

Система метрологического обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс

О. В. Довыденко, А. И. Самойленко, В. В. Петроневиц

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский, Московская обл.,
Российская Федерация, e-mail: olga-dov@mail.ru, samoylenko@tsagi.ru, mera@tsagi.ru

Предложена система метрологического обеспечения, позволяющая проводить испытания в целях утверждения типа, поверку и калибровку стендов для измерений массы, координат центра масс и моментов инерции. Разработана математическая модель специального эталона, которая основана на аналитических принципах определения координат центра масс и моментов инерции однородных тел вращения правильной геометрической формы. Специальный эталон состоит из набора модулей и крепёжных элементов специальной формы. Каждый модуль представляет собой эталонную меру одновременно массы, координат центра масс и моментов инерции и может быть использован как отдельно, так и в наборе с другими модулями. Разработана схема передачи единиц величин от государственных первичных эталонов массы и длины к стендам с помощью специальных эталонов. Предложена методика калибровки специальных эталонов, которая включает косвенные измерения координат центра масс и моментов инерции на основании результатов прямых измерений массы и геометрических размеров элементов модулей эталона, а также измерения отклонений формы и расположения поверхностей модулей эталона и статическую балансировку эталона. Установлены технические требования к специальным эталонам, позволяющие минимизировать методические неопределённости измерений при воспроизведении единиц величин. Создана линейка специальных эталонов, прошедших аттестацию и утверждение в Росстандарте. Разработаны и утверждены методики поверки стендов с помощью специальных эталонов, а также утверждены типы двух стендов с помощью специальных эталонов.

Ключевые слова: координата центра масс, момент инерции, масса, эталон, поверка, калибровка.

Введение. Важнейшей задачей управления движением летательных аппаратов является решение уравнений динамики полёта. Движение летательного аппарата моделируется в системе координат, начало которой совпадает с его центром масс. Для составления динамического уравнения вращательного движения летательного аппарата необходима информация о тензоре инерции. Согласно [1] экспериментальные методы определения моментов инерции дают более точные результаты в сравнении с расчётными методами, поэтому очень важно иметь действительные достоверные данные о положении центра масс и моментах инерции летательных аппаратов, полученные опытным путём. Работая над решением этой задачи, специалисты ЦАГИ за последнее десятилетие создали линейку стендов для измерений массы, координат центра масс и моментов инерции изделий (далее – стенды). Объектами измерений на стендах являются летательные аппараты, их динамически подобные модели, изделия двигателя- и турбиностроения (спутники, космические аппараты, ракеты, лопасти компрессоров и т. п.) для предприятий авиационной, ракетно-космической промышленности и других отраслей. Особенность стендов – автоматизация измерений всех необходимых параметров без переустановок изделия.

Стенды ЦАГИ состоят из нескольких подвижных платформ, устройств установки, задания наклонов и колебаний

изделий, первичных преобразователей силы, углов, ускорений, аппаратуры для измерения и обработки их сигналов [2–7]. Масса и координаты центра масс изделия измеряются в статическом режиме, а моменты инерции – в динамическом. Для измерения массы изделие устанавливают на стенд и суммируют показания встроенных в стенд динамометров. Для измерения координат центра масс изделие поворачивают относительно горизонтальных осей на различные углы и одновременно измеряют силы реакций и моментов. Для измерения моментов инерции вокруг осей стенда возбуждаются угловые свободные колебания и в каждый момент времени измеряются мгновенные значения составляющих инерционной силы и силы веса, а также углы и угловые ускорения.

Такие стенды являются уникальным измерительным оборудованием и используются для решения узкоспециализированных задач управления движущимися объектами, поэтому их разработка, применение и метрологическое обеспечение не регламентируется государственными или международными стандартами. Создание и совершенствование методологии измерений с помощью стендов для определения координат центра масс и моментов инерции твёрдых тел является актуальной задачей не только для ЦАГИ, но и для других предприятий промышленности [8–10]. Предприятия, применяющие аналогичные по назначению стенды, вынуждены относить их

к технологическому или испытательному оборудованию, решая вопрос их метрологического обеспечения посредством проверки на технологическую точность или аттестации. Методика аттестации, как правило, включает поверку встроенных средств измерений (СИ) и проверку функционирования стенда с использованием специального габаритно-массового макета изделия – контрольного приспособления [11–13]. Массу контрольного приспособления предварительно измеряют на весах, а координату центра масс приводят в известную точку с применением статической балансировки. Переустанавливая контрольное приспособление, можно воспроизводить не более двух контрольных точек положения центра масс.

Проблемы метрологического обеспечения стендов.

При аттестации стендов возникают большие трудности с поверкой встроенных СИ. Для первичных преобразователей стендов (силоизмерительных датчиков, датчиков углов и угловых ускорений) не предусмотрена поверка без демонтажа, вследствие чего стенд подлежит разборке и последующей повторной сборке после поверки датчиков. Это отрицательно влияет на качество функционирования стенда и приводит к необходимости его повторной наладки. Кроме того, для аттестации стендов в качестве испытательного оборудования и применения результатов измерений, полученных с помощью таких стендов, в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений требуется разработать и аттестовать методики косвенных измерений координат центра масс и моментов инерции с помощью встроенных в стенд датчиков, а также методики косвенных измерений параметров контрольных приспособлений, используемых при аттестации для контроля метрологических характеристик стендов.

Таким образом, главной проблемой организации метрологического обеспечения стендов является отсутствие государственных первичных эталонов единицы длины в области измерений координат центра масс и единицы момента инерции, способов обеспечения прослеживаемости этих единиц к первичным эталонам, а также государственных поверочных схем для передачи единиц к стендам.

Существует ещё две важные проблемы метрологического обеспечения стендов:

значительное удорожание конструкции стенда вследствие необходимости разработки и поставки индивидуального контрольного приспособления в комплекте к каждому стенду из-за разных принципов действия самих стендов и концепции контрольных приспособлений в виде габаритно-массовых макетов испытываемых изделий;

низкие точность и достоверность определения погрешности стенда из-за несовершенства методов определения характеристик геометрии масс контрольного приспособления и небольшого числа проверяемых точек, ограниченно-го конструкцией контрольного приспособления.

Созданные в ЦАГИ стенды были аттестованы в качестве испытательного оборудования, но начиная с 2015 г. для повышения их метрологической надёжности применяют специальные контрольные приспособления модульного типа [13]. Дальнейшая работа над созданием системы метрологического обеспечения стендов привела к необходимости

переопределения типа стендов как технического устройства [14]. Основными критериями отнесения устройства к тому или иному типу являются назначение и выполняемые им функции. Для технологического оборудования это операции обработки, формообразования, сборки и контроля. Для испытательного оборудования – воспроизведение условий испытаний на прочность, надёжность, безопасность и функционирование. Для СИ – экспериментальное получение нормированного значения физической величины. Процесс определения координат центра масс и моментов инерции изделий с помощью стендов наиболее точно соответствует понятию измерений, и с учётом назначения стендов их можно отнести только к СИ. Однако в рамках концепции стенда как СИ необходимо обеспечить прослеживаемость выполненных на этом стенде измерений к государственным первичным эталонам, а также утверждение типа и поверку стендов, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Постановка задачи создания системы метрологического обеспечения стендов. В момент создания автоматизированных стендов [2–7] перед метрологами ЦАГИ была поставлена задача создания специального эталона и системы обеспечения прослеживаемости измерений с помощью этого эталона. Для этого разработаны математическая модель специального эталона модульного типа, технические требования к специальному эталону, схема передачи единиц величин от государственных первичных эталонов к стендам, методика калибровки эталона [15].

В 2015 г. впервые в России был создан и утверждён Приказом Росстандарта № 952 от 17 августа 2015 г. специальный эталон единицы массы, единицы длины в области измерений координат центра масс и единицы момента инерции, а к 2020 г. – ряд специальных эталонов, предназначенных для поверки, калибровки и испытаний в целях утверждения типа стендов для измерения характеристик геометрии масс изделий массой 0,5–5000 кг. Предложенная система обеспечения метрологической прослеживаемости заключается в передаче единиц величин от существующих государственных первичных эталонов массы и длины к специальным эталонам с помощью косвенных измерений, а от специальных эталонов к стендам – с помощью прямых измерений.

Математическая модель специального эталона. В основу концепции специального эталона легли аналитические принципы определения координат центра масс и моментов инерции однородных тел вращения правильной геометрической формы. Воспроизводимые эталоном единицы величин определяются по методике измерений, разработанной с учётом изложенных в [16] алгоритмов на основании прямых измерений массы и геометрических размеров элементов эталона. Эталон (рис. 1) состоит из набора модулей и крепёжных элементов специальной формы. Каждый модуль представляет собой эталонную меру одновременно массы, координат центра масс и моментов инерции и может быть использован как отдельно, так и в наборе с другими модулями.

Центральный модуль эталона разборный, расположен в центре измерительной платформы стенда и обеспечивает



Рис. 1. Специальный эталон массы, координат центра масс и момента инерции

Fig. 1. Special standard of mass, coordinates of the center of mass and moment of inertia

смещение центра масс вдоль вертикальной оси X . Боковые модули, собранные в наборы, крепятся на измерительной платформе станда на определённом расстоянии от центра и обеспечивают смещение центра масс центрального модуля вдоль горизонтальных осей. Таким образом, эталон позволяет дискретно воспроизводить различные значения единиц величин в пределах требуемого диапазона измерений посредством формирования соответствующих конфигураций из наборов модулей.

Для повышения точности передачи единиц величин предложено использовать конструкцию модулей наиболее простой геометрической формы – прямого кругового цилиндра. Система координат (X, Y, Z) – правая ортогональная, её центр совпадает с центром измерительной платформы станда, ось X направлена вертикально вверх. Математические модели измерения (воспроизведения) массы M , вертикальной координаты X центра масс и центрального момента инерции I_X относительно вертикальной оси эталона опишем следующими уравнениями:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i; \quad (1)$$

$$X = \sum_{i=1}^n x'_i m_i / \sum_{i=1}^n m_i; \quad (2)$$

$$I_X = \sum_{i=1}^n I_{xi} + \sum_{i=1}^n \{m_i [(y'_i - Y)^2 + (z'_i - Z)^2]\}, \quad (3)$$

где m_i – массы модулей эталона, $i=1, \dots, n$, n – количество модулей эталона; X, Y, Z – координаты центра масс эталона в системе координат станда; x'_i, y'_i, z'_i – координаты центра масс каждого модуля эталона в системе координат станда; I_{xi} – центральный момент инерции каждого модуля эталона относительно вертикальной оси.

Горизонтальные координаты Y, Z эталона и его центральные моменты инерции относительно горизонтальных осей I_Y, I_Z соответственно определяют по формулам, аналогичным (2), (3).

Математические модели измерения координат центра масс и центральных моментов инерции каждого модуля эталона запишем как

$$x_i = \sum_{j=1}^k d_{ij}^2 h_{ij} x_{ij} / \sum_{j=1}^k d_{ij}^2 h_{ij}; \quad (4)$$

$$I_{xi} = \frac{\pi}{4} \sum_{j=1}^k d_{ij}^2 h_{ij} \rho_i \left[d_{ij}^2 / 8 + (y_{ij} - y_i)^2 + (z_{ij} - z_i)^2 \right], \quad (5)$$

где x_i – вертикальная координата центра масс модуля эталона в системе координат модуля; d_{ij}, h_{ij} – диаметры и высоты цилиндрических элементов, составляющих модуль эталона; x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} – координаты центра масс каждого цилиндрического элемента в системе координат модуля; ρ_j – плотность материала модуля эталона; k – количество цилиндрических элементов модуля эталона.

Горизонтальные координаты y_i, z_i модуля эталона равны нулю, а его центральные моменты инерции относительно горизонтальных осей I_{y_i}, I_{z_i} определяются по аналогичной (5) формуле.

Схема передачи единиц величин от государственных первичных эталонов к стандам. Для аттестации эталона и последующих испытаний в целях утверждения типа стандов разработана и согласована с ВНИИМС локальная поверочная схема (рис. 2) для СИ массы в диапазоне 0,5–5000 кг, координат центра масс в диапазоне 5–5000 мм и момента инерции в диапазоне $1,6 \cdot 10^{-4}$ – $6 \cdot 10^2$ кг·м², которая устанавливает порядок передачи этих единиц от государственного первичного эталона единицы массы (килограмма) ГЭТ 3-2008 и государственного первичного эталона единицы длины (метра) ГЭТ 2-2010 с помощью специального эталона.

В качестве эталонов верхнего уровня, заимствованных из государственных поверочных схем, используют гири 3-го разряда по государственной поверочной схеме для СИ массы, утверждённой приказом Росстандарта от 29 декабря 2018 г. № 2818, соответствующие классу точности F_2 по ГОСТ OIML R 111-1-2009 «ГСИ. Гири классов $E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, M_{1-2}, M_2, M_{2-3}$ и M_3 . Ч. 1. Метрологические и технические требования», а также приборы для измерений наружных и внутренних размеров по государственной поверочной схеме для СИ длины в диапазоне $1 \cdot 10^{-9}$ –100 м и длин волн в диапазоне 0,2–50 мкм, утверждённой приказом Росстандарта от 29 декабря 2018 г. № 2840, – координатно-измерительные машины с погрешностью $\delta = (2 \dots 10)$ мкм при доверительной вероятности 0,95.

Эталоны верхнего уровня применяют для передачи единиц массы и длины в области измерений координат центра масс и единицы момента инерции рабочим эталонам (РЭ) методом косвенных измерений.

Единицу массы от эталонов верхнего уровня передают РЭ путём сличения с помощью компаратора. Среднее квадратическое отклонение (СКО) компараторов массы, применяемых для передачи единицы РЭ, не должно превышать $1/9$ пределов допускаемых отклонений действительного значения массы гири от номинального значения для гирь класса точности M_1 .

Единицу длины от эталонов верхнего уровня передают РЭ методом прямых измерений геометрических параметров мер, из которых состоит РЭ.

Единицу длины в области измерений координат центра масс и единицу момента инерции от эталонов верхнего уровня передают РЭ методом косвенных измерений. При этом используют соотношения (4), (5) и по формулам (1)–(3) рассчитывают значения единиц величин, полученные для различных конфигураций наборов мер РЭ. Применяемая при передаче единиц величин РЭ методика косвенных измерений аттестована.

В качестве РЭ служат наборы калибровочные мер массы, длины в области измерений координат центра масс и моментов инерции с указанными выше диапазонами воспроизведения момента инерции, а также массы и длины в области измерений координат центра масс. Погрешность передачи единиц величин с помощью РЭ при доверительной вероятности 0,95 оценивали в соответствии с МИ 2083-90 «ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей» в рамках аттестации методики косвенных измерений [17].

От РЭ единицы величин передают рабочим СИ массы, координат центра масс и момента инерции методом прямых измерений. Соотношение пределов допускаемых значений доверительных границ абсолютной погрешности РЭ и пределов допускаемой абсолютной погрешности рабочих СИ должно быть не более $1/3$.

В качестве рабочих СИ используют стенды для измерений массы, координат центра масс и моментов инерции с

указанными выше диапазонами измерения массы, координат центра масс и момента инерции. Пределы допускаемой абсолютной погрешности рабочих СИ: $\Delta = 0,01 \dots 3,0$ кг при измерении массы; $\Delta = 0,5 \dots 3,0$ мм при измерении координат центра масс. Предел допускаемой приведённой погрешности рабочих СИ при измерении момента инерции составляет $\gamma = 1\%$ (нормирующее значение – диапазон измерений).

Методика калибровки специальных эталонов. Методика калибровки специальных эталонов заключается в проведении косвенных измерений координат центра масс и моментов инерции на основании результатов прямых измерений массы и геометрических размеров элементов эталона. Метрологами ЦАГИ разработана типовая методика калибровки эталонов, обеспечивающая прослеживаемость измерений в соответствии с локальной поверочной схемой.

Процедура подготовки к калибровке предусматривает внешний осмотр эталона, очистку поверхности мер эталона от пыли и грязи с последующей просушкой, проверку собираемости

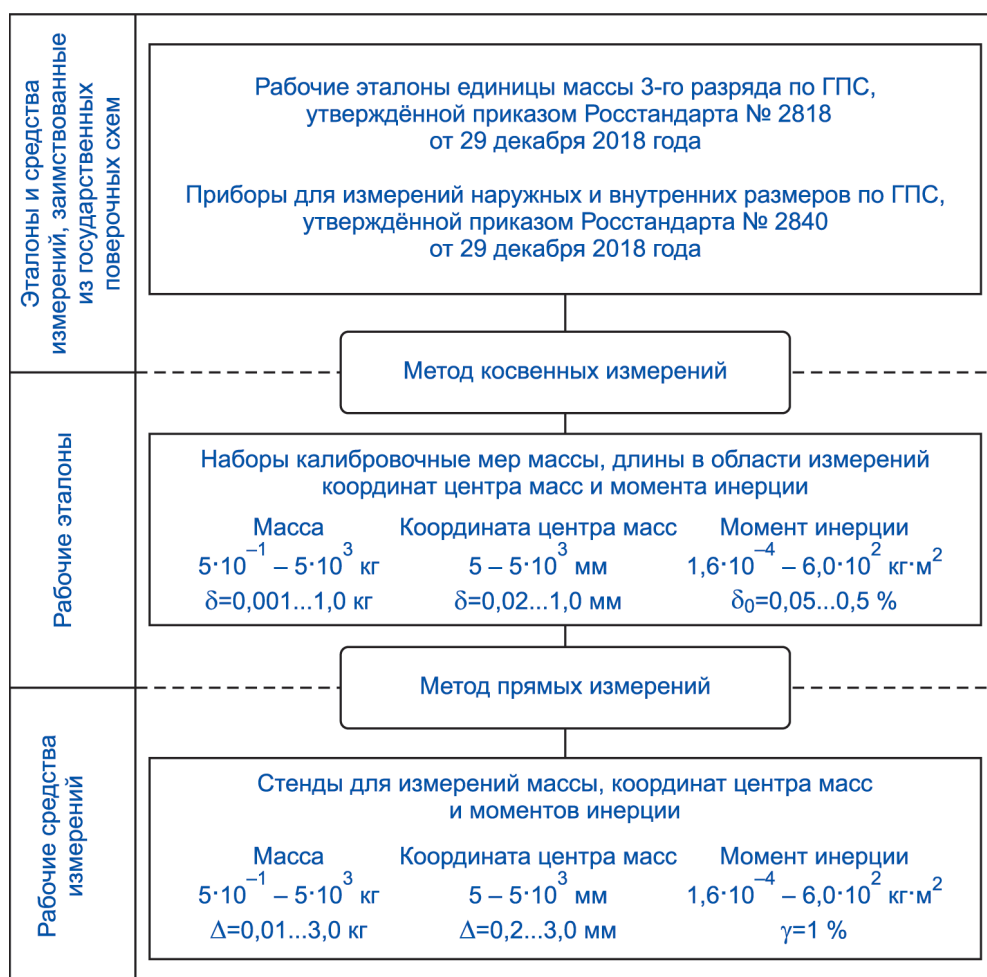


Рис. 2. Локальная поверочная схема для СИ массы, координат центра масс и моментов инерции

Fig. 2. Local verification scheme for mass, coordinates of the center of mass and moments of inertia measuring instruments

мер эталона в конфигурации, предусмотренные эксплуатационными документами эталона, выдержку эталона в помещении вместе с компаратором массы. Непосредственно калибровка включает следующие операции:

прямые измерения действительного значения массы каждой меры эталона методом сличения с помощью гирь класса точности F_2 и компаратора массы в соответствии с Приложением С ГОСТ OIML R 111-1-2009 для методов измерений ABBA или ABA и числа циклов измерений $n \geq 1$;

прямые измерения геометрических параметров мер (линейные размеры, отклонения от плоскостности, соосности, перпендикулярности, параллельности, отклонения профиля продольного сечения боковых цилиндрических поверхностей) с помощью машины трёхкоординатной измерительной, количество измерительных точек для определения отклонения от плоскостности – не менее 90, для определения остальных параметров – не менее 30;

измерительный контроль с помощью штангенциркуля геометрических размеров мер, являющихся крепёжными элементами;

статическая балансировка модулей эталона на призматических опорах.

Обработка результатов измерений производится в соответствии с аттестованной методикой измерений по соотношениям (1)–(5).

Технические требования к специальным эталонам. При анализе математических моделей измерений (1)–(5) выявлены следующие основные источники возникновения неопределённости измерений при воспроизведении единиц величин эталоном: применяемые СИ массы и длины; отклонения формы и расположения элементов, из которых состоят модули эталона; неоднородность материала эталона.

С учётом выявленных источников неопределённости для обеспечения требуемой точности при передаче единиц величин разработаны технические требования к специальным эталонам: форма элементов эталонов – прямые круговые цилиндры с минимальным количеством резьбовых соединений; отверстия – преимущественно сквозные; фаски должны отсутствовать.

Требования к качеству поверхности и отклонениям формы и расположения должны быть достаточно жёсткими, чтобы минимизировать методическую составляющую погрешности измерений. Так как эталон предназначен для хранения и воспроизведения единицы массы и других единиц, полученных на её основе, то целесообразно обеспечить выполнение технических требований ГОСТ OIML R 111-1-2009. Поэтому в качестве материала эталона вместо обычной углеродистой стали использованы коррозионностойкие сплавы с учётом всех

требований ГОСТ OIML R 111-1-2009 к плотности и магнитным свойствам материала и качеству обработанных поверхностей. Подгоночные полости в эталоне должны отсутствовать, чтобы избежать методической погрешности воспроизведения единиц длины (координат центра масс) и момента инерции.

Согласно ГОСТ OIML R 111-1-2009 элементы эталона по массе соответствуют классу точности M_1 для гирь. Гирь класса точности M_1 калибруют методом сличения с помощью компаратора гирями класса точности F_2 . Поэтому калибровку эталона по массе осуществляют с помощью набора эталонных гирь и компаратора массы. Калибровочная лаборатория ЦАГИ оснащена компаратором с наибольшим пределом взвешивания 150 кг, СКО 90–120 мг и дискретностью 50 мг. Для калибровки по массе методом сличения проработан ряд дополнительных требований к эталону:

масса составных элементов не более 150 кг, размеры (диаметры) должны вписываться в весовую платформу компаратора;

в конструкции элементов эталона должны быть площадки для их безопасного вертикального размещения на компараторе;

необходимо предусмотреть возможность перемещения тяжёлых частей подъёмными механизмами с наиболее плавной подачей при установке их на компаратор.

Для экспериментальной верификации применяемых аналитических методов измерений в конструкцию модулей эталона необходимо включить специальные элементы (балансирующие штифты), позволяющие выполнить балансировку на призматических опорах [18].

Основные результаты. В настоящее время специалистами ЦАГИ создано и аттестовано на основании результатов калибровки пять специальных эталонов массы, координат центра масс и момента инерции, четыре из них прошли процедуру утверждения в Росстандарте (регистрационные номера 3.1.АЗО.0252.2015, 3.1.АОЛ.0041.2016, 3.1.АОЛ.0122.2017, 3.1.АОЛ.0144.2019). Созданные эталоны воспроизводят единицы в широком диапазоне. Метрологические характеристики созданных эталонов приведены в таблице, где U – расширенная неопределённость измерений. С помощью этих эталонов проведены испытания в целях утверждения типа двух стендов (регистрационные номера 62420-15, 72575-18), предназначенных для измерений массы, координат центра масс и моментов инерции изделий ракетно-космической техники. Разработаны и утверждены методики поверки этих стендов. В 2020 г. Федеральным институтом промышленной собственности выдан патент на изобретение «Способ определения погрешности стенда для измерения характеристик геометрии масс изделий и устройство для его осуществления» [19].

Закключение. Таким образом, проведённая работа по разработке специальных эталонов массы, длины в области измерений координат центра масс и момента инерции позволила создать систему передачи единиц величин к стендам от государственных первичных эталонов и проводить испытания в целях утверждения типа, поверку

Метрологические характеристики созданных в ЦАГИ эталонов

Измеряемая величина	Диапазон измерений	U ($P=95\%$)
Масса, кг	0,5–5000	0,003–1
Длина (координата центра масс), мм	13–5000	0,02–1
Момент инерции, кг·м ²	0,00016–3000	$5,4 \cdot 10^{-7}$ –15

и калибровку стенов при соблюдении всех требований к прослеживаемости измерений.

Список литературы

1. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика: Учебник для студентов вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 608 с.
2. Богданов В. В., Волобуев В. С., Кудряшов А. И., Травин В. В. Комплекс для измерения массы, координат центра масс и моментов инерции машиностроительных изделий // Измерительная техника. 2002. № 2. С. 37–39.
3. Богданов В. В., Веселов Н. В., Панченко И. Н., Паршев В. А., Петровев В. В., Чумаченко Е. К. Стенд для измерения массы, координат центра масс и тензора инерции изделия // Датчики и системы. 2010. № 5. С. 24–28.
4. Богданов В. В., Панченко И. Н. К теории измерения массы, координат центра масс и моментов инерции тел // Датчики и системы. 2013. № 8. С. 12–15.
5. Патент № 2368880 РФ / Богданов В. В., Веселов Н. В., Панченко И. Н., Петровев В. В., Бодин В. В., Паршев В. А. // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 24.
6. Патент № 2506551 РФ / Богданов В. В., Панченко И. Н., Няк В. А., Галанский П. Н., Костарев В. А. // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 4.
7. Патент № 2525629 РФ / Богданов В. В., Галанский П. Н., Куликов А. А., Панченко И. Н. // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 23.
8. Резник С. В., Виденкин Н. А. Новый подход к определению моментов инерции космических аппаратов на основе анализа автоколебательной системы // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 9 (678). С. 81–89.
9. Медарь А. В., Котов А. Н., Кочкин Е. В. Определение массоинерционных характеристик конструкций космических летательных аппаратов // Технология машиностроения, 2011. № 3. С. 45–47.
10. Boyton R., *Proceeding of the 61th Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers*, Virginia Beach, Virginia, USA, May 20–21, 2002, 22 p.
11. Виденкин Н. А. Применение контрольных приспособлений для аттестации стенов контроля геометрии масс космических аппаратов // Итоги диссертационных исследований. Т. 1. Материалы VI Всероссийского конкурса молодых ученых, посвященного 90-летию со дня рождения академика В. П. Макеева. М.: РАН, 2014. С. 54–55.
12. Патент № 2445592 РФ / Ключников А. В. // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 8.
13. Довыденко О. В. Автоматизированная система управления аттестацией спецстенов для определения моментов инерции объектов с использованием метрологического контрольного приспособления модульного типа // Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации», ВНИИФТРИ, Москва, 2012. С. 48–51.
14. Довыденко О. В., Дыцков С. В., Самойленко А. И. Особенности метрологического обеспечения стенов по

измерению массы, центра масс и моментов инерции изделий аэрокосмической техники // Материалы III Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов «КИМИЛА 2018», Московская область, г. Жуковский, 2018. С. 168–180. URL: http://files.tsagi.ru/kimila/kimila2018_papers.pdf (дата обращения 30.04.2020).

15. Dovydenko O., Petronevich V., Samoilenko A., *Proceedings of the 24th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance*, 2014, Sozopol, Bulgaria, 2014, pp. 175–179.

16. Фаворин М. В. Моменты инерции тел. Справочник / Под ред. М. М. Гернета. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977.

17. Довыденко О. В. Расчет на точность методики измерений массы, центра масс и моментов инерции контрольного приспособления для аттестации испытательного стенов // Сборник трудов V Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. С. 57–58.

18. Dovydenko O. V., Samoilenko A. I., Shal'neva E. D., *Proceedings of the 26th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance*, 2016, Sozopol, Bulgaria, 2016, pp. 438–444.

19. Патент № 2722962 РФ / Довыденко О. В., Самойленко А. И., Бугров А. Ю., Лютов В. В., Куликов А. А. // Изобретения. Полезные модели. 2020. № 16.

References

1. Dmitrievskii A. A., Lysenko L. N., *Vneshnyaya ballistika: Uchebnik dlya studentov vuzov*, 4th publ., Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 608 p. (in Russian).
2. Bogdanov V. V., Volobuev V. S., Kudryashov A. I., Travin V. V., *Measurement Techniques*, 2002, vol. 45, no. 2, pp. 168–172. <https://doi.org/10.1023/A:1015543822552>
3. Bogdanov V. V., Veselov N. V., Panchenko I. N., Parshov V. A., Petronevich V. V., Chumachenko E. K., *Datchiki i sistemy*, 2010, no. 5, pp. 24–28 (in Russian).
4. Bogdanov V. V., Panchenko I. N., *Datchiki i sistemy*, 2013, no. 8, pp. 12–15 (in Russian).
5. Patent no. 2368880 RF, Bogdanov V. V., Veselov N. V., Panchenko I. N., Petronevich V. V., Bodin V. V., Parshev V. A., *Byull. Izobret.*, no. 24 (2009).
6. Patent no. 2506551 RF, Bogdanov V. V., Panchenko I. N., Nyakk V. A., Galanskii P. N., Kostarev V. A., *Byull. Izobret.*, no. 4 (2014).
7. Patent no. 2525629 RF, Bogdanov V. V., Galanskii P. N., Kulikov A. A., Panchenko I. N., *Byull. Izobret.*, no. 23 (2014).
8. Reznik S. V., Videnkin H. A., *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2016, no. 9 (678), pp. 81–89 (in Russian).
9. Medar' A. B., Kotov A. N., Kochkin E. V., *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2011, no. 3, pp. 45–47 (in Russian).
10. Boyton R., *Proceeding of the 61th Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers*, Virginia Beach, Virginia, USA, May 20–21, 2002, 22 p.

11. Videnkin H. A., *Itogi dissertatsionnykh issledovaniy. Vol. 1. Materials of the VI all-Russian competition of young scientists dedicated to the 90th anniversary of the birth of academician V. P. Makeev*, Moscow, RAN Publ., 2014, pp. 54–55 (in Russian).
12. Patent no. 2445592 RF, Klyuchnikov A.V., *Byull. Izobret.*, no. 8 (2012).
13. Dovydenko O. V., *Materials of the IX all-Russian scientific and technical conference "Metrologicheskoe obespechenie oborony i bezopasnosti v Rossiiskoi Federatsii"*, VNIIFTRI, Moscow, 2012, pp. 48–51 (in Russian).
14. Dovydenko O. V., Dytskov S. V., Samoilenko A. I., *Proceedings of the III industry conference on measurement technology and Metrology for aircraft research "KIMILA 2018"*, Zhukovskii, 2018, pp. 168–180 (in Russian), available at: http://files.tsagi.ru/kimila/kimila2018_papers.pdf (accessed: 30.04.2020).
15. Dovydenko O., Petronevich V., Samoilenko A., *Proceedings of the 24th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance 2014*, Sozopol, Bulgaria, 2014, pp. 175–179.
16. Favorin M. V. *Momenty inertsii tel. Spravochnik*, ed. M. M. Gerneta, publ. 2th, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977 (in Russian).
17. Dovydenko O. V., *Proceedings of the V all-Russian conference of young scientists and specialists "Budushchee mashinostroeniya Rossii"*, Moscow, MGTU Publ., 2013, pp. 57–58 (in Russian).
18. Dovydenko O. V., Samoilenko A. I., Shal'neva E. D., *Proceedings of the 26th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance*, 2016, Sozopol, Bulgaria, 2016, pp. 438–444.
19. Patent no. 2722962 RF, Dovydenko O. V., Samoilenko A. I., Bugrov A. Yu., Lyutov V. V., Kulikov A. A., *Byull. Izobret.*, no. 16 (2020).

Дата поступления: 17.07.2020.

Дата принятия: 04.08.2020.

System of metrological assurance of traceability of measurements of mass geometry characteristics

Olga V. Dovydenko, Alexander I. Samoylenko, Vasiliy V. Petronevich

Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation,
e-mail: metrology@tsagi.ru, samoylenko@tsagi.ru, mera@tsagi.ru

A system of metrological support is proposed that allows testing for type approval, verification and calibration of stands for measuring mass, coordinates of mass center and moments of inertia. The mathematical model of a special standard has been developed. It is based on the analytical principles for the determination of the mass center coordinates and inertia moments of homogeneous bodies with a regular geometric shape. The standard consists of a set of modules and fasteners of a special shape. Each module is a reference measure of both mass, center of mass coordinates, and moments of inertia, and can be used either separately or in a set with other modules. A scheme for transferring units of values from state primary standards of mass and length to stands using special standards has been developed. A method for calibration of special standards has been developed. It includes indirect measurements of the coordinates of the center of mass and moments of inertia based on the results of direct measurements of the mass and geometric dimensions of the standard modules' elements, as well as measurements of the form deviations and deviations of position of the standard modules' surfaces and static balancing of the standard. Technical requirements for special standards have been developed to minimize methodological measurement uncertainties when reproducing units of values by the standard. A line of special standards was created, their certification and approval in Rosstandart was carried out. Stand verification methods using special standards have been developed and approved. The type approval of two stands was carried out using special standards. The decision to grant a patent for the invention "Method for determining the error of the stand for measuring the characteristics of the mass geometry of products and a device for its implementation" was received.

Key words: coordinates of mass center, moment of inertia, mass, measurement standard, verification, calibration.