

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ СТЕНДА ИЗМЕРЕНИЯ МАСС-ЦЕНТРОВОЧНЫХ И ИНЕРЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСПУТНИКОВ С ПОМОЩЬЮ ЭТАЛОННЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2022

П. В. Васин инженер-программист НИЛ-102;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
shans-vpv@yandex.ru

Е. В. Барина кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики,
старший научный сотрудник НИЛ-102;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
15545@yandex.ru

В работе решается научно-прикладная задача экспериментального определения погрешностей стенда измерения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутников, основанного на принципе перевёрнутого крутильного маятника. Предложена методика определения погрешности измерения составляющих тензора инерции и координат центра масс с помощью эталонных объектов. Для этой цели был разработан и изготовлен эталонный наборный объект переменной конфигурации в виде наноспутника формата CubeSat 3U. С помощью эталона была отработана модифицированная методика проведения эксперимента, позволяющая снизить влияние погрешностей в изготовлении стенда и его оснастки на точность измерений за счёт осреднения одноимённых величин. В статье приведены результаты серий экспериментов по определению погрешностей измерений масс-центровочных и инерционных характеристик эталонного наборного объекта трёх вариантов сборки. Результаты серии экспериментов подтвердили теоретически вычисленную и заявленную в технической документации стенда погрешность измерений. Кроме того, проведена проверка точности определения периода колебаний и выявлено, что влияние факторов окружающей среды незначительно и им можно пренебречь. Результаты работы могут быть использованы для определения погрешности измерений координат центра масс и составляющих тензора инерции наноспутника формата CubeSat 1U-3U на этапе испытаний.

Испытательный стенд; крутильный маятник; наноспутник; координаты центра масс; тензор инерции; погрешность измерений

Цитирование: Васин П.В., Барина Е.В. Методика определения погрешности стенда измерения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутников с помощью эталонных объектов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 3. С. 7-22. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-3-7-22

Введение

Возможности современных малых космических аппаратов трудно переоценить. Уже сегодня для них существуют все необходимые комплектующие для выполнения сложнейших миссий, а количество запусков таких аппаратов растёт с огромной скоростью. Однако работа с малыми космическими аппаратами требует более точной оценки их масс-центровочных и инерционных характеристик (МЦИХ), которые включают в себя три координаты центра масс (ЦМ) и шесть независимых составляющих тензора инерции. Так, например, для больших аппаратов абсолютные погрешности измерений координат их центра масс в 5...10 мм не будут являться критическими, так как относительные погрешности при этом не будут превышать доли одного процента, что в итоге не скажется на управлении движением космического аппарата. Аналогично и для измерений составляющих тензора инерции. Что касается малых космических аппаратов, то для них погрешности измерений координат ЦМ в 5...10 мм могут привести к нерасчёт-

ной ориентации и невозможности выполнения миссии в целом, поэтому для наноспутников (НС) измерять МЦИХ необходимо с высокой точностью.

При определении МЦИХ чаще всего применяется экспериментальный метод, основанный на принципе крутильных колебаний, как наиболее точный [1; 2]. В мире существует несколько десятков испытательных стендов, основанных на данном принципе. Например, торсионная платформа компании Inertia Dynamics, работающая по принципу перевёрнутого крутильного маятника. Данная платформа измеряет только составляющие тензора инерции объектов [3]. Система Resonic K представляет собой крутильный маятник с аэроподвесом. Во время исследования объект последовательно помещается в положения, заданные программным обеспечением устройства, с последующим измерением отклика на свободные колебания. После того как все данные собраны, система вычисляет тензор инерции и координаты ЦМ объекта исследования [4]. Space Electronics предлагает множество высокоточных торсионных платформ [5]. Их серия KSR обеспечивает высочайшую точность и чувствительность. Эти системы используют сферические аэроподвесы для минимизации вращательного трения и обратной связи по силе для балансировки и устранения ошибок выравнивания. Серия KSR измеряет все масс-центровочные и инерционные характеристики [5].

На основании анализа этих и других подобных стендов, приведённого в [6; 7], можно сделать вывод, что для работы с наноспутниками все существующие стенды имеют некоторые недостатки. В частности, это высокая стоимость как самих установок, так и услуг по работе с ними, что противоречит концепции недорогих малых космических аппаратов. Кроме того, большинство таких стендов не имеет необходимой оснастки для проведения испытаний с наноспутниками формата CubeSat 1U-3U. Поэтому на межвузовской кафедре космических исследований Самарского университета был разработан и изготовлен стенд, основанный на принципе перевёрнутого крутильного маятника [8], с комплектом оснастки для определения координат центра масс и составляющих тензора инерции наноспутников формата CubeSat 1U-3U. Согласно технической документации стенда абсолютная погрешность измерения координат ЦМ объектов составляет 0,5 мм, а относительная погрешность для осевых моментов инерции – 1,5%. Такой уровень погрешностей является допустимым для подавляющего большинства космических миссий, реализуемых НС.

В работе [6] изложена методика определения МЦИХ НС с помощью данного стенда, а также приведена теоретическая оценка погрешностей измерений. Кроме того, представлены результаты экспериментов по определению двух координат ЦМ и одного осевого момента инерции эталонного диска массой 2 кг и произведён расчёт погрешностей измерений, который подтвердил заявленную в технической документации точность. Так как характеристики реального наноспутника и эталонных дисков существенно отличаются, то для оценки погрешностей возникла необходимость разработки эталона формата CubeSat, а также методики экспериментального определения погрешности стенда измерения МЦИХ НС с помощью эталонных объектов.

Сначала была проведена серия экспериментов для проверки точности определения периода колебаний при воздействии различных факторов окружающей среды, таких как: температура и относительная влажность воздуха, давление, освещённость и т.д. При вычислениях была использована методика аппроксимации графика одномоментных измерений квадратичной функцией, позволяющая исключить единичные выбросы.

Затем был разработан и изготовлен наборный эталонный объект формата CubeSat 3U переменной массы и составляющих тензора инерции, который имеет относительно простую конфигурацию. Его МЦИХ можно с высокой точностью вычислить с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР). По рекомендациям [9; 10] с

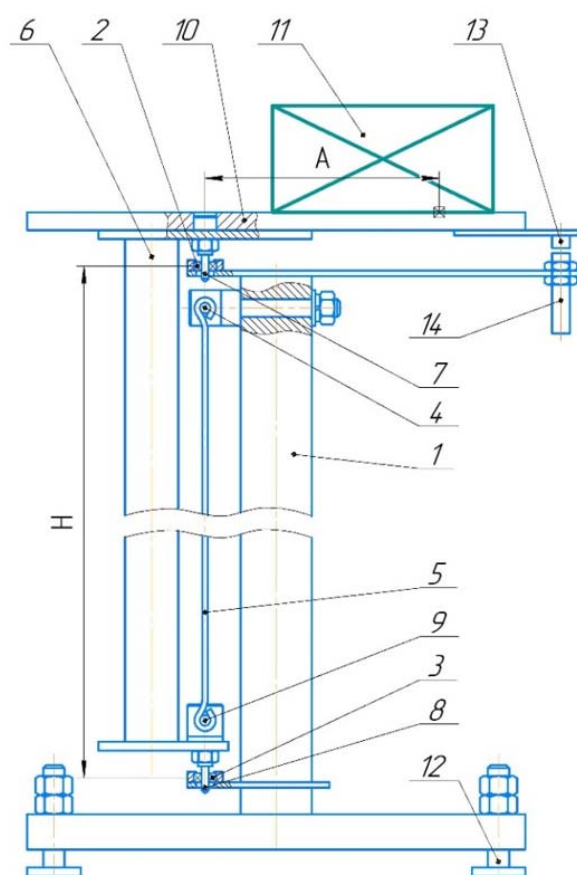
помощью разработанного эталона была сформирована методика экспериментального вычисления погрешностей измерений МЦИХ наноспутника.

Объект исследования

На кафедре космических исследований Самарского университета разработан стенд, изображённый на рис. 1 [8]. Стенд представляет собой крутильные весы, состоящие из станины и балансира (вала с рабочим столом). На станине 1 установлены верхний 2 и нижний 3 радиальные подшипники качения, расположенные соосно. Под подшипником 2 установлен узел 4 крепления торсиона 5. На валу 6 установлены верхний 7 и нижний 8 шипы. В верхней части шип 8 имеет узел крепления 9 торсиона 5. В верхней части вал 6 имеет рабочий стол 10 с координатными отверстиями для установки объекта 11. Станина 1 имеет регулируемые винтовые опоры 12. На рабочем столе 10 установлена стрелка 13, а на станине – датчик 14 положения равновесия рабочего стола 10 стенда [8].

Вал 6 висит на торсионе 5, а подшипники 2 и 3, задающие ось вращения вала 6, воспринимают только радиальную нагрузку, обусловленную несовпадением общего центра масс вала 6, рабочего стола 10 и объекта 11 с осью вращения вала 6.

Для измерения периода колебаний используется оптический датчик, который фиксирует каждое прохождение балансира. Данные записываются на карту памяти. Затем производится их обработка с помощью ПК. Для производства следующего цикла измерений информация на дисплее обновляется до нулевых показаний кнопкой перезагрузки.



а



б

Рис. 1. Испытательный стенд: а – схема испытательного стенда; б – внешний вид стенда

Рабочий стол балансира выполнен в виде плиты с сеткой координатных отверстий для установки эталонных дисков при юстировке (установлении вертикальности оси вращения балансира и горизонтальности рабочего стола) и тарировке (определении крутильной жёсткости), а также для установки оснастки базирования объектов. Установка наноспутников формата CubeSat 1U-3U на рабочий стол производится с помощью оснастки, входящей в комплект стенда. Она позволяет закреплять наноспутник на рабочем столе в различных положениях, необходимых для вычисления трёх координат ЦМ НС и шести независимых составляющих его тензора инерции.

Математическая модель определения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутника

В данной работе применяются три системы отсчёта. Система координат (СК), связанная с рабочим столом стенда ($SXYZ$): начало отчёта S находится в плоскости рабочего стола над осью вращения стенда, ось SZ совпадает с осью вращения и направлена вверх, оси SX и SU лежат в плоскости рабочего стола стенда. Строительная СК ($Oxyz$): оси совпадают с ребрами наноспутника, а начало отсчёта O выбирается в вершине НС, ось Ox при этом направлена вдоль самого большого размера наноспутника. Центральная СК ($Cxyz$): направления каждой оси совпадают с одноимёнными направлениями $Oxyz$, а начало отсчёта располагается в ЦМ наноспутника.

При известной крутильной жёсткости c и периоде колебаний T рабочего стола стенда можно вычислить момент инерции всей системы относительно оси SZ :

$$I_{sz} = \frac{T^2 c}{4\pi^2}. \quad (1)$$

Если центр масс наноспутника не совпадает с осью SZ , то, используя теорему Штейнера, можно записать:

$$I_{sz} = I_0 + I_z + m(X_C^2 + Y_C^2), \quad (2)$$

где I_0 – собственный момент инерции стенда; m – масса НС; I_z – момент инерции НС относительно оси z центральной СК; $X_C Y_C$ – координаты центра масс наноспутника в системе координат, связанной с рабочим столом стенда.

Таким образом, из (1) и (2) получим формулу для определения момента инерции наноспутника:

$$I_z = \frac{(T^2 - T_0^2)c}{4\pi^2} - m(X_C^2 + Y_C^2),$$

где T_0 – период колебаний рабочего стола стенда без установленного наноспутника.

Координаты $X_C Y_C$ вычисляются по результатам трёх экспериментов по следующим формулам:

$$X_C = \frac{(T_2^2 - T_1^2)c}{8\pi^2 m \Delta X} - \frac{\Delta X}{2},$$

$$Y_C = \frac{(T_3^2 - T_1^2)c}{8\pi^2 m \Delta Y} - \frac{\Delta Y}{2},$$

где T_1 – период колебаний рабочего стола с установленным в начальное положение НС; T_2 – период колебаний рабочего стола с НС, установленным в положение, когда он смещён относительно начального положения на расстояние ΔX только вдоль оси SX ; T_3 – период колебаний рабочего стола с НС, установленным в положение, когда он смещён относительно начального положения на расстояние ΔY только вдоль оси SY .

Если оси строительной СК и системы координат, связанной с рабочим столом стенда, сонаправлены, тогда координаты центра масс НС в строительной СК x_C, y_C можно вычислить по формулам:

$$x_C = X_C - X_O,$$

$$y_C = Y_C - Y_O,$$

где X_O, Y_O – координаты точки O в системе координат, связанной с рабочим столом стенда.

Таким образом, получены формулы для оценки трёх параметров, а именно I_z, x_C, y_C . Для того чтобы найти I_x, I_y, z_C , необходимо поместить наноспутник в соответствующее положение на рабочем столе стенда. Для оценки центробежных моментов инерции используется метод пересчёта из осевых моментов инерции. Предлагается измерять моменты инерции вдоль трёх осей, которые образуют 45° с положительным направлением осей x, y, z , а затем вычислить центробежные моменты инерции по формулам:

$$I_{xy} = \frac{(I_x + I_y)}{2} - I_1, \quad I_{xz} = \frac{(I_x + I_z)}{2} - I_2, \quad I_{yz} = \frac{(I_y + I_z)}{2} - I_3,$$

где I_1 – момент относительно оси между положительным направлением осей x и y ; I_2 – момент относительно оси между осями x и z ; I_3 – момент относительно оси между положительным направлением осей y и z .

Проверка точности определения периода колебаний

Стенд для измерения масс-центровочных и инерционных характеристик НС Самарского университета представляет собой сложную электромеханическую систему, включающую в себя: оптический датчик, подшипники, торсион и прочее. Эти и другие компоненты стенда могут быть подвержены влиянию факторов окружающей среды – таких как температура и относительная влажность воздуха, давление, освещённость и т.д. В связи с этим в разное время суток при различных погодных условиях были проведены 10 испытаний по расчёту начального периода колебаний пустого малого рабочего стола [11]. При вычислениях была использована аппроксимация квадратичной функцией одномоментных измерений. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Периоды колебаний пустого малого рабочего стола станда, полученные в разное время

Порядковый номер эксперимента	Период колебаний T , мс	Отклонение от среднего значения, мс	Относительное отклонение от среднего значения, %
1	1110,77	-0,09	-0,008
2	1111,04	0,18	0,016
3	1111,22	0,36	0,032
4	1110,99	0,13	0,012
5	1110,51	-0,34	-0,031
6	1111,18	0,05	0,004
7	1110,65	-0,21	-0,019
8	1110,78	-0,08	-0,007
9	1110,91	0,32	0,029
10	1110,56	-0,30	-0,027

Для оценки погрешности определения периода колебаний были вычислены отклонения измеренных величин от их среднего значения, которые затем были переведены в относительные отклонения. Среднее вычисленное значение для данных периодов колебаний – 1110,86 мс. Наибольшее по абсолютному значению относительное отклонение от среднего значения имеет результат девятого эксперимента – 0,032%. Такую величину можно считать пренебрежительно малой, поэтому на основании данного исследования можно сделать вывод о том, что определение периода колебаний производится с высокой точностью и практически не зависит от меняющихся факторов окружающей среды.

Эталонный наборный объект

Для отработки методики определения МЦИХ наноспутников формата CubeSat 3U был разработан и изготовлен эталонный наборный объект, размеры которого 340×100×100 мм. Данный эталон имеет набор интегрируемых пластин, с помощью которых можно изменять его массу, координаты центра масс и составляющие тензора инерции.

Эталонный объект состоит из четырёх боковых пластин, называемых плитами, и крепёжных элементов, представляющих собой 16 штифтов и 32 фиксирующие гайки. Суммарная масса такого корпуса без установленных внутренних пластин составляет 1133 г. Массы каждого из перечисленных элементов приведены в табл. 2. Они используются при моделировании эталона в САПР.

Таблица 2. Значения масс элементов каркаса эталонного объекта

Название элемента	Масса, г	Количество, шт.
Плита большая	236,800	2
Плита малая	235,600	2
Штифт	10,425	16
Гайка M4 DIN 934	0,675	32

Помимо основного каркаса существует два вида пластин номинального размера $100 \times 100 \times 4$ мм, интегрируемых в корпус:

- 1) цельная пластина массой около 280 г;
- 2) эксцентричная пластина массой около 185 г, имеющая сквозной вырез размером 40×80 мм. Центр масс данной пластины смещён только по одной оси на 10,5 мм относительно геометрического центра.

Значение массы пустого корпуса 1133 г является нижней границей массы данного наборного эталонного объекта. Верхняя граница при полном заполнении корпуса цельными пластинами составляет приблизительно 9810 г.

Элементы эталонного объекта, применяемого для экспериментальной оценки погрешностей измерений МЦИХ наноспутников на стенде Самарского университета, были спроектированы и смоделированы в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D v18.1. При этом для корректного расчёта масс-центровочных и инерционных характеристик модели эталонного объекта при проектировании его 3D-модели были взвешены на лабораторных весах (погрешность измерений не более 0,1 г) и введены в программу массы каждого из элементов.

В ходе работы были смоделированы три сборки данного эталонного объекта, изображённые на рис. 2. В табл. 3 представлены их масс-центровочные и инерционные характеристики, рассчитанные встроенными алгоритмами САПР КОМПАС-3D. Данные значения величин принимаются в работе за расчётные. Смоделированные эталонные объекты были последовательно собраны и исследованы на испытательном стенде. По завершению сборки с помощью лабораторных весов были найдены их массы, значения которых $m_{01} = 2,972$ кг, $m_{02} = 4,635$ кг и $m_{03} = 1,851$ кг соответственно. Данные значения отличаются от расчётных, вычисленных с помощью алгоритмов САПР КОМПАС-3D v18.1, на 0,07%, 0,02% и 0% соответственно, что говорит о высокой степени сходства собранных и спроектированных эталонных объектов.

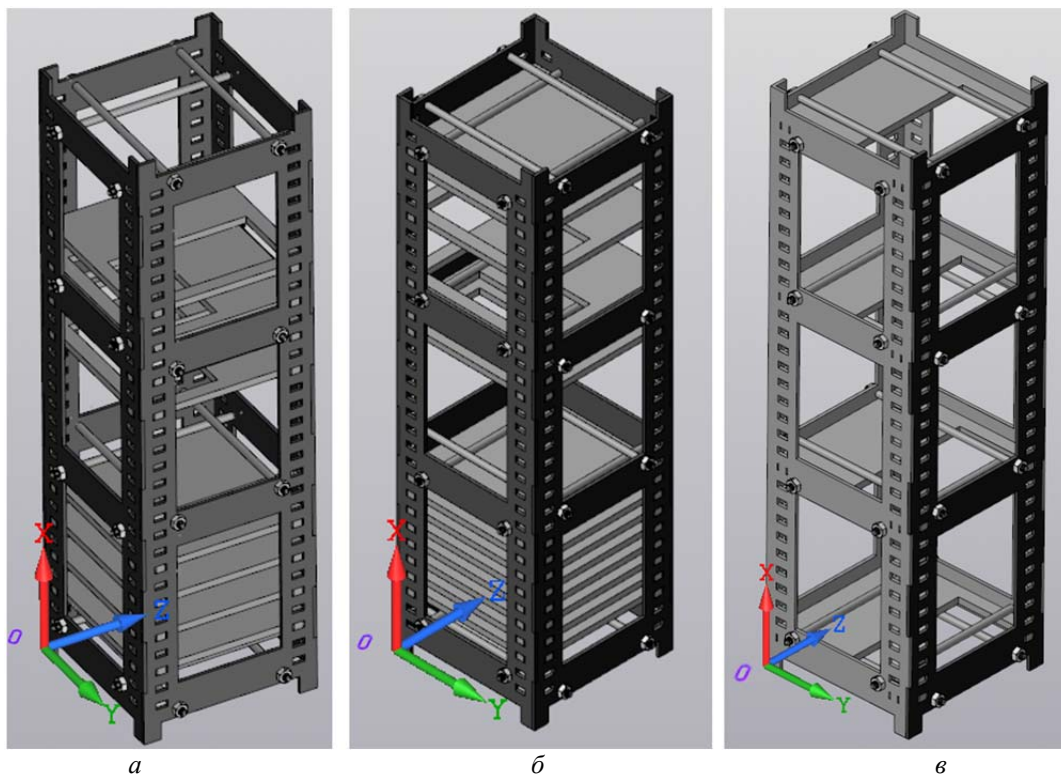


Рис. 2. Исследованные варианты сборки эталонного объекта:
 а – эталон массой 2,974 кг; б – эталон массой 4,636 кг; в – эталон массой 1,851 кг

Таблица 3. Значения МЦИХ эталонов, рассчитанные встроенными алгоритмами КОМПАС-3D

Параметр	Первый вариант сборки	Второй вариант сборки	Третий вариант сборки
Масса m , кг	2,974	4,636	1,851
Абсцисса ЦМ x_c в ССК, мм	144,96	149,83	169,94
Ордината ЦМ y_c ССК, мм	49,33	50,00	45,93
Апplikата ЦМ z_c в ССК, мм	51,90	51,65	50,00
Осевой момент инерции I_x , кг·м ²	0,006924	0,009519	0,005076
Осевой момент инерции I_y , кг·м ²	0,027579	0,049280	0,023581
Осевой момент инерции I_z , кг·м ²	0,027594	0,049299	0,023550
Центробежный момент инерции I_{xy} , кг·м ²	-0,000207	0	0,000001
Центробежный момент инерции I_{xz} , кг·м ²	0,000369	0,000599	0
Центробежный момент инерции I_{yz} , кг·м ²	-0,000004	0	0

Модифицированная методика определения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутника

Как описано в пункте «Математическая модель определения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутника», для вычисления одной координаты центра масс НС необходимо провести как минимум два измерения. Для повышения точности результатов измерений был использован способ осреднения одноимённых величин, повышающий точность существующей методики определения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутника, представленной в [6].

При использовании модифицированной методики проведения испытаний каждая координата ЦМ объекта вычисляется четыре раза с помощью различных пар измерений для прямого и обратного положений НС. Пары измерений при этом формируются из экспериментов для начального и дважды смещённого положения наноспутника. После чего производится осреднение одноимённых результатов вычислений. Таким образом, взаимно уничтожается часть систематических погрешностей и точность вычисления координат ЦМ возрастает.

Аналогичная схема проведения испытаний предложена и для определения осевых моментов инерции с существенным отличием: четыре пары измерений для расчёта каждого осевого момента инерции формируются из экспериментов с пустым рабочим столом (без установленного НС, но с размещённой оснасткой) и с установленным в четырёх различных положениях наноспутником. Для оценки центробежных моментов инерции формируется восемь пар измерений аналогично вычислению осевых моментов.

Предложенная методика подразумевает в общей сложности 57 экспериментов: 16 – для вычисления координат ЦМ НС, 14 – для определения осевых моментов инерции и, соответственно, 27 – для расчёта центробежных моментов инерции.

Методика определения погрешности расчёта координат центра масс и составляющих тензора инерции с помощью эталонного наборного объекта

Для экспериментального определения погрешностей МЦИХ наноспутника необходимо сначала провести определение данных характеристик самого космического аппарата с помощью испытательного стенда, применяя описанную выше методику определения МЦИХ НС. Затем необходимо сконфигурировать эталонный объект из имеющихся моделей элементов с помощью системы автоматизированного проектирования, имеющей встроенные численные методы расчёта МЦИХ, и провести вычисление данных характеристик. При этом координаты ЦМ и составляющие тензора инерции сконфигурированного объекта должны быть максимально близкими к реальному наноспутнику. Затем нужно собрать эталонный объект и, применяя методику определения МЦИХ НС, провести экспериментальный расчёт данных характеристик эталона с помощью стенда. После чего необходимо вычислить погрешности их измерений для эталона. Данные погрешности и будут использоваться в качестве погрешностей определения МЦИХ реального НС.

Расчёт абсолютной погрешности определения координат ЦМ эталонного объекта осуществляется путём вычисления модуля разницы между осреднённым значением координаты, полученным в ходе эксперимента, и расчётной величиной, вычисленной в строительной СК объекта исследования. Согласно технической документации стенда величина абсолютной погрешности измерения координат ЦМ объекта должна быть не более 0,5 мм.

Для осевых моментов инерции более информативным является значение относительной погрешности, которое можно вычислить делением абсолютной погрешности на расчётное значение величины. Согласно технической документации стенда величина относительной погрешности для осевых моментов инерции объекта должна быть не более 1,5%.

Результаты проведённых экспериментов

Модифицированная методика определения МЦИХ НС была использована для каждого варианта сборки эталонного объекта при проведении серии экспериментов.

При определении координат ЦМ в строительной СК эталона были вычислены абсолютные погрешности для каждой пары измерений и для осреднённых величин. За расчётные значения координат ЦМ принимались значения, вычисленные с помощью встроенных в САПР КОМПАС-3D v18.1 алгоритмов. Подробные результаты расчётов для первого варианта сборки приведены в табл. 4, где под средним понимается среднее арифметическое значение величин. Для второго и третьего вариантов сборки в табл. 5 и 6 представлены результаты расчётов погрешностей измерений только осреднённых величин. Расчёт производился с помощью разработанных исполнительных файлов приложения MATLAB R2018b.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что абсолютные погрешности измерения координат ЦМ эталонных объектов, вычисленные по разработанной методике, когда за расчётные значения принимаются рассчитанные с помощью САПР, не превосходят заявленную в конструкторской документации стенда величину 0,5 мм.

Таблица 4. Результаты экспериментального вычисления координат ЦМ эталонного объекта первого варианта сборки

Координата ЦМ	Экспериментально вычисленная координата, мм	Расчётная координата, мм	Абсолютная погрешность, мм
x_{c1}	144,91	144,96	0,05
x_{c2}	144,54	144,96	0,42
x_{c3}	143,77	144,96	1,19
x_{c4}	145,31	144,96	0,35
Среднее x_c	144,63	144,96	0,33
y_{c1}	51,43	49,33	2,10
y_{c2}	52,27	49,33	2,93
y_{c3}	47,16	49,33	2,17
y_{c4}	46,79	49,33	2,54
Среднее y_c	49,41	49,33	0,08
z_{c1}	53,78	51,90	1,88
z_{c2}	54,76	51,90	2,86
z_{c3}	50,13	51,90	1,77
z_{c4}	49,00	51,90	2,90
Среднее z_c	51,92	51,90	0,02

Таблица 5. Результаты экспериментального вычисления координат ЦМ эталонного объекта второго варианта сборки

Координата ЦМ	Экспериментально вычисленная координата, мм	Расчётная координата, мм	Абсолютная погрешность, мм
Среднее x_c	149,50	149,83	0,33
Среднее y_c	50,08	50,00	0,08
Среднее z_c	51,76	51,65	0,11

Таблица 6. Результаты экспериментального вычисления координат ЦМ эталонного объекта третьего варианта сборки

Координата ЦМ	Экспериментально вычисленная координата, мм	Расчётная координата, мм	Абсолютная погрешность, мм
Среднее x_c	169,90	169,94	0,04
Среднее y_c	45,75	45,93	0,18
Среднее z_c	50,07	50,00	0,07

Из приведённых в табл. 4 – 6 значений можно сделать вывод и об эффективности способа осреднения одноимённых координат, полученных для различных положений эталона в оснастке для определения координат ЦМ НС. Модифицированная методика хорошо показала себя, так как абсолютные погрешности однократно проводимых измерений для некоторых положений эталона по данным табл. 4 превосходят 1,5 и даже 2,5 мм, а осреднённые значения при этом принимают значения с отклонением от расчётных не более чем на 0,5 мм.

Для экспериментально полученных координат ЦМ эталонов по методике проведения эксперимента, подразумевающей осреднение одноимённых величин, были экспериментально вычислены составляющие тензора инерции эталонного наборного объекта трёх вариантов сборки. В табл. 7 приведены подробные результаты расчётов всех шести независимых составляющих тензора инерции эталонного объекта первого варианта сборки в центральной системе координат. Результаты расчётов погрешностей измерений осреднённых величин для эталонного объекта второго и третьего вариантов сборки представлены в табл. 8 и 9.

Таблица 7. Результаты экспериментального вычисления составляющих тензора инерции эталонного объекта первого варианта сборки

Момент инерции	Экспериментально вычисленный I , кг·м ²	Расчётный I , кг·м ²	Абсолютная погрешность, кг·м ²	Относительная погрешность, %
I_{x1}	0,006868	0,006849	0,000019	0,28
I_{x2}	0,006821	0,006849	0,000028	0,41
I_{x3}	0,006800	0,006849	0,000049	0,72
I_{x4}	0,006851	0,006849	0,000002	0,03
Среднее I_x	0,006835	0,006849	0,000014	0,21
I_{y1}	0,027474	0,027521	0,000047	0,17
I_{y2}	0,027476	0,027521	0,000045	0,16
I_{y3}	0,027754	0,027521	0,000233	0,85
I_{y4}	0,027600	0,027521	0,000079	0,29
Среднее I_y	0,027576	0,027521	0,000055	0,20
I_{z1}	0,027449	0,027530	0,000081	0,29
I_{z2}	0,027505	0,027530	0,000026	0,09
I_{z3}	0,027596	0,027530	0,000065	0,24
I_{z4}	0,027600	0,027530	0,000069	0,25
Среднее I_z	0,027537	0,027530	0,000007	0,03
I_{yz1}	0,000181	0,000004	0,000184	–
I_{yz2}	–0,000174	0,000004	0,000170	–
I_{yz3}	0,000186	0,000004	0,000190	–

Окончание табл. 7. Результаты экспериментального вычисления составляющих тензора инерции эталонного объекта первого варианта сборки

Момент инерции	Экспериментально вычисленный I , кг·м ²	Расчётный I , кг·м ²	Абсолютная погрешность, кг·м ²	Относительная погрешность, %
I_{yz4}	-0,000179	0,000004	0,000176	—
I_{yz5}	0,000191	0,000004	0,000195	—
I_{yz6}	-0,000179	0,000004	0,000176	—
I_{yz7}	0,000186	0,000004	0,000190	—
I_{yz8}	-0,000179	0,000004	0,000176	—
Среднее I_{yz}	0,000003	0,000004	0,000001	—
I_{xy1}	-0,000291	-0,000207	0,000498	—
I_{xy2}	-0,000150	-0,000207	0,000358	—
I_{xy3}	-0,000043	-0,000207	0,000251	—
I_{xy4}	-0,000419	-0,000207	0,000629	—
I_{xy5}	-0,000087	-0,000207	0,000294	—
I_{xy6}	-0,000432	-0,000207	0,000640	—
I_{xy7}	-0,000593	-0,000207	0,000800	—
I_{xy8}	0,000131	-0,000207	0,000076	—
Среднее I_{xy}	-0,000236	-0,000207	0,000005	—
I_{xz1}	0,000305	0,000369	0,000674	—
I_{xz2}	0,000450	0,000369	0,000819	—
I_{xz3}	0,000182	0,000369	0,000551	—
I_{xz4}	0,000478	0,000369	0,000847	—
I_{xz5}	0,000219	0,000369	0,000588	—
I_{xz6}	0,000579	0,000369	0,000948	—
I_{xz7}	0,000076	0,000369	0,000294	—
I_{xz8}	0,000855	0,000369	0,001224	—
Среднее I_{xz}	0,000374	0,000369	0,000029	—

Таблица 8. Результаты экспериментального вычисления составляющих тензора инерции эталонного объекта второго варианта сборки

Момент инерции	Экспериментально вычисленный I , кг·м ²	Расчётный I , кг·м ²	Абсолютная погрешность, кг·м ²	Относительная погрешность, %
Среднее I_x	0,009418	0,009519	0,000101	0,15
Среднее I_y	0,049054	0,049280	0,000226	0,11
Среднее I_z	0,049057	0,049299	0,000242	0,01
Среднее I_{yz}	0,000006	0	0,000006	–
Среднее I_{xy}	–0,000070	0	0,000070	–
Среднее I_{xz}	0,000582	0,000599	0,000017	–

Таблица 9. Результаты экспериментального вычисления составляющих тензора инерции эталонного объекта третьего варианта сборки

Момент инерции	Экспериментально вычисленный I , кг·м ²	Расчётный I , кг·м ²	Абсолютная погрешность, кг·м ²	Относительная погрешность, %
Среднее I_x	0,005084	0,005076	0,000008	0,16
Среднее I_y	0,023588	0,023581	0,000007	0,03
Среднее I_z	0,023559	0,023550	0,000009	0,04
Среднее I_{yz}	0,000003	0	0,000003	–
Среднее I_{xy}	–0,000004	0,000001	0,000005	–
Среднее I_{xz}	0,000012	0	0,000012	–

По результатам экспериментов можно сделать вывод о состоятельности способа осреднения одноимённых величин для расчёта составляющих тензора инерции объекта исследования. В частности, погрешности осевых моментов инерции при некоторых положениях эталона в оснастке по данным табл. 7 превосходят аналогичные значения погрешностей осреднённых величин в несколько раз. Следует также отметить, что погрешности всех единичных измерений осевых моментов инерции, приведённых в табл. 7, не превосходят 1%.

Для центробежных моментов инерции абсолютные погрешности осреднённых величин имеют значения на 1 – 2 порядка ниже, чем для однократного расчёта. Таким образом, существенно снижаются погрешности измерений моментов инерции наноспутника при использовании методики осреднения одноимённых величин.

Полученные результаты подтверждают заявленную в технической документации стенда величину относительной погрешности измерения осевых моментов инерции 1,5%.

Заключение

В ходе работы была проведена проверка точности определения периода колебаний рабочего стола стенда Самарского университета при влиянии различных факторов окружающей среды. Результаты экспериментов показали, что погрешность измерения периодов колебаний не превосходит 0,04%, поэтому ей можно пренебречь.

Была модифицирована существующая методика определения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутника путём увеличения общего количества экс-

периментов и последующего осреднения одноимённых величин. Такая методика даёт значительно меньшие погрешности измерений МЦИХ по сравнению с разработанной ранее.

Для формирования методики определения погрешностей измерений координат центра масс и составляющих тензора инерции наноспутника были разработаны, собраны и смоделированы в системе автоматизированного проектирования три варианта сборки наборного эталонного объекта формата CubeSat 3U. Данные эталоны прошли полный цикл испытаний по расчёту МЦИХ НС и позволили оценить погрешности определяемых характеристик. В частности, были экспериментально вычислены погрешности измерения координат центра масс и составляющих тензора инерции и методически повышена их точность. Таким образом, заявленная в технической документации стенда точность измерений подтверждена экспериментально. Такие низкие величины погрешностей измерений масс-центровочных и инерционных характеристик позволяют отнести данный стенд к категории высокоточных измерительных установок.

Предложенные в работе методики могут быть использованы для проведения наземных предпусковых испытаний наноспутников формата CubeSat 1U-3U.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-08-00617а).

Библиографический список

1. Гернет М.М., Ратобильский В.Ф. Определение моментов инерции. М.: Машиностроение, 1969. 247 с.
2. Genta G., Delprete C. Some considerations on the experimental determination of moments of inertia // *Meccanica*. 1994. V. 29, Iss. 2. P. 125-141. DOI: 10.1007/BF01007497
3. Altra Industrial Motion. Inertia dynamics. <https://www.idicb.com/products/moment-of-inertia-measurement-instruments>
4. Resonic. Resonic K. <https://resonic.de/resonic-k/>
5. Raptor scientific. SpaceElectronics KSR, CG/MOI. <https://www.space-electronics.com/Products/ksr-cg-moi-series>
6. Belokonov I.V., Kliuchnik V.N., Barinova E.V., Ivliev A.V., Boltov E.A. Procedure of experimental evaluation of nanoclass spacecraft design parameters using the ground test equipment // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 984. Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/984/1/012038
7. Olmedo N.A., Barczyk M., Lipsett M. Experimental determination of the inertial properties of small robotic systems using a torsion platform // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V. 131. P. 71-96. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.05.021
8. Белоконов И.В., Баринаева Е.В., Ивлиев А.В., Ключник В.Н., Тимбай И.А. Устройство для определения положения центра масс и моментов инерции объектов: патент РФ № 2698536; опубл. 28.08.2019; бюл. № 25.
9. Голицына О.М., Меремьянин А.В., Рисин В.Е. Математическая обработка результатов измерений в лабораторном практикуме по курсу общей физики: учеб.-метод. пособие. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015. 20 с.
10. ГОСТ 8.010-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2014. 11 с.
11. Цветкова Е.В., Шабуньо Е.В. Измерение момента инерции твёрдых тел методом крутильных колебаний: методические указания к лабораторной работе № 111 по механике. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. 12 с.

PROCEDURE OF ASSESSING THE ERROR OF THE DEVICE FOR MEASURING MASS-CENTERING AND INERTIAL CHARACTERISTICS OF NANOSATELLITES USING REFERENCE OBJECTS

© 2022

P. V. Vasin Software Engineer of the Research and Development Laboratory 102; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; shans-vpv@yandex.ru

E. V. Barinova Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Further Mathematics, Senior Researcher of the Research and Development Laboratory 102; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; 15545@yandex.ru

In this paper, we solve the problem of experimental determination of the accuracy of a device for measuring mass-centering and inertial characteristics of nanosatellites which was developed at Samara University and based on the principle of inverted torsional pendulum. A procedure for determining the measurement error of the inertia tensor components and the center-of-mass coordinates using reference objects is proposed. For this purpose, a reference composite object of variable configuration was developed and produced in the form of a CubeSat 3U nanosatellite. With the help of this standard, a modified method of conducting an experiment was developed, which allows reducing the influence of errors in the manufacture of the device and its tooling on the measurement accuracy by averaging the homogeneous quantities. The article presents the results of a series of experiments to determine the errors in measuring mass-centering and inertial characteristics of a reference composite object of three variants of assembly. This series of experiments confirmed the measurement error theoretically calculated and stated in the technical documentation for the device. In addition, the accuracy of the electronic optical sensor installed on the device was evaluated and it was found that the influence of environmental factors on its operation is insignificant and can be neglected. The results of this work can be used to determine the error of measuring the center-of-mass coordinates and the inertia tensor components of a CubeSat 1U-3U nanosatellite at the pre-launch testing stage.

Test equipment; torsional pendulum; nanosatellite; center-of-mass coordinates; tensor of inertia; measurement error

Citation: Vasin P.V., Barinova E.V. Procedure of assessing the error of the device for measuring mass-centering and inertial characteristics of nanosatellites using reference objects. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 3. P. 7-22. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-3-7-22

References

1. Gernet M.M., Ratobyl'skiy V.F. *Opredelenie momentov inertsii* [Determination of moments of inertia]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 247 p.
2. Genta G., Delprete C. Some considerations on the experimental determination of moments of inertia. *Meccanica*. 1994. V. 29, Iss. 2. P. 125-141. DOI: 10.1007/BF01007497
3. Altra Industrial Motion. Inertia dynamics. Available at: <https://www.idicb.com/products/moment-of-inertia-measurement-instruments>
4. Resonic. Resonic K. Available at: <https://resonic.de/resonic-k/>
5. Raptor scientific. SpaceElectronics KSR, CG/MOI. Available at: <https://www.space-electronics.com/Products/ksr-cg-moi-series>
6. Belokonov I.V., Kliuchnik V.N., Barinova E.V., Ivliev A.V., Boltov E.A. Procedure of experimental evaluation of nanoclass spacecraft design parameters using the ground test equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 984. Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/984/1/012038

7. Olmedo N.A., Barczyk M., Lipsett M. Experimental determination of the inertial properties of small robotic systems using a torsion platform. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V. 131. P. 71-96. DOI: 10.1016/j.ymsp.2019.05.021

8. Belokonov I.V., Barinova E.V., Ivliev A.V., Klyuchnik V.N., Timbaj I.A. *Ustroystvo dlya opredeleniya polozheniya tsentra mass i momentov inertsii ob"ektov* [Device for determining position of the center of mass and moments of inertia of objects]. Patent RF, no. 2698536, 2019. (Publ. 28.08.2019, bull. no. 25)

9. Golitsyna O.M., Merem'yanin A.V., Risin V.E. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov izmereniy v laboratornom praktikume po kursu obshchey fiziki: ucheb.-metod. posobie* [Mathematical processing of measurement results in a laboratory practical work on the course of general physics]. Voronezh: Izdatel'skiy Dom VGU Publ., 2015. 20 p.

10. GOST 8.010-2013. State system for ensuring the uniformity of measurements. Procedures of measurements. Main principles. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 11 p. (In Russ.)

11. Tsvetkova E.V., Shabunio E.V. *Izmerenie momenta inertsii tverdykh tel metodom krutil'nykh kolebaniy: metodicheskie ukazaniya k laboratornoy rabote № 111 po mekhanike* [Measurement of the moment of inertia of solid bodies by the torsional oscillation method: laboratory operations manual for laboratory work No. 111 on mechanics]. Orenburg: GOU OGU Publ., 2006. 12 p.