

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕНТРА МАСС И СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕНЗОРА ИНЕРЦИИ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА НАНОСПУТНИКА SAMSAT-ION

На базе Межвузовской кафедры космических исследований (МККИ) разрабатывается наноспутник (НС) SamSat-ION, предназначенный для изучения ионосферы Земли. Конструкция и специфика научного эксперимента разрабатываемой миссии таковы, что существует необходимость стабилизации и чёткой ориентации аппарата. Предполагается, что аппарат будет стабилизирован с помощью гравитационного момента, поэтому необходимо с высокой точностью знать масс-центровочные и инерционные характеристики (МЦИХ) аппарата, к которым относятся координаты центра масс (ЦМ) НС и составляющие его тензора инерции.

Предварительную оценку данных параметров можно провести с помощью встроенных численных методов систем автоматизированного проектирования (САПР), однако такой метод не всегда удобен для сложной механически-электрической системы, так как существуют небольшие отклонения из-за производственных допусков и изменчивости материалов, в некоторых случаях это может привести к значительным изменениям характеристик [1]. В связи с этим в данной работе рассматривается определение МЦИХ опытного образца наноспутника SamSat-ION экспериментальным методом с помощью разработанного на МККИ и запатентованного стенда определения МЦИХ НС формата CubeSat 1U-3U [2].

Данная испытательная установка включает в себя стенд, представляющий собой перевернутый крутильный маятник, комплект оснастки, позволяющий устанавливать наноспутники формата CubeSat 1U-3U в требуемых положениях, а также эталонный наборный объект с помощью которого проводится оценка погрешностей измерений.

Стенд Самарского университета, изображённый на рис. 1. а, оснащён оптическим датчиком, который фиксирует периоды колебаний рабочего стола. При установке НС в различные положения на рабочем столе можно получить совокупность периодов колебаний, которая позволяет оценить 3 координаты ЦМ НС и 6 независимых составляющих его тензора инерции [3]. Абсолютная погрешность определения координат ЦМ не превышает 0,5 мм, относительная погрешность определения осевых моментов инерции не более 1,5%.

Для оценки погрешностей измерения МЦИХ опытного образца НС SamSat-ION используется эталонный наборный объект, 3D-модель которого представлена на рис. 1. б. Данный эталонный объект имеет форму наноспутника формата CubeSat 3U, при этом его внутренние пластины взаимозаменяемы. Существуют 5 различных конфигураций интегрируемых пластин, позволяющих изменять его МЦИХ. Элементы эталонного объекта имеют простую геометрическую форму и изготовлены с высокой точностью, поэтому МЦИХ 3D-модели такого эталонного объекта, рассчитанные встроенными численными алгоритмами САПР, практически не отличаются от истинных для реального объекта испытаний.

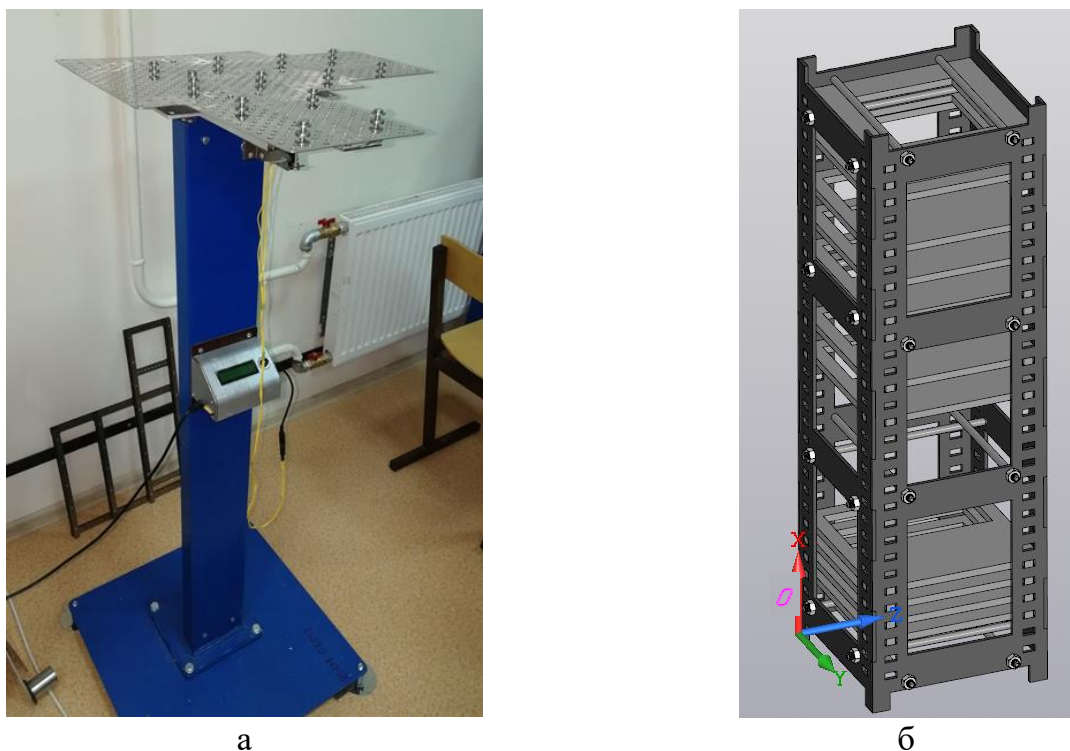


Рис. 1:

а – внешний вид стенда, б – 3D-модель эталонного наборного объекта

Сравнивая экспериментально полученные значения и рассчитанные в САПР, можно получить погрешности измерений МЦИХ эталонного наборного объекта. Если МЦИХ НС и эталонного наборного объекта близки, то за погрешности измерений координат ЦМ и составляющих тензора инерции НС принимаются погрешности, вычисленные для эталонного объекта. В табл. 1 представлены результаты оценки погрешностей измерений МЦИХ эталонного наборного объекта. Из результатов экспериментов следует, что погрешности измерений МЦИХ являются удовлетворительными для большинства миссий и не превосходят заявленных в технической документации стенда.

Таблица 1. МЦИХ эталонного наборного объекта

| Характеристика | Расчётная величина | Экспериментально вычисленная величина | Погрешность измерений |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--|
| Координата x_c ЦМ | 180,14 мм | 179,96 мм | 0,18 мм |
| Координата y_c ЦМ | 55,36 мм | 55,51 мм | 0,15 мм |
| Координата z_c ЦМ | 50,00 мм | 50,05 мм | 0,05 мм |
| Осевой момент инерции I_x | 0,008148 кг·м ² | 0,008108 кг·м ² | 0,000040 кг·м ² (0,49 %) |
| Осевой момент инерции I_y | 0,041433 кг·м ² | 0,041412 кг·м ² | 0,000021 кг·м ² (0,05 %) |
| Осевой момент инерции I_z | 0,041332 кг·м ² | 0,041281 кг·м ² | 0,000051 кг·м ² (0,12 %) |
| Центробежный момент инерции I_{xy} | 0,000048 кг·м ² | 0,000085 кг·м ² | 0,000037 кг·м ² |
| Центробежный момент инерции I_{xz} | 0 кг·м ² | -0,000016 кг·м ² | 0,000016 кг·м ² |
| Центробежный момент инерции I_{yz} | 0 кг·м ² | -0,000002 кг·м ² | 0,000002 кг·м ² |

Определение масс-центровочных и инерционных характеристик опытного образца наноспутника SamSat-ION проводилось в несколько этапов: определение координат ЦМ, определение осевых моментов инерции, определение центробежных моментов инерции, оценка погрешностей измерений. Каждый из этапов проводится последовательно, так как для обработки результатов каждого следующего этапа необходимы результаты предыдущих. На рис. 2 представлен опытный образец НС SamSat-ION на этапе определения центробежных моментов инерции.

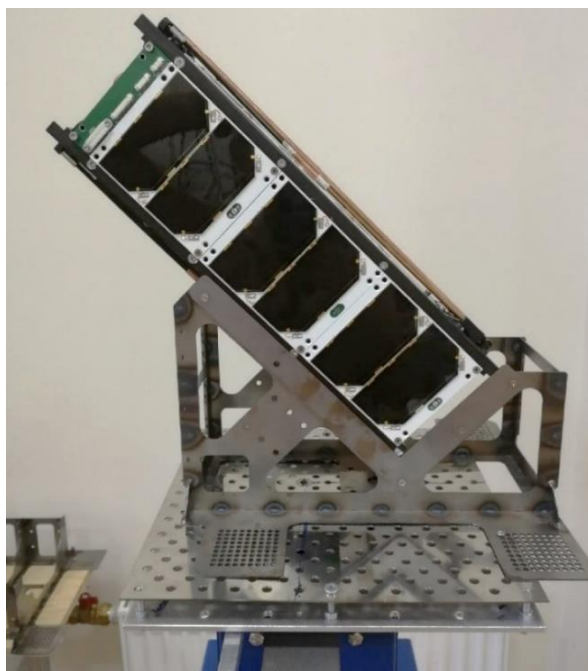


Рис. 2. Опытный образец НС SamSat-ION на стенде Самарского университета

Результаты экспериментального определения МЦИХ опытного образца НС SamSat-ION и погрешности измерений отображены в табл. 2. Координаты ЦМ представлены в строительной системе координат (СК), которая изображена на рис. 1. б, моменты инерции – в центральной СК, оси которой сонаправлены с осями строительной СК, а начало отсчёта располагается в ЦМ НС.

Таблица 2. МЦИХ опытного образца SamSat-ION

| Характеристика | Результат измерений |
|--------------------------------------|--|
| Координата x_c ЦМ | $185,4 \pm 0,2$ мм |
| Координата y_c ЦМ | $53,9 \pm 0,2$ мм |
| Координата z_c ЦМ | $50,0 \pm 0,2$ мм |
| Осевой момент инерции I_x | $0,00728 \pm 0,00005$ кг·м ² |
| Осевой момент инерции I_y | $0,03351 \pm 0,00005$ кг·м ² |
| Осевой момент инерции I_z | $0,03423 \pm 0,00005$ кг·м ² |
| Центробежный момент инерции I_{xy} | $-0,00019 \pm 0,00008$ кг·м ² |
| Центробежный момент инерции I_{xz} | $-0,00005 \pm 0,00008$ кг·м ² |
| Центробежный момент инерции I_{yz} | $0,00002 \pm 0,00008$ кг·м ² |

Таким образом, в данной работе приведены результаты экспериментального определения МЦИХ опытного образца НС SamSat-ION с помощью стенда Самарского университета. Оценка погрешности измерений была проведена с помощью наборного эталонного объекта. Проведённый анализ показал, что полученные МЦИХ удовлетворяют требованиям разрабатываемой космической миссии, а погрешности измерений являются допустимыми.

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

Библиографический список

1. Olmedo N.A., Barczyk M., Lipsett M. Experimental determination of the inertial properties of small robotic systems using a torsion platform. Mech. Syst. Signal Process. 2019. V. 131. P. 71-96.
2. Белоконов И.В., Баринаова 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.
3. Белоконов, И. В. Технология и способ экспериментального определения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутников формата CUBESAT / Е. В. Баринаова, В. Н. Ключник, А. В. Ивлиев, Е. А. Болтов // Космическая техника и технологии. – 2021. – № 3 (34). – С. 83-95.