
**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ,
ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING
THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК 681.2-2,62-293, 53.08, 629.78
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-472-482

**ПОВОРОТНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НАНОСПУТНИКОВ**

А. Е. ГОЛЫХ, Д. В. ФОМИН*

*Амурский государственный университет, Благовещенск, Россия,
e-office@yandex.ru

Аннотация. Одним из важных видов наземного тестирования малых космических аппаратов являются вибродинамические испытания. Как правило, наноспутники размещаются на рабочем столе вибрационных стендов посредством имитаторов транспортно-пускового контейнера (ИТПК). Представлен результат модернизации имитатора транспортно-пускового контейнера статически закрепляемого на столе вибростенда, а также поворотного комплекса, в который включен модернизированный ИТПК. Для обеих конструкций проведены модельные вибродинамические исследования в САПР SolidWorks. При этом для статически закрепляемого ИТПК максимальное количество резонирующей массы конструкции составило 0,048 % на всем диапазоне заданных частот, деформации близки к нулю, в то время как для модернизированного ИТПК с поворотным устройством резонирующая масса составила 0,27 %, а деформации узлов комплекса — 0,09 мм. Для основания поворотного устройства отдельно исследованы статические деформации: с помощью численного моделирования получено значение 0,057 мм, а при натурных испытаниях — 0,052 мм, что говорит о высоком запасе прочности конструкции. Модернизированный ИТПК с поворотным устройством, закрепляемый на столе вибростенда, имеет большую резонирующую массу и деформации, чем у статически закрепляемого ИТПК, однако значения этих параметров лежат в допустимых пределах по ГОСТ 30630.0.0-99 (п. 6), что позволяет эксплуатировать спроектированный поворотный комплекс при проведении вибродинамических испытаний наноспутников. Использование комплекса дает возможность заменить дорогостоящие вибростенды, создающие вибродинамические нагрузки в двух и более независимых плоскостях, так как его можно использовать на вибростендах, создающих вибрации только в одном направлении.

Ключевые слова: *оснастка, поворотный комплекс, наноспутник, вибродинамические испытания, деформация*

Благодарности: статья подготовлена при поддержке внутреннего гранта ФГБОУ ВО „АмГУ“ № 2022/2023.

Ссылка для цитирования: *Голых А. Е., Фомин Д. В.* Поворотный комплекс для проведения вибродинамических испытаний наноспутников // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 472—482. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-472-482.

ROTARY COMPLEX FOR DYNAMIC VIBRATION TESTING OF NANOSATELLITES

A. E. Golykh, D. V. Fomin*

*Amur State University, Blagoveshchensk, Russia
e-office@yandex.ru*

Abstract. Dynamic vibration testing is an important component of small spacecraft ground testing program. As a rule, nanosatellites are placed on the desktop of vibration stands by means of simulators of a transport and launch container (STPC). Results of modernization of the simulator of transport-launch container statically fixed on the table of the

vibrating stand, as well as of the rotary complex, which includes the modernized STPC, are presented. For both structures, model dynamic vibration studies are carried out in SolidWorks CAD. For a statically fixed STPC, the maximum amount of the resonating mass of the structure is 0,048 % over the entire range of specified frequencies, the deformations are close to zero, while for the modernized STPC with a rotary device, the resonating mass is 0,27 %, and the deformations of the nodes complex – 0,09 mm. For the base of the rotary device, static deformations are studied separately; using numerical simulation, a value of 0,057 mm is obtained, and in full-scale tests – 0,052 mm, which indicates a high factor of the structure safety. The modernized STPC with a rotary device, fixed on the table of the shaker, has a greater resonant mass and deformation than the statically fixed STPC, however, the values of these parameters lie within the acceptable limits according to GOST 30630.0.0-99 (p. 6), which allows the operation of the designed rotary complex for nanosatellites dynamic vibration testing. Application of the complex makes it possible to replace expensive vibration stands that create dynamic vibration loads in two or more independent planes, since it can be used on vibration stands that create vibrations in only one direction.

Keywords: equipment, rotary complex, nanosatellite, dynamic vibration tests, deformation

Acknowledgment: the article was prepared with the support of the internal grant of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "AmSU" No. 2022/2023.

For citation: Golykh A. E., Fomin D. V. Rotary complex for dynamic vibration testing of nanosatellites. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 6. P. 472—482 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-472-482.

Популярность малых космических аппаратов (МКА), таких как наноспутники, возрастает с каждым годом благодаря возможностям, связанным с коротким циклом разработки МКА, осуществлением их попутного запуска, широким использованием в образовательных целях [1, 2]. По данным сайта <www.nanosats.eu>, поддерживающего одну из самых крупных баз данных наноспутников, за последние два года число запущенных наноспутников в мире возросло вдвое (с 326 до 633) и превысило самый большой до пандемии показатель в 297 наноспутников, установленный в 2017 г. По прогнозу разработчиков сайта, в ближайшие шесть лет будет запущено 2500 малых космических аппаратов стандарта CubeSat.

Все космические аппараты, включая наноспутники, должны проходить ряд наземных испытаний. Целью таких проверок является подтверждение готовности МКА к функционированию в соответствии с требованиями технического задания. Положительные результаты проверок и получение соответствующих сертификатов является основанием для допуска МКА к полету.

Одним из самых важных видов наземного тестирования наноспутников являются вибродинамические испытания [3, 4]. Как правило, наноспутники размещаются на рабочем столе (плите) вибрационных стендов посредством оснастки — имитаторов транспортно-пускового контейнера (ИТПК) или схожих по конструкции устройств [5, 6]. ИТПК устанавливается на плиту испытательного стенда, МКА загружается внутрь и там фиксируется. В настоящей работе предлагается использовать поворотное устройство, включив в него модернизированный ИТПК [5]. Такая конструкция позволит проводить вибродинамические испытания спутников в трех взаимно ортогональных плоскостях на вибростендах, создающих вибродинамическую нагрузку только в одном направлении, поскольку предложенные ранее конструкции ИТПК дают возможность на таких стендах проводить испытания только в двух плоскостях, при условии поворота спутника внутри ИТПК в паузах между тестированиями. При эксплуатации поворотного устройства дорогостоящий вибростенд, позволяющий проводить испытания в трех ортогональных плоскостях, не нужен.

При тестировании уровень испытательных нагрузок, как правило, задается с учетом требований проведения приемочных и квалификационных испытаний наноспутников. Так, например, диапазон частот для проведения вибродинамических испытаний при транспортировке наноспутников ракетой-носителем Союз-2.1б задается от 20 до 2000 Гц, а при их транспортировке наземным транспортом к месту старта — от 1 до 60 Гц.

Предлагаемое в настоящей работе устройство предназначено для тестирования спутников стандарта CubeSat 1-3U, в большинстве случаев разрабатываемых в образовательных организациях, бюджет которых, как правило, ограничен.

Постановка задач. Для достижения поставленной цели требовалось спроектировать поворотное устройство, позволяющее непосредственно в процессе виброиспытаний изменять положение наноспутника на вибростенде в трех взаимно ортогональных плоскостях, согласно методике [7]. Далее требовалось исследовать предложенную конструкцию на собственные частоты и деформации. В первом случае это позволяет определить виброустойчивость и вибропрочность изделия при его транспортировке; во втором случае — выявить элементы и узлы, подверженные изменению геометрии, что в дальнейшем может привести к их разрушению.

Немаловажной также представляется задача снижения временной составляющей трудоемкости при исследовании собственных частот и деформаций наноспутников. Это может быть достигнуто за счет особой конструкции оснастки, в частности, позволяющей тестировать спутники формата CubeSat 1-3U на вибростендах, создающих вибродинамические нагрузки только в одном направлении.

Решение задач. В настоящей работе для решения поставленных задач выполнена модернизация статически закрепляемого ИТПК, разработанного в Научно-образовательном центре им. К.Э. Циолковского (НОЦ) Амурского государственного университета, для наноспутников стандарта CubeSat 1U-3U. Дополнительно был спроектирован поворотный комплекс, включающий данный модернизированный ИТПК, комплекс позволяет проводить вибродинамические испытания космических аппаратов в трех взаимно ортогональных плоскостях.

Решение задач состояло из двух этапов. На первом этапе модернизирован ИТПК, статически закрепляемый на вибростенде (рис. 1). Данный имитатор транспортно-пускового контейнера для спутников CubeSat 1-3U [5] включает в себя: 1 — винты крепления; 2 — переднюю крышку; 3 — ручку; 4 — боковые стенки; 5 — верхнюю крышку; 6 — нижние направляющие; 7 — верхние направляющие; 8 — окна; 9 — основание; 10 — толкатель; 11 — пружину толкателя; 12 — механизм перемещения толкателя; 13 — шпильку; 14 — вороток; 15 — цилиндрические направляющие.

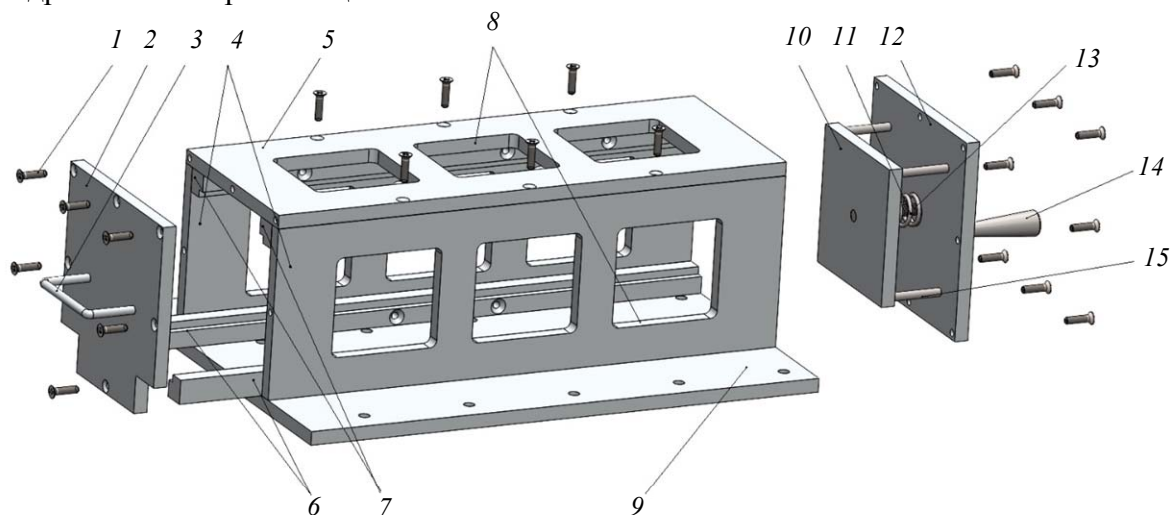


Рис. 1

Такое устройство позволяет тестировать спутники формата от 1U до 3U, в частности, используя типовые проставки, выполненные в виде пустотелых кубических конструкций.

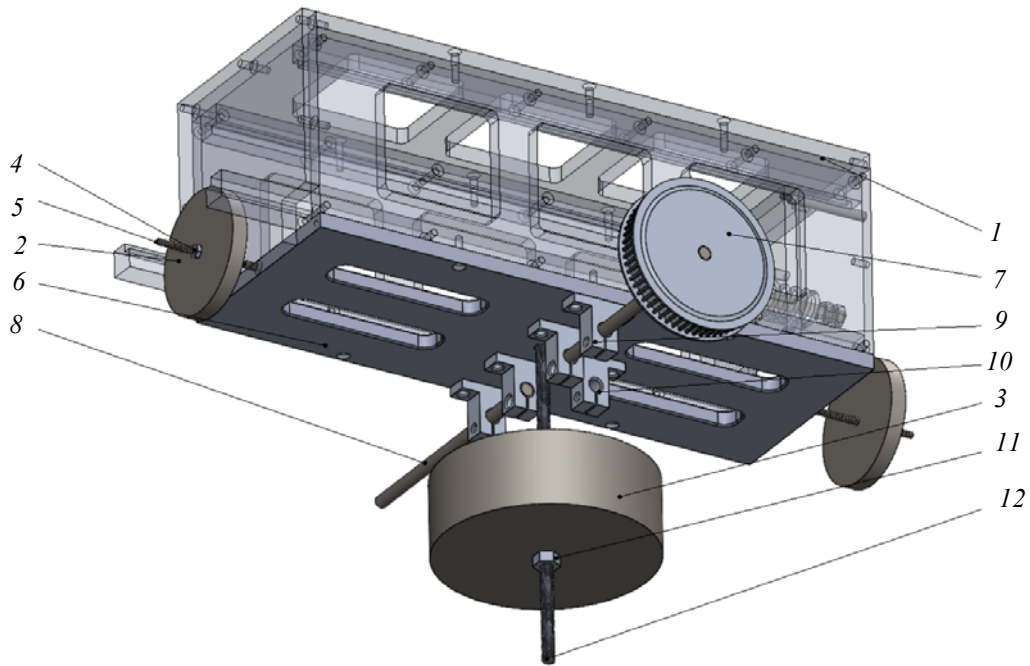


Рис. 2

Для модернизации рассмотренного ИТПК, статически закрепляемого на вибростенде [8], в первую очередь разработан механизм крепления его основания на поворотной оси (рис. 2: 1 — ИТПК; 2 — горизонтальный балансир; 3 — вертикальный балансир; 4, 11 — гайка; 12, 5 — шпилька; 6 — основание; 7 — шкив; 8 — полуось; 9 — крепление полуосей; 10 — фиксатор штифта). Такой подход обеспечивает возможность поворота (непосредственно в процессе виброиспытаний) ИТПК на заданный угол, относительно стола вибростенда. Для этого уменьшена ширина основания, установлены крепления для полуосей, также в конструкцию основания добавлены торцевые отверстия и отверстие в нижней его плоскости, для системы балансировки центра масс (в состав последней вошли набор шпилек и цилиндрических балансиров).

Модернизированный ИТПК закрепляется с помощью основания поворотного устройства на столе вибростенда, разработанного на втором этапе решения задач. Поворот ИТПК на заданный угол выполняется с помощью передачи крутящего момента шагового двигателя через ременную передачу на шкив поворотной полуоси. По данным инклинометра, устанавливаемого непосредственно на ось ИТПК, микроконтроллер отслеживает угол поворота ИТПК. Регистрация угла наклона и его изменение происходят непосредственно во время вибродинамических испытаний без участия оператора, с использованием программы микроконтроллера, управляющего шаговым двигателем. Образец фиксируется с использованием статического момента шагового двигателя на основе данных, получаемых от инклинометра. Такая схема нивелирует вероятность опрокидывания ИТПК относительно поворотного основания.

Для спроектированного устройства точками крепления датчиков являются: стол-плита вибростенда, основание ИТПК (закрепляемого на поворотном устройстве) и непосредственно исследуемый объект. Оценкой величины перемещений колебательных процессов служат усредненные показания, регистрируемые датчиком, согласно ГОСТ 30630.0.0-99.

Поворотный комплекс, спроектированный с использованием САПР Компас 3D и SolidWorks, изготовлен в НОЦ им. К. Э Циолковского. Общий вид комплекса с имитатором транспортно-пускового контейнера спутника CubeSat 1-3U, установленного на вибростенд [8], представлен на рис. 3 (1 — ИТПК; 2, 3 — система балансировки центра масс; 4 — основание поворотного устройства; 5 — вибростенд (не входит в состав комплекса); 6 — стол

оснастки; 7, 11 — шкивы; 8 — ремень; 9 — драйвер; 10 — шаговый двигатель; 12 — электронный блок; 13 — стол; 14 — утяжелитель).

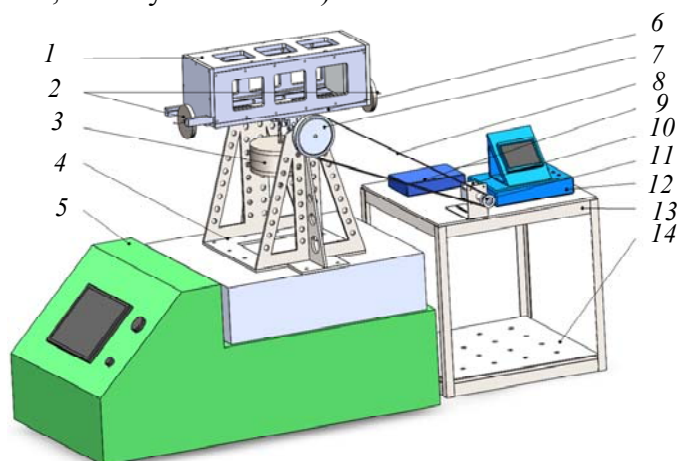


Рис. 3

Данный комплекс изготовлен из широко распространенных материалов: так, материалом основания, стенок и крышек обоих устройств выбран алюминий марки АМг2М, а материалом основания поворотного устройства — сталь марки 45. Для шпилек, гаек и балансиров выбрана сталь марки А2.

Расчет собственной частоты колебаний спроектированных конструкций. В качестве объектов исследования были выбраны: ИТПК, статически закрепляемый на столе вибростенда и модернизированный ИТПК с поворотным устройством, которое также фиксируется на столе вибростенда.

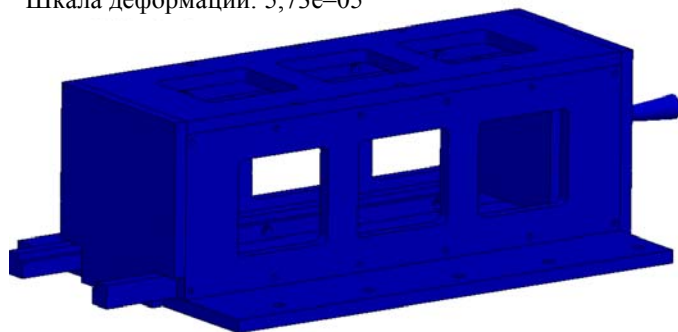
НОЦ им. К. Э Циолковского имеет опыт моделирования как в специально подготовленных для этих целей программах, так и в уже известных САПР [9]. Для определения собственной частоты и формы колебаний элементов конструкций использованы возможности САПР SolidWorks.

Анализ мод колебаний дает возможность получить модель, которая, в свою очередь, позволяет определить влияние конструктивных модификаций или предсказать поведение конструкции при изменяющихся рабочих условиях [10, 11].

На рис. 4 представлены трехмерная модель (а) статически закрепляемого имитатора транспортно-пускового контейнера спутников стандарта CubeSat 1-3U при анализе собственных частот колебаний в САПР SolidWorks, а также фрагмент сетки на 3D-модели устройства в виде равнобедренных треугольников (б), иллюстрирующий способ описания объемной поверхности конструкции. Такая же методика использовалась для модернизированного ИТПК с поворотным устройством (рис. 5).

а)

Шкала деформации: $5,73e-05$



б)

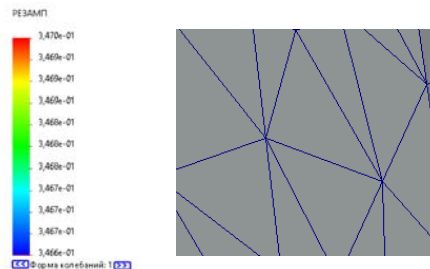


Рис. 4

В табл. 1 приведены 23 моды колебаний собственной частоты статически закрепляемого имитатора транспортно-пускового контейнера спутников стандарта CubeSat 1-3U и соответствующие им расчетные значения в диапазоне $f = 142,19—1889,9$ Гц.

Представленные в табл. 1 данные рассчитаны для резонирующей массы m_Y конструкции вдоль оси Y , это соответствует работе вибростенда, создающего только вертикальные вибрации.

Таблица 1

Собственная частота колебаний ИТПК для наноспутников CubeSat 1-3U

Режим	f , Гц	m_Y , %	Режим	f , Гц	m_Y , %
1	142,19	0,000305	12	1304,6	$1,11 \cdot 10^{-5}$
2	150,03	$2,02 \cdot 10^{-5}$	13	1465,8	$1,75 \cdot 10^{-5}$
3	299,36	$4,09 \cdot 10^{-6}$	14	1504,4	$5,11 \cdot 10^{-7}$
4	348,52	$4,23 \cdot 10^{-9}$	15	1506,2	$1,30 \cdot 10^{-6}$
5	653,31	$3,14 \cdot 10^{-6}$	16	1509,2	0,000119
6	665,8	0,000118	17	1512,1	$9,27 \cdot 10^{-5}$
7	830,4	0,048700	18	1513	$5,99 \cdot 10^{-5}$
8	841,38	0,000186	19	1514,7	0,000172
9	932,08	$1,17 \cdot 10^{-5}$	20	1611,9	$5,01 \cdot 10^{-7}$
10	1048,8	$2,89 \cdot 10^{-8}$	21	1648,7	$4,51 \cdot 10^{-6}$
11	1247,7	$1,99 \cdot 10^{-5}$	22	1813,1	$3,81 \cdot 10^{-5}$
12	1304,6	$1,11 \cdot 10^{-5}$	23	1889,9	$1,38 \cdot 10^{-6}$
11	1247,7	$1,99 \cdot 10^{-5}$			

Анализ данных табл. 1 показал, что максимальное количество резонирующей массы конструкции статически закрепляемого ИТПК составляет 0,048 % на всем диапазоне частот. Деформации устройства близки к нулю.

Шкала деформации: 0,0942195

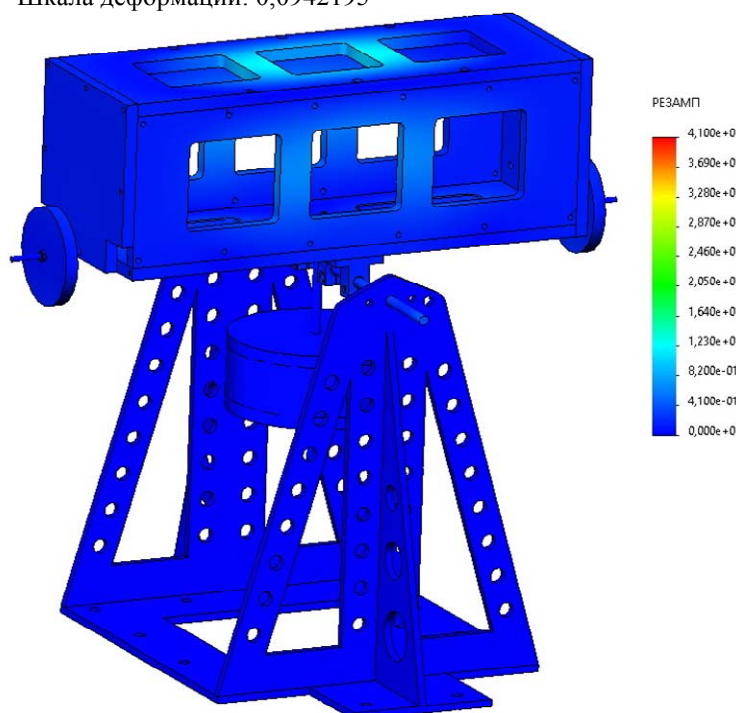


Рис. 5

Аналогичным образом было проведено моделирование для модернизированного ИТПК с поворотным устройством. В табл. 2 приведены 18 мод колебаний собственной частоты указанного устройства в диапазоне $f = 0,001—1715$ Гц.

Таблица 2

Собственная частота колебаний для части комплекса, закрепляемого на вибростенде

Режим	f , Гц	m_y , %	Режим	f , Гц	m_y , %
1	0,001	$3,78 \cdot 10^{-10}$	10	597,670	$9,26 \cdot 10^{-6}$
2	27,929	0,275680	11	984,400	$1,41 \cdot 10^{-11}$
3	37,819	$1,06 \cdot 10^{-10}$	12	1431	$1,04 \cdot 10^{-5}$
4	135,970	$5,95 \cdot 10^{-12}$	13	1431,800	$1,03 \cdot 10^{-5}$
5	136,570	$1,08 \cdot 10^{-8}$	14	1538,900	$9,14 \cdot 10^{-13}$
6	138,650	$1,99 \cdot 10^{-12}$	15	1559,300	$2,51 \cdot 10^{-13}$
7	139,860	$2,83 \cdot 10^{-12}$	16	1613,100	$2,22 \cdot 10^{-12}$
8	463,390	$3,08 \cdot 10^{-12}$	17	1701,500	$1,66 \cdot 10^{-12}$
9	464,360	$3,62 \cdot 10^{-10}$	18	1715	$4,16 \cdot 10^{-9}$

Анализ данных табл. 2 показал, что максимальное количество резонирующей массы модернизированного ИТПК с поворотным устройством составило 0,27 % на второй моде с $f = 27,929$ Гц.

Сравнив полученные результаты моделирования для рассмотренных выше конструкций, можно прийти к выводу, что статически закрепляемый ИТПК имеет меньшую резонирующую массу и деформацию. Поэтому для модернизированного ИТПК с поворотным устройством были подробно исследованы особо нагруженные узлы (основание поворотного устройства). Для основания, включая подшипники в его составе, были определены максимально допустимые статические деформации. Необходимость такого расчета обусловлена вероятностью разрушения подшипников при значениях деформации конструкции, превышающих пороговые в 0,1 мм [12].

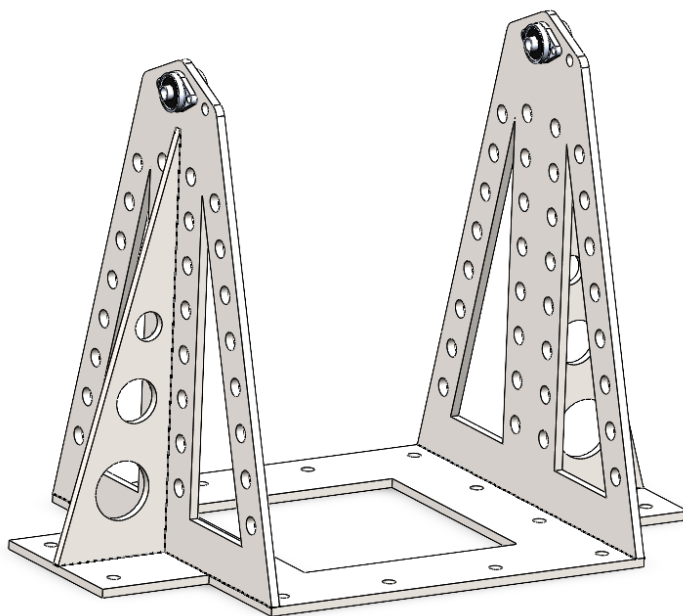


Рис. 6

Конструкция основания поворотного устройства, нижняя пластина которого жестко закреплена, также проанализирована в САПР SolidWorks. Масса нагружения на основание поворотного устройства (11,44 кг) задавалась с учетом максимально возможной массы спутника CubeSat 3U и массы модернизированного ИТПК. Было установлено, что максимальная деформация боковых вертикальных пластин с подшипниками составила 0,057 мм. Вид деформированной трехмерной модели основания поворотного устройства представлен на рис. 7.

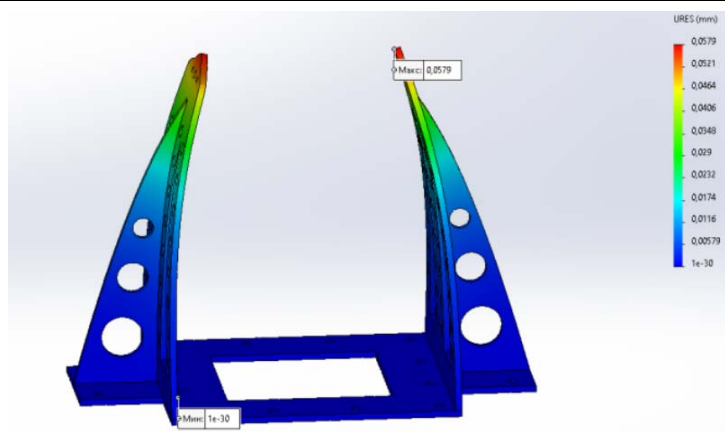


Рис. 7

Статические деформации лабораторного образца рассмотренной выше конструкции и его устройства фиксации исследованы с применением цифрового индикатора ИЦ 0-12.5 0.001 КЛБ (рис. 8). В результате измеренное максимальное отклонение составило 0,052 мм. Расхождение результатов моделирования и эксперимента, полученных для основания поворотного устройства составило менее 1 %. В обоих случаях полученные значения деформации ниже порогового [13—15], что говорит о высоком запасе прочности.

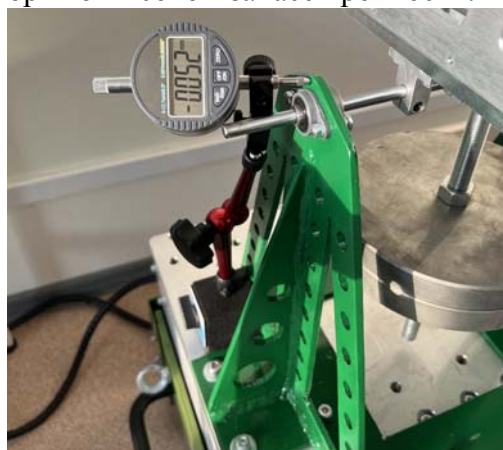


Рис. 8

На основе разработанной конструкторской документации в НОЦ им. К. Э Циолковского изготовлены лабораторные образцы как статически закрепляемого ИТПК (рис. 9, а) для наноспутников CubeSat 1-3U [1], так и модернизированного ИТПК (б) с поворотным устройством [5].

а)

б)

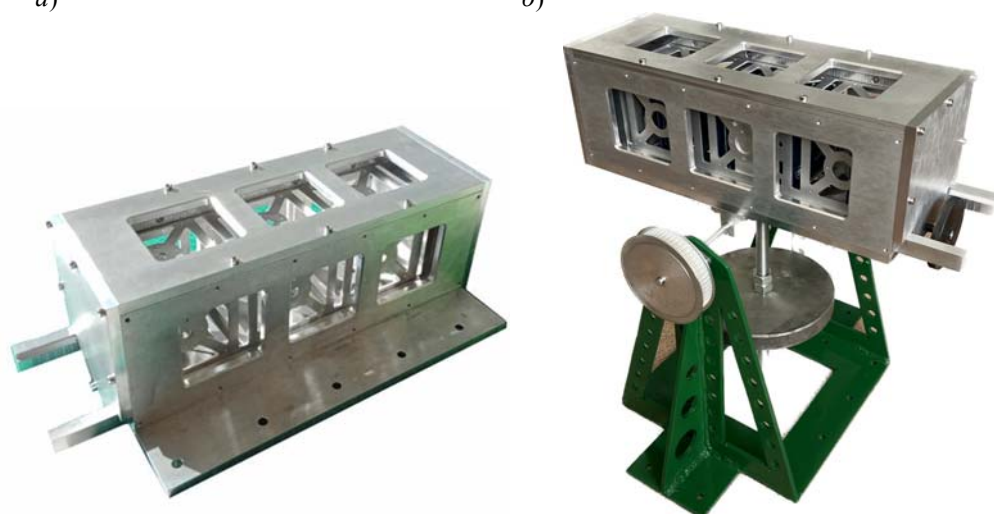


Рис. 9

Габаритные размеры изготовленного статически закрепляемого ИТПК массой 8,32 кг составили 460,00×280,00×144,40 мм. Габаритные размеры модернизированного ИТПК массой 18,47 кг с поворотным устройством составили 500,00×440,00×270,70 мм.

Результаты и их обсуждение. Таким образом, в настоящей работе представлен результат модернизации имитатора транспортно-пускового контейнера статически закрепляемого на столе вибростенда, а также поворотного комплекса, в который включен модернизированный ИТПК. Для обеих конструкций были проведены модельные вибродинамические исследования. При этом у статически закрепляемого ИТПК максимальное количество резонирующей массы конструкции составило 0,048 % на всем диапазоне заданных частот, деформации близки к нулю. Для модернизированного ИТПК с поворотным устройством максимальное количество резонирующей массы конструкции составило 0,27 % на всем диапазоне частот, а деформации узлов комплекса по оси Y — 0,09 мм. Для основания поворотного устройства отдельно были исследованы статические деформации, которые при моделировании составили 0,057 мм, а при натурных испытаниях составили 0,052 мм, что говорит о высоком запасе прочности конструкции (расхождение результатов менее 1 %).

Резонирующая масса и деформации модернизированного ИТПК с поворотным устройством, закрепляемого на столе вибростенда, больше, чем у статически закрепляемого ИТПК, однако значения этих параметров лежат в допустимых, согласно ГОСТ 30630.0.0-99 (п. 6), пределах, что позволяет эксплуатировать спроектированный поворотный комплекс при проведении вибродинамических испытаний наноспутников. Использование такого комплекса расширяет возможности недорогих вибростендов, создающих вибрации только в одном направлении.

Следует отметить, что использование поворотного устройства с ИТПК позволяет снизить время виброиспытаний на однокомпонентных стендах — согласно ГОСТ 30630.0.0-99 (п. 6.9), возможно сокращение на 30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barulina M. A., Fomin D. V., Golikov A. V. et al. Practical modeling and simulation in small spacecraft engineers training // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2647. P. 020022. <https://doi.org/10.1063/5.0104328>.
2. Фомин Д. В., Струков Д. О., Герман А. С. Универсальная платформа полезной нагрузки для малых спутников стандарта CubeSat // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 446—449. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-446-449.
3. Левченко А. С. Об уровнях вибрационных воздействий при испытаниях бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7, № 4. С. 67—75. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2020.7.4.74.82.
4. Козочкин М. П., Порватов А. Н., Сабиров Ф. С. Вибрационный контроль технологических процессов в автоматизированном станочном оборудовании // Метрология. 2013. № 11. С. 27—38.
5. Пат. RU211274U1. Имитатор транспортно-пускового контейнера для поведения вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat 1U-3U / Д. В. Фомин, А. Е. Голых. Заявл. 2021-12-29, опубл. 2022-05-30.
6. Пат. RU2758161C1. Универсальный имитатор транспортно-пускового контейнера для поведения вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat / Д. В. Фомин, Д. С. Тарасов. Заявл. 2021-10-26, опубл. 2021-03-22.
7. Пат. SU1556302A1. Способ виброиспытаний изделия / Ю. Г. Карпов, В. В. Байрак. Заявл. 1987-02-17, опубл. 1996-02-27.
8. Пат. RU2796176C1. Поворотное устройство имитатора транспортно-пускового контейнера спутника CubeSat 1-3U / Д. В. Фомин, Голых А. Е. Заяв. 2022134380 от 27.12.2022. Опубл. 17.05.2023. Бюл. № 14.

9. Фомин Д. В., Барулина М. А., Голиков А. В. и др. Трехмерные неоднородные тепловые поля электронной платы полезной нагрузки „Фотон-Амур 2.0“, разработанной для наноспутников // Вестн. Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 2. С. 74—82. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-74-82.
10. Иголкин А. А., Сафин А. И., Филипов А. Г. Модальный анализ динамического макета малого космического аппарата // Решетневские чтения. 2018. Т. 1. С. 117—118.
11. Данилин А. Н., Курбатов А. С., Жаворонок С. И. О моделировании колебаний многочастотного гасителя вибрации стокбриджа с учётом гистерезиса энергорассеяния // Intern. Journ. for Computational Civil and Structural Engineering. 2020. Т. 16, № 4. С. 29—37. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-4-29-37>.
12. Ли Р. И., Мироненко А. В. Методика исследования параметров деформации металлополимерных подшипников качения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 9. С. 67—70.
13. Малинин Г. В. Методики расчета ребристых пластин на прочность и устойчивость // Тр. МАИ. 2021. № 121. DOI: 10.34759/trd-2021-121-08.
14. Инкин И. В., Капусткина Л. М., Савельев А. М. и др. Моделирование деформации стального листа в протяжном штампе // Металлы. 2004. № 3. С. 34—45.
15. Бернс В. А., Жуков Е. П., Лакиза П. А., Лысенко Е. А. Исследования достоверности диагностирования трещин по искажениям портретов вынужденных колебаний // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21, № 2. С. 26—39. DOI 10.17212/1994-6309-2019-21.2-26-39.

Сведения об авторах

Артём Евгеньевич Голых

— магистрант; Амурский государственный университет, лаборатория малых космических аппаратов научно образовательного центра им. К. Э. Циолковского; E-mail: toksikccc@gmail.com

Дмитрий Владимирович Фомин

— канд. физ.-мат. наук, доцент; Амурский государственный университет; научно-образовательный центр им. К. Э. Циолковского; директор; E-mail: e-office@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.02.2023; одобрена после рецензирования 10.03.2023; принята к публикации 27.04.2023.

REFERENCES

1. Barulina M.A., Fomin D.V., Golikov A.V. et al. *AIP Conf. Proc.*, 2022, vol. 2647, pp. 020022, <https://doi.org/10.1063/5.0104328>.
2. Fomin D.V., Strukov D.O., German A.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 5(61), pp. 446–449, DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-446-449. (in Russ.)
3. Levchenko A.S. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2020, no. 4(7), pp. 67–75, DOI: 10.30894/issn2409-0239.2020.7.4.74.82. (in Russ.)
4. Kozochkin M.P., Porvatov A.N., Sabirov F.S. *Measurement Techniques*, 2014, no. 12(56), pp. 1414–1420, DOI: 10.1007/s11018-014-0393-4.
5. Patent RU211274U1, *Imitator transportno-puskovogo konteynera dlya povedeniya vibrodinamicheskikh ispytaniy sputnikov standarta CubeSat 1U-3U* (Simulator of the Transport and Launch Container for the Behavior of Vibration-Dynamic Tests of Satellites of the CubeSat 1U-3U Standard), D.V. Fomin, A.E. Golykh, Priority 2021-12-29, Published 2022-05-30. (in Russ.)
6. Patent RU2758161C1, *Universal'nyy imitator transportno-puskovogo konteynera dlya povedeniya vibrodinamicheskikh ispytaniy sputnikov standarta CubeSat* (Universal Simulator of Transport and Launch Container for Conducting Vibrodynamic Tests of Cubesat Standard Satellites), D.V. Fomin, D.S. Tarasov, Priority 2021-03-22, Published 2021-10-26. (in Russ.)
7. Patent SU 1556302 A1, *Sposob vibroispytaniy izdeliya* (Method of Vibration Tests of Article), Yu.G. Karpov, V.V. Bayrak, Patent application no., Priority 1987-02-17, Published 1996-02-27. (in Russ.)
8. Patent RU2796176C1, *Povorotnoye ustroystvo imitatora transportno-puskovogo konteynera sputnika CubeSat 1-3U* (Rotary Device of Cubesat 1-3u Satellite Transport and Launch Container Simulator), D.V. Fomin, A.E. Golykh, Patent application no. 2022134380, Priority 27.12.2022, Published 17.05.2023, Bulletin 14. (in Russ.)
9. Fomin D.V., Barulina M.A., Golikov A.V., Strukov D.O., German A.S., Ogorodnikov A.A. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2021, no. 2(20), pp. 74–82, DOI 10.18287/2541-7533-2021-20-2-74-82. (in Russ.)
10. Igolkin A.A., Safin A.I., Filipov A.G. *Reshetnev readings*, 2018, vol. 1, pp. 117–118. (in Russ.)
11. Danilin A.N., Kurbatov A.S., Zhavoronok S.I. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2020, no. 4(16), pp. 29–37, DOI 10.22337/2587-9618-2020-16-4-29-37.
12. Lee R.I., Mironenko A.V. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* (All Materials. Encyclopedic Reference), 2017, no. 9, pp. 67–70. (in Russ.)

13. Malinin G.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 121, DOI: 10.34759/trd-2021-121-08. (in Russ.)
14. Inkin I.V., Kaputkina L.M., Savelyev A.M. et al. *Metals*, 2004, no. 3, pp. 34–45. (in Russ.)
15. Burns V.A., Zhukov E.P., Lakiza P.A., Lysenko E.A. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*, 2019, no. 2(21), pp. 26–39, DOI 10.17212/1994-6309-2019-21.2-26-39. (in Russ.)

Data on authors

- Artem E. Golykh** — Master's Student; Amur State University, Laboratory of Small spacecraft of the K.E. Tsiolkovsky Scientific and Educational Center; E-mail: toksikccc@gmail.com
Dmitry V. Fomin — PhD, Associate Professor; Amur State University, Laboratory of Small spacecraft of the K.E. Tsiolkovsky Scientific and Educational Center; Director of the Center; E-mail: e-office@yandex.ru

Received 11.02.2023; approved after reviewing 10.03.2023; accepted for publication 27.04.2023.