



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-77-85>

УДК 621.828

К вопросу оптимизации выбора стендового оборудования, используемого для уравнивания летательных аппаратов

Н. А. Абышев, А. В. Ключников

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Челябинская область, Российская Федерация

Проанализированы аспекты, касающиеся оптимизации выбора контрольно-измерительных стендов, предназначенных для определения массо-центровочных и инерционных характеристик и балансировки летательных аппаратов на заключительном этапе их общей сборки. Рассмотрены особенности конструкции стендов, реализующих методы унифилярного и астатического маятников, обеспечивающие определение координат центра масс и моментов инерции при однократной установке аппарата на измерительное устройство, и метод динамической балансировки, обеспечивающий прецизионное определение параметров массо-инерционной асимметрии аппаратов. Приведены характеристики точности стендов.

Ключевые слова: центр масс, момент инерции, ось инерции, массо-инерционная асимметрия, контрольно-измерительный стенд, метод измерений, погрешности измерений, продолжительность эксперимента

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-77-85>

For citation: Abyshev N. A., Klyuchnikov A. V. Optimizing the selection of test-bench equipment for aircraft balancing // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2020. No. 3. P. 77–85. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-77-85>

Поступила 13.07.2020 Отрецензирована 30.07.2020 Одобрена 13.08.2020 Опубликована 14.10.2020

Разработка и эксплуатация современных беспилотных летательных аппаратов (ЛА) требует точного знания их массо-центровочных и инерционных характеристик (МЦИХ) – массы, положения центра масс, моментов инерции. Учитывая невысокую точность теоретического расчета (10–20%), который, как правило, проводится на этапе проектирования, а также неизбежные погрешности в величинах масс и пространственном расположении компонентов внутри корпуса ЛА полезных грузов, датчиковой и вычислительной аппаратуры, наиболее достоверным способом получения сведений о МЦИХ, характеризующих статическую и моментную неуравновешенность,

является их экспериментальное или расчетно-экспериментальное определение на заключительном этапе общей сборки аппарата, выполняемое с использованием стендового оборудования. К аппаратам, стабилизируемым вращением вокруг оси симметрии корпуса, предъявляются требования по совмещению главных осей инерции с геометрическими осями. Балансировку с целью устранения поперечного смещения центра масс с геометрической оси и перекоса продольной главной центральной оси инерции (ГЦОИ) относительно геометрической оси, неизбежно возникающих в процессе сборки и изготовления ЛА, выполняют путем корректировки массы аппарата с помощью балансировочных грузов, прикрепляемых к плоскости коррекции. На указанные



параметры массо-инерционной асимметрии устанавливаются допуски, значения которых определяются при проектировании ЛА.

Зачастую массу ЛА определяют путем стандартного взвешивания на весах с точностью до 0,01–0,03 % от массы аппарата. Остальные МЦИХ и требования к ним достаточно специфичны, аналогов в других отраслях промышленности не имеют, и их определение обеспечивается специализированными контрольно-измерительными стендами (обычно применяется от 2 до 3 стендов на аппарат или группу аппаратов). Для определения координат центра масс, как правило, применяют стенды, реализующие весовые методы, а для определения моментов инерции – стенды, работающие по принципу опрокинутого унифиляра или физического маятника [1–3]. Стенды обоих указанных типов обычно характеризуются высокой трудоемкостью и низкой производительностью, а также требуют больших трудовых и материальных затрат на проведение периодических проверок и техническое обслуживание. Кроме того, невысокая инструментальная точность стендов обоих типов требует выполнения многократных измерений искомых параметров (с последующим усреднением результатов измерений) в процессе балансировки, что дополнительно удлиняет время проведения балансировочного эксперимента, снижает точность измерений. Также при статической балансировке опасение, что эффект от установки корректирующей массы в плоскости коррекции, которая не проходит через центр масс изделия, приведет к увеличению его моментной неуравновешенности, зачастую заставляет балансировщиков принимать половинчатые решения, увеличивая при этом количество шагов балансировки, что, в свою очередь, приводит к кратному увеличению объемов выполняемых измерений. В результате последовательное уравнивание лишь одного аппарата на стендах нередко может продолжаться до 10 рабочих смен и более. При этом достаточно сложной инженерной задачей является необходимость поддержания неизменных условий окружающей среды в течение всего времени проведения балансировочного эксперимен-

та. Дополнительные методические погрешности вносит вынужденная многократная переустановка объекта контроля с одного стенда на другой. Указанные обстоятельства делают актуальной задачу создания стендового оборудования, обеспечивающего сокращение времени и повышение точности определения МЦИХ и уравнивания ЛА.

Использование универсальных контрольно-измерительных стендов, обеспечивающих возможность определять весь комплекс МЦИХ с одной установки контролируемого аппарата на измерительное устройство, позволяет исключить появление методических погрешностей, связанных с многократными переустановками аппарата на различных стендах в процессе выполнения измерений, и сократить продолжительность балансировочного эксперимента [2]. При необходимости существенного повышения точности определения отдельных МЦИХ, например параметров массо-инерционной асимметрии, номинальные значения которых близки к нулю, и, соответственно, повышения точности балансировки, в последнее время намечается тенденция к использованию динамических балансировочных стендов. Балансировочные стенды позволяют измерить параметры массо-инерционной асимметрии непосредственно относительно геометрической оси ЛА, если с высокой точностью совместить эту ось с осью вращения, имеющейся на балансировочном стенде. Также весьма привлекательным применением балансировочных стендов для целей прецизионной балансировки ЛА является высокая производительность (время одного пуска обычно не превышает нескольких минут, а всего измерительного цикла – полутора-двух часов) и возможность определять и корректировать сразу оба контролируемых параметра массо-инерционной асимметрии, сокращая время балансировки.

В качестве примера универсального стенда рассмотрим стенд, спроектированный и изготовленный для определения всего комплекса МЦИХ ЛА конической формы с одной установки аппарата на измерительном столе и реализующий метод опрокинутого унифилярного подвеса [4]. Схема стенда показана на рисунке 1.

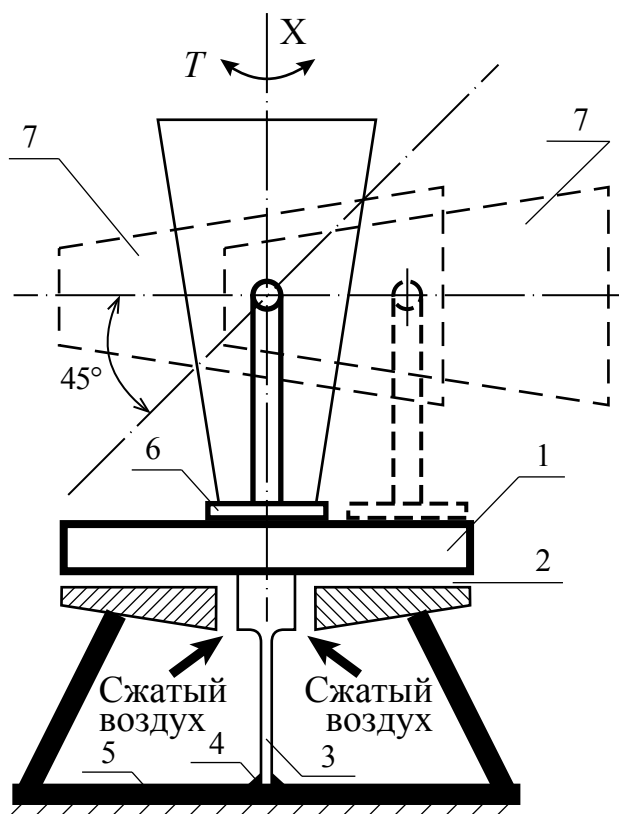


Рис. 1. Схема унифицированного стенда с возможностью горизонтального смещения объекта контроля: 1 – стол; 2 – газовые подшипники; 3 – торсион; 4 – мембрана; 5 – корпус; 6 – каретка; 7 – позиционер

Измерительный стол 1 располагается горизонтально, опирается на газостатические подшипники 2 и жестко соединен с одним концом торсиона 3, другой конец которого закреплен в центре мембраны 4, установленной в основании корпуса 5 стенда. Контролируемый ЛА (на рисунке 1 не показан) устанавливаются и фиксируются внутри позиционера 7, закрепленного на каретке 6, имеющей возможность фиксированного смещения в горизонтальной плоскости. Позиционер обеспечивает перевод объекта контроля в заданные пространственно-угловые положения. Каретка, размещенная на измерительном столе, имеет возможность перемещаться в известные фиксированные положения на измерительном столе. В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий в газостатические подшипники из заводской пневмосети низкого давления (до 0,6 МПа).

Искомые значения МЦИХ ЛА определяют по результатам измерений периодов T

малых крутильных колебаний, совершаемых установленным на измерительном столе аппаратом вокруг вертикальной оси, образованной упругим торсионом, в шести пространственно-угловых положениях: при вертикальном, горизонтальном и расположенном под углом 45 градусов к горизонту положении геометрической оси ЛА. А также измерения выполняют при расположенной горизонтально геометрической оси, но со смещением аппарата в горизонтальном направлении на заданное расстояние относительно оси крутильных колебаний. Расчет величины поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси аппарата проводят по специальным методикам с использованием измеренных значений массы, координат центра масс и моментов инерции.

Однако на практике невысокая инструментальная точность унифицированного стенда, наличие нестационарных элементов (таких как каретка, позиционер) в конструкции технологической оснастки, требует для повышения точности определения МЦИХ выполнения многократных измерений с последующим усреднением результатов. Это в значительной степени снижает преимущества метода, достигаемые за счет большей производительности стенда, по сравнению с последовательной методикой измерений МЦИХ, реализуемой на отдельных центровочном стенде и стенде определения моментов инерции. Например, достигнутая точность определения поперечных координат центра масс и угла перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси ЛА составила соответственно 0,05 мм и 3 угловые минуты [4]. Это сопоставимо с результатами определения тех же параметров массо-инерционной асимметрии при последовательном использовании отдельных центровочного стенда и стенда определения моментов инерции. Тем не менее использование стенда позволило до 3–4 рабочих смен сократить продолжительность балансирующего эксперимента за счет исключения операций по переустановке ЛА. В то же время необходимость перевода контролируемого объекта в вертикальное положение в процессе

выполнения измерений накладывает ограничения на высоту потолков производственных помещений, в которых проводится балансировка, а наличие позиционера, обеспечивающего установку и закрепление аппарата в измерительном устройстве стенда и его перевод в требуемые пространственно-угловые положения, ограничивает возможные изменения габаритов и формы корпуса ЛА.

Для определения координат центра масс и моментов инерции ЛА, в том числе длинномерных, в том числе с профилированным корпусом, спроектирован и изготовлен контрольно-измерительный стенд, реализующий метод астатического маятника [5–7]. Стенд обеспечивает определение всего комплекса МЦИХ с одной установки контролируемого аппарата на измерительном столе.

Механическая установка стенда в соответствии с рисунком 2 выполнена в виде качающейся платформы 1, на которой установлен позиционер 5 с двумя ложементами 6 и 7 для закрепления контролируемого аппарата 8. Колебания платформы выполняются в вертикальной плоскости и обеспечиваются при помощи рычага 3 и упругого элемента – пружины 4.

Искомые значения МЦИХ ЛА (кроме продольной координаты центра масс) определяют по результатам измерений периодов T малых маятниковых колебаний, совершаемых при воздействии упругой пружины установленным на измерительном столе аппаратом вокруг горизонтальной оси. Измерения выполняются при расположении геометрической оси ЛА относительно оси качания под углом 0° , 45° и 90° . Изменение пространственно-углового положения аппарата выполняют с помощью позиционера. Определение продольной координаты центра масс основано на принципе статического уравнивания, которое выполняют с помощью пробных грузов известной массы, прикрепляемых к платформе на известном расстоянии от оси качания [7]. Расчет величины поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси аппарата проводят по специальным методикам с использованием измеренных МЦИХ.

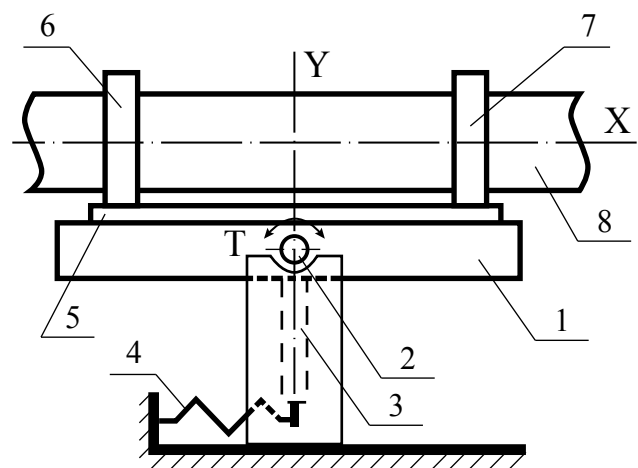


Рис. 2. Схема механической установки стенда: 1 – платформа; 2 – шарнир; 3 – рычаг; 4 – пружина; 5 – позиционер; 6 и 7 – ложементы; 8 – объект контроля

Оснащение стенда набором сменных ложементов дает возможность установки и контроля МЦИХ ЛА, имеющих как цилиндрическую, так и коническую форму корпуса. Стенд обеспечивает определение координат центра масс и моментов инерции ЛА и выполняет эту работу исключительно при горизонтальном положении аппарата, что снимает требования к высоте потолков производственного помещения, в котором проводятся работы. Достигнутые при выполнении измерений погрешности не превысили 0,1 мм при определении поперечных координат центра масс и 12 угловых минут [7]. При этом до 1,5–2 рабочих смен сократилась продолжительность процедуры уравнивания ЛА. Простота конструкции механической установки делает несложным ее масштабирование и соответствующее (при необходимости – значительное) увеличение грузоподъемности.

В качестве примера стенда, относящегося ко второму направлению оптимизации, может быть рассмотрен динамический балансировочный стенд с вертикальной осью вращения и жесткими опорами, выполненными в виде конических газостатических подшипников, спроектированный и изготовленный для прецизионного определения параметров массо-инерционной асимметрии и балансировки конических ЛА [8, 9]. Схема стенда приведена на рисунке 3.

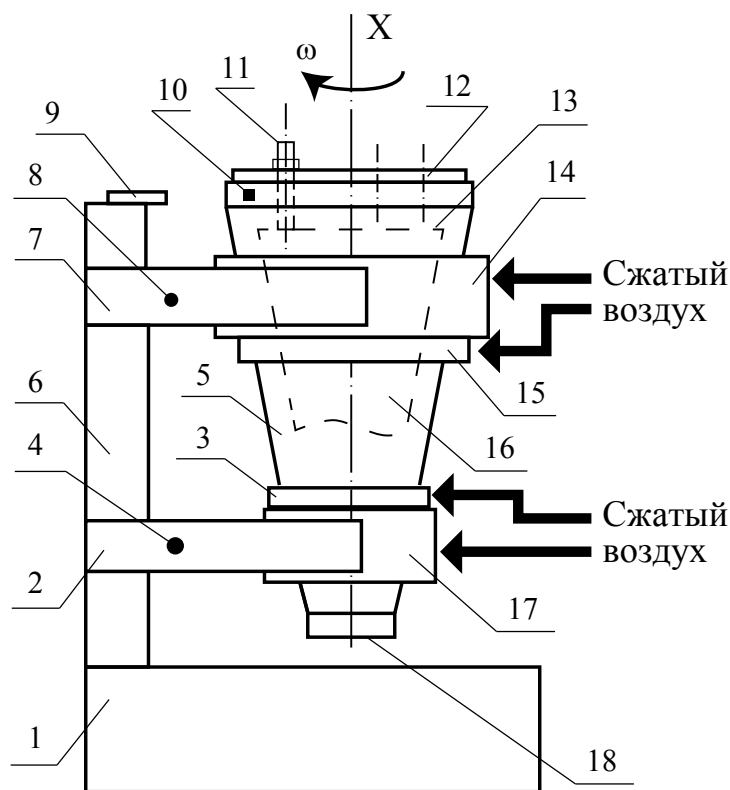


Рис. 3. Схема балансирующего стенда: 1 – фундамент; 2 – нижняя колебательная подвеска; 3 – пневматический механизм торможения ротора; 4 – датчик силы «н»; 5 – технологический переходник; 6 – вертикальная стойка; 7 – верхняя колебательная подвеска; 8 – датчик силы «в»; 9 – датчик-отметчик фазы дисбалансов; 10 – зеркальный светоотражатель; 11 – фиксирующая шпилька; 12 – профилированная крышка; 13 – верхняя плоскость коррекции; 14 – верхний газостатический подшипник; 15 – пневмопривод; 16 – контролируемый ЛА; 17 – нижний газостатический подшипник; 18 – нижняя плоскость коррекции

Стенд содержит две – нижнюю 2 и верхнюю 7 – идентичные по конструкции колебательные подвески, каждая из которых выполнена в виде пары упругих плоскопараллельных пластин, удерживающих соответственно нижний 17 и верхний 14 газостатические подшипники, консольно закрепленные на вертикальной стойке 6, установленной на мощном фундаменте 1. С верхним подшипником совмещен пневматический механизм раскрутки 15 (пневмопривод вращения), а с нижним – пневматический механизм торможения 3 (пневмотормоз).

Стенд снабжен технологическим переходником 5, имеющим форму усеченного конуса и выполненным в виде жесткого кожуха, наружная боковая поверхность которого соответствует рабочим поверхностям газостатических подшипников. Поверхности внутренних опор переходника соответствуют базовым

посадочным поверхностям контролируемого ЛА 16, устанавливаемого на эти опоры носком вниз, образуя тем самым так называемый сборный ротор. Аппарат внутри переходника фиксируется с использованием специальной профилированной крышки 12 и трех фиксирующих шпилек 11, равномерно расположенных по окружности на крышке. Этим исключается возможность перемещения аппарата 16 относительно переходника 5 в процессе разгона и торможения сборного ротора. Применение переходника также исключает возможность механического контакта контролируемого ЛА с балансирующим оборудованием в процессе выполнения измерений и обеспечивает материализацию второй (нижней) плоскости коррекции 18, используемой для настройки измерительной системы стенда. При этом в качестве первой (верхней) плоскости коррекции используется штатная плоскость коррекции аппарата,



как правило, конструктивно располагаемая вблизи его торца.

В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий из заводской пневмосети низкого давления в газостатические подшипники и в пневматические механизмы разгона и торможения. Испытуемый аппарат на стенде балансируют как отдельную деталь в составе сборного ротора. В ходе эксперимента искомые параметры массо-инерционной асимметрии рассчитывают по результатам определения значений и углов дисбалансов, действующих в верхней и нижней плоскостях коррекции. Указанные параметры дисбалансов определяют по результатам измерений амплитуд и фаз вибраций газовых опор, выполняемых с использованием силоизмерительных датчиков 4 и 8, установленных в упругих элементах соответственно верхней 7 и нижней 2 колебательной подвески, и оптоволоконного датчика-отметчика фазы 9, зеркальный светоотражатель 10 которого закрепляется на боковой поверхности переходника. Датчик-отметчик фазы используется также для контроля частоты вращения сборного ротора ω [10].

Перед проведением балансировки на другом оборудовании и с использованием других средств измерений определяют массу ЛА, продольное положение его центра масс относительно штатной плоскости коррекции, а также моменты инерции. В случае если значение хотя бы одного из параметров начальной массо-инерционной асимметрии превышает соответствующее предельно допустимое значение, проводят балансировочный расчет для достижения заданных нормативов, например с оптимизацией по критерию достижения минимального значения какого-либо из контролируемых параметров массо-инерционной асимметрии [11, 12], и выполняют корректировку массы ЛА путем прикрепления балансировочных грузов к верхней 13 (штатной) плоскости коррекции ЛА. Если же расчетным путем показана невозможность приведения обоих параметров массо-инерционной асимметрии к значениям, не превышающим предельно допустимых значений, то контролируемый аппарат бракуют и направляют изготовителю на пере-

компоновку, исключая выполнение заведомо бесперспективных шагов балансировки, что позволяет существенно сократить продолжительность балансировочного эксперимента.

Достигнутые погрешности измерений поперечного смещения центра масс и угла перекоса продольной ГЦОИ на рассмотренном балансировочном стенде не превысили соответственно 0,01 мм и 1 угловой минуты. А весь процесс балансировки ЛА, например при использовании унифицированного стенда для определения продольной координаты и моментов инерции аппарата, как правило, не превышает 1 рабочей смены.

Все рассмотренные стенды компьютеризированы и представляют собой современные автоматизированные системы контроля, включающие в свой состав как непосредственно контрольно-измерительный стенд с необходимой технологической оснасткой, так и аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий управление оборудованием, проведение математических расчетов, формирование отчетных документов [13–15]. Также в состав системы обязательно входит рабочий эталон (набор эталонов), предназначенный для тестирования нормируемых технических характеристик стенда, выполняемого с определенной периодичностью в течение всего срока эксплуатации стенда [16, 17]. Как правило, массо-центровочные характеристики и базовые посадочные поверхности рабочего эталона соответствуют указанным характеристикам и поверхностям балансируемого ЛА.

Таким образом, можно отметить, что в последнее время в области разработки и совершенствования методов и средств контроля МЦИХ и балансировки ЛА наметились два направления, позволяющие экспериментаторам оптимизировать выбор стендового оборудования. К одному из таких направлений можно отнести разработку универсальных контрольно-измерительных стендов, обеспечивающих возможность определения всего комплекса МЦИХ ЛА с одной установки контролируемого аппарата на измерительное устройство, что позволяет сократить номенклатуру используемых стендов до одного, исключить необходимость многократной



переустановки аппарата в процессе выполнения измерений, а также сократить время выполнения измерений при приемлемой точности измерений. При проектировании стенда и технологической оснастки стремятся максимально снизить его «уязвимость» к изменению массы, габаритов и формы корпуса ЛА, а также требования к производственным помещениям. Однако стремление к большей универсализации при конструировании стенда нередко приводит к снижению точности измерений контролируемых МЦИХ. Другим направлением можно считать разработку динамических балансировочных стендов, обеспечивающих существенное повышение точности определения параметров массо-инерционной асимметрии и, соответственно, повышение точности уравнивания ЛА, а также сокращение длительности балансировочного эксперимента. При этом следует заметить, что необходимость предварительного определения продольной координаты и моментов инерции ЛА требует использования в паре с балансировочным стендом дополнительного контрольно-измерительного оборудования. Получаемая при этом избыточная информация по МЦИХ позволяет избежать грубых неточностей при расчете корректирующих грузов путем сопоставления результатов контроля МЦИХ в разных системах.

Список литературы

1. Матвеев Е. В., Крылов В. В., Кочкин Е. В. Оборудование для определения характеристик геометрии масс и массы космических летательных аппаратов // *Научно-технические достижения*. 1992. № 5. С. 40–44.
2. *Основы балансировочной техники. Т. 1. Уравнивание жестких роторов и механизмов* / Под ред. В. А. Щепетильникова. М.: Машиностроение, 1972. 527 с.
3. Абышев Н. А., Ключников А. В. Обзор российских патентов по направлению экспериментального определения массо-центровочных и инерционных характеристик беспилотных летательных аппаратов // *Труды XXIV международного симпозиума «Надежность и качество»* (Пенза, 27–31 мая 2019 г.). Т. 1. Пенза: ПГУ, 2019. С. 149–155.
4. Ключников А. В. Моделирование, расчет и оптимизация процесса технологического обеспечения нормативов балансировки летающих моделей // *Материалы IX Всероссийской конференции «Новые технологии»* (Миасс, 16–17 октября 2012 г.). Т. 1. М.: РАН. 2012. С. 28–37.
5. Способ определения тензора инерции изделия и стенд для его реализации: пат. на изобретение № 2596032. Рос. Федерация. МПК G01M 1/10 // М. А. Васильев, В. И. Комаров, М. Н. Коньков и др. / Заявл. 05.12.2014; опублик. 27.08.2016. Бюл. № 24. 20 с.
6. Васильев М. А., Ключников А. В., Коньков М. Н. и др. Опытный образец стенда определения МЦИХ крупногабаритных БПЛА // *Сборник докладов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского»* (Москва, 13–14 апреля 2017 г.). М.: Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского, 2017. С. 140–145.
7. Абышев Н. А., Васильев М. А., Ключников А. В. и др. Технический облик и методическое обеспечение стенда для контроля МЦИХ летательных аппаратов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 3. С. 18–21.
8. Балансировочный стенд с вертикальной осью вращения: пат. на изобретение № 2292533. Российская Федерация. МПК G01M 1/02 // Л. М. Глазырина, А. В. Ключников, Г. Г. Смирнов и др. / Заявл. 27.04.2004; опублик. 27.01.2007. Бюл. № 3. 17 с.
9. 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.
10. Ключников А. В. Обработка измерительных сигналов в процессе динамической балансировки летательного аппарата // *Вестник воздушно-космической обороны*. 2019. № 1. С. 86–92.
11. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции: пат. на изобретение № 2499985. Российская Федерация. МПК G01M 11/16 / А. В. Ключников / Заявл. 11.04.2012; опублик. 27.11.2013. Бюл. № 33. 19 с.
12. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции: пат. на изобретение



№ 2694142. Российская Федерация. МПК G01M 11/16 / А. В. Ключников / Заявл. 27.09.2018; опубл. 09.07.2019. Бюл. № 19. 18 с.

13. Андреев С. В., Ключников А. В., Лысых А. В. и др. Автоматизация измерений параметров, характеризующих асимметричность в распределении масс летающих моделей // *Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Рдултовские чтения» (Санкт-Петербург, 10–12 октября 2012 г.)*. СПб.: БалтГТУ «Военмех», 2013. С. 119–125.

14. Абышев Н. А., Ключников А. В., Терехова С. А. Алгоритм функционирования компьютерной программы маятникового стенда, предназначенного для определения МЦИХ летательных аппаратов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 10. С. 58–60.

15. Волоконно-оптический разъемный соединитель: пат. на полезную модель № 197174. Российская Федерация. МПК G01M 1/02 // Е. М. Жиганова, А. В. Ключников, Л. Д. Цынгueva / Заявл. 20.08.2019; опубл. 08.04.2020. Бюл. № 10. 23 с.

16. Способ проверки качества функционирования стенда для определения массо-центровочных и массо-инерционных характеристик твердого тела вращения: пат. на изобретение № 2445592. Российская Федерация. МПК G01M 1/10 // А. В. Ключников / Заявл. 30.06.2010; опубл. 20.03.2012. Бюл. № 8. 21 с.

17. 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.

Об авторах

Абышев Николай Александрович – инженер-конструктор Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Челябинская область, Российская Федерация.
Область научных интересов: разработка электронных приборов, управление в технических системах.

Ключников Александр Васильевич – канд. техн. наук, начальник конструкторского отдела Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Челябинская область, Российская Федерация.
Область научных интересов: системы контроля и испытаний вооружений и военной техники.



Optimizing the selection of test-bench equipment for aircraft balancing

Abyshev N. A., Klyuchnikov A. V.

*Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute for Technical Physics,
Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation*

This article analyses various aspects related to optimizing the selection of control and measuring test-bench equipment designed to determine the mass-centring and inertial characteristics of aircrafts, as well as their balancing, at the final assembly stage. Specific features of designing test benches capable of implementing the methods of unifilar and astatic pendulums, which determine the coordinates of the centre of mass and moments of inertia under a single installation of the apparatus under study in the measuring device, as well as the method of dynamic balancing, which provides precise determination of the mass-inertia asymmetry parameters of aircrafts. The accuracy characteristics of the test benches under consideration are given.

Keywords: centre of mass, moment of inertia, axis of inertia, mass-inertia asymmetry, test bench, measurement method, measurement errors, experiment duration

Information about the authors

Abyshev Nikolai Aleksandrovich – Design Engineer, Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute for Technical Physics, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation.

Research interests: development of electronic devices, control in technical systems.

Klyuchnikov Alexander Vasilievich – Cand. Sci. (Engineering), Head of Engineering Department, Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute for Technical Physics, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation.

Research interests: control and testing systems for weapons and military equipment.