

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАЛОГАБАРИТНОГО ДАТЧИКА ЗВЕЗДНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ

М.К. Абубекеров^{1,2}, **А.В. Бирюков**^{1,2}, **А.И. Захаров**^{1,2},
П.В. Картунов¹, **Н.Л. Крусанова**^{1,2}, **В.Г. Мошкалев**^{1,2}, **С.А. Потанин**^{2,3},
М.Е. Прохоров^{1,2}, **О.Ю. Стекольников**^{1,2}, **М.С. Тучин**^{1,2}

¹ ООО «Азмерит», резидент Сколково, Москва, Россия

² Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга
Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
(ГАИШ), Москва, Россия

³ Физический факультет Московского государственного университета
имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

В настоящее время быстро растет число запусков наноспутников различного назначения, например, в стандарте CubeSat. Для ряда выполняемых ими задач необходима ориентация в инерциальной системе координат. С наибольшей точностью это можно сделать с помощью звездных датчиков ориентации.

Датчик для наноспутников должен иметь малые размеры, низкое энергопотребление, массу не более 200 г, а также низкую стоимость.

Компанией «Азмерит» разработан и изготовлен малогабаритный звездный датчик АЗДК-1. Датчик успешно выдержал наземные испытания.

Ключевые слова: малогабаритный звездный датчик, микроспутники, наноспутники, вибрационные испытания, тармовакuumные испытания, натурные испытания.

ВВЕДЕНИЕ

Задачей компании Азмерит являлась разработка бюджетного звездного датчика умеренной точности, прежде всего для нано и микроспутников. В ближайшее время планируется массовый вывод наноспутников для их использования для задач ДЗЗ и связи. Компания разработала специальное решение – малогабаритный звездный датчик АЗДК-1. Датчик прошел наземные испытания. В 2019 году планируются летные испытания.

ВНЕШНИЙ ВИД И ПАРАМЕТРЫ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА

Перед разработчиками стояла задача найти оптимальное решение по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению, и обеспечить точность 5-10 угловых секунд. Мы использовали колодезную компоновку звездного датчика. В основе колодезной компоновки находится гибко-жесткая плата, показанная на рис.1.

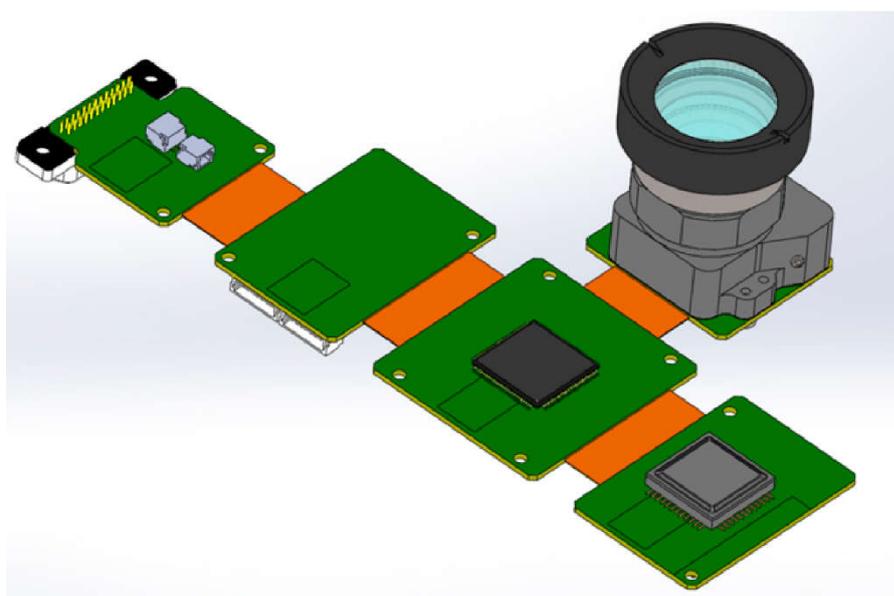


Рис. 1. Гибко-жесткая плата с установленным объективом

Гибко-жесткая плата сворачивается в куб. После чего устанавливается в корпус звездного датчика. Гибко-жесткая плата, свернутая в куб, представлена на рис. 2.

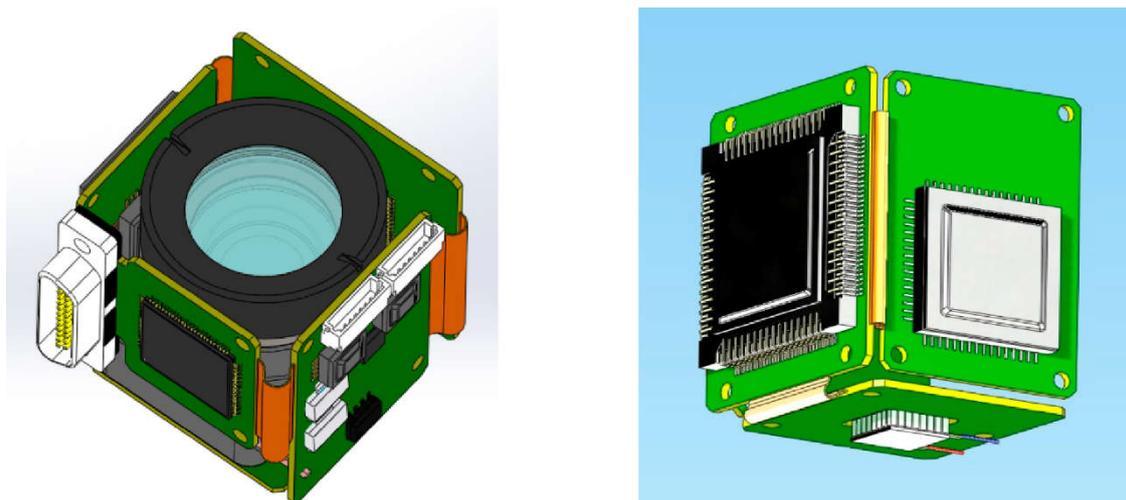


Рис. 2. Гибко-жесткая плата, свернутая в куб для установки в корпус звездного датчика

ЭЛЕКТРОННО-КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА

В качестве фотоприемника используется КМОП матрица размером 1024×1280 пикселей. Разработчики придерживались концепции импортозамещения, поэтому все микросхемы, за исключением фотоприемника, российского производства.

После сборки гибко-жесткой платы в условный куб (см. рис. 2) плата устанавливается в корпус звездного датчика, представленный на рис. 3.

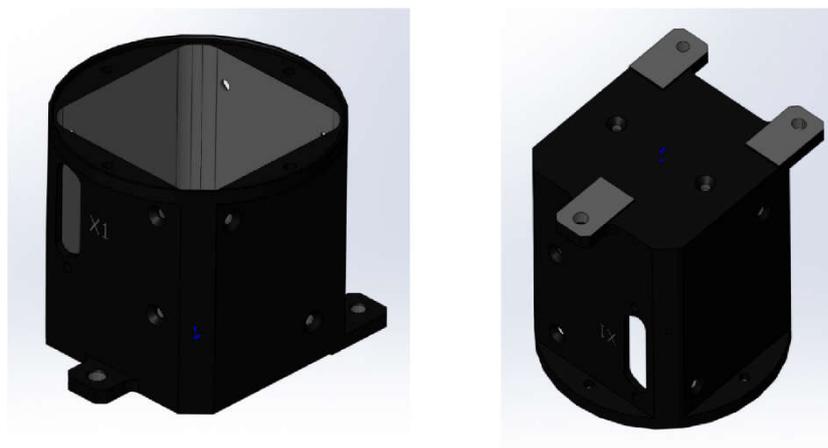


Рис. 3. Корпуса МЗД АЗДК-1

После установки гибко-жесткой платы в корпус, она закрывается блендой и затягивается винтами со стороны основания нижней части корпуса (рис. 4).

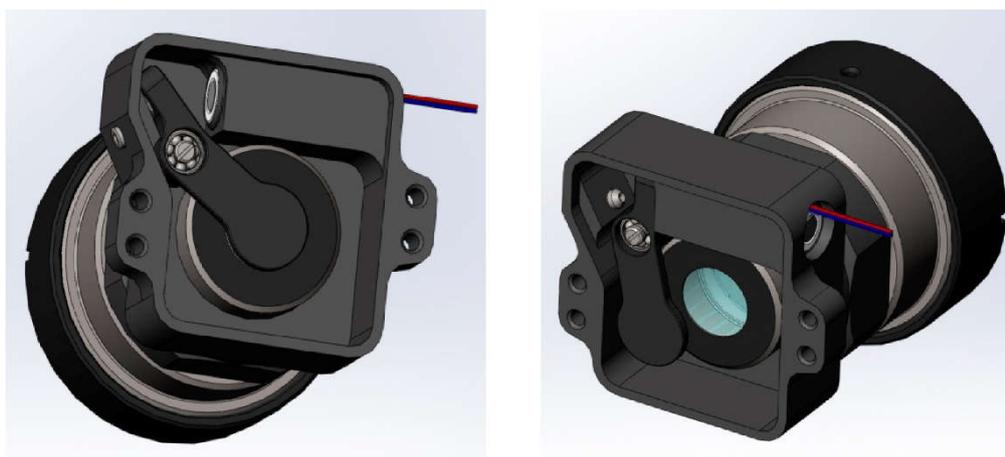


Рис. 4. Узел крепления объектива с блендой и калибровочным затвором

В малогабаритном звездном датчике для более точного учета темновых токов фотоприемника предусмотрена возможность их измерения непосредственно в полете. Калибровка темновых токов производится с помощью калибровочного затвора, на короткое (1-10 сек) время перекрывающего световой поток. Это позволяет вычислить индивидуально в каждом пикселе темновой ток и создать карту темнового тока для последующего его учета при обработке

изображения. Помимо этого, с обратной стороны фотоприемника располагается элемент Пельте, позволяющий охлаждать фотоприемник, тем самым уменьшая темновой ток, вызванный тепловыми электронами, а также радиационную деградацию КМОП. Малогабаритный звездный датчик АЗДК-1 в сборе и его параметры представлены на рис. 5 и в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики МЗД АЗДК-1

| | |
|--------------------------------|------------------|
| Габариты | 56×60×93 мм |
| Масса | 193 г |
| Мощность\ Пиковая мощность | 0,3 Вт \ 1,25 Вт |
| Точность | 5-10 угл. сек. |
| Максимальная скорость вращения | 3°/ сек |
| Частота | 5 Гц |
| Поле зрения | 20° |
| Фотоприемник | 1024×1280 (КМОП) |
| Проницающая способность | 5,8 ^m |
| Бортовой каталог | 2400 звезд |

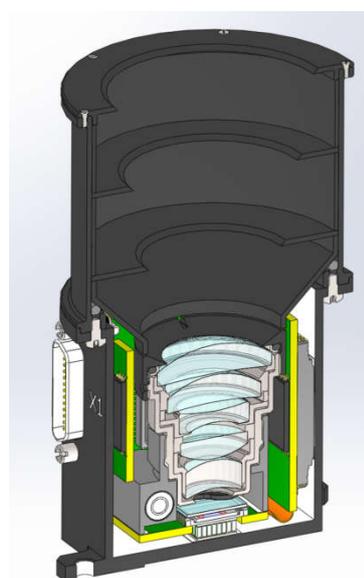


Рис. 5. Малогабаритный звездный датчик АЗДК-1: внешний вид и разрез

На конструкторские решения, примененные в МЗД АЗДК-1, получены патенты: RU 2585179, RU 2577558, RU 154706, ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ 026970.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА

Малогобаритный звездный датчик прошел полный цикл наземных испытаний, включающий в себя функциональные, вибродинамические и термовакуумные испытания.

Для измерения проникающей величины звездного датчика на временах его работы (экспозиция 0,1 с) в Москве на крыше государственного астрономического института имени П.К. Штернберга были выполнены наблюдения звездного неба. На рис. 6 представлены наблюдения звездного скопления Плеяды. Проникающая звездная величина на экспозиции 0,1 с составила 5,8 звездных величин. Значение проникающей способности позволяет уверенно работать по всему звездному небу. Бортовой каталог звездного датчика включает в себя около 2400 звезд.



Рис. 6. МЗД АЗДК-1 на штативе во время проведения натуральных испытаний и полученное изображение скопления Плеяды с экспозицией 0,1 с

ВИБРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Лабораторный образец малогабаритного звездного датчика АЗДК-1 прошел вибродинамические испытания (ВДИ). В ходе испытаний датчик подвергался синусоидальным, случайным (белый шум) и ударным воздействиям. В табл. 2 и 3 приведены режимы испытания звездного датчика

Таблица 2. Синусоидальное воздействие вдоль оси X, Y и Z

| Вдоль оси X | | Единица измерения |
|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| Частота, Гц | Уровень воздействия | |
| от 5 до 14 | $\pm 10,1$ | мм |
| от 14 до 100 | 8 | g |
| Интервал частот колебаний | от 5 до 100 Гц | |
| Скорость изменения частоты | 4 октавы/мин | |

Таблица 3. Широкополосная случайная вибрация вдоль оси X, Y и Z

| Длительность воздействия, с | Частотные диапазоны, Hz | | | | | СКВ виброускорения, g |
|-----------------------------|---|----------------|---------|------------------|-------------------|-----------------------|
| | 20-100 | 100-200 | 200-500 | 500-1000 | 1000-2000 | |
| | Уровни СПМ виброускорений, g ² /Hz | | | | | |
| 240 | 0,0225 | 0,0225-0,05625 | 0,05625 | 0,05625-0,028125 | 0,028125-0,014625 | 7,9 |

Примечания:
g = 9.81 м/с².
Допускаемые отклонения уровней СПМ виброускорений: ± 3 дБ.

После каждого воздействия по оси X Y и Z выполнялась проверка функционирования МЗД АЗДК-1, проверка MEMS – гироскопа и проверка внутреннего датчика температуры.

Параметры пикового ударного ускорения по осям X, Y и Z приведены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры пикового ударного ускорения по осям X, Y и Z

| Пиковое ударное ускорение, g | 9 | 25 |
|---|------|-----|
| Длительность действия ударного ускорения, мс | 5-10 | 1-3 |
| Число ударов по каждой оси (не более 120 ударов в минуту) | 2000 | 7 |

ВЛИЯНИЕ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ФОКУСНОЕ РАССТОЯНИЕ ОБЪЕКТИВА МЗД АЗДК-1

Для измерения изменения фокусного расстояния объектива МЗД АЗДК-1 перед ВДИ был сделан кадр равномерной сетки по всему полю зрения МЗД АЗДК-1.

После ВДИ кадр равномерной сетки сделан повторно. На рис. 7 представлено наложение кадров равномерной сетки до и после ВДИ. Смещение фокуса оказалось в пределах ошибок измерения фокусного расстояния. Относительное изменение фокусного расстояния, рассчитанное с использованием метода наименьших квадратов, составило минус $2,9 \cdot 10^{-6}$.

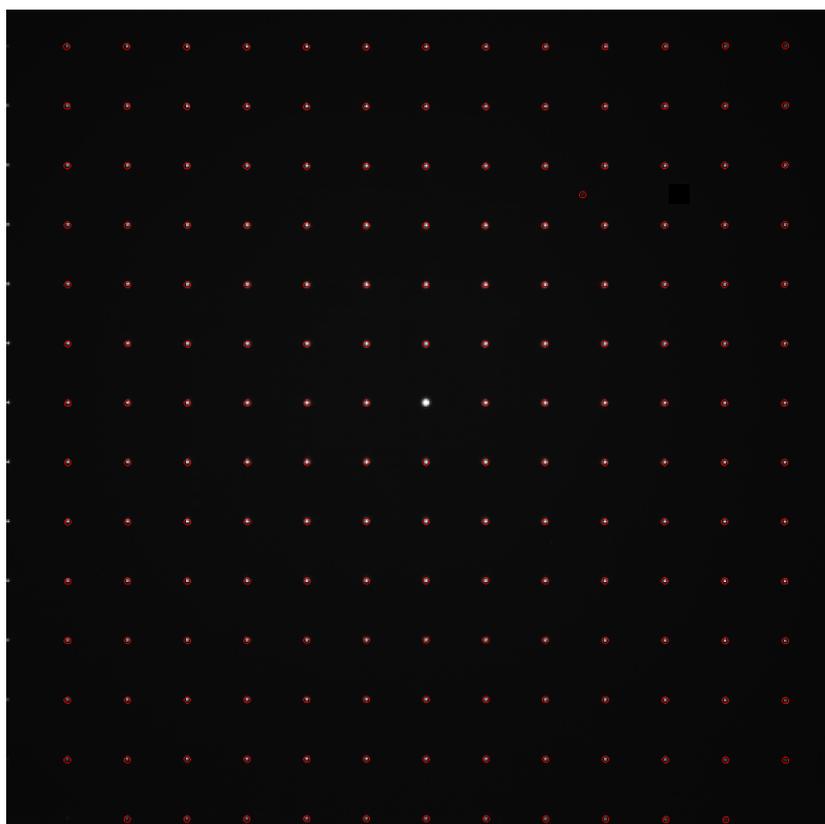


Рис. 7. Наложение кадров равномерной сетки до (светлые точки) и после ВДИ (красные окружности).

ТЕРМОВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В процессе всех термовакуумных испытаний значение давления внутри камеры не превышало $2 \cdot 10^{-6}$ бар, что соответствует глубокому вакууму. Крайние значения температур термоцикла составляли -27°C и $+57^{\circ}\text{C}$. Общее время технологического вакуума составило 17 часов 40 мин. Звездный датчик прошел три термоцикла. Начальная температура термоцикла составляла $+20^{\circ}\text{C}$. Далее температура поднималась до $+57^{\circ}\text{C}$ и удерживалась в течение двух часов. Затем температура опускалась до минус 27°C и это значение удерживалось в течение двух часов.

Во время термовакуумных испытаний непрерывно проверялось функционирование звездного датчика, изменение фокусного

расстояния, темновые токи и функционирование калибровочного затвора и элемента Пельте. Испытания показали, что элемент Пельтье осуществляет охлаждение компонентов АЗДК на 21°C.

Результаты термовакуумных испытаний показали, что малогабаритный звездный датчик АЗДК-1 обеспечивает свои характеристики (см. табл.1), а также сохраняет работоспособность, целостность конструкции и внешний вид после воздействия термоциклов в заявленном диапазоне температур от минус 27°C до 57°C в условиях вакуума.

Из приведённого графика (см. рис. 8), следует, что, как и ожидалось, при повышении температуры внутри АЗДК-1 среднее значение темнового тока увеличивается экспоненциально с ростом температуры.

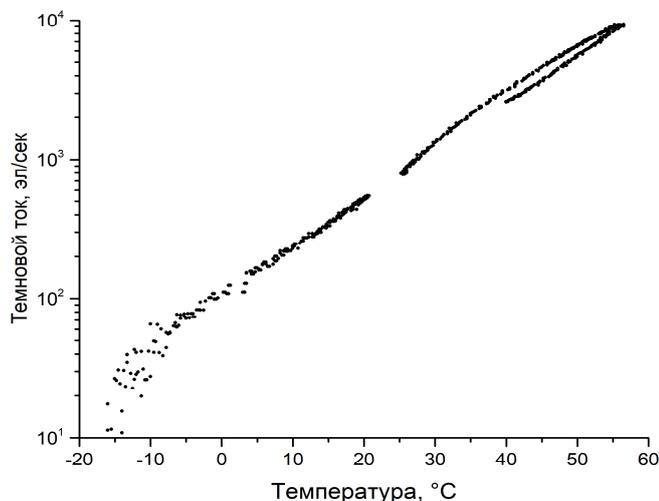


Рис. 8. График зависимости темнового тока от температуры

При достижении внутренней температуры 52°C среднее значение темнового тока составляет $5 \cdot 10^3$ электронов в секунду, а максимальные значения темнового сигнала при длительности накопления в 1 секунду приводят к насыщению фотоприемных элементов.

В процессе эксплуатации число элементов с большими значениями темнового тока будет только возрастать, уменьшая значения отношения сигнала к шуму и, соответственно, понижая проникающую способность АЗДК-1 и понижая точность определения ориентации.

Таким образом, температурный диапазон выше 52°C (по внутреннему датчику) может оцениваться как нерабочий и не рекомендуемый к использованию.

Согласно результатам испытаний элемент Пельтье рекомендуется включать при температуре посадочного места более 20°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малогабаритный звездный датчик успешно прошел функциональные, вибродинамические и термовакуумные испытания. Летные испытания МЗД АЗДК-1 запланированы на конец 2019 года.



Рис. 9. МЗД АЗДК-1 в транспортном кейсе

Малогобаритный звездный датчик по точности и массогабаритным характеристикам (см. табл. 1) не уступает известным зарубежным аналогам при стоимости в 2-3 раза ниже. Звездный датчик можно приобрести. Стоимость звездного датчика составляет около 2.5 млн. руб. На рис.9 представлена фотография МЗД АЗДК-1 в транспортном кейсе. Умеренная точность при низкой стоимости делают МЗД АЗДК-1 оптимальным решением для систем ориентации наноспутников. Более подробно информация о МЗД АЗДК-1 содержится на сайте компании Азмерит (см. www.azmerit.ru).