

УДК 531.383

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

*Репина Т.О., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации»*

*Колыхаев Д.Е., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Попов Г.В., к.т.н., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

### **Введение.**

Микромеханические чувствительные элементы (микромеханические акселерометры, микромеханические гироскопы) принадлежат к классу инерциальных измерителей параметров линейных и угловых перемещений, выполненных по технологиям МЭМС (микроэлектромеханических систем) и образуют одно из подмножеств МСТ (микросистемной техники). Основным отличительным признаком микромеханических чувствительных элементов от ЧЭ инерциальных микродатчиков других типов (пьезогироскопы/микроакселерометры на поверхностно-акустических волнах и др.) является наличие механически подвижных элементов.

К достоинствам МГ можно отнести малые габариты (5-10 мм), возможность совместного изготовления микромеханической части гироскопа и электронной схемы обработки сигналов в едином технологическом цикле, низкая стоимость микромеханических чувствительных элементов.

Основными недостатками приборов данного типа являются - низкая точность измерения, нестабильность масштабного коэффициента, зашумленность выходного сигнала. Однако эти недостатки, по заверениям разработчиков, в ближайшие 2-3 года будут существенно уменьшены, а конструктивное исполнение в виде микрочипов переводит их в разряд компонентов электронных схем с характерными для них технологиями проектирования и изготовления.

Одним из перспективных направлений использования МА и МГ является их применение в качестве инерциальных датчиков для бесплатформенных систем ориентации

и навигации малоразмерных высокоманевренных ЛА, а также для решения ряда задач по их управлению с помощью специальных информационно-управляющих систем, выполняющих функции выработки команд управления.

В данной работе задается цель исследовать основные характеристики инерциального измерительного модуля Atomic 6 DOF. Внимание уделяется экспериментальному определению точностных параметров модуля: смещению нуля ДУСов и акселерометров, а так же определению времени готовности прибора, стабильности в запуске, стабильности от запуска к запуску.

### Инерциальный измерительный модуль.

Инерциальный измерительный блок Atomic 6 DOF предназначен для измерения по трем взаимно ортогональным осям кажущегося ускорения и трех составляющих угловой скорости и преобразования полученных данных в 10-разрядный двоичный цифровой код. Структурная схема представлена на рис.1

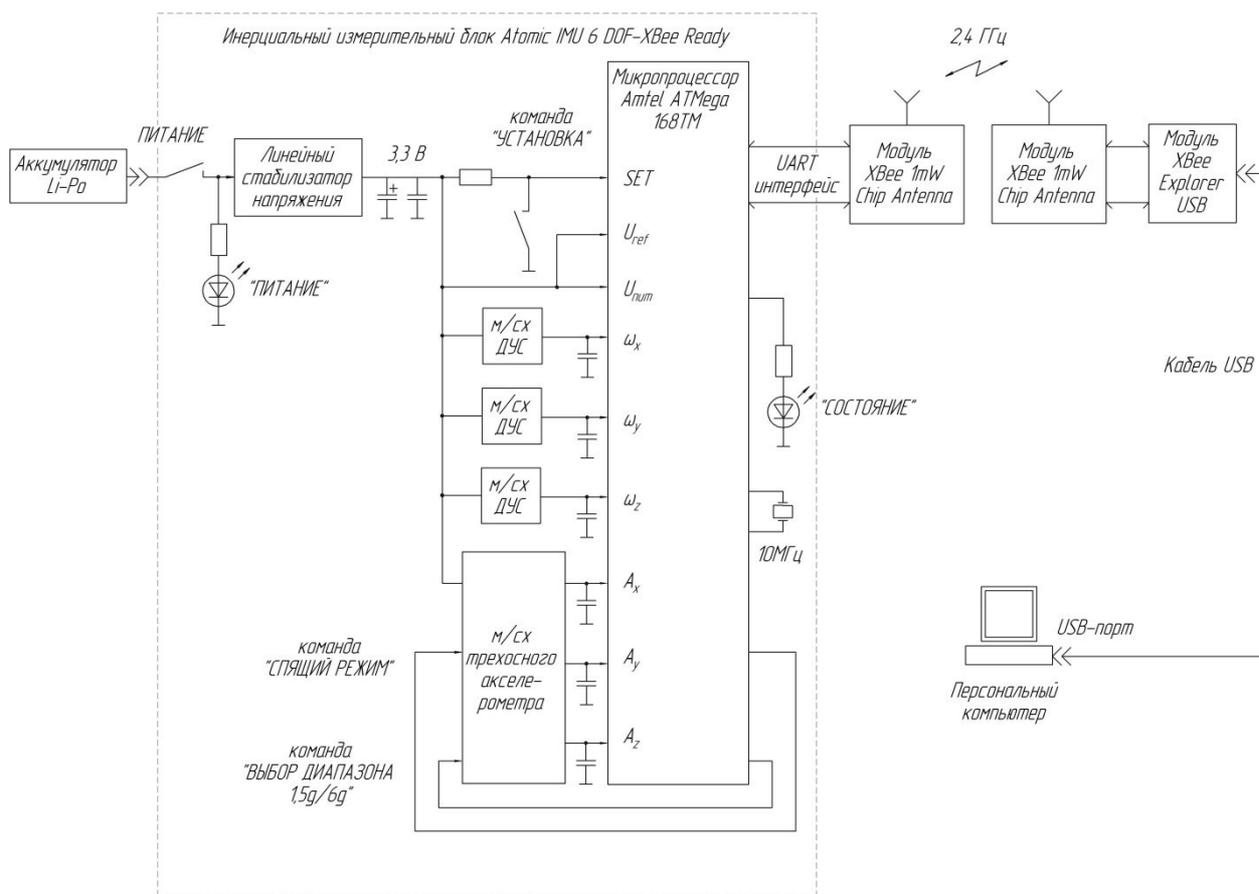


Рис.1. Структурная схема измерительного модуля.

Состав инерциального измерительного модуля:

-трехосный акселерометр MMA 7261L с переключаемым диапазоном измерений  $\pm 1,5$  g или  $\pm 6$  g, разрешение в режиме измерения  $\pm 1,5$  g - 0.00403 g/ ед. мл. разряда; в режиме  $\pm 6$  g - 0.0161 g/ед. мл разряда.

-три одноосных датчика угловой скорости LISY300AL с диапазоном измерения до  $\pm 300$  °/с, разрешение 0.977 °/сек ед. мл. разряда

-микроконтроллер Atmel ATMega 168 с тактовой частотой 10 МГц с 6 выделенными 10-битными АЦП каналами, считывающими показания датчиков

-устройство приема-передачи данных Xbee 1mw Chip Antenna.

-устройство для подключения к ПЭВМ Xbee Explorer USB

### **Модель погрешности трехосного акселерометра.**

Акселерометр – прибор, измеряющий проекцию кажущегося ускорения на ось чувствительности. Большинство характеристик акселерометра определяют при испытаниях на развязанном основании, исключая, по возможности, колебания и наклоны пола и стен лаборатории. В качестве входного воздействия используется рассчитанное ускорение силы тяжести в месте проведения испытаний.

Акселерометру придают разные ориентации относительно отвесной линии.

Измерения выходного сигнала соотносят с величиной ускорения силы тяжести.

Три акселерометра с номинально ортогональными осями чувствительности образуют триаду акселерометров. Получим простейшую линейную модель триады из следующих соображений:

Свяжем с кубом с взаимно ортогональными гранями систему координат OXYZ, как показано на рис. 2. Начало системы координат OXYZ расположим в центре подвеса акселерометра. Оси системы координат ортогональны и параллельны соответствующим граням куба. Оси чувствительности каждого из трех акселерометров номинально совпадают с осями системы координат OXYZ. Обозначим проекции кажущегося ускорения на оси куба  $a_x$   $a_y$   $a_z$ . При наличии малых относительных погрешностей коэффициента преобразований  $A_{xx}$   $A_{yy}$   $A_{zz}$ , каждый акселерометр измеряет проекцию кажущегося ускорения на свою ось чувствительности с соответствующими погрешностями  $(1 + A_{xx}) a_x$ ,  $(1 + A_{yy}) a_y$ ,  $(1 + A_{zz}) a_z$ .

При наличии малых относительных погрешностей выставки осей чувствительности каждый акселерометр дополнительно измеряет кажущиеся ускорения вдоль других осей трехгранника OXYZ, связанного с кубом:

-по оси чувствительности акселерометра X имеем дополнительно проекции кажущегося ускорения  $A_{xz}a_y$   $-A_{xy}a_z$ .

-по оси чувствительности акселерометра  $Y$  имеем дополнительно проекции кажущегося ускорения  $-A_{yz}a_x$   $A_{yx}a_z$ .

-по оси чувствительности акселерометра  $Z$  имеем дополнительно проекции кажущегося ускорения  $A_{zy}a_x$   $-A_{zx}a_y$ .

Каждый акселерометр имеет своё смещение нулевого сигнала  $a_{x0}$   $a_{y0}$   $a_{z0}$ , в общем случае зависящее от времени, температуры, и других внешних условий.

Каждый акселерометр имеет свою шумовую составляющую нулевого сигнала  $\xi_{AX}(t)$ ,  $\xi_{AY}(t)$ ,  $\xi_{AZ}(t)$

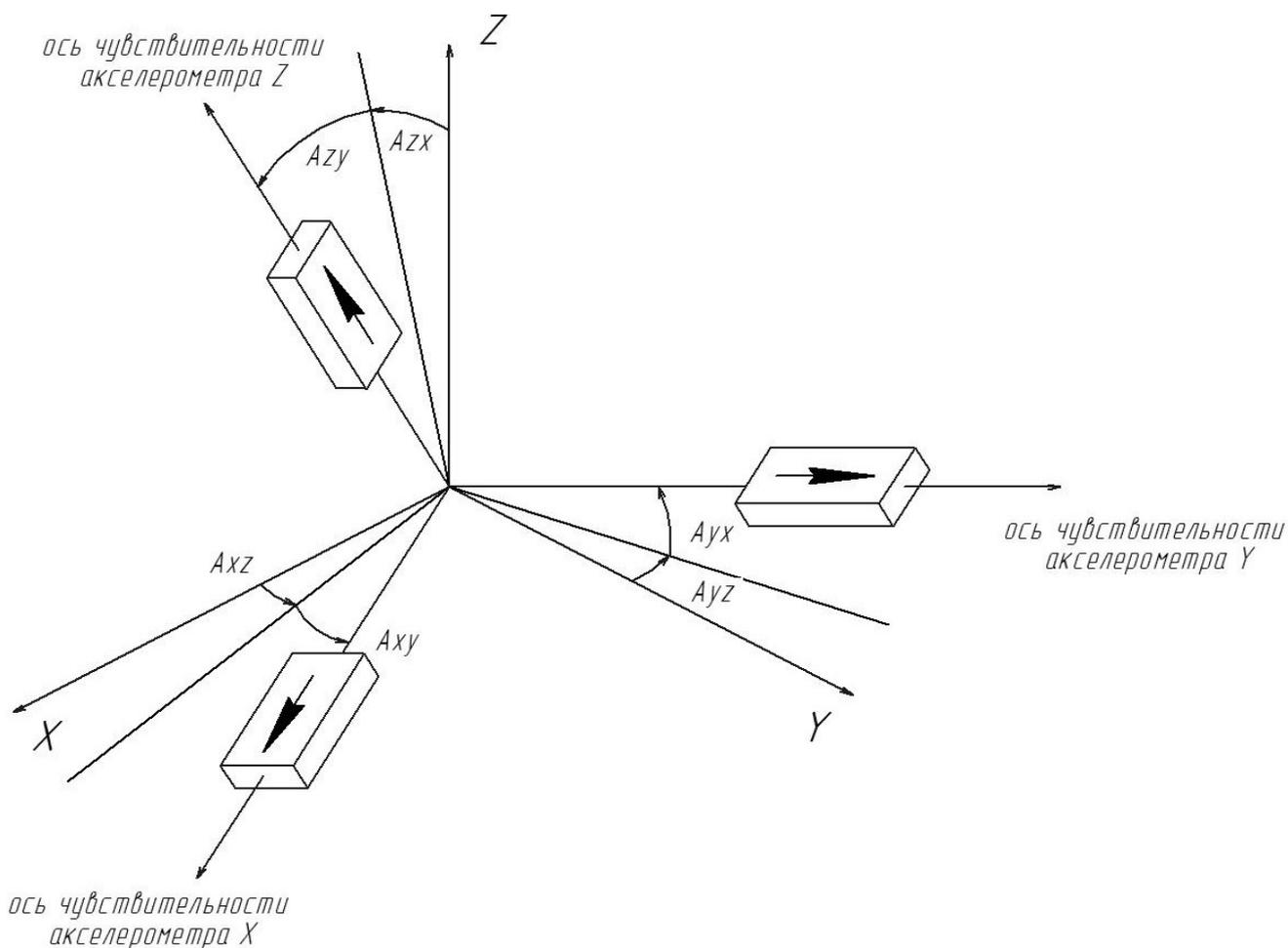


Рис. 2. Модель погрешности триады акселерометров

Таким образом, измерения триадой акселерометров составляющих кажущегося ускорения вдоль осей блока ЧЭ можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 U_{AX} &= K_{AX}[(1 + A_{XX})a_X + A_{XZ}a_Y - A_{XY}a_Z + a_{0X} + \xi_{AX}(t)] \\
 U_{AY} &= K_{AY}[-A_{YZ}a_X + (1 + A_{YY})a_Y + A_{YX}a_Z + a_{0Y} + \xi_{AY}(t)] \\
 U_{AZ} &= K_{AZ}[A_{ZY}a_X - A_{ZX}a_Y + (1 + A_{ZZ})a_Z + a_{0Z} + \xi_{AZ}(t)]
 \end{aligned}$$

Где  $U_{AX}, U_{AY}, U_{AZ}$ - выходной сигнал акселерометров,

$K_{AX}, K_{AY}, K_{AZ}$  -номинальные коэффициенты преобразования акселерометров по соответствующим осям

Калибровка триады акселерометров осуществляется путем измерения показаний каждого из трех акселерометров при их различных угловых положениях относительно отвесной линии.

В гироскопических системах с кардановым подвесом платформы сама конструкция прибора является стендом, так как позволяет осуществлять выставку платформы в разные угловые ориентации посредством датчиков команд и соответствующих приводов. В бескарданных системах калибровка осуществляется на наклонно-поворотных и/или оптических делительных головках.

#### **Модель погрешностей датчиков угловой скорости.**

Датчик угловой скорости – прибор, измеряющий проекцию вектора абсолютной угловой скорости на свою ось чувствительности. Большинство характеристик ДУСа определяют при испытаниях на поворотном столе с развязанным основанием, исключаящем, по возможности, колебания и наклоны пола и стен лаборатории. В качестве входного воздействия используется заданная угловая скорость вращения поворотного стола.

ДУСу придают разные ориентации вектора угловой скорости поворотного стола. Измерения выходного сигнала соотносят с величиной угловой скорости.

Три ДУСа с номинально ортогональными осями чувствительности образуют триаду ДУС. Получим простейшую линейную модель триады из следующих соображений:

Свяжем с кубом с взаимно ортогональными гранями систему координат OXYZ, как показано на рис.3. Начало системы координат OXYZ расположим в центре подвеса акселерометра. Оси системы координат ортогональны и параллельны соответствующим граням куба. Оси чувствительности каждого из трех акселерометров номинально совпадают с осями системы координат OXYZ. Обозначим проекции угловой скорости куба на связанные с ним оси  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$  и проекции кажущегося ускорения начала системы координат OXYZ на те же оси  $a_x, a_y, a_z$

При наличии малых относительных погрешностей коэффициента преобразований  $G_{xx}$   $G_{yy}$   $G_{zz}$ , каждый ДУС измеряет проекцию вектора угловой скорости на свою ось чувствительности с соответствующими погрешностями  $(1 + G_{xx}) \Omega_x$ ,  $(1 + G_{yy}) \Omega_y$ ,  $(1 + G_{zz}) \Omega_z$ .

При наличии малых относительных погрешностей выставки осей чувствительности каждый ДУС дополнительно измеряет угловую скорость вдоль других осей трехгранника OXYZ, связанного с кубом:

- по оси чувствительности ДУС X имеем дополнительно проекции кажущегося ускорения  $G_{xz}\Omega_y$   $-G_{xy}\Omega_z$ .

- по оси чувствительности ДУС Y имеем дополнительно проекции кажущегося ускорения  $-G_{yz}\Omega_x$   $G_{yx}\Omega_z$ .

- по оси чувствительности ДУС Z имеем дополнительно проекции кажущегося ускорения  $G_{zy}\Omega_x$   $-G_{zx}\Omega_y$ .

Примем что при наличии линейных ускорений вдоль каждой из осей куба, показания ДУС изменяются пропорционально этим ускорениям.

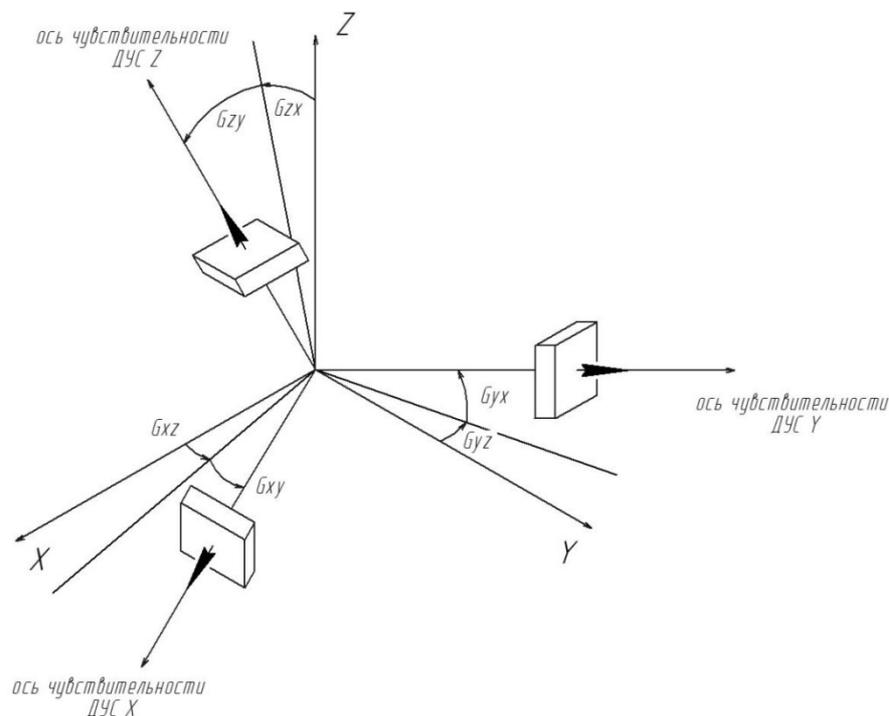


Рис.3. Модель погрешности триады ДУС

Каждый ДУС имеет своё смещение нулевого сигнала  $\Omega_{x0}$   $\Omega_{y0}$   $\Omega_{z0}$ , в общем случае зависящее от времени, температуры, и других внешних условий.

Каждый акселерометр имеет свою шумовую составляющую нулевого сигнала  $\xi_{GX}(t), \xi_{GY}(t), \xi_{GZ}(t)$

Таким образом, измерения триадой ДУС составляющих угловой скорости блока ЧЭ можно представить в виде:

$$U_{GX} = K_{GX}[(1 + G_{XX})\Omega_X + G_{XZ}\Omega_Y - G_{XY}\Omega_Z + \Omega_{0X} + \xi_{GX}(t) + G_{XX}^A a_X + G_{XY}^A a_Y + G_{XZ}^A a_Z]$$

$$U_{GY} = K_{GY}[-G_{YZ}\Omega_X + (1 + G_{YY})\Omega_Y + G_{YX}\Omega_Z + \Omega_{0Y} + \xi_{GY}(t) + G_{YX}^A a_X + G_{YY}^A a_Y + G_{YZ}^A a_Z]$$

$$U_{GZ} = K_{GZ}[G_{ZY}\Omega_X - G_{ZX}\Omega_Y + (1 + G_{ZZ})\Omega_Z + \Omega_{0Z} + \xi_{GZ}(t) + G_{ZX}^A a_X + G_{ZY}^A a_Y + G_{ZZ}^A a_Z]$$

Где:

$U_{GX}U_{GY}U_{GZ}$ -Выходной код ДУСов по соответствующим осям

$K_{GX}K_{GY}K_{GZ}$ -Масштабные коэффициенты ДУСов по соответствующим осям

$\Omega_X\Omega_Y\Omega_Z$ - Проекция угловой скорости основания на оси трехгранника OXYZ

$a_X a_Y a_Z$ - Проекция кажущегося ускорения основания на оси трехгранника OXYZ

$\Omega_{0X}\Omega_{0Y}\Omega_{0Z}$ -Смещение нуля соответствующего ДУС

$\xi_{GX}(t)\xi_{GY}(t)\xi_{GZ}(t)$ -случайная составляющая измерения соответствующего ДУС

$G_{XX}G_{YY}G_{ZZ}$ -Погрешности масштабного коэффициента соответствующего ДУС

$G_{XZ}G_{XY}$ -Погрешности выставки оси чувствительности ДУС, относительно оси X

$G_{YZ}G_{YX}$ - Погрешности выставки оси чувствительности ДУС, относительно оси Y

$G_{ZY}G_{ZX}$ - Погрешности выставки оси чувствительности ДУС, относительно оси Z

$G_{XX}^A G_{XY}^A G_{XZ}^A$ - коэффициенты влияния кажущихся ускорений по осям X,Y,Z на ДУС X

$G_{YX}^A G_{YY}^A G_{YZ}^A$ -коэффициенты влияния кажущихся ускорений по осям X,Y,Z на ДУС Y

$G_{ZX}^A G_{ZY}^A G_{ZZ}^A$ -коэффициенты влияния кажущихся ускорений по осям X,Y,Z на ДУС Z

Калибровка ДУС осуществляется путем измерения показаний каждого из трёх ДУС при различных тестовых воздействиях. В гироскопических системах с кардановым подвесом платформы тестовые воздействия может создать сама конструкция прибора путем выставки и вращения платформы в разных угловых ориентациях посредством датчиков команд и соответствующих приводов.

Заявленная производителем цена единицы младшего разряда составляет  $0.977^{\circ}/сек$  или  $3517^{\circ}/ч$ , что говорит о том, что ДУС не чувствует угловую скорость вращения Земли.

Это позволяет при калибровке ДУС среди тестовых воздействий не учитывать скорость вращения Земли.

Калибровка проводится в два этапа:

Этап 1. На невращающемся основании.

$$\Omega_x = \Omega_y = \Omega_z = 0.$$

Тестовое воздействие в виде ускорения силы тяжести прикладывается последовательно в положительном и отрицательном направлении вдоль осей X, Y, Z. При этом осуществляется определение следующих погрешностей:

- смещение нуля соответствующего ДУСа -  $\Omega_{x0}, \Omega_{y0}, \Omega_{z0}$ ,

- коэффициентов влияния кажущихся ускорений по осям X, Y, Z ДУСа X -  $G_{XX}^A G_{XY}^A G_{XZ}^A$

- коэффициентов влияния кажущихся ускорений по осям X, Y, Z ДУСа Y -  $G_{YX}^A G_{YY}^A G_{YZ}^A$

- коэффициентов влияния кажущихся ускорений по осям X, Y, Z ДУСа Z -  $G_{ZX}^A G_{ZY}^A G_{ZZ}^A$

Этап 2. На основании, вращающемся с постоянной скоростью вокруг вертикальной оси.

$$\Omega_x = \Omega_y = \Omega_z = 0.$$

Тестовое воздействие в виде ускорения силы тяжести прикладывается последовательно в положительном и отрицательном направлении вдоль осей X, Y, Z. При этом осуществляется определение следующих погрешностей:

- смещение нуля соответствующего ДУСа -  $\Omega_{x0}, \Omega_{y0}, \Omega_{z0}$ ,

- коэффициентов влияния кажущихся ускорений по осям X, Y, Z ДУСа X -  $G_{XX}^A G_{XY}^A G_{XZ}^A$

- коэффициентов влияния кажущихся ускорений по осям X, Y, Z ДУСа Y -  $G_{YX}^A G_{YY}^A G_{YZ}^A$

- коэффициентов влияния кажущихся ускорений по осям X, Y, Z ДУСа Z -  $G_{ZX}^A G_{ZY}^A G_{ZZ}^A$

### **Экспериментальное определение параметров стабильности в запуске, стабильности от запуска к запуску и времени готовности модуля в одной ориентации.**

Для определения данных параметров проведем 8 запусков измерительного модуля в одной ориентации.

Стабильность в запуске – наибольшее из 8 запусков значение среднего квадратического отклонения от среднего арифметического в данном запуске.

Стабильность от запуска к запуску – среднее квадратическое отклонение из средних значений в 8 запусках от их среднего арифметического значения.

Время готовности – наибольшее из 8 запусков время вхождения в трубку ( $-\sigma, +\sigma$ ) относительно среднего в данном запуске.

Настройки прибора:

Диапазон измерений  $\pm 1,5$  g

Частота вывода данных 50 Гц

Измерения будем проводить 10 минут ( 30000 замеров)

С перерывом на 10 минут

Формат выходных данных:

0	498	544	701	529	520	492
1	494	547	698	528	521	492
2	496	543	696	528	521	492
3	496	543	700	528	521	492

Где первый столбец – счетчик измерения,

Второй – показания акселерометра по оси X

Третий – показания акселерометра по оси Y

Четвертый – показания акселерометра по оси Z

Пятый – показания ДУСа по оси X

Шестой – показания ДУСа по оси Y

Седьмой – показания ДУСа по оси Z

Обработку данных проведем в системе Matlab.

Полученные данные представлены в таблице 1:

Таблица 1

Определение времени готовности и среднеквадратического отклонения

№ опыта	Акселерометр					
	Канал X		Канал Y		Канал Z	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	СКО
1	497,7	2,17	544,8	3,67	696	3,83
2	497,6	2,17	544,9	3,5	696,2	4
3	497,7	2,33	544,8	3,33	696,2	4,17
4	497,6	2,33	544,8	3,33	696,2	3,83
5	497,8	2,17	544,7	3,5	696,2	4
6	497,8	2,33	544,8	3,17	696,2	3,83
7	497,9	2,50	544,7	3,5	696,1	3,83
8	497,8	2,33	544,7	3,33	696,2	4,17
среднее по 8 опытам	497,7375	2,29	544,775	3,41625	696,1625	3,9575
время	0 с		0 с		0 с	

ГОТОВНОСТИ						
ДУС						
	Канал X		Канал Y		Канал Z	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	СКО
1	528,7	0,83	522,4	4	491,1	0,67
2	528,8	0,5	522,3	3	491	0,67
3	528,9	0,5	522,2	3,17	491	0,67
4	528,6	0,5	522,2	1,67	490,9	0,67
5	528,7	0,5	522,2	1,67	490,9	0,67
6	528,6	0,5	522,3	1,5	491	0,67
7	528,7	0,5	522,2	2,83	490,9	0,67
8	528,6	0,5	522,2	3,33	491	0,67
среднее по 8 опытам	528,7	0,54125	522,25	2,65	490,975	0,67
время готовности	0 с		50 с		50 с	

### Определение калибровочных констант.

Для определения данных параметров проведем 12 запусков измерительного модуля в различных ориентациях на поворотном столе, с неподвижным основанием и вращающемся со скоростью 150<sup>0</sup>/сек по и против часовой стрелки.

Настройки прибора:

-Диапазон измерений ±1,5 g

-Частота вывода данных 50 Гц

-Каждое измерение будем проводить 2 минуты (6000 замеров)

-Полученные данные представлены в таблице 2.

Масштабный коэффициент может быть определен как величина обратная разрешению

$$K_{\text{акс}}=1/0.0403=248,139 \text{ ед.мл.р/g}$$

$$K_{\text{ДУС}}=1/0.977=1,023 \text{ ед.мл.р./}[\text{}^{\circ}\text{/сек}]$$

Воспользовавшись формулами для калибровки акселерометра из раздела 3 рассчитаем смещения нуля, погрешности невыставки, и масштабных коэффициентов акселерометра и занесем данные в таблицы 3,4:

Таблица 2

№ положения	Акселерометр			ДУС		
	Канал X	Канал Y	Канал Z	Канал X	Канал Y	Канал Z
	Среднее Ед. мл. разряда					
+X <sup>+1</sup>	745,5	541,8	454,4	684,4	521,1	491
+X-	745,6	541,8	454,6	373,4	523,2	490,9
+X0	745,7	540,9	450,7	529	522,3	491
-X0	247,1	538	454	528,8	521,9	490,9
-Y+	491,4	294,9	457,8	530,7	682,7	489,3
-Y-	491,6	294,9	457,7	527,1	361,1	492,3
-Y0	494,9	294,7	450	528,9	522	490,8
+Y0	495,6	780,4	459,2	528,8	521,9	490,8
+Z+	492,8	543,7	696,4	523,2	520,1	655,6
+Z-	491,1	543,8	696,6	534,2	523,6	325,7
+Z0	497,7	544,7	696,2	528,7	522,2	490,1
-Z0	498,7	532,3	207,8	528,8	521,8	490,7

Таблица 3

Погрешности невыставки и масштабных коэффициентов акселерометра

g направлен по X		g направлен по Y		g направлен по Z	
A <sub>xx</sub>	0,022782	A <sub>xz</sub>	-0,001435916	A <sub>yx</sub>	0,025436221
A <sub>yz</sub>	-0,00595	A <sub>yy</sub>	-0,003679629	A <sub>xy</sub>	0,002051308
A <sub>zy</sub>	0,006769	A <sub>zx</sub>	0,018872035	A <sub>zz</sub>	0,001858903

Таблица 4

Смещения нуля акселерометров, м/с<sup>2</sup>:

a <sub>ox</sub>	-0,62868	a <sub>ox</sub>	-0,675025
-----------------	----------	-----------------	-----------

<sup>1</sup> +X+ - это обозначение положения + или - перед буквой обозначает направление ориентации оси относительно гравитационного поля Земли; X, Y, Z – обозначает какая ось направлена, 0, - или + обозначает направление угловой скорости поворота вокруг выбранной оси

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/637776.html>

$a_{oy}$	1,106235	$a_{oy}$	1,029665
$a_{oz}$	-2,4039	$a_{oz}$	-2,31322

Так как смещение нуля рассчитывалось два раза по разным данным, близость полученных значений говорит о правильности результата.

Рассчитаем смещения нуля, погрешности невыставки, коэффициенты влияния кажущегося ускорения, и масштабных коэффициентов ДУСов и занесем данные в таблицы:

Таблица 5

Коэффициенты влияния кажущегося ускорения

$G_{xx}$	0,009946	$G_{xy}$	0,004973	$G_{xz}$	-0,00497
$G_{yx}$	0,019892	$G_{yy}$	0,004973	$G_{yz}$	0,019892
$G_{zx}$	0,004973	$G_{zy}$	0	$G_{zz}$	-0,02984

Таблица 6

Получим смещения нуля,  $^{\circ}/с$

$\Omega_{0x}$	16,5113	$\Omega_{0x}$	16,46245	$\Omega_{0x}$	16,36475
$\Omega_{0y}$	9,8677	$\Omega_{0y}$	9,72115	$\Omega_{0y}$	9,77
$\Omega_{0z}$	-20,5659	$\Omega_{0z}$	-20,7124	$\Omega_{0z}$	-21,1032

Таблица 7

Погрешности невыставки и масштабных коэффициентов

$G_{xx}$	0,012823	$G_{xz}$	0,011724	$G_{xy}$	0,035823
$G_{yz}$	0,006839	$G_{yy}$	0,047344	$G_{yx}$	-0,0114
$G_{zy}$	0,000326	$G_{zy}$	0,00977	$G_{zz}$	0,074374

Проверим полученные результаты:

Сравним правую и левую часть равенства модели акселерометра подставив в правую часть экспериментальные данные а в левую полученные константы и входные воздействия

$$U_{AX} = K_{AX}[(1 + A_{XX})a_X + A_{XZ}a_Y - A_{XY}a_Z + a_{0X}]$$

$745.5 = 24,813 ((1+0,022782)*9,823-0.62868))+512$  (512 добавляем потому что показания 0 в датчике начинаются не в 0 а в 512)

Получили 745,5 и 745,69

$$U_{GX} = K_{GX}[(1 + G_{XX})\Omega_X + G_{XZ}\Omega_Y - G_{XY}\Omega_Z + \Omega_{0X} + G_{XX}^A a_X + G_{XY}^A a_Y + G_{XZ}^A a_Z]$$

$$684,4 = 1,023((1 + 0,012823) * 150 + 16,4625 + 0,009946 * 9,823) + 512$$

684,4 и 684,3587.

Сравнивая рассчитанные и полученные значения можно сделать вывод в различии до первого знака после запятой единиц младшего разряда. Или различие в рассчитанном и полученном результатах 0,396 м/с<sup>2</sup> для акселерометра 0,977 °/с для ДУСа. Данное различие можно объяснить тем, что модель погрешностей акселерометра и ДУС, включает в себя только члены линейно зависящие от входных воздействий.

### Вывод.

В данной работе была рассмотрена конструкция и принцип работы инерциального измерительного модуля. Была сформулирована линейная модель погрешности чувствительных элементов в виде полинома, связывающего входное воздействие и выходной сигнал чувствительного элемента. Были экспериментально получены коэффициенты при членах этого полинома, и тем самым установлена однозначная зависимость между входными и выходными параметрами. Однако анализ этой модели был проведен в камеральном режиме - то есть обработка результатов после проведения измерений.

### Список литературы

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы, Машиностроение, 2007г.
2. Н.Бабур, ДЖ. Шмидт Направления развития инерциальных датчиков // Гироскопия и навигация, 2000 г., №1.
3. В.Г. Пешехонов Гироскопы начала XXI века// Гироскопия и навигация, 2003г., №4.
4. Документация на прибор SparkFun Electronics 2009  
URL: [http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/IMU/SFE-0012-DS-6DOFAtomic\\_v3.pdf](http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/IMU/SFE-0012-DS-6DOFAtomic_v3.pdf)
5. Салычев О.С. «Applied Inertial navigation: problems and solutions», МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004г.
6. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения инерциальных навигационных систем, ГНЦ РФ ОАО «ЦНИИ Электроприбор» 2009г., 280с.
7. Васечкин Ю.С. Лабораторные работы в среде Matlab, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002г.