

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕДУРЫ УРАВНОВЕШИВАНИЯ ДЛИННОМЕРНОГО ТЕЛА В ЕДИНСТВЕННОЙ ПЛОСКОСТИ КОРРЕКЦИИ ДИСБАЛАНСОВ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ БАЛАНСИРОВОЧНОМ СТЕНДЕ

А. В. Ключников

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл., Россия
a.klyuchnikov@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* К числу способов, применяемых при проектировании и изготовлении силовой установки транспортного средства с целью повышения эффективности и надежности его функционирования, относится экспериментальный контроль параметров массоинерционной асимметрии, выполняемый на заключительном этапе общей сборки модуля. *Материалы и методы.* Рассмотрены способ и алгоритм балансировки конического тела вращения в одной плоскости коррекции дисбалансов на вертикальном динамическом балансировочном стенде. Используемая плоскость коррекции конструктивно располагается на торце тела, на значительном расстоянии от его центра масс. *Результаты.* Предложенный способ за один шаг балансировки либо обеспечивает приведение параметров массоинерционной асимметрии тела к заданным нормативам с оптимизацией по критерию достижения минимального значения одним из контролируемых параметров массоинерционной асимметрии, либо позволяет диагностировать невозможности достижения нормативов. *Выводы.* Эффективность способа подтверждается результатами численных экспериментов.

Ключевые слова: тело вращения, сборный ротор, ось симметрии, ось инерции, центр масс, дисбаланс, плоскость коррекции дисбалансов, стенд, измерение, балансировочный расчет

Для цитирования: Ключников А. В. Особенности процедуры уравнивания длинномерного тела в единственной плоскости коррекции дисбалансов на вертикальном балансировочном стенде // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 83–90. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-9

SPECIAL APPROACH FOR A LONG-LENGTH SOLID BALANCING IN THE UNIQUE PLANE OF UNBALANCES CORRECTION AT VERTICAL BALANCING STAND

A.V. Klyuchnikov

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics
named after Academician E. I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia
a.klyuchnikov@bk.ru

Abstract. *Background.* Mass-inertia asymmetry is experimentally verified at the final stage of the module assembly while designing and manufacturing both efficient and reliable power unit for a vehicle. *Materials and methods.* The work presents a procedure and an algorithm for balancing the conical solid of rotation in the only plane of unbalances correction at a vertical balancing stand. The correction plane used is designed to be located at the end of the solid far enough of its mass-center. *Results.* Proposed approach provides, in one step of balancing, either bringing parameters of mass-inertia asymmetry of the solid to design values, or diagnosing unattainability of the latter. *Conclusions.* The efficiency of the approach is proved by the numerical experimental results.

Keywords: rotation solid, precast rotor, symmetry axis, axis of inertia, mass-center, unbalance, plane of unbalances correction, stand, measurement, balance computing

For citation: Klyuchnikov A.V. Special approach for a long-length solid balancing in the unique plane of unbalances correction at vertical balancing stand. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):83–90. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-9

Введение

Одним из условий движения с заданной точностью транспортного средства (наземного, подводного, воздушного), силовая установка которого, выполненная в виде модуля, представляет собой длинномерное твердое тело вращения, а также надежного функционирования бортовой аппаратуры модуля является определение на завершающем этапе общей сборки его массоцентровочных и инерционных характеристик (МЦИХ), к которым относятся масса, координаты центра масс, моменты инерции и направления главных центральных осей инерции (ГЦОИ), и устранение параметров массоинерционной асимметрии в процессе уравнивания. К числу указанных параметров относится величина радиуса-вектора \vec{r} поперечного смещения центра масс с геометрической оси тела (являющейся также осью симметрии его наружной поверхности) и величина радиуса-угла $\vec{\gamma}$ отклонения продольной ГЦОИ относительно той же оси [1, 2]. Уравнивание выполняют на специализированных контрольно-измерительных станках (стендах) путем корректировки массы тела, например, с помощью установки балансировочных грузов в заданных плоскостях коррекции дисбалансов.

Как известно [3, 4], для балансировки твердого тела достаточно двух плоскостей коррекции. Однако для случаев, когда контролируемый модуль имеет, например, форму кругового конуса с малым полуглом раствора и единственной плоскостью коррекции, обычно расположенной вблизи торца, в процессе уравнивания после изготовления и сборки модуля приходится решать задачу не устранения массоинерционной асимметрии, а приведения параметров асимметрии к значениям, не превышающим заданных в эксплуатационной документации на модуль предельно допустимых значений.

Для определения массы тела 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. 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, 3, 5]. При этом расчет величины поперечного смещения центра масс и угол перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси контролируемой модели выполняют по специальным методикам с использованием результатов измерений МЦИХ. Следует отметить, что при использовании пооперационной технологии контроля МЦИХ, предполагающей применение отдельных центровочного и маятниковых стендов, операторы-балансировщики, как правило, при расчете параметров балансировочного груза стремятся исключить поперечное смещение центра масс с геометрической оси контролируемого объекта с последующим экспериментальным определением нового положения продольной ГЦОИ. В этом случае, если угол отклонения ГЦОИ от геометрической оси окажется больше предельно допустимого значения, то производится следующая итерация с расчетом балансировочного груза и определением положения ГЦОИ. Однако низкая точность стендов обоих перечисленных типов и малая их производительность являются значимыми факторами, сдерживающими повышение точности определения и обеспечения параметров массоинерционной асимметрии, а также ведущими к росту числа расчетно-экспериментальных итераций и длительности процедуры уравнивания. В работе [6] отмечается, что длительность процедуры уравнивания с многократной переустановкой объекта контроля на центровочном и маятниковом стендах может составлять от нескольких рабочих смен до нескольких суток.

Однако в последнее время для определения параметров массоинерционной асимметрии тел вращения наметилась тенденция к использованию методов и средств динамической балансировки, что обусловлено высокими характеристиками точности динамических балансировочных станков (стендов) [2, 3, 6–8]. Применение метода динамической балансировки позволяет значительно повысить точность и сократить длительность балансировки, причем не только за счет высокой производительности и точности балансировочных стендов, но также за счет сокращения числа шагов балансировки (расчетно-экспериментальных итераций). Использование в балансировочном расчете коэффициентов взаимовлияния плоскостей коррекции, экспериментально определяемых на стадии настройки стенда, позволяет не только сократить число шагов балансировки до одного шага, но и оптимизировать параметры массоинерционной асимметрии в процессе их приведения к заданным нормативам.

В работах [2, 9] приведено описание низкочастотного динамического балансирующего стенда с вертикальной осью вращения, две жесткие опоры которого выполнены в виде соосных конических газостатических подшипников. Стенд спроектирован и изготовлен для прецизионной балансировки длинномерных тонкостенных модулей конической формы, обладающих единственной (штатной) плоскостью коррекции, расположенной вблизи торца, на значительном расстоянии от центра масс модуля. Балансировка модуля проводится в составе сборного ротора с использованием специализированного технологического переходника, выполненного в виде усеченного конуса. Сборный ротор образуется в результате установки контролируемого модуля вертикально, торцом вверх внутри переходника. Переходник обеспечивает фиксацию модуля, физическую защиту его наружной поверхности модуля при вращении сборного модуля в опорах и материализацию второй (нижней) плоскости коррекции. При этом в качестве верхней (первой) плоскости коррекции используется штатная плоскость коррекции контролируемого модуля. В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий из заводской пневмосети низкого давления (0,6 МПа).

Уравновешивание тела

В работах [10, 11] рассмотрена математическая модель и способ балансировки в динамическом режиме длинномерного тела (модуля) конической формы в составе сборного ротора. Перед проведением балансирующего эксперимента ряд параметров контролируемого модуля (массу, продольное положение центра масс, моменты инерции) определяют с использованием другого контрольно-измерительного оборудования и других средств измерений. Измерения амплитуд и фаз вибраций опор выполняются с помощью двух пьезоэлектрических датчиков силы, установленных в упругих элементах соответственно верхней и нижней опоры, и оптоэлектрического датчика-кифазора, который используется как в качестве отметчика фазы дисбалансов, так и для измерений частоты вращения ротора. В ходе балансирующего эксперимента выполняют серию измерений вибраций опор как для сборного ротора, находящегося в исходном состоянии, так и после установки пробных грузов в плоскостях коррекции. В каждом пуске измерения выполняют на постоянной рабочей частоте вращения (~2 Гц) в процессе медленного самопроизвольного торможения ротора после его предварительного разгона до некоторой завышенной (на 15–20 %) частоты вращения. С целью выделения дисбалансов модуля из суммарных дисбалансов сборного ротора, измерения параметров вибрации опор в исходном состоянии проводят в двух фиксированных угловых положениях контролируемого модуля относительно технологического переходника, отличающихся друг от друга на 180°, с последующим усреднением результатов измерений [12–14].

По результатам измерений вибраций опор определяют балансирующие чувствительности измерительной системы стенда по амплитудам и углам дисбалансов и коэффициенты взаимовлияния плоскостей коррекции, рассчитывают векторные параметры (значения и углы) начальных дисбалансов модуля \vec{B} и \vec{H} , действующих в верхней и нижней плоскости коррекции [15–18]. Далее рассчитывают параметры начальной массоинерционной асимметрии модуля по формулам [10, 13]:

$$\bar{\rho} = \frac{\vec{B} + \vec{H}}{M}; \quad (1)$$

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(\vec{B}x_B - \vec{H}x_H)}{I_s - I_a}, \quad (2)$$

где M – масса модуля; I_s и I_a – соответственно экваториальный и аксиальный моменты инерции модуля; x_B и x_H – расстояния от центра масс модуля до верхней и нижней плоскости коррекции в соответствии с рис. 1.

Затем в случае, если хотя бы один из указанных параметров превышает предельно допустимое значение, проводят балансирующий расчет с определением массы и места установки балансирующего груза, прикрепление которого к штатной плоскости коррекции позволит привести значения обоих контролируемых параметров массоинерционной асимметрии модуля к заданным нормативам [13, 19].

Оптимизация может быть выполнена для конкретного уравниваемого модуля по одному из двух критериев: по критерию достижения минимальной величины поперечного смещения центра масс с геометрической оси модуля либо по критерию достижения минимального угла отклонения продольной ГЦОИ от той же геометрической оси.

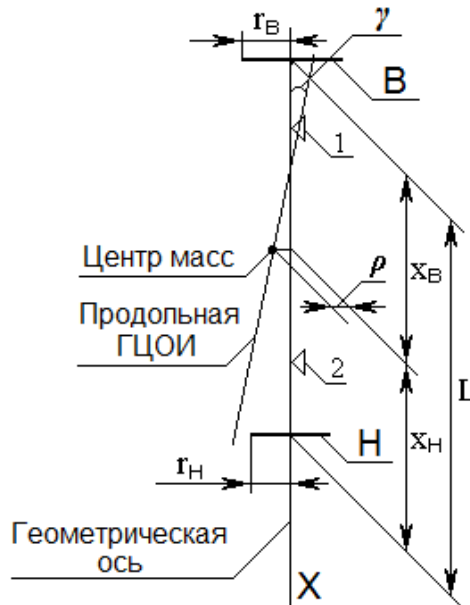


Рис. 1. Расчетная схема модуля:

1 – верхняя опора; 2 – нижняя опора; В – верхняя плоскость коррекции; Н – нижняя плоскость коррекции

Алгоритм приведения параметров массоинерционной асимметрии контролируемого модуля к значениям, не превышающим заданных в эксплуатационной документации на модуль предельно допустимых значений с оптимизацией, имеет итерационный характер. С использованием математической модели балансировки [11] определяют значения и угловые положения векторов начальных дисбалансов \vec{B} и \vec{H} , действующих в верхней и нижней плоскостях коррекции. Затем расчетным путем моделируют перевод модуля в состояние квазистатической неуравновешенности, когда геометрическая ось и продольная ГЦОИ пересекаются, но не в центре масс. Для этого моделируют воздействие компенсирующего дисбаланса $\vec{B}_{\text{КОМП}}$ в штатной плоскости коррекции, исключая (компенсирующего) действие начального дисбаланса в этой плоскости. Перевод модуля в состояние квазистатической неуравновешенности обуславливает появление в нижней плоскости коррекции дисбаланса $\vec{H}_{\text{КОМП}}$ как сумма дисбаланса \vec{H} и дисбаланса $\vec{H}_{\text{ДП}}$, появляющегося в результате влияния верхней плоскости коррекции на нижнюю плоскость коррекции, и позволяет в дальнейших расчетах оперировать исключительно коллинеарными векторами дисбалансов, моделируемыми в противоположных плоскостях коррекции, что значительно упрощает проведение дальнейших расчетов. Далее в зависимости от заданного критерия оптимизации моделируют появление корректирующего дисбаланса $\vec{B}_{\text{КОРР}}$ в штатной плоскости коррекции:

– в случае оптимизации по критерию достижения минимальной величины поперечного смещения центра масс моделируемый корректирующий дисбаланс $\vec{B}_{\text{КОРР}}$, в соответствии с рис. 2 направленный противоположно дисбалансу $\vec{H}_{\text{КОМП}}$, обеспечивает приведение центра масс на геометрическую ось. Далее рассчитывают параметры дисбаланса $\vec{H}_{\text{КОРР}}$, возникающего в нижней плоскости коррекции как ответ на появление дисбаланса $\vec{B}_{\text{КОРР}}$, и рассчитывают предполагаемое значение угла отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси модуля. Если это значение выходит за пределы заданного предельно допустимого значения, то рассчитывают предполагаемое (одновременно являющееся минимально возможным для данного варианта компоновки контролируемого модуля) значение поперечного смещения центра масс, задавая угол перекоса продольной ГЦОИ равным предельно допустимому значению. Если в результате расчета предполагаемое минимально возможное значение поперечного смещения центра масс превысит предельно допустимое значение, т.е. удовлетворительное балансировочное решение не будет найдено, то процедуру уравнивания прекращают, а контролируемый модуль отправляют изготовителю на перекомпоновку. Если же удовлетворительное балансировочное решение окажется найдено, то рассчитывают параметры нового корректирующего дисбаланса $\vec{B}_{\text{КОРР}|\gamma=\gamma_{\text{дон}}}$, появление которого в штат-

ной плоскости коррекции обеспечит рассчитанные значения параметров массоинерционной асимметрии контролируемого модуля. После чего определяют балансировочный вектор $\vec{V}_{\text{БАЛ}}$ или $\vec{V}_{\text{БАЛ}|\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$ соответственно как сумму дисбалансов $\vec{V}_{\text{КОМП}}$ и $\vec{V}_{\text{КОРР}}$ или дисбалансов $\vec{V}_{\text{КОМП}}$ и $\vec{V}_{\text{КОРР}|\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$;

– в случае оптимизации по критерию достижения минимального угла отклонения продольной ГЦОИ моделируемый корректирующий дисбаланс $\vec{V}_{\text{КОРР}}$ в соответствии с рис. 3 обеспечивает приведение продольной ГЦОИ в положение, параллельное геометрической оси. Далее рассчитывают параметры дисбаланса $\vec{H}_{\text{КОРР}}$, возникающего в нижней плоскости коррекции как ответ на появление дисбаланса $\vec{V}_{\text{КОРР}}$, и рассчитывают предполагаемую величину поперечного смещения центра масс с геометрической оси модуля. Если это значение выходит за пределы заданного предельно допустимого значения, то рассчитывают предполагаемое (одновременно являющееся минимально возможным для данного варианта компоновки контролируемого модуля) значение угла перекоса продольной ГЦОИ, задавая величину смещения центра масс равной предельно допустимому значению. Если в результате расчета предполагаемое минимально возможное значение угла перекоса продольной ГЦОИ превысит предельно допустимое значение, т.е. удовлетворительное балансировочное решение будет не найдено, то процедуру уравнивания прекращают, а контролируемый модуль отправляют на перекомпоновку изготовителю. Если же удовлетворительное балансировочное решение окажется найдено, то рассчитывают параметры нового корректирующего дисбаланса $\vec{V}_{\text{КОРР}|\rho=\rho_{\text{доп}}}$, появление которого в штатной плоскости коррекции обеспечит рассчитанные значения параметров массоинерционной асимметрии контролируемого модуля. После чего определяют балансировочный вектор $\vec{V}_{\text{БАЛ}}$ или $\vec{V}_{\text{БАЛ}|\rho=\rho_{\text{доп}}}$ соответственно как сумму дисбалансов $\vec{V}_{\text{КОМП}}$ и $\vec{V}_{\text{КОРР}}$ или дисбалансов $\vec{V}_{\text{КОМП}}$ и $\vec{V}_{\text{КОРР}|\rho=\rho_{\text{доп}}}$.

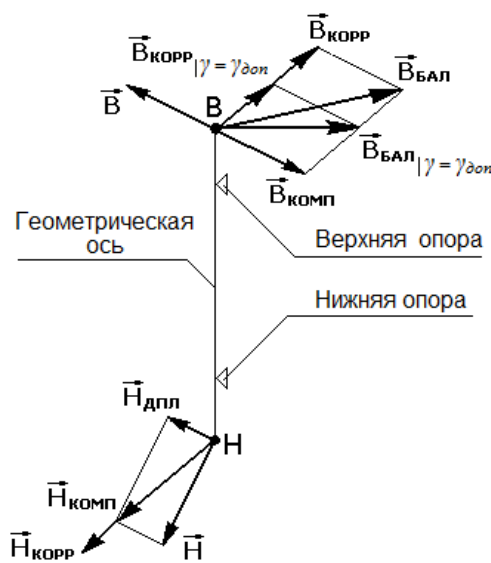


Рис. 2. Уравнивание с минимизацией величины смещения центра масс

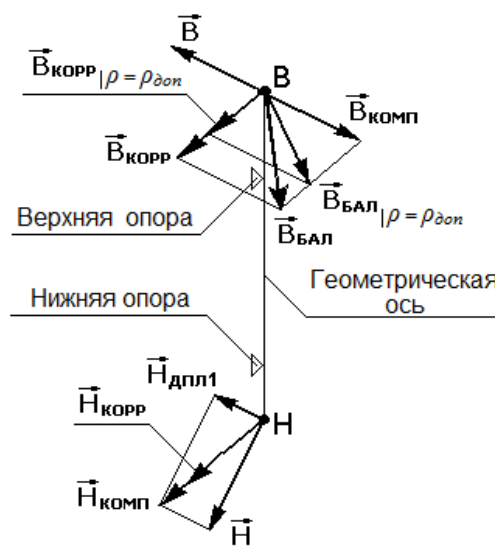


Рис. 3. Уравнивание с минимизацией угла отклонения продольной ГЦОИ

Балансировочный расчет заканчивается определением массы балансировочного груза, выполняемым по законам статики. При этом угловое положение балансировочного груза совпадает с угловым положением балансировочного дисбаланса. После прикрепления балансировочного груза к штатной плоскости коррекции проводят контрольный цикл измерений, определяют значения остаточных дисбалансов и с использованием выражений (1) и (2) остаточных параметров массоинерционной асимметрии модуля.

Заключение

Рассмотренные способы и алгоритмы балансировки тел вращения, выполненных в виде конического модуля, за один шаг балансировки либо подтверждают возможность приведения параметров массоинерционной асимметрии к значениям, не превышающим предельно допустимых значений,

либо позволяют доказать невозможность достижения удовлетворительного балансировочного решения для данной конструкции модуля. Балансировка выполняется в единственной плоскости коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс модуля. Перевод модуля в состояние квазистатической неуравновешенности при моделировании параметров массоинерционной асимметрии значительно упрощает проведение балансировочного расчета. Исключение необходимости выполнения дополнительных шагов балансировки при уравнивании тела позволяет сократить общее время балансировочного эксперимента до одной рабочей смены.

В процессе балансировки возможна оптимизация по критерию достижения минимального значения одного из контролируемых параметров массоинерционной асимметрии. Способы оптимизации запатентованы [20, 21]. Приведенные в работах [22, 23] результаты численного моделирования подтверждают высокую точность и эффективность способов. Точность приведения контролируемых параметров асимметрии к заданным нормативам обеспечивается точностью измерений сигналов дисбалансов [18, 24, 25] и точностью настройки измерительной системы стенда на объект контроля в процессе выполнения балансировочного эксперимента.

Список литературы

1. Правдин В. М., Шанин А. П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. Снежинск : РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999. 496 с.
2. Ильиных В. В., Ключников А. В., Лысых А. В. [и др.]. Технология обеспечения качества при изготовлении высокоскоростных неуправляемых летающих моделей // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 3. С. 191–196.
3. Основы балансировочной техники. Т.1. Уравнивание жестких роторов и механизмов / под ред. В. А. Щепетильникова. М. : Машиностроение, 1975. 527 с.
4. Гернет М. М., Ратобыльский В. Ф. Определение моментов инерции. М. : Машиностроение, 1969. 249 с.
5. Миронов А. Д., Владычин Г. П., Кондратов А. А. Методы исследований на летающих моделях. М. : Машиностроение, 1988. 144 с.
6. Ключников А. В., Васильев М. А., Патокина Н. Е. [и др.]. Конструкции и пути совершенствования систем контроля характеристик геометрии масс летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 105–114.
7. Ключников А. В., Абышев Н. А. Обзор российских патентов по направлению экспериментального определения массовых и инерционных характеристик беспилотных летательных аппаратов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 149–155.
8. Абышев Н. А., Ключников А. В. К вопросу оптимизации выбора стендового оборудования, используемого для уравнивания летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2020. № 3. С. 77–85.
9. Андреев С. В., Ключников А. В., Михайлов Е. Ф. Перспективы применения метода динамической балансировки для определения параметров асимметрии масс летательного аппарата // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Красноярск, 1–10 ноября 2014 г.) : в 2 ч. Красноярск : СибГАУ, 2014. Ч. 1. С. 8–10.
10. Ключников А. В., Сидоров А. В. Применение метода динамической балансировки для прецизионного контроля параметров массоинерционной асимметрии роторных объектов // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2011. № 3. С. 48–53.
11. Ключников А. В. Уточненная математическая модель оценки и обеспечения параметров массоинерционной асимметрии длинномерного роторного модуля // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 224–227.
12. Патент № 2292534 РФ МПК G 01 M 1/04. Способ балансировки ротора / Л. М. Глазырина, М. С. Карповицкий, А. В. Ключников, А. И. Мальгин, Г. Г. Смирнов, Ю. П. Фомин ; заявл. 27.04.2004 ; опубл. 27.01.2007 ; Бюл. № 3.
13. Абышев Н. А., Ключников А. В., Михайлов Е. Ф., Чертков М. С. Стенд для прецизионной бесконтактной балансировки конических роторов в динамическом режиме // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 2. С. 234–236.
14. Ключников А. В. Способ устранения влияния технологической оснастки на результаты измерений в процессе динамической балансировки летательного аппарата // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. (г. Красноярск, 1–10 ноября 2015 г.) : в 2 ч. Красноярск : СибГАУ, 2015. Ч. 1. С. 21–23.
15. Андреев С. В., Ключников А. В., Лысых А. В., Михайлов Е. Ф. Калибровочные операции в процессе модульной балансировки детали на ненастроенном динамическом балансировочном стенде // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 2. С. 129–131.
16. Ключников А. В. Методическое обеспечение процесса индивидуальной настройки динамического балансировочного стенда на объект контроля // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Сочи, 1–10 октября 2017 г.). М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2017. С. 382–386.

17. Патент 2453818 РФ МПК G 01 M 01/22. Способ настройки балансировочного стенда для определения параметров массоинерционной асимметрии роторов / А. В. Ключников ; заявл. 11.01.2011 ; опубл. 20.06.2012 ; Бюл. № 17.
18. Абышев Н. А., Ключников А. В., Шагмуратов М. Д. Компенсация погрешностей дисбалансов, вызванных фазовыми сдвигами измерительных сигналов балансировочного стенда // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 7. С. 15–18.
19. Ключников А. В., Шагмуратов М. Д. Принципы построения и структура системы диагностики асимметричности в распределении масс летательного аппарата // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 141–143.
20. Патент 2499985 РФ МПК G 01 M 11/16. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции / А. В. Ключников ; заявл. 11.04.2012 ; опубл. 27.11.2013 ; Бюл. № 33.
21. Патент 2694142 РФ МПК G 01 M 11/16. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции / А. В. Ключников ; заявл. 27.09.2018 ; опубл. 09.07.2019 ; Бюл. № 19.
22. Ключников А. В. Численный алгоритм оптимизации процесса уравнивания конической летающей модели на динамическом балансировочном стенде // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2016. Т. 17, № 2. С. 309–317.
23. Klyuchnikov A. V. Elaboration and testing of the algorithm, which ensures an achievement of minimal deviation angle of flying model main centroidal axis of inertia during it counterbalancing process in a sole correction flatness // Siberian Journal of Science and Technology. 2020. Vol. 21, № 1. P. 70–77.
24. Andreev S. V., Klyuchnikov A. V., Mikhailov E. F., Lysykh A. V. Peculiarities of measuring signals processing during detail's dynamic counterbalancing // Innovative Information Technologies : Materials of the III International scientific-practical conference (Prague, April, 21–25, 2014) : in 4 parts. Moscow : HSE, 2014. Part 3. P. 238–242.
25. Ключников А. В. Обработка измерительных сигналов в процессе динамической балансировки летательного аппарата // Вестник воздушно-космической обороны. 2019. № 1. С. 86–92.

References

1. Pravdin V.M., Shanin A.P. *Ballistika neupravlyaemykh letatel'nykh apparatov = Ballistics of uncontrolled aircraft*. Snezhinsk: RFYaTs-VNIITF, 1999:496. (In Russ.)
2. P'inykh V.V., Klyuchnikov A.V., Lysykh A.V. [et al.]. Quality assurance technology in the manufacture of high-speed uncontrolled flying models. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Aerospace University*. 2013;(3):191–196. (In Russ.)
3. Shchepetil'nikov V.A. (ed.). *Osnovy balansirovochnoy tekhniki. T.I. Uravnoveshivanie zhestkikh rotorov i mekhanizmov = Fundamentals of balancing technology. Vol. 1. Balancing rigid rotors and mechanisms*. Moscow: Mashinostroenie, 1975:527. (In Russ.)
4. Gernet M.M., Ratobyl'skiy V.F. *Opreделение momentov inertsii = Determination of moments of inertia*. Moscow: Mashinostroenie, 1969:249. (In Russ.)
5. Mironov A.D., Vladychin G.P., Kondratov A.A. *Metody issledovaniy na letayushchikh modelyakh = Research methods on flying models*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:144. (In Russ.)
6. Klyuchnikov A.V., Vasil'ev M.A., Patokina N.E. [et al.]. Designs and ways of improving control systems for the characteristics of the geometry of the masses of aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(3):105–114. (In Russ.)
7. Klyuchnikov A.V., Aбышев N.A. Review of Russian patents in the direction of experimental determination of mass-centering and inertial characteristics of unmanned aerial vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:149–155. (In Russ.)
8. Aбышев N.A., Klyuchnikov A.V. On the issue of optimizing the choice of bench equipment used for balancing aircraft. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey» = Bulletin of the Concern of East Kazakhstan Region "Almaz-Antey"*. 2020;(3):77–85. (In Russ.)
9. Andreev S.V., Klyuchnikov A.V., Mikhaylov E.F. Prospects for using the dynamic balancing method to determine the parameters of the mass asymmetry of an aircraft. *Reshetnevskie chteniya: materialy XVIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Krasnoyarsk, 1–10 noyabrya 2014 g.): v 2 ch. = Reshetnev readings : materials of the XVIII International Scientific and Technical conf. (Krasnoyarsk, November 1-10, 2014) : in 2 parts*. Krasnoyarsk: SibGAU, 2014;(pt. 1):8–10. (In Russ.)
10. Klyuchnikov A.V., Sidorov A.V. Application of the dynamic balancing method for precision control of mass-inertia asymmetry parameters of rotary objects. *Pribery i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika = Instruments and systems. Management. Control. Diagnostics*. 2011;(3):48–53. (In Russ.)
11. Klyuchnikov A.V. A refined mathematical model for estimating and providing parameters of mass-inertia asymmetry of a long-dimensional rotary module. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;1:224–227. (In Russ.)
12. Patent № 2292534 Russian Federation МПК G 01 M 1/04. Rotor balancing method. L.M. Glazyrina, M.S. Karpovitskiy, A.V. Klyuchnikov, A.I. Mal'gin, G.G. Smirnov, Yu.P. Fomin; appl. 27.04.2004; publ. 27.01.2007; bull. № 3. (In Russ.)

13. Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V., Mikhaylov E.F., Chertkov M.S. Stand for precision contactless balancing of conical rotors in dynamic mode. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and quality*. 2014;2:234–236. (In Russ.)
14. Klyuchnikov A.V. A way to eliminate the influence of technological equipment on the measurement results in the process of dynamic balancing of an aircraft. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Krasnoyarsk, 1–10 noyabrya 2015 g.): v 2 ch. = Reshetnev readings : materials of the XIX Inter-Dunar. scientific and technical. conf. (Krasnoyarsk, November 1-10, 2015) : in 2 parts*. Krasnoyarsk: SibGAU, 2015;(pt. 1):21–23. (In Russ.)
15. Andreev S.V., Klyuchnikov A.V., Lysykh A.V., Mikhaylov E.F. Calibration operations in the process of modular balancing of a part on an unconfigured dynamic balancing stand. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013;2:129–131. (In Russ.)
16. Klyuchnikov A.V. Methodological support of the process of individual adjustment of the dynamic balancing stand to the object of control. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: materialy XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Sochi, 1–10 oktyabrya 2017 g.) = Innovative, information and communication technologies : materials of the XIV International Scientific and Practical Conference (Sochi, October 1-10, 2017)*. Moscow: Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA im. prof. Zhukovskogo, 2017:382–386. (In Russ.)
17. Patent 2453818 Russian Federation MPK G 01 M 01/22. A method for setting up a balancing stand to determine the parameters of mass-inertia asymmetry of rotors. A.V. Klyuchnikov; appl. 11.01.2011; publ. 20.06.2012; bull. № 17. (In Russ.)
18. Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V., Shagimuratov M.D. Compensation of errors of imbalances caused by phase shifts of measuring signals of the balancing stand. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2019;(7):15–18. (In Russ.)
19. Klyuchnikov A.V., Shagimuratov M.D. Principles of construction and structure of the system of diagnostics of asymmetry in the distribution of aircraft masses. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2015;(2):141–143. (In Russ.)
20. Patent 2499985 Russian Federation MPK G 01 M 11/16. Method of balancing the rotor in one plane of correction. A.V. Klyuchnikov; appl. 11.04.2012; publ. 27.11.2013; bull. № 33. (In Russ.)
21. Patent 2694142 Russian Federation MPK G 01 M 11/16. Method of balancing the rotor in one plane of correction. A.V. Klyuchnikov; appl. 27.09.2018; publ. 09.07.2019; bull. № 19. (In Russ.)
22. Klyuchnikov A.V. Numerical algorithm optimization of the process of balancing a conical flying model on a dynamic balancing stand. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Aerospace University*. 2016;17(2):309–317. (In Russ.)
23. Klyuchnikov A.V. Elaboration and testing of the algorithm, which ensures an achievement of minimal deviation angle of flying model main centroidal axis of inertia during it counterbalancing process in a sole correction flatness. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020;21(1):70–77.
24. Andreev S.V., Klyuchnikov A.V., Mikhailov E.F., Lysykh A.V. Peculiarities of measuring signals processing during detail's dynamic counterbalancing. *Innovative Information Technologies: Materials of the III International scientific-practical conference (Prague, April, 21–25, 2014): in 4 parts*. Moscow: HSE, 2014;(pt. 3):238–242.
25. Klyuchnikov A.V. Processing of measuring signals in the process of dynamic balancing of the aircraft. *Vestnik vozdušno-kosmicheskoy oborony = Bulletin of Aerospace Defense*. 2019;(1):86–92. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Васильевич Ключников

кандидат технических наук, главный специалист,
 Российский федеральный ядерный центр –
 Всероссийский научно-исследовательский институт
 технической физики имени академика Е. И. Забабахина
 (Россия, Челябинская обл., г. Снежинск,
 ул. Васильева, 13)
 E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

Aleksandr V. Klyuchnikov

Candidate of technical sciences, chief specialist,
 Russian Federal Nuclear Centre –
 All-Russia Research Institute of Technical Physics
 named after Academician E. I. Zababakhin
 (13 Vasilyeva street, Snezhinsk,
 Chelyabinsk region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
 The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 09.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2021

Принята к публикации/Accepted 16.11.2021