильиных [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 191–196.
5. Андреев С. В., Ключников А. В., Михайлов Е. Ф. Перспективы применения метода динамической балансировки для определения параметров асимметрии масс летательного аппарата // Решетнёвские чтения : тр. XVIII Междунар. науч. конф. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 8–10.
6. ГОСТ 22061–76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. М. : Изд-во стандартов, 1977. 139 с.
7. Пат. 2292533 Российская Федерация. Балансировочный стенд с вертикальной осью вращения / Глазырина Л. М., Карповицкий М. С., Ключников А. В., Малгин А. И., Смирнов Г. Г., Фомин Ю. П. Опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.

8. Абышев Н. А., Андреев С. В., Ключников А. В. Конструктивные особенности стенда для диагностики характеристик асимметрии масс летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 1. С. 39–45.

9. Ключников А. В. Испытательное оборудование для диагностики симметричности распределения масс сложных роторных деталей // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий : тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. Сочи, 2012. С. 362–364.

10. Ключников А. В., Лысых А. В., Чертков М. С. Метрологические аспекты модели уравнивания летательного аппарата на динамическом балансировочном стенде // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2015. № 1. С. 43–48.

11. Пат. 2292534 Российская Федерация. Способ балансировки ротора / Глазырина Л. М., Карповицкий М. С., Ключников А. В., Малгин А. И., Смирнов Г. Г., Фомин Ю. П. Опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.

12. Ключников А. В., Самарцев А. А., Симонова Н. Ф. Алгоритм функционирования компьютерной программы стенда исследования характеристик асимметрии распределения масс тела // Надежность и качество – 2012 : тр. междунар. симпозиума. Пенза, 2012. Т. 1. С. 319–322.

13. Peculiarities of measuring signals processing during detail's dynamic counterbalancing) / S. V. Andreev [et al.] // Innovative Information Technologies : Materials of the International scientific-practical conference : in 3 parts. Part 3. M., 2014. P. 238–242.

14. Автоматизация измерений параметров, характеризующих асимметричность в распределении масс летающих моделей / С. В. Андреев [и др.] // Рдултовские чтения – 2012 : тр. III Всерос. науч.-техн. конф. СПб., 2013. С. 119–125.

15. Ключников А. В. Настройка балансировочного стенда: к вопросу повышения точности измерения параметров асимметрии масс тела // Информационно-измерительная техника и технологии : тр. III науч.-практ. конф. Томск, 2012. С. 52–55.

16. Пат. 2499985 Российская Федерация. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции / Ключников А. В. Опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.

References

1. Pravdin V. M., Shanin A. P. *Ballistika neupravlyаемikh letatelnykh apparatov* [Ballistics of uncontrollable flying machines]. Snezhinsk, RFNC-VNIITF Publ., 1999, 496 p.
2. Mironov A. D., Vladychin G. P., Kondratov A. A. *Metody issledovaniy na letayushchikh modelyakh* [Methods of investigations on flying models]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 144 p.
3. Shchepetilnikov V. A. *Osnovy balansirovochnoi tekhniki. Tom 1* [Fundamentals of balancing technique. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 527 p.
4. Ilinykh V. V., Klyuchnikov A. V., Mihailov E. F., Timoshchenko A. G. [Technological support of quality during the manufacture of hypersonic uncontrollable flying models]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 3 (49), P. 191–196 (In Russ.).

5. Andreyev S. V., Klyuchnikov A. V., Mihailov E. F. [Prospects of application of dynamic counterbalancing method for testing of flying machine's mass-inertia asymmetry parameters]. *Trudy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniia"* [Proc. 18th Int. Technol. Conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2014, Part 1, P. 8–10 (In Russ.).
6. GOST 22061–76. *Mashiny i tekhnologicheskoe oborudovanie. Sistema klassov tochnosti balansirovki* [State Standard 22061-76. Machines and equipment. The system of rules of counterbalancing precision]. Moscow, Standartinform Publ., 1977, 139 p. (In Russ.).
7. Glazyrina L. M., Karpovitskiy M. S., Klyuchnikov A. V., Malgin A. I., Smirnov G. G., Fomin Yu. P. *Balansirovochnyi stend s vertikalnoi osyu vrashcheniya* [Balancing stand with vertical axis of gyration]. Patent RF, no. 2292533, 2007.
8. Abyshev N. A., Andreev S. V., Klyuchnikov A. V. [Features of a stand for diagnostics the mass-inertia characteristics of flying machines]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2015, No. 1, P. 39–45 (In Russ.).
9. Klyuchnikov A. V. [Test equipment for diagnostics of a mass symmetry distribution of compound rotor's details]. *Trudy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy"*. [Proc. 9th Int. Technol. Conf. "Innovations based on information and communication technologies"]. Sochi, 2012, P. 362–364 (In Russ.).
10. Klyuchnikov A. V., Lysykh A. V., Chertkov M. S. [Metrological aspects of flying machine's counterbalancing model on dynamic balancing stand]. *Vestnik Kontserna PVO "Almaz-Antey"*. 2015, No. 1, P. 43–48 (In Russ.).
11. Glazyrina L. M., Karpovitskiy M. S., Klyuchnikov A. V., Malgin A. I., Smirnov G. G., Fomin Yu. P. *Sposob balansirovki rotora* [Rotor's counterbalancing method]. Patent RF, no. 2292534, 2007.
12. Klyuchnikov A. V., Samartsev A. A., Simonova N. F. [Algorithm of functioning of computer program of the stand, which is created for investigations rotor's mass-inertia asymmetry characteristics]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadyozhnost i kachestvo"*. [Proc. 17th Int. Technol. Symp. "Reliability & Quality"]. Penza, 2012, Vol. 1, P. 319–322 (In Russ.).
13. Andreev S. V., Klyuchnikov A. V., Mikhailov E. F., Lysykh A. V. Peculiarities of measuring signals processing during detail's dynamic counterbalancing. *Proc. 3rd Int. Technol. Conf. "Innovative Information Technologies"*. Moscow, 2014, Part 3, P. 238–242.
14. Andreev S. V., Klyuchnikov A. V., Lysykh A. V., Chertkov M. S. [Automation of measuring parameters, which are showing in asymmetry in flying models' mass-inertia parameters]. *Trudy III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Rdultovskiye chteniia"* [Proc. 3rd Russ. Technol. Conf. "Rdultov readings"]. Sankt-Peterburg, 2013, P. 119–125 (In Russ.).
15. Klyuchnikov A. V. [Turning of a balancing stand: To the question about raising of precision during body's mass-inertia parameters measuring]. *Trudy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Informatsionno-izmeritelnaya tekhnika i tekhnologii"* [Proc. 3rd Russ. Technol. Conf. "Information and Measuring Technique and Technologies"]. Tomsk, 2012, P. 52–55 (In Russ.).
16. Klyuchnikov A. V. *Sposob balansirovki rotora v odnoy ploskosti korrektsii* [Method of rotor's counterbalancing in singular place for correction]. Patent RF, no. 2499985, 2007.