

# 11, ноябрь 2015

УДК 629.052.7

## **Исследование погрешностей определения ориентации объекта при помощи БИНС на основе инерциальных датчиков по МЭМС-технологии**

*Журавлева Д.О., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Автономные информационные и управляющие системы»*

*Научный руководитель: Микаэлян С.В., ассистент кафедры*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Автономные информационные и управляющие системы»*

*[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

### **Введение**

Инерциальные навигационные системы играют важнейшую роль в решении задач навигации для самых различных объектов. Их ключевая особенность – полная автономность. В настоящее время наиболее применим класс бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), поскольку они выигрывают в цене, простоте и надежности. Однако существенным недостатком таких систем является сравнительно небольшая точность измерений. БИНС могут быть построены по разным технологиям: волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), лазерно-кольцевые гироскопы (ЛКГ). Тем не менее развиваются датчики, построенные по МЭМС-технологиям, которые несмотря на худшие параметры точности выигрывают в соотношении стоимость/габариты. Для решения многих задач, рассмотренных в научных статьях [7, 8, 9, 10], применение этого класса навигационных систем является незаменимым. Ниже приведена сравнительная таблица 1 для некоторых распространенных МЭМС датчиков [2, 3, 4, 5].

Таблица 1

Сравнительная таблица датчиков

Датчик	Дрейф нуля, град./час	Стоимость	Заявленная область применения
ADIS 16488A	5,1	469\$	Измерительная техника, стабилизация и управление платформами, навигация
MLX90609	17	52.83 €	Навигация, улучшение точности определения координат устройства GPS
CRS09-12	3	900\$	Системы телематики, навигация, робототехника

Из таблицы 1 видно, что датчик ADIS16488A фирмы Analog Devices обладает средними по точности характеристиками и удовлетворительной стоимостью из всех представленных образцов. Более подробный перечень характеристик [2] представлен в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики гироскопов датчика ADIS16488A

Параметр	Значение	Размерность
Диапазон измерений	$\pm 450$	°/с
Чувствительность	$3.052 \times 10^{-7}$	°/с/МЗР
Нелинейность	0.01	%
Погрешность ортогональности осей	$\pm 0.05$	град
Стабильность нулевого сигнала	5.1	°/час
Случайный уход по углу	0.26	°/√час
Резонансная частота	18	кГц
Среднеквадратическое отклонение	0.135	°/с

Целью данной работы является изучение реальных характеристик датчика ADIS16488A и оценка возможности построения БИНС на данном датчике.

## Результаты экспериментов по определению характеристик погрешностей первичных измерений датчиков угловой скорости

Погрешность измерений в общем случае имеет две составляющие: шумовая и систематическая погрешность. Погрешность зависит от многих внешних факторов, таких как климатические условия, вибрации, влажность и других. Случайную составляющую погрешности нет возможности устранить, дрейфовую же можно попытаться учесть. В ходе данной работы было достаточным усреднение полученных результатов, что, как будет показано ниже, значительно повлияет на характер движения объекта. Средние значения проекций угловой скорости датчика по результатам 6 экспериментов представлены в таблице 3. Число отсчетов, взятых в экспериментах равно  $5 \cdot 10^5$ , а частота записи данных – 1230 Гц.

Таблица 3

Средние значения проекций угловых скоростей по результатам 6 экспериментов

$\omega$ №	$\omega_x$ , град/с	$\omega_y$ , град/с	$\omega_z$ , град/с
1	0.033	0.074	-0.071
2	0.029	0.071	-0.071
3	0.026	0.057	-0.059
4	0.024	0.054	-0.063
5	0.024	0.055	-0.062
6	0.024	0.054	-0.063

Таблица 4

Средние значения проекций угловых скоростей по результатам  
6 экспериментов для I и II половин отсчетов

$\omega$ №	$\omega_x$ , град/с		$\omega_y$ , град/с		$\omega_z$ , град/с	
	I	II	I	II	I	II
1	0.032	0.034	0.073	0.075	-0.071	-0.071
2	0.029	0.031	0.069	0.069	-0.069	-0.068
3	0.028	0.025	0.058	0.056	-0.059	-0.059
4	0.024	0.023	0.054	0.055	-0.061	-0.065
5	0.024	0.024	0.053	0.057	-0.062	-0.062
6	0.025	0.023	0.053	0.056	-0.063	-0.063

Таблица 5

Средние квадратичные отклонения проекций угловых скоростей  
по результатам 6 экспериментов

$\omega$ №	$\omega_x$ , град/с	$\omega_y$ , град/с	$\omega_z$ , град/с
1	0.113	0.113	0.119
2	0.117	0.114	0.117
3	0.127	0.13	0.117
4	0.127	0.13	0.117
5	0.127	0.13	0.117
6	0.127	0.13	0.117

По данным таблиц 3, 4 можно сделать вывод, что для каждого эксперимента средние значения проекций угловой скорости на разных промежутках и на всем интервале наблюдений близки по значениям, что дает возможность вносить в результат среднее арифметическое значение. Из таблицы 5 видно, что экспериментальные значения среднеквадратичных отклонений удовлетворяют заявленному, представленному в таблице 2.

При проведенных экспериментах была выявлена особенность рассматриваемого устройства, а именно нечувствительность к угловой скорости вращения Земли, т.е. при перевороте датчика на другую сторону среднее значение проекции угловой скорости на вертикальную ось датчика не изменило знака ( $\omega_z$  имеет одинаковый знак независимо от положения измерительного модуля). Этот недостаток необходимо учесть при проектировании внедрением дополнительных систем для коррекции начальной выставки.

### Оценка результирующей точности определения положения с помощью БИНС, построенной на датчике ADIS16488A

Эксперимент проводится следующим образом. Считываемые с датчиков данные обрабатываются следующим алгоритмом: кинематические уравнения движения твердого тела с использованием углов Эйлера-Крылова[1]:

$$\dot{\vartheta} = \omega_y^r \sin\gamma + \omega_z^r \cos\gamma$$

$$\dot{\psi} = \frac{1}{\cos\vartheta} (\omega_y^r \cos\gamma - \omega_z^r \sin\gamma)$$

$$\dot{\gamma} = \omega_x^r - \operatorname{tg}\vartheta (\omega_y^r \cos\gamma - \omega_z^r \sin\gamma)$$

интегрируются с помощью метода Рунге-Кутты 4 порядка [11]. В результате получаются данные, характеризующие ориентацию объекта в пространстве. В рамках данной работы рассматривалось неподвижное состояние датчика. Производилось 6 реализаций эксперимента. Частота записи данных с датчиков составляет 1230 Гц. Для всех экспериментов была получена практически идентичная зависимость угла поворота от времени (№ отсчета), представленная на рис. 1.

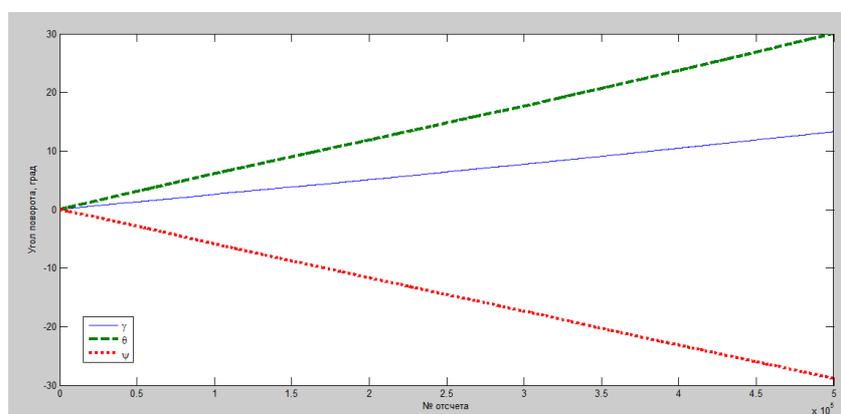


Рис. 1. Результаты эксперимента № 1

По полученным данным можно сделать следующие выводы:

- у покоящегося датчика происходит уход параметров, которые соответствуют средним значениям проекций угловой скорости, приведенной в таблице 1 для эксперимента № 1;
- для представленных углов ориентации прослеживается систематическая составляющая погрешности, не удовлетворяющая заявленным в таблице № 2 характеристикам;

Систематическая погрешность устраняется вычитанием из интегрируемой угловой скорости среднеарифметического значения за весь период наблюдения. Результаты работы алгоритма с учетом погрешностей для 6 экспериментов представлены на рис. 2 - 5.

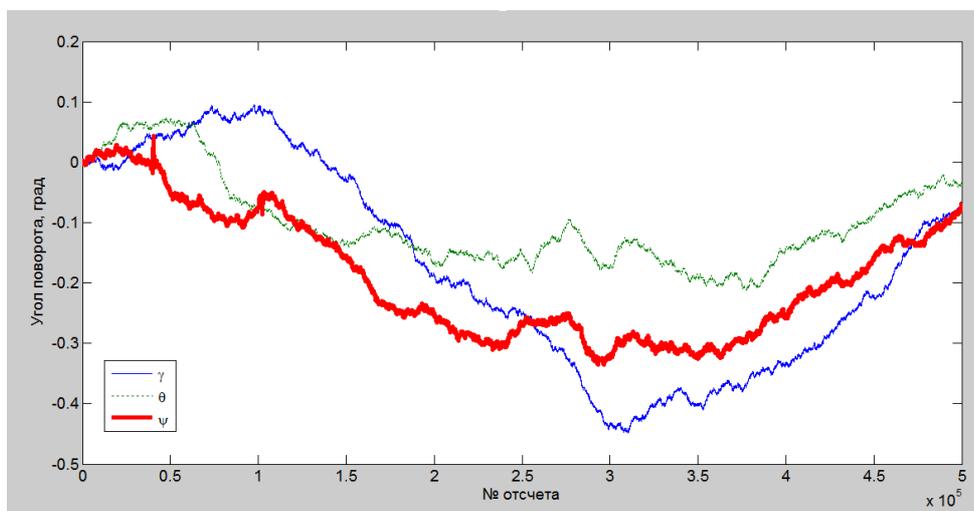


Рис. 2. Результаты эксперимента № 1 с учетом погрешности

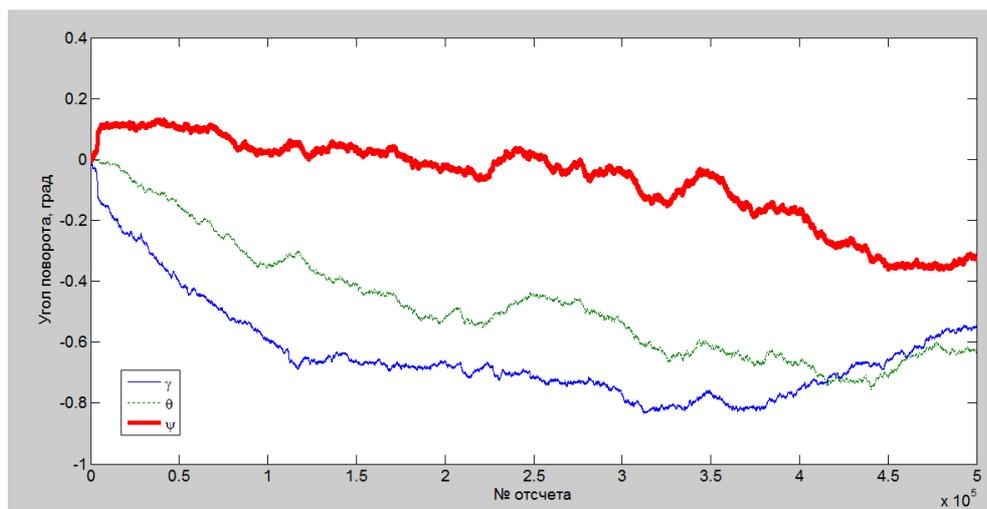


Рис. 3. Результаты эксперимента № 2 с учетом погрешности

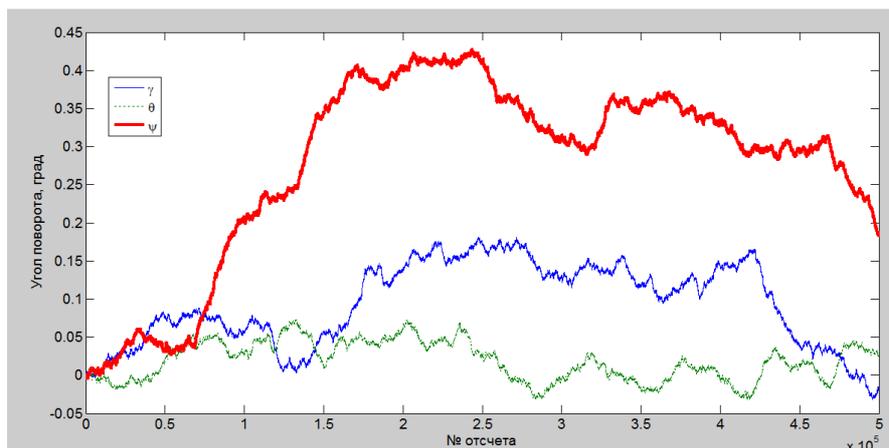


Рис. 4. Результаты эксперимента № 3 с учетом погрешности

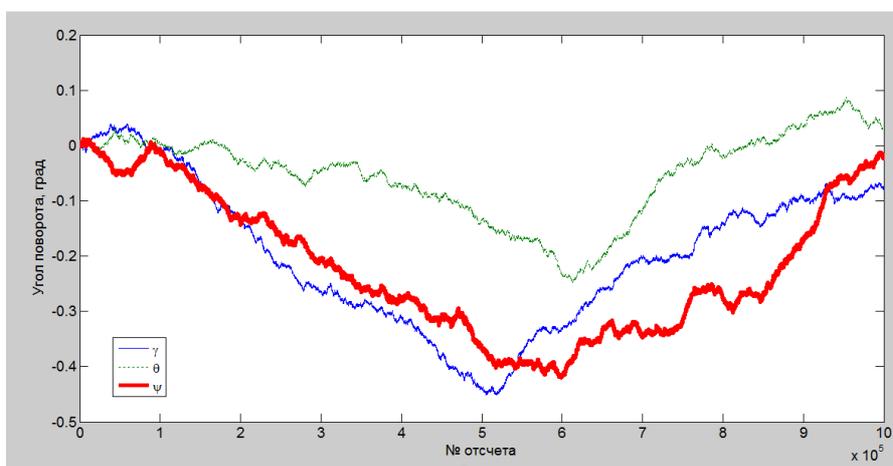


Рис. 5. Результаты эксперимента № 4 с учетом погрешности

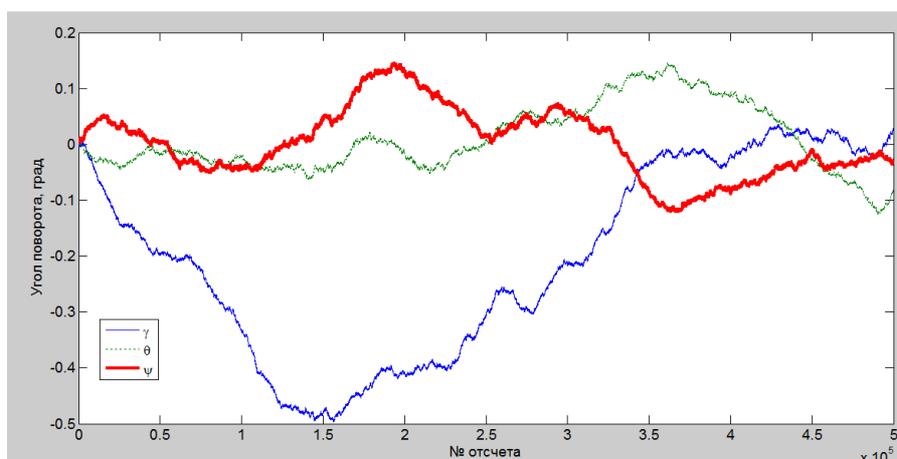


Рис. 6. Результаты эксперимента № 5 с учетом погрешности

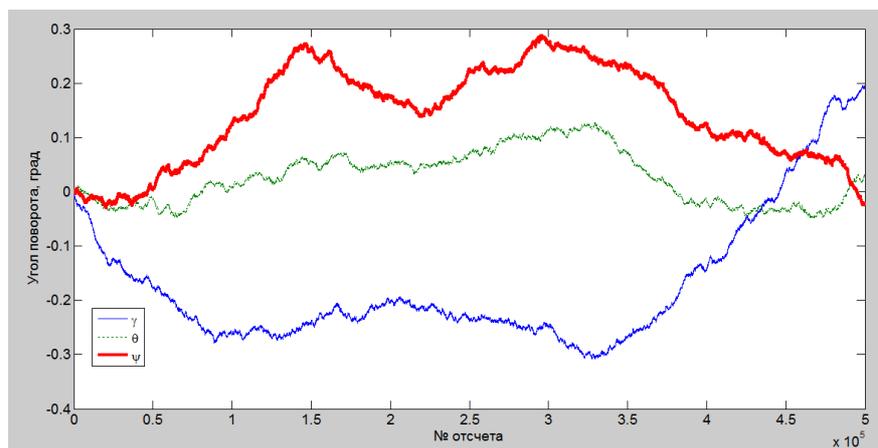


Рис. 7. Результаты эксперимента № 6 с учетом погрешности

Рассмотрим положение датчика в пространстве, учитывая углы ориентации, полученные выше. Предположим, что имеется идеальный акселерометр, у которого показания проекций ускорения на оси x и y равны 0, а на ось z  $g = -9.8155$  [6]. Тогда в зависимости от углов ориентации его оси будут поворачиваться, а проекции ускорения будут определяться из матрицы поворота [1]:

$$n_x = -\cos\gamma \cdot \cos\psi \cdot \sin\theta + \sin\gamma \cdot \sin\psi$$

$$n_y = \cos\gamma \cdot \sin\psi \cdot \sin\theta + \sin\gamma \cdot \cos\psi$$

$$n_z = \cos\gamma \cdot \cos\theta.$$

После двойного интегрирования проекций ускорений получаются аналогичные для каждого эксперимента зависимости изменения координат тела в пространстве от времени, построенные на рис. 8 – 11.

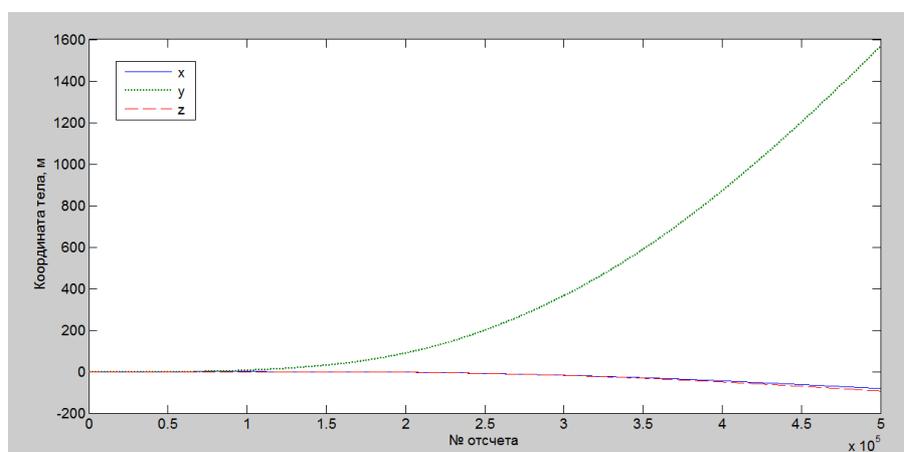


Рис. 8. Координаты тела для эксперимента № 1

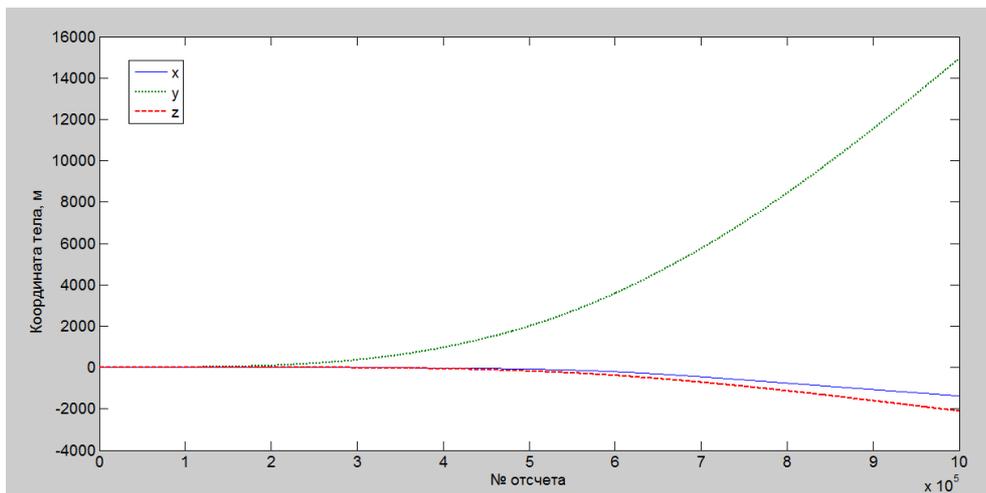


Рис. 9. Координаты тела для эксперимента № 2

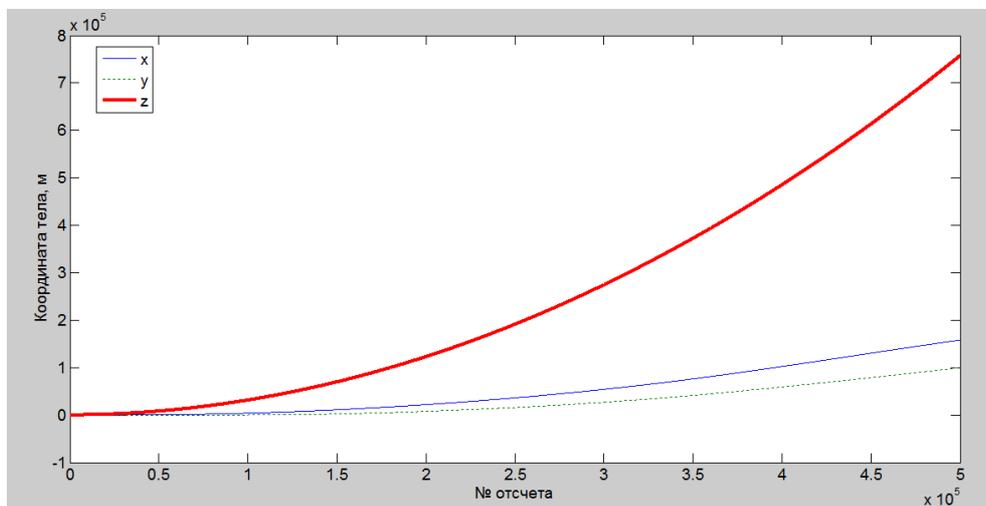


Рис. 10. Координаты тела для эксперимента № 3

Из полученных графиков видно, что за всё время проведения экспериментов координата покоящегося датчика значительно изменяется с увеличением времени. Следовательно, данный датчик можно применять на объектах, время движения которых ограничено, например на ракетах, и для корректной работы необходимо производить коррекцию данных на каждом шаге обработки данных.

### Заключение

В данной работе были получены количественные результаты оценки точности измерительных датчиков угловой скорости. Также была рассмотрена работа данного датчика в составе БИНС и сделаны соответствующие выводы. В дальнейшем планируется

другие методы корректировки результатов измерений, а также произвести обработку данных, получаемых с акселерометров.

### Список литературы

1. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб: ГНЦ РФ ОАО Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
2. Analog Devices. Tactical Grade, Ten Degrees of Freedom Inertial Sensor. Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16488A.pdf> (дата обращения 13.03.2015).
3. Melexis. Microelectronic Integrated Systems. MLX90609 Digital Angular Rate Sensor (Standard version). Режим доступа: <http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Melexis%20PDFs/MLX90609.pdf> (дата обращения 20.03.2015).
4. CRS09 Technical Datasheet. Analogue Angular Rate Sensor. High Performance MEMS Gyroscope. Silicon Sensing. Режим доступа: [http://www.siliconsensing.com/media/455035/CRS09-00-0100-132\\_1\\_PDF\\_SSS\\_-.pdf](http://www.siliconsensing.com/media/455035/CRS09-00-0100-132_1_PDF_SSS_-.pdf) (дата обращения 21.03.2015).
5. Silicon Sensing. Режим доступа: <http://www.siliconsensing.com/products/gyroscopes/crs09/> (дата обращения 21.03.2015).
6. Альфапаскаль. Режим доступа: [http://alfapascal.ru/library/uskorenie\\_svobodnogo\\_padeniya\\_dlya\\_122\\_gorodov](http://alfapascal.ru/library/uskorenie_svobodnogo_padeniya_dlya_122_gorodov) (дата обращения 25.03.2015).
7. Борзов А.Б., Лихоеденко К.П., Сучков В.Б., Капустян А.В., Васильев Д.А., Цыганков В.Ю., Тиняков Ю.Н. Исследование и разработка МЭМС сенсорных элементов системы защиты информационно-телекоммуникационной аппаратуры беспилотных космических аппаратов при электромагнитном старте // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2012. № 7. DOI: 10.7463/0712.0442268.
8. Ефремов А.К., Власов К.В. Термоэлектрический генератор для МЭМС-взрывателя // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2015. № 4. DOI: 10.7463/0415.0764526.
9. Борзов А.Б., Лихоеденко К.П., Цыганков В.Ю., Тиняков Ю.Н., Андреев К.А., Цивинская Т.А. Термически изолированные ячейки в конструкциях преобразователей физических величин изготовленные электростатической анодной посадкой

- полупроводниковых и диэлектрических элементов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2012. № 12. DOI: 10.7463/0113.0517471.
10. Борзов А.Б., Лихоеденко К.П., Цыганков В. Ю., Власов А.И., Тиняков Ю.Н., Андреев К.А., Цивинская Т.А. Термокомпенсация измерительного канала датчика давления на основе полупроводниковых интегральных преобразователей // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. DOI: 10.7463/1112.0482504.
11. Бахвалов Н.С. Численные методы: учебник для ВЗУов. М.: Наука, 1978. 632 с.