

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

зав.кафедры ИнИТ

\_\_\_\_\_ / А.Л.Шестаков /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

**РАЗРАБОТКА ИНКЛИНОМЕТРА НА БАЗЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО  
АКСЕЛЕРОМЕТРА**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ – 12.03.01. 2018. 114-253. ПЗ ВКР

Консультант, доц. каф. ИнИТ

\_\_\_\_\_ / Д.А. Кацай /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Руководитель, ст.преп. каф. ИнИТ

\_\_\_\_\_ / С.В.Пашнин /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Автор

студентка группы КЭ-475

\_\_\_\_\_ / Е.Е.Кондрух /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Нормоконтролер, доцент

\_\_\_\_\_ / А.А.Лысова /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

## АННОТАЦИЯ

Кондрух Е.Е. «Разработка инклинометра на базе микромеханического акселерометра» – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-475; 2018, 89 с., 30 ил., 23 табл., библиогр. список – 20 наим., 4 прил.

В данной работе разрабатывается инклинометр на основе микромеханического акселерометра ADXL345.

При создании инклинометра были проведены аналитический обзор отечественных аналогов, подбор компонентов устройства, изготовлен прототип, экспериментально определены его погрешности и произведена калибровка.

Для инклинометра спроектирована 3D-модель с указанием крепежных мест, обеспечена его герметичность и влагозащищенность.

Результатом проделанной работы является разработанный инклинометр, который измеряет угол наклона с точностью измерения до 0,1 градуса.

Данный инклинометр на базе микромеханического акселерометра может использоваться в строительстве как измерительное устройство.

В работе были использованы следующие программные обеспечения: MS Office 2013, Компас – 3D V17, Mathcad V17, Arduino.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР			
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата				
Разраб.		Кондрух Е.Е.			Разработка инклинометра на базе микромеханического акселерометра	Лит	Лист	Листов
Проверил		Пашнин С.В.					5	89
Н. контр.		Лысова А.С.						
Утвердил		Лапин А.П.						
						ЮУрГУ Кафедра ИнИТ		

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОИСК.....	10
1.1 Анализ технического задания.....	10
1.2 Обзор отечественных аналогов .....	11
1.3 Патентный обзор.....	13
1.3.1 Измеритель углового положения изделия.....	13
1.3.2 Инклинометр на базе трехкомпонентного акселерометра .....	16
1.4 Обзор существующих микромеханических акселерометров .....	19
1.4.1 Емкостные акселерометры .....	19
1.4.2 Пьезорезистивные акселерометры.....	21
1.4.3 Пьезоэлектрические акселерометры.....	22
1.4.4 Выбор трехкомпонентного микромеханического акселерометра .....	22
1.4.5 Использование микроконтроллерной платы «Arduino» в разрабатываемом инклинометре .....	24
2 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЭМС- АКСЕЛЕРОМЕТРА.....	27
2.1 Постановка задач построения математической модели трехосевого микромеханического акселерометра .....	27
2.2 Принцип работы трехосевого микромеханического акселерометра .....	27
2.3 Составление передаточной функции трехосевого микромеханического акселерометра .....	28
2.4 Перевод математической модели из системы дифференциальных уравнений второго порядка в первый.....	33
2.5 Формирование измерительного прибора с желаемыми характеристиками	35
2.6 Реализация обратной связи.....	36
2.7 Моделирование математической модели.....	37
2.8 Построение нелинейной математической модели маятника.....	42
3 КАЛИБРОВКА ИНКЛИНОМЕТРА .....	46

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

3.1	Постановка эксперимента.....	46
3.2	Проведение эксперимента .....	48
3.3	Обработка результатов измерений.....	51
4	РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ИНКЛИНОМЕТРА .....	58
4.1	Предварительная компоновка элементов в проектируемом инклинометре	58
4.2	Выбор материала для проектируемого корпуса .....	59
4.3	Разработка конструкторской документации и 3D-модели .....	60
4.4	Расчет размерной цепи методом максимума-минимума .....	64
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	70
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	71
	ПРИЛОЖЕНИЯ	
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА ADXL345 .....	73
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ .....	76
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА .....	78
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г. КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ.....	83

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

## ВВЕДЕНИЕ

Для определения угла наклона различных объектов относительно гравитационного поля Земли используется прибор, который называется инклинометр [1].

Инклинометрия является перспективным направлением для научно-технических разработок и представляет собой совокупность методик решения геологических задач, которая включает в себя множество современных разработок из таких научных областей, как математика, электроника, гироскопия и микроэлектромеханические системы (МЭМС).

С развитием технологий инклинометрия получила широкое распространение в строительстве для определения отклонений от горизонтали различных объектов.

Разработкой инклинометрических систем занимаются отечественные и зарубежные фирмы.

Научно-технические достижения наших ведущих предприятий приборостроительной отрасли показывают, что на основе своих разработок они могут создавать отечественные инклинометры, которые на мировом рынке являются конкурентоспособными по своим техническим характеристикам и по стоимости.

Другими важными задачами являются минимизация габаритов прибора для удобства использования и его эргономика.

Перечисленные задачи требуют дополнительного изучения и исследования. Это означает, что все усилия, направленные на разработку инклинометрических систем, являются актуальными и своевременными.

На сегодняшний момент для минимизации габаритов прибора используют микромеханические электронные компоненты, так называемые МЭМС-системы.

МЭМС-системы представляют собой устройства, которые объединяют в себе микромеханические и микроэлектронные компоненты [2].

В разрабатываемом проекте будет использован микромеханический акселерометр – датчик, который измеряет проекцию вектора ускорения гравитации на его две чувствительные оси.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

По величинам измеренных проекций определяется угол наклона.

Инклинометры на основе микромеханического акселерометра обладают уникально малыми массой и габаритами, низким потреблением электроэнергии, полным отсутствием подвижных узлов, возможностью функционирования в повседневных условиях эксплуатации и меньшей стоимостью, чем их традиционные аналоги.

Разрабатываемый инклинометр предполагается использовать в строительной сфере для контроля угла наклона горизонтальных конструкций.

Целью данного проекта является разработка инклинометра на основе микромеханического акселерометра, который позволит измерять статический угол наклона с точностью до 0,1 градуса.

Задачами проекта являются:

- проведение информационного поиска;
- составление математической модели МЭМС-акселерометра;
- проведение калибровки инклинометра;
- разработка конструкторской документации на основе 3D-модели инклинометра.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

# 1 ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОИСК

Разработка инклинометрических систем на базе микромеханических датчиков позволяет определять угол наклона с высокой точностью при малых габаритах измерительного устройства.

Инклинометры находят широкое применение в различных сферах. В зависимости от сферы использования, инклинометры могут быть разных видов, структуры и содержать различные вспомогательные устройства.

## 1.1 Анализ технического задания

Перед началом проектирования инклинометра необходим предварительный анализ технического задания, который включает в себя все необходимые требования по структуре и функционалу.

В таблице 1.1 представлено техническое задание на проектирование инклинометра на базе микромеханического акселерометра.

Таблица 1.1 – Техническое задание на проектирование инклинометра на основе микромеханического акселерометра

Номер этапа, №	Описание требования	Содержание требования
1	Информационный поиск	Анализ по уже существующим устройствам, выявление их достоинств и недостатков, реализация наиболее оптимального решения
2	Достижение необходимой точности инклинометра при измерении	Проведение эксперимента, экспериментальное определение погрешностей устройства, выполнение калибровки
3	Модульность в формировании системы	Реализация наиболее оптимального решения с точки зрения соотношения необходимой точности к малым габаритам конструкции устройства

Этап анализа технического задания помог сформулировать целый ряд требований, которые необходимы для создания инклинометра в рамках ВКР.

## 1.2 Обзор отечественных аналогов

На сегодняшний момент существуют два вида инклинометра:

- электрический;
- гироскопический.

Рассмотрим эти два вида на примере двух отечественных инклинометров: СММК. БСГ [3] и УГИ-42 [4].

Сравнительный анализ параметров двух типов инклинометра представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ параметров двух типов инклинометра

Критерий сравнения	Электрический инклинометр (СММК. БСГ)	Гироскопический инклинометр (УГИ-42)
Состав устройства	Реализован на основе чувствительного элемента двухосевого акселерометра. Чувствительным элементом является дифференциальный конденсатор	В состав блока электроники входят источники питания датчика угловой скорости, акселерометров и двигателя разворота корпуса гироскопа
Точность измерения	$\pm 0,03^\circ$	$\pm 0,1^\circ$
Диапазон измерения	от $-30^\circ$ до $+30^\circ$ по всем осям	По зенитному углу: $0 \dots 180^\circ$ По азимуту: $0 \dots 360^\circ$ По углу тангажа: $0 \dots 360^\circ$
Условия окружающей среды	от $-30^\circ\text{C}$ до $+60^\circ\text{C}$	$-10^\circ\text{C}$ до $+105^\circ\text{C}$
Максимальное рабочее давление	10 МПа	45 МПа
Габариты	(95×84×35) мм, масса 0,26 кг	(320×280×140) мм, масса 3 кг

Окончание таблицы 1.2

Критерий сравнения	Электрический инклинометр (СМИК. БСГ)	Гироскопический инклинометр (УГИ-42)
Область применения	Для измерения углов наклона инженерных несущих конструкций зданий и сооружений	В нефтегазовой, горнорудной, угледобывающей, строительной отраслях
Надежность, долговечность	Высокая, срок эксплуатации 10 лет	Низкая, 12 месяцев
Затраты электроэнергии	Напряжение постоянного тока 24 В	220/50Гц 50Вт
Источник энергии	Электрическая сеть	Электрическая сеть
Стоимость	Высокая	Высокая

После проведенного сравнительного анализа двух типов инклинометра для реализации проекта был выбран в качестве аналога инклинометр электрического типа, который обладает следующими достоинствами:

- 1) использован емкостной метод преобразования перемещения в электрический сигнал. Данный метод является самым надежным из-за высокого порога чувствительности и небольшой инерционности;
- 2) малые габариты и масса, которые позволяют перемещать инклинометр без усилий;
- 3) высокий срок эксплуатации и надежность дают возможность использовать прибор без частой калибровки и ремонта;
- 4) высокая точность дает на выходе инклинометра максимально близкое к истинному значение угла наклона;
- 5) используется для измерения углов наклона инженерных несущих конструкций зданий и сооружений.

К недостаткам относятся следующие критерии:

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

- значительное влияние внешних электромагнитных полей;
- высокая стоимость, обусловленная дорогой электроникой и программным обеспечением;
- малый диапазон измерения угла наклона;
- отсутствие возможности автономного электропитания.

При разработке инклинометра в рамках ВКР будут учтены перечисленные выше недостатки.

### 1.3 Патентный обзор

В данном пункте рассмотрены уже существующие инженерные наработки связанные с измерением угла наклона.

Патентный обзор необходим для изучения уже существующих изобретений, выявления их достоинств и недостатков с целью их учета при проектировании устройства.

#### 1.3.1 Измеритель углового положения изделия

Измеритель углового положения изделия №2491507 был запатентован в 2013 году. Изобретение относится к области измерительной техники и промышленной электроники [5].

Устройство предназначено для измерения углового положения изделия.

Устройство содержит два двухосевых микромеханических акселерометра. Их одноименные оси чувствительности направлены горизонтально и перпендикулярно, а разноименные в противоположные стороны.

Принципиальная схема измерителя углового положения изделия представлена на рисунке 1.1.

Измеритель угловых положений изделия содержит два двухосевых микромеханических акселерометра 1 и 2 (ADXL203), установленных на противоположных сторонах основания так, что их одноименные оси чувствительности  $x_1$ ,  $x_2$  и  $y_1$ ,  $y_2$  направлены горизонтально и перпендикулярно, а разноименные оси  $x_1$ ,  $y_2$  и  $x_2$ ,  $y_1$  направлены в противоположные стороны, при этом вертикальные оси  $z_1$  и  $z_2$  совпадают.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

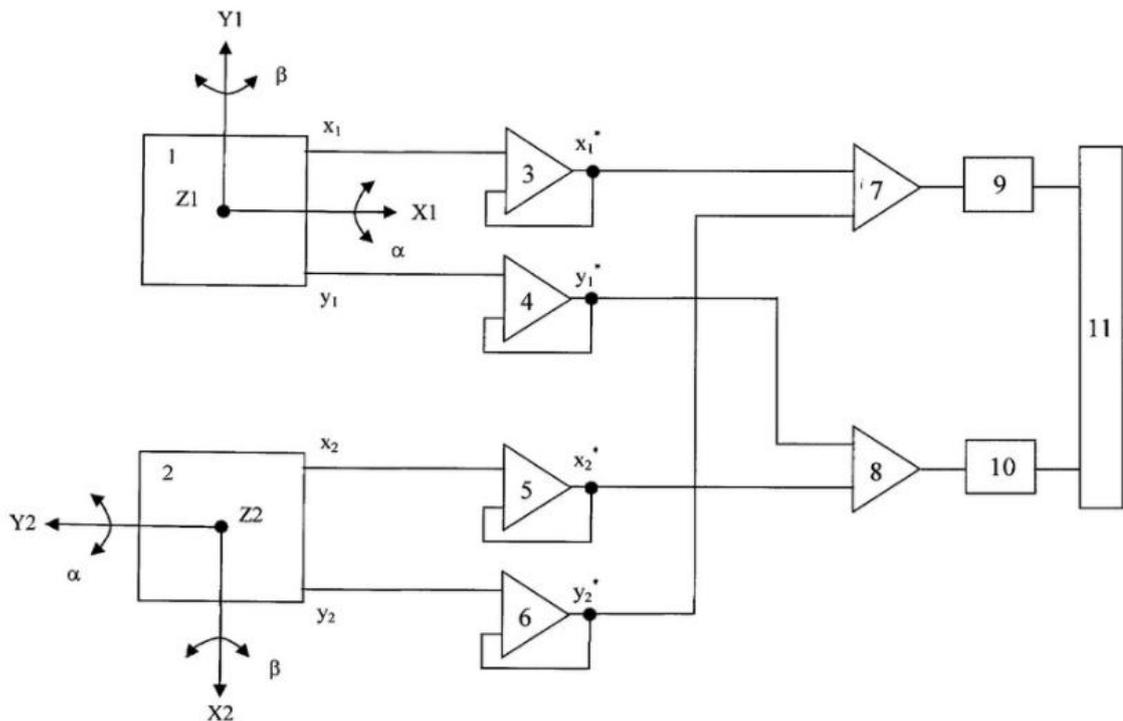


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема измерителя углового положения изделия:

- 1, 2 – двухосевые микромеханические акселерометры;
- 3, 4, 5, 6 – буферные операционные усилители;
- 7, 8 – дифференциальные усилители разности напряжений;
- 9, 10 – аналогово-цифровые преобразователи; 11 – микроконтроллер

Так же, измеритель угловых положений изделия содержит буферные операционные усилители 3, 4, 5, 6, к входам которых подключены высокоомные ( $\sim 20$  кОм) выходы  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  акселерометров, низкоомные выходы  $x_1^*$  и  $y_2^*$  буферных операционных усилителей 3 и 6 подключены к входам дифференциального усилителя разности напряжений 7, в которых компенсируются нулевые сигналы акселерометров, выделяются и удваиваются полезные сигналы акселерометров, а низкоомные выходы  $x_2^*$ ,  $y_1^*$  буферных операционных усилителей 4 и 5 подключены к входам дифференциального усилителя 8.

Таким образом, разноименные выходы  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  акселерометров через буферные операционные усилители подключены к дифференциальным входам усилителей разности напряжений 7 и 8. Выходы дифференциальных усилителей 7 и 8 подключены к соответствующим аналого-цифровым преобразователям 9 и 10 микроконтроллера 11.

При отсутствии ускорений, отличных от ускорения силы тяжести, выходные сигналы акселерометров имеют вид:

- для акселерометра 1:

$$U_{x1} = U_{0x1} + K_{x1} \cdot g \cdot \sin \alpha ;$$

$$U_{y1} = U_{0y1} + K_{y1} \cdot g \cdot \sin \beta ;$$

- для акселерометра 2:

$$U_{x2} = U_{0x2} + K_{x2} \cdot g \cdot \sin \beta ;$$

$$U_{y2} = U_{0y2} + K_{y2} \cdot g \cdot \sin \alpha .$$

где  $U_{0x1}, U_{0x2}, U_{0y1}, U_{0y2}$  – нулевые сигналы акселерометров;

$K_{x1}, K_{x2}, K_{y1}, K_{y2}$  – масштабные коэффициенты.

Вследствие особенностей конструктивной установки акселерометров в измерителе, при отклонении их осей чувствительности от горизонтальной плоскости, выходные сигналы акселерометров и соответствующие им сигналы буферных операционных усилителей примут вид:

$$U_{x1}^* = U_{0x1} + \Delta U_{x1} + K_{x1} \cdot g \cdot \sin \alpha ;$$

$$U_{y1}^* = U_{0y1} + \Delta U_{y1} + K_{y1} \cdot g \cdot \sin \beta ;$$

$$U_{x2}^* = U_{0x2} - \Delta U_{x2} + K_{x2} \cdot g \cdot \sin \beta ;$$

$$U_{y2}^* = U_{0y2} - \Delta U_{y2} + K_{y2} \cdot g \cdot \sin \alpha .$$

В результате преобразования и суммирования сигналов  $U_{x1}^*, U_{y2}^*$  в дифференциальном усилителе разности напряжений 7 и сигналов  $U_{x2}^*, U_{y1}^*$  в дифференциальном усилителе разности напряжений 8 компенсируются начальные сигналы акселерометров  $U_{0x1}, U_{0y2}$  в дифференциальном усилителе 7 и начальные сигналы акселерометров  $U_{0x2}, U_{0y1}$  в дифференциальном усилителе 8, существенно зависящие от изменения температуры окружающей среды, и удваиваются полезные сигналы акселерометров:  $|U_{x1}| + |U_{y2}|$  и  $|U_{x2}| + |U_{y1}|$ .

При условии  $U_{0x1} = U_{0y2}; U_{0x2} = U_{0y1}; |U_{x1}| = |U_{y2}| = \Delta U_{\alpha}; |U_{x2}| = |U_{y1}| = \Delta U_{\beta}; K_{x1} = K_{y2} = \Delta K_{\alpha}; K_{x2} = K_{y1} = \Delta K_{\beta}$ , на выходах дифференциальных усилителей разности напряжений 7 и 8 сформируются соответственно сигналы:

$$2\Delta U_{\alpha} = K_{\alpha} \cdot g \cdot \sin \alpha ;$$

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$2\Delta U_{\beta} = K_{\beta} \cdot g \cdot \sin \beta; \quad (1.1)$$

$$2\Delta U_{\alpha} \leq 2\Delta U_{\beta}.$$

Выходные напряжения (1.1) дифференциальных усилителей 7 и 8 преобразуются в кодовый эквивалент аналого-цифровыми преобразователями 9 и 10.

Определение значений углов положения изделия выполняется путем вычисления арксинусов углов  $\alpha$  и  $\beta$  в микроконтроллере 11.

К достоинствам измерителя углового положения изделия можно отнести :

- повышение чувствительности и точности измерения углов, уменьшение температурной погрешности и повышения помехоустойчивости;
- малые габариты (24×24×23,7 мм) и вес (0,060 кг).

Недостатками измерителя углового положения изделия являются:

- сложность конструкции;
- недостаточная эксплуатационная надежность датчика (не допускаются удары при установке измерителя, удары по изделию после его установки, одновременное включение либо выключение напряжений питания +15 В и -15 В);
- измерение угла наклона относительно только одной оси чувствительности;
- использование внешнего масштабного резистора, включенного последовательно с катушкой датчика момента (величиной 3000 Ом).

### *1.3.2 Инклинометр на базе трехкомпонентного акселерометра*

Инклинометр на базе трехкомпонентного акселерометра №2348008 был запатентован в 2006 году [6].

Изобретение предназначено для контроля пространственного положения траектории ствола скважин в процессе их строительства. Инклинометр содержит трехкомпонентный акселерометр, трехкомпонентный магнитометр, цифровое процессорное устройство, датчик температуры.

Принципиальная схема инклинометра на базе трехкомпонентного акселерометра представлена на рисунке 1.2.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

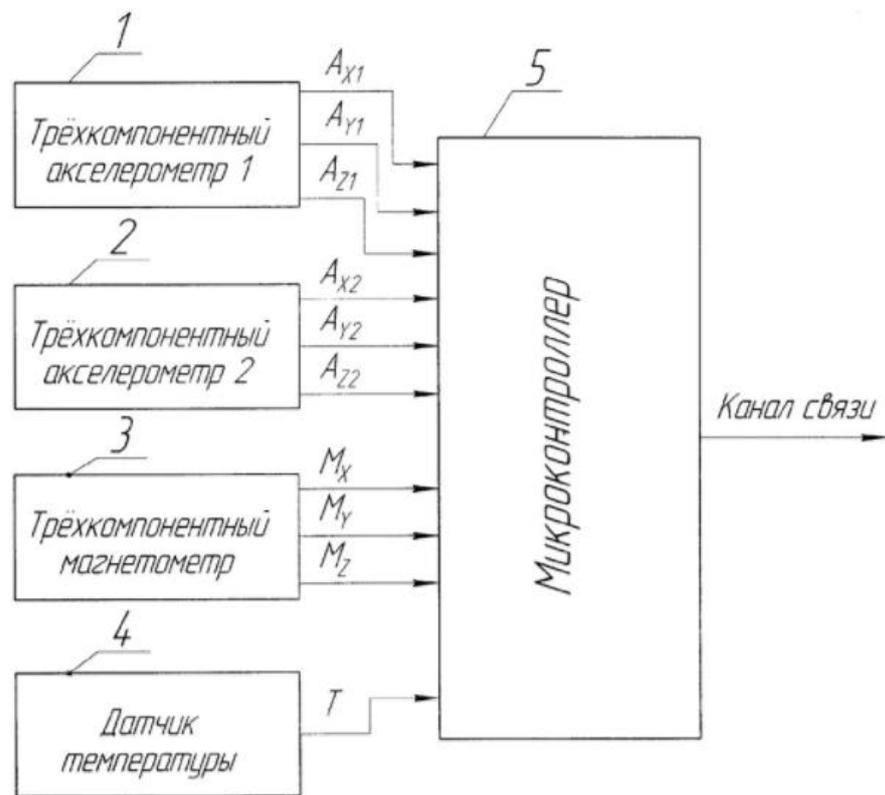


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема инклинометра на базе трехкомпонентного акселерометра:

1,2 – акселерометры; 3 – трехкомпонентный магнетометр;  
4 – датчик температуры; 5 – микроконтроллер

Предлагаемый инклинометр состоит из трехкомпонентного акселерометра 1 с диапазоном, достаточным для измерения вектора силы тяжести, трехкомпонентного акселерометра 2 с диапазоном, достаточным для измерения суммы ускорения свободного падения и виброускорения, действующего на инклинометр, трехкомпонентного магнитометра 3, датчика температуры 4, микроконтроллера 5. Акселерометр 1 высокостабильный, имеет малый диапазон измерений. Акселерометр 2 имеет широкий диапазон, но обладает большим дрейфом смещения нуля, который корректируется по показаниям акселерометра 1.

Инклинометр поддерживает три режима работы:

- «Статика» - измерение производится в статическом положении, например, при наращивании буровой колонны, когда отсутствуют вибрации;
- «Динамика» - измерения производятся в процессе бурения;

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

- «Калибровка» - измерение производится в статическом положении аналогично режиму «Статика», а также производится коррекция смещения нуля каналов акселерометра 2.

Принцип определения пространственного положения инклинометра с трехкомпонентным акселерометром основан на измерении проекций вектора ускорения свободного падения на измерительные оси акселерометра. В состоянии покоя эти величины не превышают величины ускорения свободного падения. Во время бурения инклинометр испытывает влияние вибраций, которые вносят переменную составляющую ускорения. Вектор ускорения свободного падения определяется как постоянная составляющая общего ускорения. Пиковые значения виброускорений значительно превышают ускорение свободного падения.

В случае, если ускорение превысит диапазон измерений акселерометра, произойдет ограничение выходного сигнала, что приведет к изменению постоянной составляющей и, следовательно, к ошибке измерения пространственного положения. Для того чтобы этого не происходило, применяются дорогостоящие высокоточные акселерометры с большим диапазоном измерений.

Достоинствами инклинометра на базе трехкомпонентного акселерометра являются:

- повышение точности измерений;
- широкая область применения.
- экономичность с точки зрения замены дорогостоящих высокоточных акселерометров более дешевыми и с малыми габаритами.

Например, первый акселерометр на приборах типа ADXL213 с диапазоном  $\pm 1,2g$ , второй акселерометр на приборах типа ADXL210 с диапазоном  $\pm 10g$ .

Эти акселерометры имеют габариты  $5 \times 5 \times 2$  мм, потребляют мощность 1,35 мВт и одно напряжение питания 3 В. Применение микромеханических акселерометров позволяет уменьшить на два порядка потребляемую мощность, что особенно важно при батарейном питании, использовать более простые источники питания,

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

изготавливать скважинную аппаратуру с меньшими диаметрами кожуха, вплоть до минимально установленного - 25 мм. В качестве магнитометров могут быть использованы магниторезисторы или феррозонды.

Основным недостатком изобретения является сложность конструкции.

Изучив представленные в данной главе патенты, можно сделать заключение, что любое техническое устройство, связанное с измерением угла наклона, включает в себя сложную систему, состоящую из акселерометров, датчиков температур, скоростей и т.д.

Таким образом, в качестве базы для разработки инклинометра будет использован инклинометр на базе трехкомпонентного акселерометра №2348008.

Изобретение подходит для измерения угла наклона в в строительной сфере. Устройство обладает малыми габаритами и весом, что является актуальным в наше время.

Основным недостатком является сложность конструкции.

Трехосевые акселерометры будут заменены одним трехосевым, так как разрабатываемый инклинометр измеряет проекцию вектора ускорения гравитации на две чувствительные оси и используется в строительной сфере. Это значительно упростит конструкцию устройства.

#### **1.4 Обзор существующих микромеханических акселерометров**

Особенностью микромеханического акселерометра является изготовление чувствительных элементов этих приборов из материалов на основе кремния по кремниевой технологии, что предопределяет:

- малые габариты и массу приборов;
- возможность применения групповой технологии ;
- невысокую стоимость изготовления при массовом производстве;
- высокую надежность в эксплуатации.

##### *1.4.1 Емкостные акселерометры*

Основным элементом таких акселерометров является инерционная масса. Ее движение отстает от движения корпуса датчика. Главным назначением

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

инерционной массы является обнаружение перемещения этой массы относительно корпуса устройства и преобразование его в пропорциональный электрический сигнал.

Отсюда следует, что вторым основным элементом емкостного акселерометра является детектор перемещений, который может измерять микроскопические амплитуды линейных ускорений или вибрационных колебаний [7].

На рисунке 1.3 представлен емкостной акселерометр с дифференциальным конденсатором.

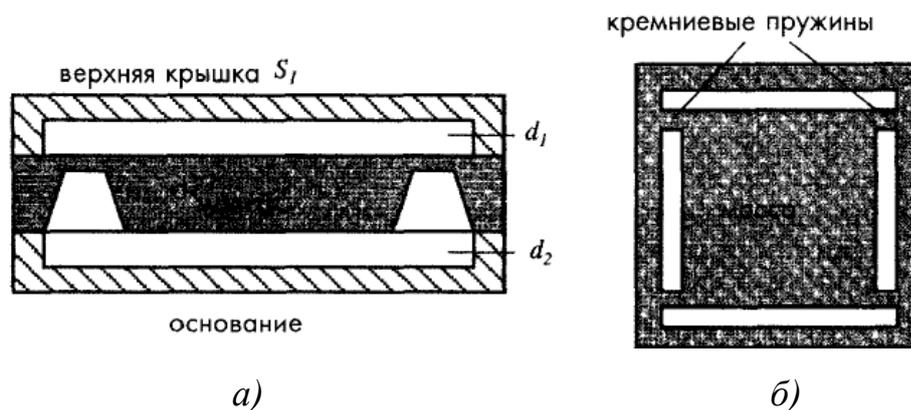


Рисунок 1.3 – Емкостной акселерометр с дифференциальным конденсатором:  
*а)* – поперечное сечение акселерометра;  
*б)* – вид сверху на инерционную массу, поддерживаемую четырьмя кремниевыми пружинами

Емкостной акселерометр состоит из различных пластин. Одни пластины являются стационарными, а другие пластины свободно перемещаются внутри корпуса. Между пластинами образуется конденсатор, величина емкости которого зависит от расстояния между пластинами. Под влиянием силы ускорения емкость конденсатора меняется [7].

Емкостной метод преобразования перемещения в электрический сигнал является наиболее точным и надежным, это означает, что емкостные акселерометры наиболее распространены по сравнению с другими.

У таких датчиков элементы конструкции производятся на кремниевой подложке методами микротехнологий.

### 1.4.2 Пьезорезистивные акселерометры

У пьезорезистивных акселерометров чувствительным элементом является тензодатчик, который измеряет деформацию пружин, поддерживающих инерционную массу.

Измеренная деформация пропорциональна скорости перемещения массы, а следовательно, и ускорению.

На рисунке 1.4 показан пьезорезистивный акселерометр с широким динамическим диапазоном фирмы Endevco/Allied Signal Aerospace Co (Sunnyvale, CA).

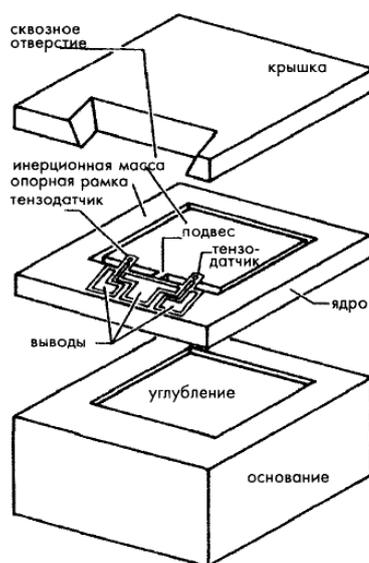


Рисунок 1.4 – Устройство пьезорезистивного акселерометра

Устройство состоит из трех слоев кремния. Средний слой состоит из инерционной массы и упругой поддерживающей конструкции. Масса фиксируется методом травления внутри рамки на подвесе, с двух сторон которого прикреплены тензодатчики, которые фиксируют движение инерционной массы.

Остальные два слоя представляют из себя крышку и основание. Они защищают средний слой от загрязнения и внешнего постороннего влияния.

Пьезорезистивные акселерометры измеряют ускорения в широком частотном диапазоне от 0 до 13 кГц и способны выдерживать перегрузку, равную 10000g [7].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

### 1.4.3 Пьезоэлектрические акселерометры

Чувствительным элементом такого акселерометра является пьезокерамика. На рисунке 1.5 представлена структура пьезоэлектрического акселерометра.

При воздействии ускорения на датчик, возникает разность перемещений кожуха и инерционной массы. Это приводит к появлению силы, действующей на кристалл. Выходной сигнал датчика прямопропорционален ускорению.

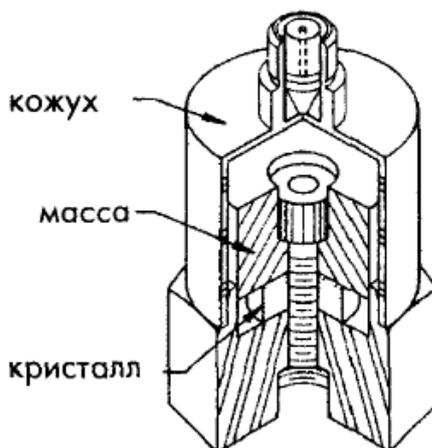


Рисунок 1.5 – Структура пьезоэлектрического акселерометра

Пьезоэлектрические датчики измеряют ускорения в частотном диапазоне от 2 Гц до 5 кГц и обладают высокой линейностью и широким температурным диапазоном до 120 °С [7].

### 1.4.4 Выбор трехкомпонентного микромеханического акселерометра

В настоящее время существуют акселерометры с аналоговыми и цифровыми выходами.

Главной особенностью аналоговых акселерометров является их малая стоимость, но при их эксплуатации потребуются подключение внешних фильтров и аналогово-цифровой преобразователь. Аналоговый акселерометр подключается к аналоговому-цифровому преобразователю через фильтр низкой частоты, что требует дополнительный расчет параметров фильтра и погрешностей, вносимых элементами фильтра.

Цифровые акселерометры не требуют дополнительных расчетов, так как они не нуждаются в подключении внешних компонентов. Это означает, что время

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		22

на разработку устройств с их использованием сокращается. Однако, их стоимость выше, чем у аналоговых акселерометров.

Исходя из перечисленных достоинств и недостатков, при разработке инклинометра будет использоваться цифровой акселерометр. Сделав анализ по линейке уже существующих цифровых акселерометров, наиболее подходящим оказался трехкомпонентный акселерометр ADXL345.

#### Технические характеристики акселерометра ADXL345:

Количество осей.....	3
Напряжение питания, В.....	3,3-5
Интерфейс.....	I2C, SPI
Пределы измерений.....	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$
Частота выборки, Гц.....	0,1 – 3200
Погрешность нуля, mg.....	150
Приведенная погрешность нуля, %.....	2/4
Мультипликативная погрешность, %.....	10
Температурный дрейф нуля, mg/°C.....	1
Нелинейность, % от FS.....	0,5
Боковая чувствительность, % .....	1
Температурный диапазон, °C.....	от -40 до +85
Стоимость.....	низкая

Полное техническое описание трехкомпонентного МЭМС-акселерометра ADXL345 представлено в Приложении А.

Проанализировав технические параметры можно сделать следующие выводы:

- 1) акселерометр имеет достаточно большой диапазон измерений;
- 2) датчик имеет низкую стоимость;
- 3) присутствует боковая чувствительность, которая означает, что при движении строго по одной из осей, на второй будет тоже наблюдаться небольшое движение;
- 4) используется последовательный протокол обмена данными I2C, который предусматривает простоту разработки при неплохой скорости работы;

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

5) Диапазон температуры МЭМС-акселерометра входит в рабочий диапазон температур разрабатываемого инклинометра.

#### *1.4.5 Использование микроконтроллерной платы «Arduino» в разрабатываемом инклинометре*

Микроконтроллер – это специальная микросхема, которая предназначена для управления различными электронными устройствами [8]. В состав микроконтроллера входят:

- микропроцессор;
- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ);
- постоянное запоминающее устройство (ПЗУ);
- совокупность внешних устройств.

В настоящее время существует большое количество специальных микроконтроллерных плат для разработки различных электронных устройств. Среди самых популярных:

- микроконтроллеры Texas Instruments MSP430, лежащие в основе микроконтроллерных плат Ti MSP430 LaunchPad;
- микроконтроллеры AVR от Atmel, лежащие в основе микроконтроллерных плат Arduino;
- микроконтроллеры PIC от Microchip, лежащие в основе микроконтроллерных плат PICSTART.

При разработке инклинометра будет использоваться микроконтроллерная плата Arduino, которая обладает целым рядом преимуществ:

- 1) удобный язык программирования на C/C++, большое количество готовых примеров делают программы доступными;
- 2) для создания прототипов и макетных образцов достаточно макетной платы и набора перемычек;
- 3) наличие большого количества библиотек и аппаратных модулей, что позволяет повысить скорость разработки;
- 4) плата спроектирована таким образом, что ее можно расширять, посредством добавления в устройства новых компонентов;

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

- 5) низкая стоимость;
- 6) небольшие размеры платы.

Платы Arduino делятся на четыре вида [9]:

- Arduino Mega;
- Arduino Uno;
- Arduino Mini;
- Arduino Nano.

В таблице 1.3 представлены основные технические параметры плат Arduino.

Таблица 1.3 – Основные технические параметры плат Arduino

Параметры	Mega	Uno	Nano	Mini
Микроконтроллер	ATmega2560	ATmega328p	Atmel ATmega168 или ATmega328	ATmega168
Рабочее напряжение, В	5	5	5	5
Входное напряжение (рекомендуемое), В	7 – 12	7 – 12	7 – 12	7 – 9
Входное напряжение (предельное), В	6 – 20	6 – 20	6 – 20	-
Цифровые Входы/Выходы	54 (14 могут использоваться как выход ШИМ)	14 (6 можно применить как выход ШИМ)	14 (6 могут служить как выходы ШИМ)	14 (6 как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	16	6	8	8 (4 имеют выводы)
Постоянный ток через вход/выход, мА	40	40	40	40

Окончание таблицы 1.3

Параметры	Mega	Uno	Nano	Mini
Флеш-память, Кб	128 (4 использует загрузчик)	32 (0,5 использует загрузчик)	16/32 (ATmega168/ ATmega328) (2 использует загрузчик)	16 (2 на загрузчик)
ОЗУ, Кб	8	2	1 (ATmega168) 2 (ATmega328)	1
Энергонезависимая память	4 Кб	1 Кб	512 b (ATmega168) 1 Кб (ATmega328)	512 Б
Тактовая частота, МГц	16	16	16	16
Габариты, мм	101×53	69×53	18,5×42	18×33

Проанализировав таблицу 1.3 для разрабатываемого устройства была выбрана плата Arduino Uno, так как ее габариты наиболее удобны для компоновки в корпус инклинометра.

**Выводы по главе 1:** в ходе проведения информационного поиска были изучены аналоги как самого устройства, так и его элементов. Анализ отечественных аналогов позволил выбрать электрический тип инклинометра и выявить его и недостатки, которые будут исключены в данном проекте.

Изучив представленные в данной главе патенты, в качестве базы для разработки устройства был выбран инклинометр на базе трехкомпонентного акселерометра №2348008, основными достоинствами которого являются малые габариты и вес.

## 2 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

### 2.1 Постановка задач построения математической модели трехосевого микромеханического акселерометра

Микромеханический акселерометр входит в состав инерциального измерительного модуля, который предназначен для измерения угла поворота различных объектов.

Основным недостатком автономного инерциально измерительного модуля является накопление ошибки спустя некоторого времени работы устройства. Накопление ошибки связано с дрейфом нуля и шумами акселерометра.

Для устранения выше перечисленных погрешностей необходимо использовать точную математическую модель МЭМС-акселерометра.

Для получения математической модели МЭМС-акселерометра необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) рассмотреть принцип работы МЭМС-акселерометра;
- 2) составить передаточную функцию системы;
- 3) сформировать измерительный преобразователь с желаемой характеристикой;
- 4) оценить погрешности, которые возникли при моделировании системы.

### 2.2 Принцип работы трехосевого микромеханического акселерометра

Схема структуры емкостного МЭМС-акселерометра представлена на рисунке 2.1.

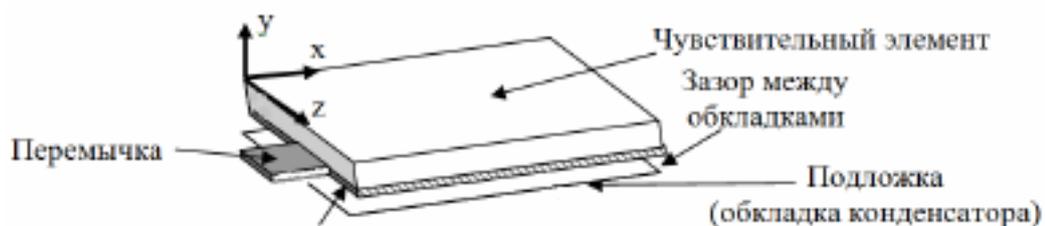


Рисунок 2.1 – Схема структуры емкостного МЭМС-акселерометра

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Емкостной МЭМС-акселерометр состоит из чувствительного элемента – слоистой пластины, которая присоединена к основанию при помощи перемычки (упругого подвеса) [10].

Если на акселерометр подано питание, то между обкладками создаются электростатические силы. Система, состоящая из подвижного чувствительного элемента с обкладками, создает конденсатор с переменной емкостью. Когда объект перемещается, на чувствительный элемент действуют силы инерции. Возникает смещение чувствительного элемента относительно обкладок и изменение емкости конденсатора.

Если превысить пределы диапазона ускорений или превысить напряжения питания, то возникает эффект «слипания» – сближение заряженных обкладок конденсатора [10].

Пределы ускорений и напряжения питания указаны в паспортных данных акселерометра.

На основании принципа работы трехосевого МЭМС-акселерометра делаем вывод, что он относится к устройствам маятникового типа.

### 2.3 Составление передаточной функции трехосевого микромеханического акселерометра

Представим МЭМС-акселерометр в виде измерительного преобразователя (Рисунок 2.2).

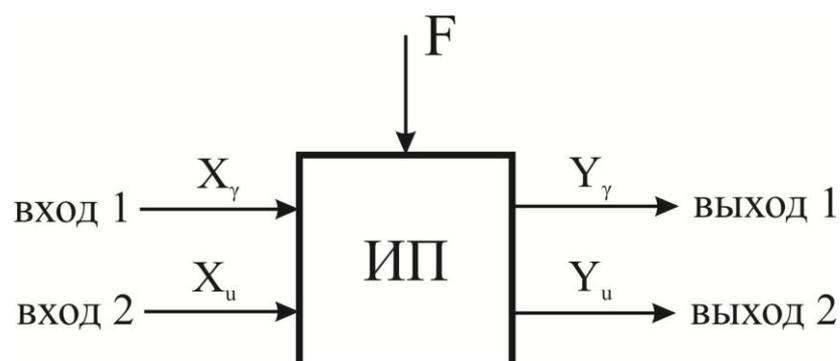


Рисунок 2.2 – Обобщенная структурная схема МЭМС-акселерометра

На вход измерительного преобразователя (ИП) поступает входное значение в виде двух составляющих:  $X_\gamma$  – полезного сигнала и сигнала в виде

возмущения  $X_u$ . Так же, на ИП оказывает влияние окружающая среда  $F$ . На выходе получаем, аналогично входу, полезный сигнал  $Y_y$  и погрешность измерения  $Y_u$  [11].

Для акселерометров маятникового типа при работе в широком динамическом диапазоне ускорений характерен нелинейный характер перемещения, а именно, переносно-поступательное движение.

На рисунке 2.3 представлена упрощенная линейризованная механическая схема маятниковой структуры МЭМС-акселерометра ADXL345 между обкладками конденсатора.

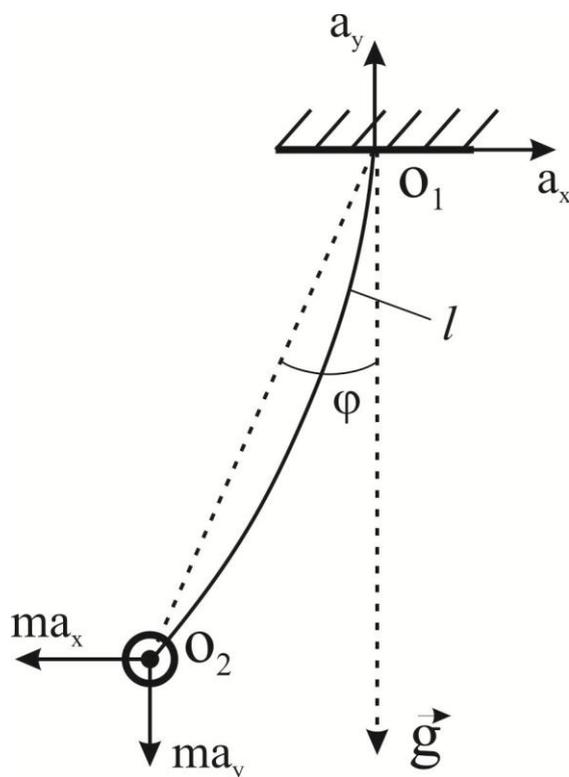


Рисунок 2.3 – Упрощенная линейризованная механическая схема маятниковой структуры микромеханического акселерометра ADXL345

Механическая схема микромеханического акселерометра представляет собой маятник, конец которого представляет собой заделку. В качестве инерционной массы  $m$  выступает емкостной элемент, который соединен с заделкой при помощи плоской пружины длиной  $l$ .

Основным назначением упрощенной механической модели маятниковой структуры является получение информации о переносном движении точки  $O_1$ , которая имеет ускорения  $a_x$  и  $a_y$ . Выходной величиной является угол поворота  $\varphi$ .

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

На рисунке 2.4 представлена проекция ускорения свободного падения на две чувствительные оси МЭМС-акселерометра.

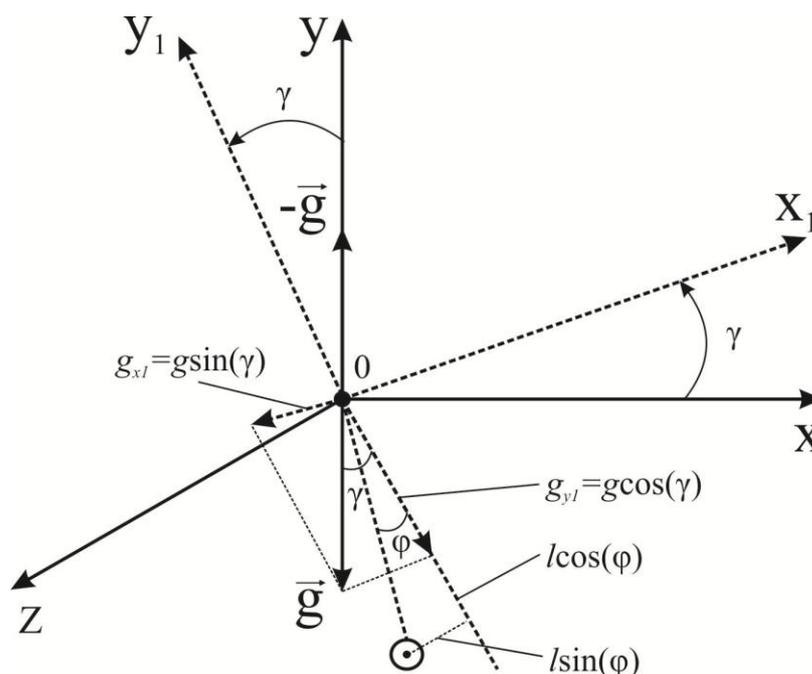


Рисунок 2.4 – Проекция ускорения свободного падения на две чувствительные оси МЭМС-акселерометра

Составим уравнение Эйлера для упрощенной маятниковой структуры:

$$J_m \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = mg \sin(\gamma) \cdot l \cos(\varphi) - mg \cos(\gamma) \cdot l \sin(\varphi) - k\varphi,$$

где  $J_m$  – момент инерции;

$\varphi$  – угол отклонения маятника;

$\gamma$  – угол отклонения ускорения свободного падения от чувствительной оси;

$m$  – инерционная масса;

$g$  – ускорение свободного падения;

$l$  – длина маятника;

$k$  – коэффициент упругости маятника.

Полученная модель является полной и нелинейной, из которой угол  $\varphi$  является функцией ускорений  $a_x$  и  $a_y$ :

$$\varphi = f(a_x, a_y).$$

$a_x$  – ускорение объекта, направленное по оси  $Ox$  инерциальной системы отсчета;

$a_y$  – ускорение объекта, направленное по оси  $Oy$  инерциальной системы отсчета.

Благодаря силе инерции маятник можно превратить в измерительный прибор. Моменты направлены против часовой стрелки.

Проведем линеаризацию математической модели маятника. Для этого, в окрестностях нулевой точки разложим  $\sin(\varphi)$  и  $\cos(\varphi)$  в ряд Маклорена:

$$\sin(\varphi) = \varphi + O_2 \approx \varphi;$$

$$\cos(\varphi) = 1 + O_2 \approx 1.$$

Отсюда следует, что при  $O_2 < 1\%$  будет задано условие:

$$\varphi \leq \varphi_{max}.$$

С учетом выше перечисленных допущений, математическая модель маятниковой структуры примет следующий вид:

$$J_m \frac{d^2\varphi}{dt^2} = mgl \cdot \sin(\gamma) - mgl \cdot \cos(\gamma) \cdot \varphi - k\varphi;$$

$$J_m \frac{d^2\varphi}{dt^2} = mgl \cdot \sin(\gamma) - (mgl \cdot \cos(\gamma) + k) \cdot \varphi.$$

Отсюда,

$$a_x = g \cdot \sin(\gamma);$$

$$a_y = g \cdot \cos(\gamma).$$

При  $\gamma = 0$  система в положении равновесия относительно горизонта.

Ускорение  $a_y$  имеет нелинейный характер изменения во времени и вносит погрешность в основное значение ускорения. Это означает, что основным входным значением является ускорение  $a_x$ , а  $a_y$  является возмущением.

Тогда, структурная схема МЭМС-акселерометра примет вид, представленный на рисунке 2.5.

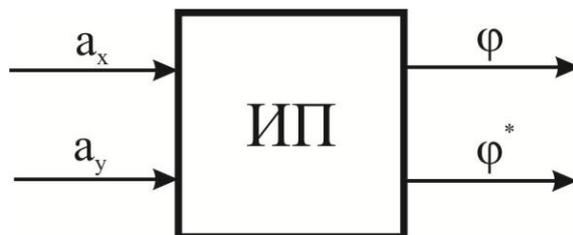


Рисунок 2.5 – Структурная схема МЭМС-акселерометр

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Для акселерометра, который измеряет проекцию вектора ускорения гравитации на его две чувствительные оси, запишем передаточную функцию второго порядка. Для этого, составим уравнение Лапласа при отсутствии погрешностей, вносимых ускорением  $a_y$ :

$$Jp^2 = ma_x l - k \cdot \varphi. \quad (2.1.1)$$

Преобразуем выражение (2.1.1):

$$Jp^2 + k \cdot \varphi = ma_x l.$$

Составим уравнение «вход-выход»:

$$\frac{\varphi}{a} = \frac{ml}{Jp^2 + k} = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{J}{ml}p^2 + 1}. \quad (2.1.2)$$

Отсюда, корни передаточной функции имеют вид:

$$p_{1,2} = \pm j \frac{1}{T}.$$

Полученная математическая модель (2.1.2) ограничена максимальным углом отклонения, диапазоном ускорений и имеет связи по оси  $Ox$  и имеет незатухающий процесс собственных колебаний.

Для устранения недостатков необходимо ввести демпфирующее звено.

Тогда, математическая модель маятниковой структуры примет вид [11]:

$$W(p) = \frac{\varphi(p)}{a(p)} = \frac{K}{T^2 p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1}.$$

где  $K$  – передаточный коэффициент;

$T$  – постоянная времени, с;

$\xi$  – коэффициент демпфирования;

$p$  – комплексная переменная.

Если  $\xi = 0$ , то постоянная времени примет вид:  $T = \frac{J}{ml}$ .

Таким образом, акселерометру, который измеряет проекцию вектора ускорения гравитации на его две чувствительные оси соответствует передаточная функция второго порядка.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

## 2.4 Перевод математической модели из системы дифференциальных уравнений второго порядка в первый

Для перехода используем понятие переменных состояния, содержащие относительные позиционные координаты объекта и их первые производные [11].

Общий вид для линейных динамических систем запишем в виде одного векторно-матричного уравнения:

$$J_m \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = m a_x l - k \cdot \varphi + 0 \cdot \frac{d\varphi}{dt}.$$

Запишем общий вид уравнения состояния:

$$\frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot W(t),$$

где  $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$  – матрица состояния;

$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}$  – вектор состояния;

$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}$  – матрица внешних воздействий (матрица

управления);

$W(t) = \begin{bmatrix} W_1(t) \\ W_2(t) \\ \dots \\ W_n(t) \end{bmatrix}$  – вектор внешних воздействий.

Укажем производные позиционных координат:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{-k}{J} \cdot \varphi + \frac{m a_x(t) l}{J} + 0 \cdot \frac{d\varphi}{dt},$$

отсюда,

$$a_{12} = \frac{-k}{J};$$

$$\varphi = x_2;$$

$$W(t) = \frac{m a_x(t) l}{J m};$$

$$x_1 = \frac{d\varphi}{dt}.$$

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Так как размерность динамической системы имеет второй порядок ( $n=2$ ), то вектор состояния можно записать в следующем виде:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d\varphi}{dt} \\ \varphi \end{bmatrix}.$$

Для формирования матриц состояния записываем исходную математическую модель в скалярной форме дифференциальных уравнений состояния [11]:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left( \frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{dx_1}{dt};$$

$$\frac{dx_1}{dt} = 0 \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + 1 \cdot W(t); \quad (2.1.3)$$

$$\frac{dx_2}{dt} \equiv \frac{d\varphi}{dt} = 1 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot W(t). \quad (2.1.4)$$

Из выражений (2.1.3) — (2.1.4) получаем:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-k}{J} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} - \text{матрица состояния};$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \text{матрица внешних воздействий}.$$

Запишем характеристическое уравнение матрицы состояния, которое совпадает со знаменателем передаточной функции, приравненное к нулю:

$$|\lambda \cdot E - A| = 0,$$

где  $\lambda$  – корни уравнения матрицы состояния;

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{единичная матрица};$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-k}{J} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} - \text{матрица состояния}.$$

Найдем корни уравнения матрицы состояния:

$$\begin{vmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & a_{12} \\ 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda & -a_{12} \\ -1 & \lambda \end{vmatrix} = 0;$$

$$\lambda^2 - a_{12} = 0;$$

$$\lambda = \pm \sqrt{a_{12}} = \pm \sqrt{\frac{-k}{J}} = \pm j \sqrt{\frac{k}{J}} \text{ при } J = ml^2.$$

Если пренебречь инерционными свойствами, то динамическая система вырождается в систему первого порядка. Система находится на границе устойчивости.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



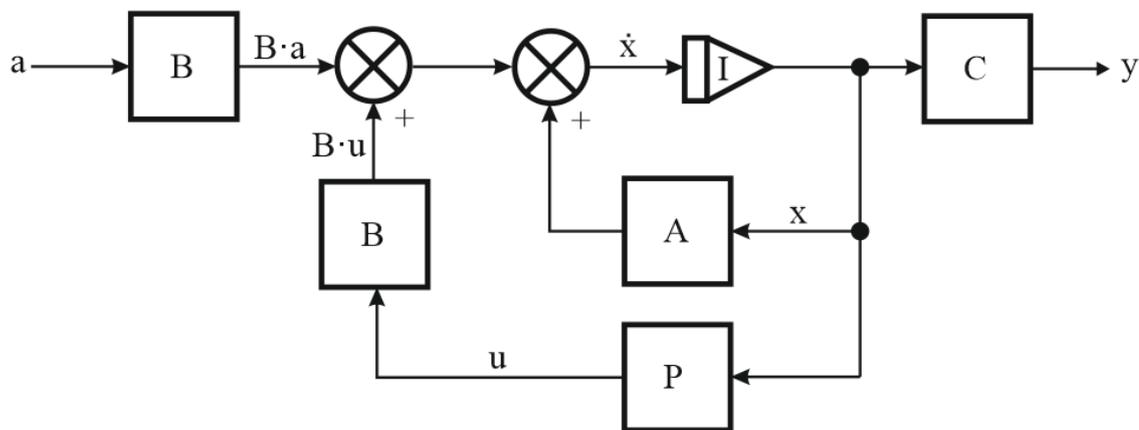


Рисунок 2.6 – Контур регулирования маятниковой структуры с обратной связью

Отсюда следует общий вид уравнения состояния:

$$\frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot u + B \cdot a,$$

где  $u = -p \cdot x$  – вектор управления.

Исходя из структурной схемы инклинометра с отрицательной обратной связью, коэффициент перерегулирования  $\sigma$  и время переходного процесса  $t_{\text{пп}}$  обеспечивается путем настройки коэффициентов регулятора :  $P = (p_1 p_2)$ .

На выходе получаем вектор наблюдения, равный:

$$y = C \cdot x.$$

Основной проблемой реализации обратной связи является доступность прямому измерению только части вектора состояния  $x$  и вектора управления  $u$ . Для реализации обратной связи контура регулирования маятниковой структуры необходим учет наблюдающего устройства.

## 2.6 Реализация обратной связи

Основной задачей построения наблюдающего устройства является восстановление вектора управления  $u$ , то есть проведение оценки вектора состояния  $\hat{x}$ .

Для этого, произведем проверку по критерию Калмана [13], который имеет следующее определение: динамическая система является наблюдаемой, если ранг матрицы наблюдаемости равна порядку системы:

$$\text{rank}(Q_n) = n. \quad (2.1.5)$$

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Матрица наблюдаемости имеет вид:

$$Q_n = [C^T \quad A^T C^T \quad (A^T C^T)^2 \dots (A^T C^T)^{n-1}].$$

При выполнении условия (2.1.5) формируется уравнение наблюдающего устройства:

$$\dot{\hat{x}} = (A - GC)\hat{x} + Gy + Bu(\hat{x}), \quad (2.1.6)$$

где  $G$  – матрица коэффициентов наблюдающего устройства;

$A - GC = AL$  – матрица состояния Льюинберга наблюдающего устройства;

$Gy = GCx$  – внешнее воздействие на наблюдателя;

$u(\hat{x}) = -p\hat{x}$  – вектор управления, воздействующий на объект и на наблюдателя.

Выражение (2.1.6) является математической моделью наблюдающего устройства, имеющая следующее свойство:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{x}(t) = x.$$

Наблюдающее устройство может быть как виртуальным в виде математической модели, так и аппаратным.

## 2.7 Моделирование математической модели

Любой контур регулирования можно рассматривать как систему, состоящую из объекта регулирования и регулятора. В свою очередь, регулятор через исполнительное устройство может влиять на регулируемый параметр объекта.

Из рисунка 2.6 видно, что отрицательная обратная связь в регуляторе осуществляется по положению регулирующего органа путем подачи на вход устройства обратной связи сигнала с выхода акселерометра. Конструктивно обратная связь осуществляется с помощью электрической передачи.

Для настройки регулятора по схеме с обратной связью необходимо выполнить ряд этапов:

1. получить выражение характеристического уравнения с коэффициентами регулятора:  $P = (p_1 \ p_2)$ ;
2. получить желаемые коэффициенты характеристического уравнения  $T$  и  $\xi$  элементарных динамических звеньев;

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

3. составить алгебраические уравнения для матрицы регулирования  $P$ .

Расчетная часть проводится в программе MathCAD.

### 1. Получение коэффициентов для характеристического уравнения

$$a12 := -0.1$$

$$A(a12) := \begin{pmatrix} 0 & a12 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$P(p1, p2) := (p1 \quad p2)$$

$$-P(p1, p2) \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} \rightarrow -p1 \cdot x_0 - p2 \cdot x_1$$

$$Azs(a12, p1, p2) := A(a12) - B \cdot P(p1, p2)$$

$$Azs(a12, p1, p2) \rightarrow \begin{pmatrix} -p1 & -p2 - 0.1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$E2 := \text{identity}(2) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$v\lambda(a12, p1, p2) := |E2 \cdot \lambda - Azs(a12, p1, p2)| \rightarrow \lambda^2 + p1 \cdot \lambda - a12 + p2$$

$$\text{coeffs}(\lambda) := \begin{pmatrix} p2 + 0.1 \\ p1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

### 2. Уравнение с $T$ и $\xi$

$$W(p, T, \xi, k) := \frac{k}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1}$$

$$T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1 = 0$$

### 3. Составление алгебраического уравнения для матрицы регулирования

$$\lambda^2 + p1 \cdot \lambda + p2 + 0.1 = \frac{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1}{T^2}$$

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$p1(\xi, T) := 2 \cdot \frac{\xi}{T}$$

$$p2(\xi, T, a12) := -a12 + \frac{1}{T^2}$$

Получили выражение второго порядка, которое связано с постоянной времени T и коэффициентом демпфирования  $\xi$ .

Тогда, коэффициенты регулирования примут значения, при которых система принимает установившейся режим и обладает заданными характеристиками:

$$\omega_{\text{н}} := 0.01, 0.011 \dots 10$$

$$k := 1$$

$$\xi_{\text{н}} := 0.71$$

$$p1(\xi, T) = 1.42$$

$$p2(\xi, T, a12) = 1.1$$

$$p10 := p1(\xi, T)$$

$$p20 := p2(\xi, T, a12)$$

$$W0(\lambda, p1, p2) := \frac{1}{\frac{\lambda^2}{p2 + a12} + \frac{p1}{p2 + a12} \cdot \lambda + 1} \quad \text{- система с коэффициентами регулятора}$$

$$W00(\lambda) := \frac{1}{(10 \cdot \lambda^2 + 1)} \quad \text{- система с начальными параметрами}$$

$$W(p, T, \xi, k) := \frac{k}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1} \quad \text{- система с коэффициентом демпфирования}$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) полученной системы представлена на рисунке 2.7.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

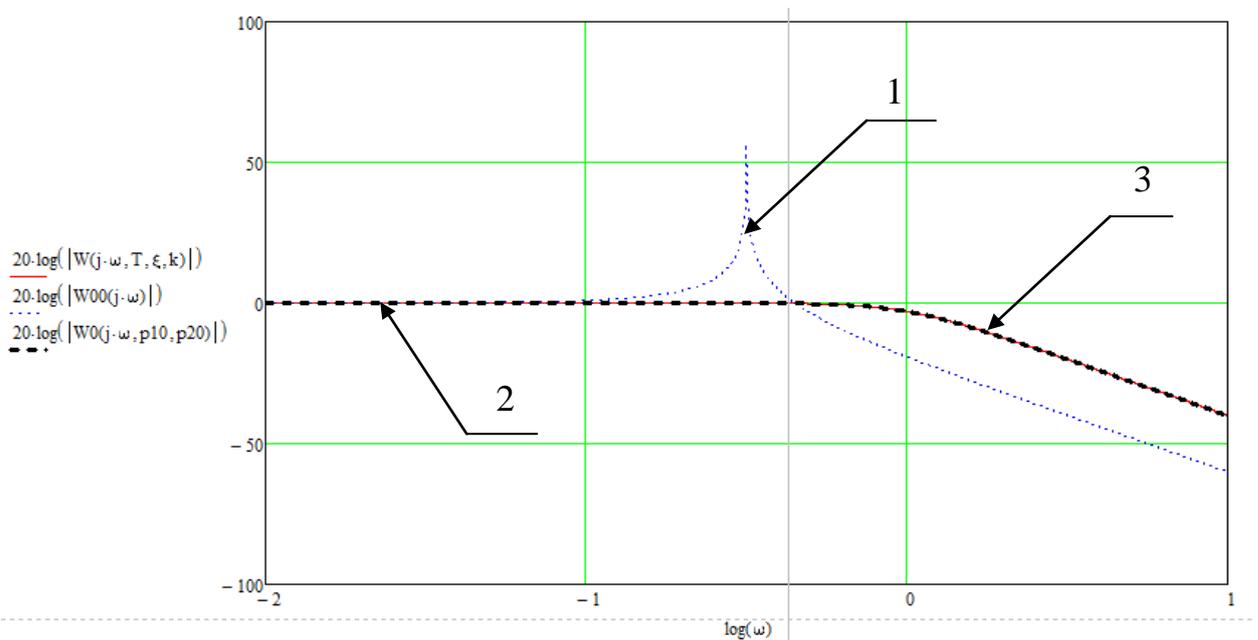


Рисунок 2.7 – АЧХ системы

Из рисунка 2.7 видно, что начальная система 1 имеет резонанс, который не желателен при работе измерительного прибора. Коэффициент демпфирования и коэффициенты регулятора позволяют регулировать параметры системы, тем самым можно получить желаемые характеристики на выходе измерительного устройства. На рисунке 2.7 АЧХ системы с коэффициентом демпфирования 2 совпадает с АЧХ системы с коэффициентами регулятора 3.

Рассмотрим поведение маятниковой системы во временной области.

$$N := 1000 \quad x_0 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad t_k := 4 \text{ с} \quad f = 2 \text{ Гц} \quad a_{\max} := 1$$

$$a(t) := 1 + 0 \cdot a_{\max} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{5} \cdot t\right)$$

$$D(t, vx) := Azs(a12, p10, p20) \cdot vx + \begin{pmatrix} a(t) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$X := rkfixed(x_0, 0, t_k, N, D)$$

	0	1	2
0	0	0	0
1	$4 \cdot 10^{-3}$	$3.861 \cdot 10^{-3}$	$7.814 \cdot 10^{-6}$
2	$8 \cdot 10^{-3}$	$7.45 \cdot 10^{-3}$	$3.052 \cdot 10^{-5}$
3	0.012	0.011	$6.706 \cdot 10^{-5}$
4	0.016	0.014	$1.164 \cdot 10^{-4}$
5	0.02	0.017	$1.776 \cdot 10^{-4}$
6	0.024	0.019	$2.496 \cdot 10^{-4}$
7	0.028	0.022	$3.315 \cdot 10^{-4}$
8	0.032	0.024	$4.225 \cdot 10^{-4}$
9	0.036	0.026	$5.218 \cdot 10^{-4}$
10	0.04	0.028	$6.285 \cdot 10^{-4}$
11	0.044	0.029	$7.418 \cdot 10^{-4}$
12	0.048	0.031	$8.611 \cdot 10^{-4}$
13	0.052	0.032	$9.856 \cdot 10^{-4}$
14	0.056	0.033	$1.115 \cdot 10^{-3}$
15	0.06	0.034	...

На рисунке 2.8 представлен график изменения угловой скорости и угла отклонения маятника во временной области при введении в систему начального импульса.

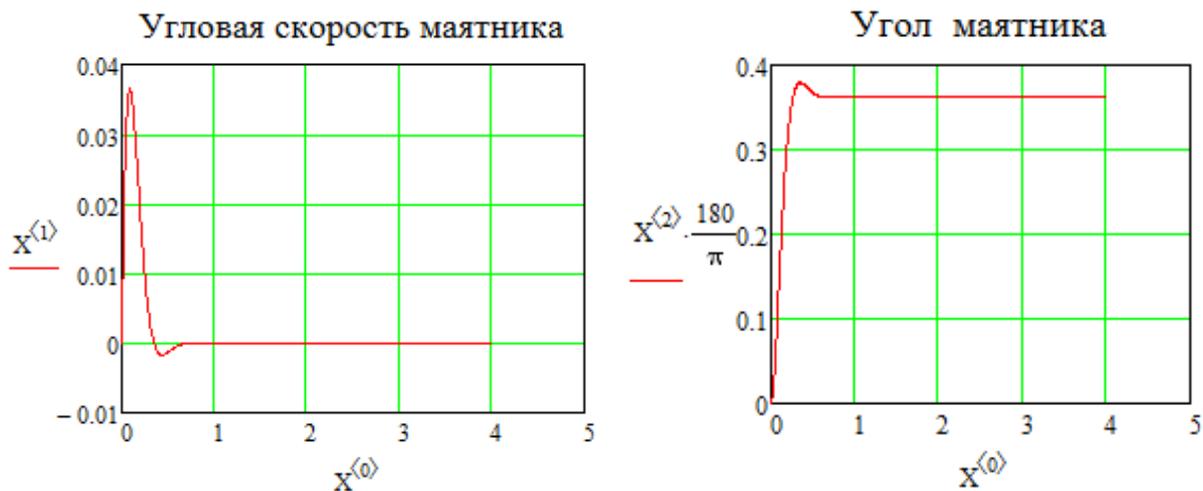


Рисунок 2.8 – График изменения угловой скорости и угла отклонения маятника при введении в систему начального импульса во временной области:

$X^{(0)}$  - время колебательного процесса, с;

$X^{(1)}$  – угловая скорость маятника, рад/с;  $X^{(2)}$  – угол поворота маятника, град.

Из рисунка 2.8 видно, что колебательный процесс маятника приходит в установившийся режим.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

## 2.8 Построение нелинейной математической модели маятника

Наличие нелинейной модели позволяет сформировать процесс сопоставления анализа линейной и нелинейной модели, оценить погрешности, которые связаны с линеаризацией. На рисунке 2.9 представлен график зависимости угла отклонения маятника от ускорения.

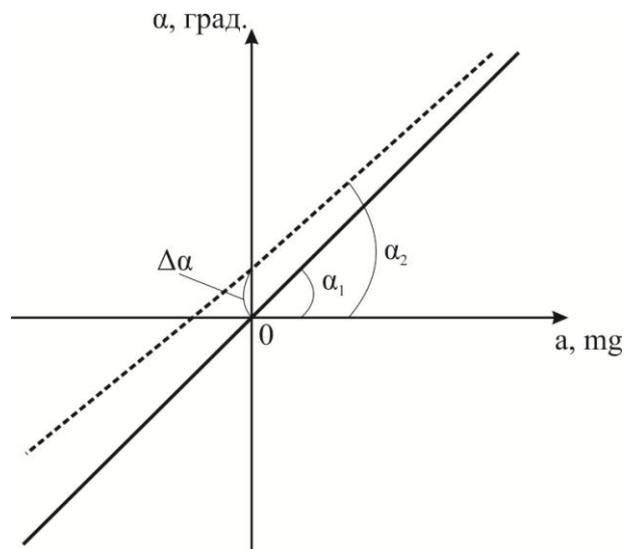


Рисунок 2.9 – График зависимости угла отклонения маятника от ускорения

Изменение угла наклона прямой зависит от коэффициента чувствительности, которая составляет мультипликативную погрешность.

Смещение нуля прямой составляет аддитивную погрешность.

Для правильной работы прибора необходимо свести до минимума вышеперечисленные погрешности.

Аддитивная погрешность вводится в математическую модель в виде постоянной составляющей.

Для этого, необходимо в правую часть математической модели ввести дополнительное постоянное ускорение:

$$a_{x_0}^e = a_{x_0} + \Delta a_x,$$

где  $a_{x_0}^e$  – измеренное переносное ускорение;

$\Delta a_x$  – погрешность аддитивного типа, приведенная ко входу.

На рисунке 2.10 представлен контур регулирования маятниковой структуры с учетом аддитивной погрешности, приведенная ко входу.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

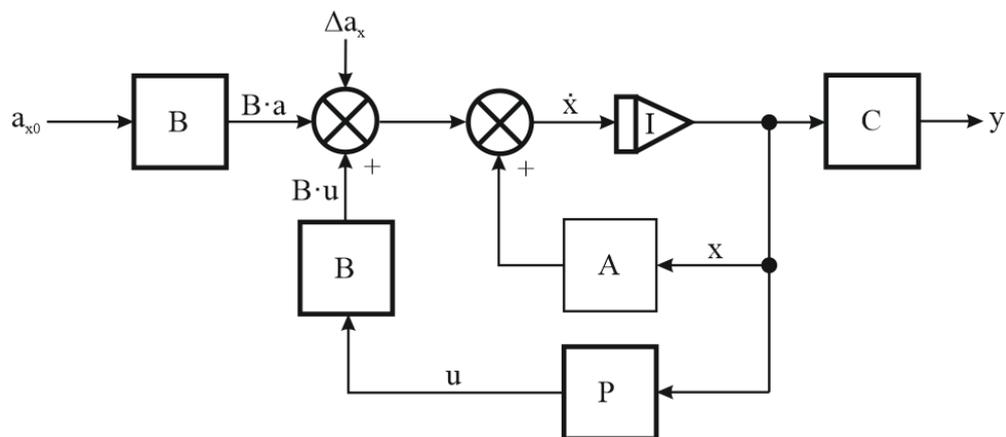


Рисунок 2.10 – Контур регулирования маятниковой структуры с учетом аддитивной погрешности, приведенная ко входу

С физической точки зрения, при подаче ускорения при помощи обратной связи к массе  $m$  приложена сила  $F$ , заставляющая ее двигаться вместе с корпусом прибора с ускорением, равному переносному  $a_{x0}^e$ , при этом  $\alpha \sim a_{x0}^e$ .

Если  $a_{x0}^e = 0$ , то и  $\alpha = 0$  из-за наличия в системе обратной связи.

Промоделируем поведение системы при введении аддитивной погрешности в программе MathCAD.

Нелинейная модель маятника

$$ay(t) := 0$$

$$\Delta a := 0.1 \cdot a_{max}$$

$$a_{max} = 1$$

$$D3(t, vx) := Azs(a12, p10, p20) \cdot vx + \begin{pmatrix} a2(t) \cdot 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta a \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & ay(t) \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot vx$$

$$X3 := rkfixed(x0, 0, tk, N, D3)$$

$$\Delta ak := (X2^{(2)} - X3^{(2)}) \cdot k$$

На рисунке 2.11 представлен график измеренного значения ускорения с учетом поправки на аддитивную погрешность во временной области.

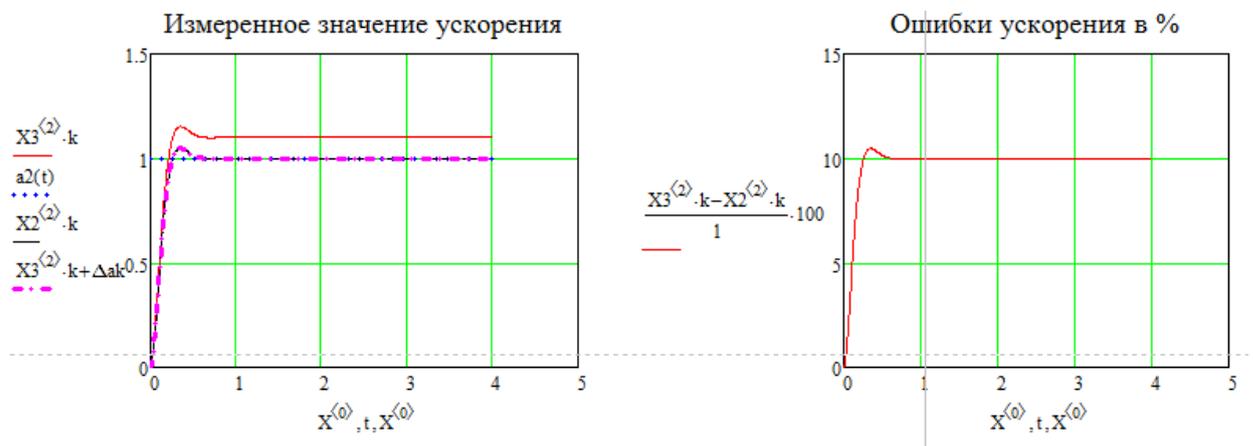


Рисунок 2.11 – График измеренного значения ускорения с учетом поправки на аддитивную погрешность во временной области

На рисунке 2.12 представлен график угла отклонения маятника с учетом поправки на аддитивную погрешность.

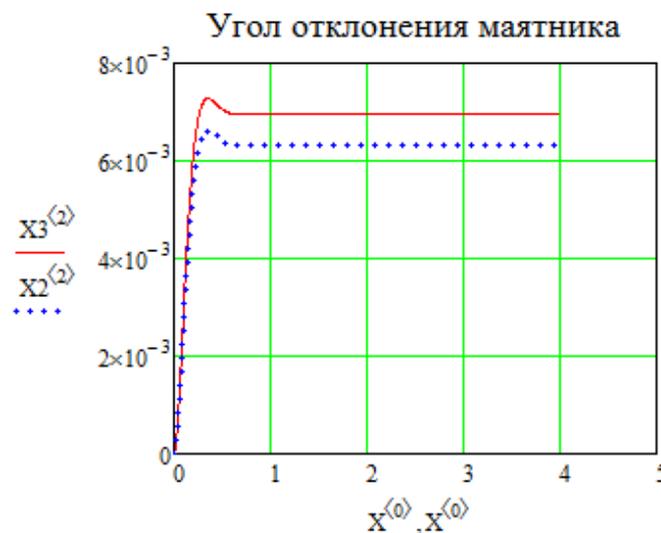


Рисунок 2.12 – График угла отклонения маятника с учетом поправки на аддитивную погрешность

Алгоритм устранения аддитивной составляющей предполагает включение в алгоритм обработки операцию суммирования со знаком, обратной величине аддитивной составляющей.

На практике, кроме аддитивной погрешности, присутствует мультипликативная погрешность. В процессе калибровки коэффициент чувствительности масштабируется и подбирается таким образом, чтобы угол наклона прямой был близок к  $45^\circ$ .

На основании анализа погрешностей, выявленных при моделировании системы, математическая модель примет окончательный вид:

$$x_{\text{изм}} = k \cdot x + \Delta x,$$

где  $x_{\text{изм}}$  – измеренное значение входного сигнала;

$k$  – коэффициент чувствительности;

$x$  – проекция вектора гравитации на чувствительную ось;

$\Delta x$  – смещение нуля.

На практике смещение нуля  $\Delta x$  и  $k$  выявляют экспериментально. Такой процесс называется калибровкой инклинометра.

**Выводы по главе 2:** на основании проведенного анализа принципа работы МЭМС-акселерометра было выявлено, что его структура относится к маятниковому типу.

Изучены основные величины, характеризующие работу инклинометра, смоделирована динамика работы маятниковой структуры, определены основные погрешности, которые влияют на результат измерения.

По результатам исследования представлена математическая модель инклинометра с учетом погрешностей, имеющая контур ПИД-регулирования с обратной связью.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

### 3 КАЛИБРОВКА ИНКЛИНОМЕТРА

Согласно ГОСТ Р 8.879-2014 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению» под калибровкой средства измерения понимают совокупность операций, которые выполняются с целью определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений [14].

В данном разделе представлены: эксперимент по измерению проекции вектора ускорения инклинометра на его две чувствительные оси, сравнение полученных характеристик с теоретическими, проведение калибровки инклинометра.

#### 3.1 Постановка эксперимента

Эксперимент по измерению вектора проекции ускорения гравитации на его две чувствительные оси состоит из следующих этапов [14]:

1) подготовка к процедуре калибровки: внешний осмотр экспериментальной установки на отсутствие внешних повреждений, нарушения покрытия шкал, надписей, проверка отсутствия люфтов. Прибор укомплектован со всеми необходимыми вспомогательными устройствами, которые необходимы для эксперимента;

2) опробование: на этом этапе прибор должен быть надежно закреплен на экспериментальной установке, проводится проверка плавного хода установки.

3) проведение эксперимента по измерению вектора проекции ускорения гравитации на его две чувствительные оси;

4) обработка результатов измерений, получение эмпирических зависимостей выходных сигналов инклинометра от вектора проекции ускорения гравитации, сравнение полученных результатов.

Схема подключения электронных компонентов представлена на рисунке 3.1.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

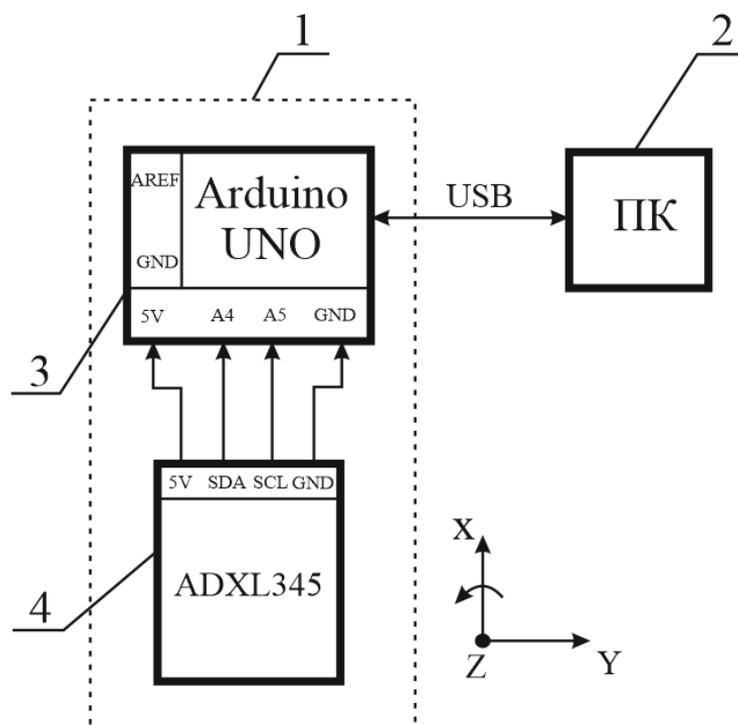


Рисунок 3.1 – Схема подключения электронных компонентов

Из рисунка 3.1 видно, что МЭМС-акселерометр 4, закрепленный на экспериментальной установке 1, поворачивается на определенный угол относительно одной оси чувствительности. Микроконтроллер 3, считывая данные с МЭМС-акселерометра, передает их через USB-интерфейс на персональный компьютер 2.

При проведении эксперимента ставится ряд требований:

- 1) температура воздуха в помещении в процессе эксперимента считается неизменной;
- 2) поверхность, на которой расположена экспериментальная установка, должна быть горизонтально ровной, на ней должны отсутствовать посторонние предметы;
- 3) экспериментальная установка должна быть закреплена строго горизонтально на поверхности для исключения зазоров и расшатывания.

Фотография экспериментальной установки представлена на рисунке 3.2.

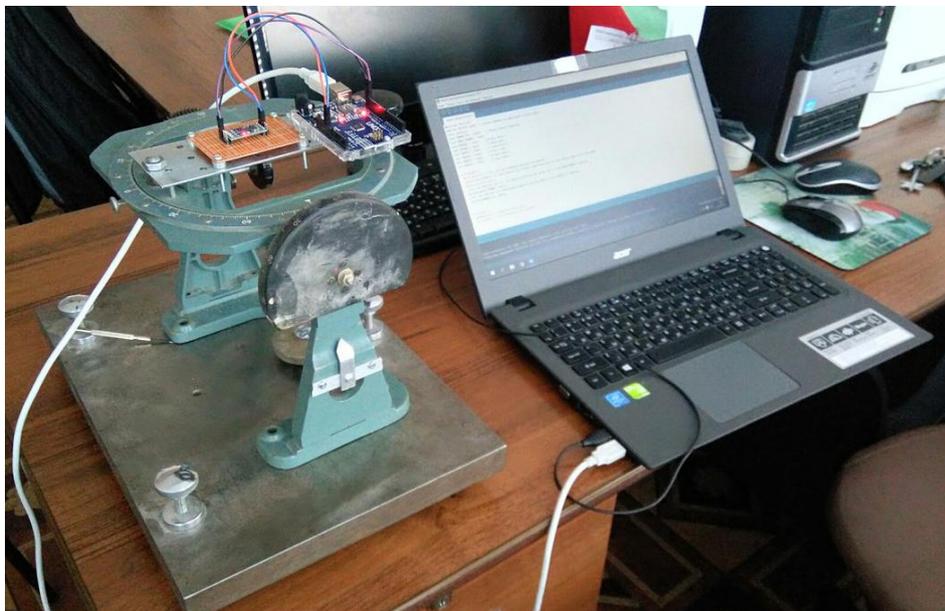


Рисунок 3.2 – Фотография экспериментальной установки для измерения проекции вектора ускорения гравитации на его две чувствительные оси

Код программы для эксперимента представлен в Приложении Б.

На экспериментальной установке устанавливаем акселерометр таким образом, чтобы его первая ось, выбираемая как ось вращения, пересекалась с вектором гравитационного ускорения  $\vec{g}$  под углом  $90^\circ$ , калибруем вторую ось акселерометра [15]:

- вращаем его вокруг первой оси;
- фиксируем в четырех ортогональных положениях  $j = 1 \div 4$ ;
- в каждом положении измеряем проекции  $A_{yj}$  и  $A_{zi}$  вектора гравитационного ускорения  $\vec{g}$  на вторую и третью оси акселерометра соответственно.

### 3.2 Проведение эксперимента

В таблице 3.1 представлены усредненные результаты измерения вектора гравитационного ускорения относительно оси  $Ox$  в четырех ортогональных положениях.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Таблица 3.1 – Усредненные результаты измерения вектора гравитационного ускорения относительно оси  $Ox$  в четырех ортогональных положениях

Угол поворота установки, град.	Показания датчика вокруг оси $Ox$ , LSB		
	$A_x$	$A_y$	$A_z$
0	3,167	1,167	160,0
90	9,000	133,0	33,17
180	9,167	7,167	-96,33
270	8,000	-124,0	28,67

Для точного определения погрешностей измерения проводим дополнительные измерения в диапазоне от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Усредненные результаты измерения представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Усредненные результаты измерения вектора гравитационного ускорения относительно оси  $Ox$  в диапазоне от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  с шагом  $10^\circ$

Угол поворота установки, град.	Показания датчика при вращении вокруг оси $Ox$ , LSB			Наклон без калибровки, град.	Абсолютная погрешность, град.
	$V_{x\text{изм}}$	$V_{y\text{изм}}$	$V_{z\text{изм}}$		
-90	7,833	-124,0	27,17	-77,6	12,36
-80	6,833	-122,3	49,33	-68,0	11,96
-70	6,167	-117,8	70,33	-59,2	10,83
-60	5,333	-107,8	93,17	-49,2	10,83
-50	4,667	-96,33	110,7	-41,0	8,96
-40	4,000	-80,83	127,3	-32,4	7,59
-30	3,667	-63,83	140,3	-24,5	5,54
-20	3,333	-43,83	150,3	-16,3	3,74
-10	3,333	-22,00	157,5	-7,95	2,05
0	3,500	0,667	160,0	0,24	0,24
10	3,333	24,33	158,7	8,72	-1,28
20	3,667	46,00	153,3	16,7	-3,30
30	4,333	65,83	144,0	24,6	-5,43
40	4,667	85,33	130,8	33,1	-6,89
50	5,833	101,2	115,2	41,3	-8,70
60	6,167	114,8	96,67	49,9	-10,09
70	7,000	124,8	76,33	58,6	-11,45
80	8,167	130,5	55,33	67,0	-12,98
90	9,000	133,0	33,17	76,0	-14,00

Перевод вектора гравитационного ускорения относительно оси  $Ox$  в радианы осуществляется через функцию арктангенса:

$$\beta_1 = \arctg\left(\frac{B_{уизм}}{B_{зизм}}\right).$$

Абсолютная погрешность вычисляется по формуле:

$$\Delta_j = \beta_j^* - \beta_j,$$

где  $\Delta_i$  – абсолютная погрешность  $i$ -го измерения, град.;

$\beta_i^*$  – угол наклона без калибровки, град.;

$\beta_i$  – угол наклона установки, град.

Далее, калибруем первую и третью оси акселерометра, выбирая в качестве оси вращения вторую ось. Выполняя вышеперечисленные операции, измеряем проекции  $A_{zi}$  и  $A_{xi}$  вектора гравитационного ускорения  $\vec{g}$  на третью и первую оси акселерометра соответственно [15].

В таблице 3.3 представлены усредненные результаты измерения вектора гравитационного ускорения относительно оси  $Oy$  в четырех ортогональных положениях.

Таблица 3.3 – Усредненные результаты измерения вектора гравитационного ускорения относительно оси  $Oy$  в четырех ортогональных положениях

Угол поворота установки, град.	Показания датчика вокруг оси $Oy$ , LSB		
	$A_x$	$A_y$	$A_z$
0	2,000	7,167	160,0
90	137,3	4,800	37,83
180	17,33	2,000	-96,17
270	-119,0	4,500	24,33

В таблице 3.4 представлены усредненные результаты измерения вектора гравитационного ускорения относительно оси  $Oy$  в диапазоне от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  с шагом  $10^\circ$ .

Таблица 3.4 – Усредненные результаты измерения вектора гравитационного ускорения относительно оси  $Oy$  в диапазоне от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  с шагом  $10^\circ$

Угол поворота установки, град.	Показания датчика при вращении вокруг оси $Oy$ , LSB			Угол наклона без калибровки, град.	Абсолютная погрешность, град.
	$B_{xизм}$	$B_{yизм}$	$B_{zизм}$		
-90	-119,0	4,500	24,33	-78,4	11,56
-80	-118,3	5,333	48,17	-67,9	12,15
-70	-113,3	5,833	69,00	-58,7	11,33

-60	-104,7	6,167	90,50	-49,2	10,85
-50	-93,50	7,000	108,7	-40,7	9,29
-40	-78,50	7,333	125,8	-31,9	8,04

Окончание таблицы 3.4

Угол поворота установки, град.	Показания датчика при вращении вокруг оси $Oy$ , LSB			Угол наклона без калибровки, град.	Абсолютная погрешность, град.
	$V_{xизм}$	$V_{yизм}$	$V_{zизм}$		
-30	-60,50	7,333	139,8	-23,4	6,60
-20	-40,83	7,500	150,5	-15,2	4,82
-10	-20,17	7,667	157,7	-7,29	2,71
0	2,000	7,500	160,0	0,72	0,72
10	26,00	7,500	158,0	9,35	-0,66
20	47,50	7,500	154,7	17,1	-2,93
30	67,83	7,167	146,0	24,9	-5,08
40	87,17	7,000	133,3	33,2	-6,83
50	103,3	6,667	117,8	41,3	-8,75
60	117,0	6,333	99,83	49,5	-10,47
70	127,8	6,500	80,17	57,9	-12,09
80	134,3	5,833	59,50	66,1	-13,89
90	137,2	4,833	37,00	74,9	-15,10

Перевод вектора гравитационного ускорения относительно оси  $Oy$  в радианы осуществляется через функцию арктангенса:

$$\beta_2 = \arctg\left(\frac{V_{xизм}}{V_{zизм}}\right).$$

По полученным данным из эксперимента произведем калибровку МЭМС-акселерометра. Многократные измерения, с помощью которых были получены усредненные данные представлены в Приложении В.

### 3.3 Обработка результатов измерений

Измерения акселерометра в четырех ортогональных положениях  $j = 1 \div 4$  по осям чувствительности могут быть представлены в следующем виде [15]:

$$A_{ij} = kg + m_j,$$

где  $i$  – номер оси акселерометра ( $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ );

$j$  – номер измерения при проведении калибровки;

$A_{ij}$  – показание акселерометра при калибровке;

$g$  – действительное значение проекции вектора гравитационного ускорения на

ось чувствительности;

$k$  – коэффициент чувствительности;

$m_j$  – начальное смещение нуля (статическая ошибка).

Основной задачей калибровки является определение из эксперимента статической ошибки  $m_j$ .

Смещения нуля акселерометра по второй оси  $m_2$  происходит путем усреднения измерений проекций вектора гравитации на эту ось:

$$m_2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{i=4} A_{yi}. \quad (3.1.1)$$

Из выражения (3.1.1):

$$m_2 = 4,50.$$

Одновременно со второй осью аналогично калибруем третью ось акселерометра с вычислением статической ошибки  $m_3$ :

$$m_3 = 31,50.$$

Аналогично вычисляем статическую ошибку первой оси  $m_1$ .

$$m_1 = 9,40.$$

Относительный коэффициент чувствительности третьей и второй осей акселерометра вычисляется по формуле [15]:

$$k_{32} = \frac{k_3}{k_2} = \sqrt{\frac{(A_{z1} - A_{z3})^2 + (A_{z2} - A_{z4})^2}{(A_{y1} - A_{y3})^2 + (A_{y2} - A_{y4})^2}}. \quad (3.1.2)$$

Отсюда следует, что для вычисления относительного коэффициента чувствительности по третьей и второй осям не требуется отдельных вычислений коэффициентов чувствительности  $k$  по каждой из них, а также величины и ориентации вектора гравитационного ускорения  $\vec{g}$ . Это значит, что для калибровки МЭМС-акселерометра достаточно тех же измерений, которые были необходимы для определения статических ошибок  $m_j$  [15].

Вычислим относительный коэффициент чувствительности по формуле (3.1.2):

$$k_{32} = 0,997.$$

Относительный коэффициент чувствительности третьей и первой осей

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

акселерометра вычисляется по формуле [15]:

$$k_{31} = \frac{k_3}{k_1} = \sqrt{\frac{(A_{z1} - A_{z3})^2 + (A_{z2} - A_{z4})^2}{(A_{x1} - A_{x3})^2 + (A_{x2} - A_{x4})^2}}. \quad (3.1.3)$$

Вычислим относительный коэффициент чувствительности по формуле (3.1.3):

$$k_{31} = 0,999.$$

Определим углы  $\alpha_j$  между вектором гравитационного ускорения  $\vec{g}$  и тремя осями МЭМС-акселерометра [15]:

$$\alpha_x = \arctg \left( \frac{k_{31} \cdot (B_1 - m_1)}{[k_{32} \cdot (B_2 - m_2)]^2 + (B_3 - m_3)^2} \right); \quad (3.1.4)$$

$$\alpha_y = \arctg \left( \frac{k_{32} \cdot (B_2 - m_2)}{[k_{31} \cdot (B_1 - m_1)]^2 + (B_3 - m_3)^2} \right); \quad (3.1.5)$$

где  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  – угол наклона акселерометра по 1-ой и 2-ой осям;

$B_j, j = 1,2,3$  – измеренный угол наклона в каждой строке.

В соотношениях (3.1.4) - (3.1.5) выражение  $(B_i - m_i)$  обеспечивает компенсацию статических ошибок измерений по осям МЭМС-акселерометра. Коэффициенты относительной чувствительности  $k_{31}$  и  $k_{32}$  нормируют измерения по всем осям, устраняя различия в их чувствительности [15].

Результат калибровки по оси  $Oy$  представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результат калибровки по оси  $Oy$

Угол наклона, град.	Угол наклона после калибровки, град.	Абсолютная погрешность, град.
-90	-87,94	2,06
-80	-81,89	-1,89
-70	-72,28	-2,28
-60	-61,11	-1,11
-50	-51,73	-1,73
-40	-41,55	-1,55
-30	-32,00	-2,00
-20	-22,04	-2,04
-10	-11,81	-1,81
0	-1,68	-1,68
10	8,85	-1,15
20	18,76	-1,24
30	28,53	-1,47

40	39,04	-0,96
----	-------	-------

Окончание таблицы 3.5

Угол наклона, град.	Угол наклона после калибровки, град.	Абсолютная погрешность, град.
50	49,03	-0,97
60	59,34	-0,66
70	69,49	-0,51
80	79,25	-0,75
90	89,23	-0,77
50	49,03	-0,97

Результат калибровки по оси  $Ox$  представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результат калибровки по оси  $Ox$

Угол наклона, град.	Угол наклона после калибровки, град.	Абсолютная погрешность, град.
-90	-85,96	4,04
-80	-82,02	-2,02
-70	-72,22	-2,22
-60	-61,50	-1,50
-50	-51,68	-1,68
-40	-41,25	-1,25
-30	-30,88	-0,88
-20	-20,78	-0,78
-10	-11,01	-1,01
0	-1,09	-1,09
10	9,64	-0,36
20	19,21	-0,79
30	28,89	-1,11
40	39,00	-1,00
50	48,78	-1,22
60	58,64	-1,36
70	68,39	-1,61
80	77,71	-2,29
90	86,91	-3,09

Характеристикой погрешности считается ее стандартная ошибка (СКО), которая рассчитывается по формуле [16]:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

где  $S$  – среднеквадратическое отклонение;

$n$  – количество значений в выборке;

$x_i$  –  $i$ -ое значение в выборке;

$\bar{x}$  – среднее значение выборки.

Полученные значения по обеим осям представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Среднеквадратическое отклонение абсолютных погрешностей до и после калибровки по обеим осям

По оси $Oy$ , град.		По оси $Ox$ , град.	
До калибровки	После калибровки	До калибровки	После калибровки
9,07	0,94	9,39	1,41

На рисунке 3.3 представлен график измерения угла наклона датчика по оси  $Oy$  до и после калибровки.

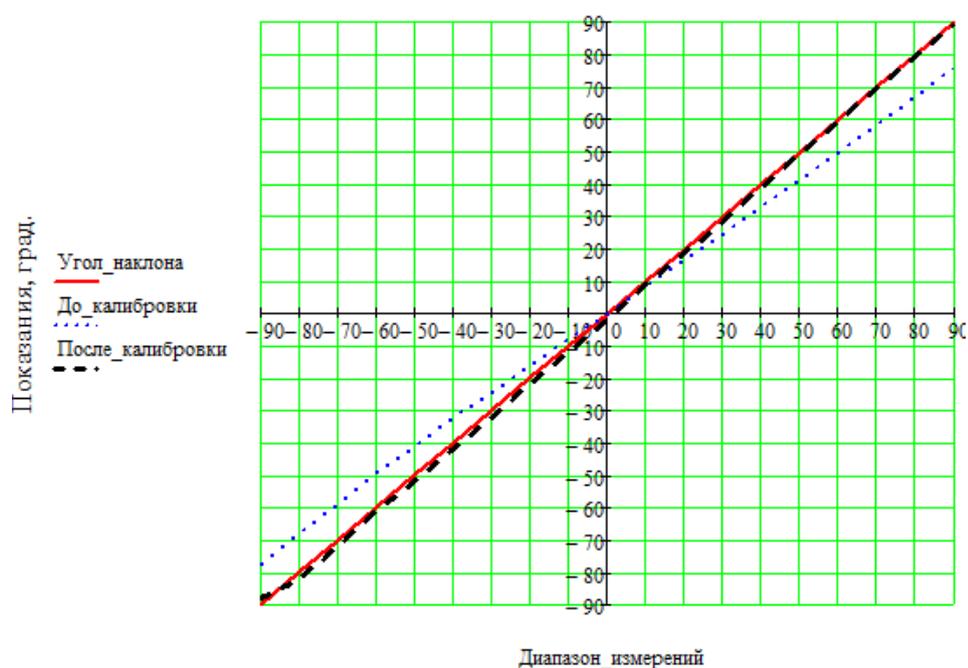


Рисунок 3.3 – График измерения угла наклона датчика по оси  $Oy$  до и после калибровки

На рисунке 3.4 представлен график измерения угла наклона датчика по оси  $Ox$  до и после калибровки.

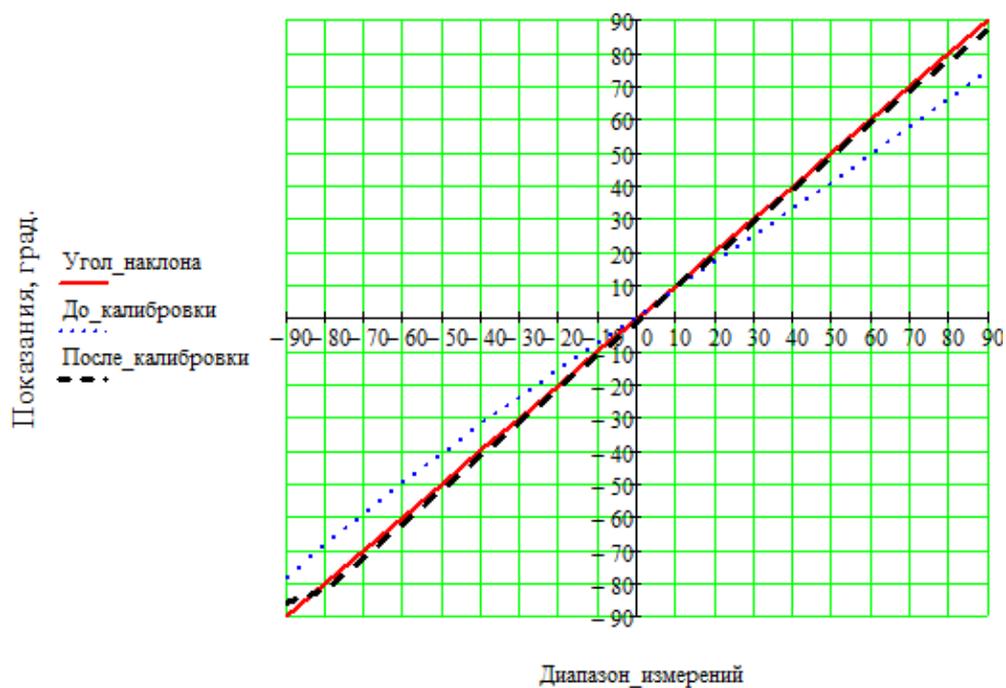


Рисунок 3.4 – График измерения угла наклона датчика по оси  $Ox$  до и после калибровки

Из графиков видно, что откалиброванные значения по обеим осям почти совпадают с идеальными значениями наклонной прямой [16].

На рисунке 3.5 представлен графики абсолютных погрешностей до и после калибровки по оси  $Oy$ .

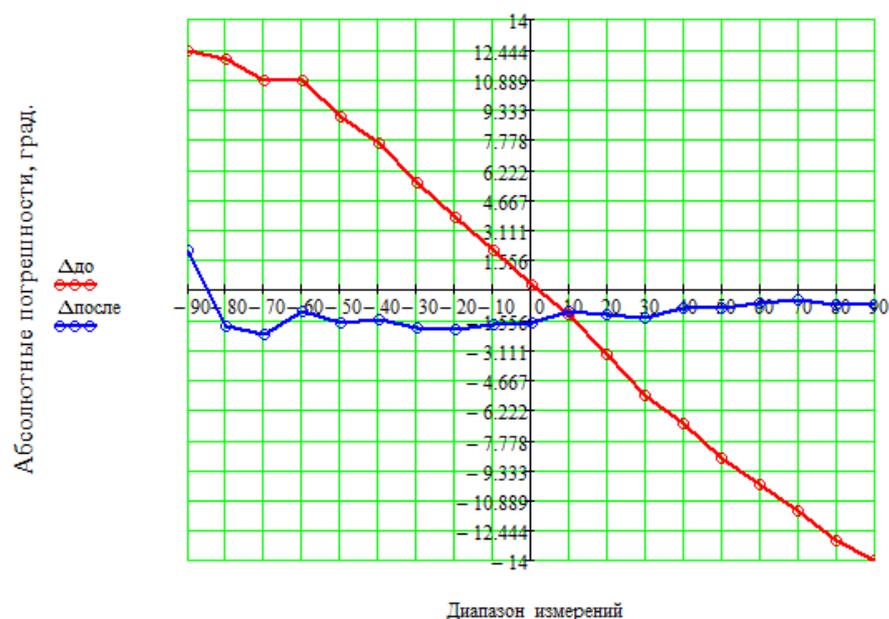


Рисунок 3.5 – Графики абсолютных погрешностей до и после калибровки относительно оси  $Oy$

На рисунке 3.6 представлен графики абсолютных погрешностей до и после калибровки по оси  $Ox$ .

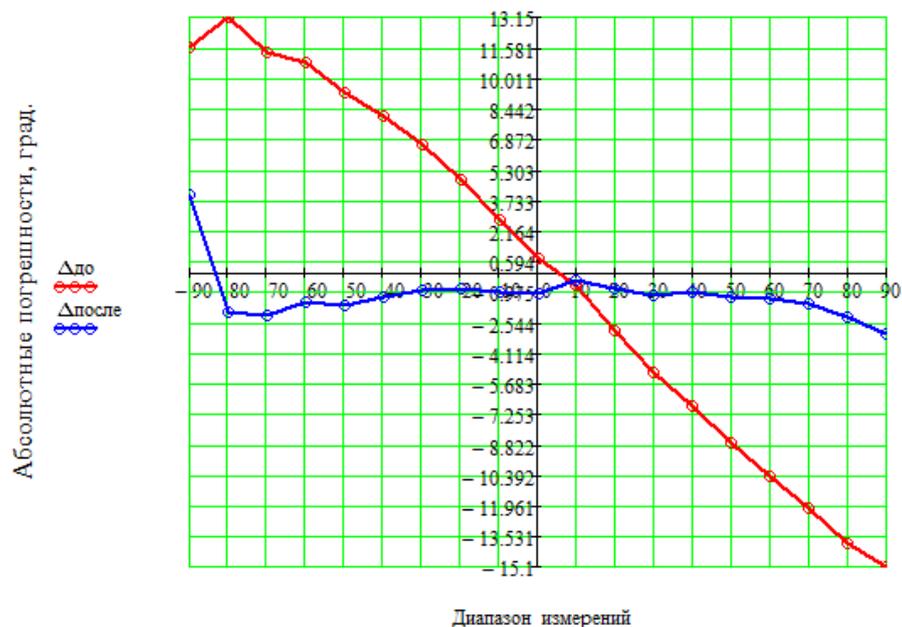


Рисунок 3.6 – Графики абсолютных погрешностей до и после калибровки по оси  $Ox$

Из графиков видно, что абсолютные погрешности до калибровки по обеим осям изменяются в широком диапазоне и принимают большие значения. После калибровки диапазон изменения абсолютных погрешностей уменьшается и их значения минимальны [16].

**Выводы по главе 3:** для проведения эксперимента была собрана экспериментальная установка. При проведении эксперимента были определены погрешности измерения угла наклона по обеим осям.

После калибровки удалось добиться уменьшения погрешности измерения угла наклона по обеим осям: по оси  $Oy$  с 9,07 до 0,94 градуса, по оси  $Ox$  с 9,39 до 1,41 градуса. Однако, они не удовлетворяют заявленной погрешности 0,1°. Это связано с тем, что в инклинометре используются достаточно дешевые электронные компоненты, у которых качество ниже, чем у аналогов, чья стоимость выше. Отсюда следует, что для увеличения точности инклинометра необходимо использовать более качественные электронные компоненты.

## 4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ИНКЛИНОМЕТРА

Одной из главных задач ВКР является разработка конструкции корпуса инклинометра. Конструкция должна быть малогабаритной и эргономичной. При этом, устройство должно отвечать всем техническим требованиям и безопасности.

Для структурирования при разработке конструкции инклинометра будем ссылаться на ГОСТ 2.103-2013 «Стадии разработки» [17].

Первым этапом является изучение и анализ технического задания, который был произведен в главе 1. Все последующие этапы разработки конструкции инклинометра представлены ниже.

### 4.1 Предварительная компоновка элементов в проектируемом инклинометре

Составим структуру будущего устройства (Рисунок 4.1). Базой системы является микроконтроллер, осуществляющий сбор информации с акселерометра и сохраняющий ее себе в буферную память. К микроконтроллеру подключены аккумуляторные батарейки для автономного питания устройства.



Рисунок 4.1 – Структурная схема проектируемого инклинометра

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Из рисунка 4.1 видно, что блок управления разделен на более мелкие модули. Такое деление позволяет разрабатывать отдельные модули независимо друг от друга, становится удобной отладка взаимодействия между блоками.

#### **4.2 Выбор материала для проектируемого корпуса**

Проанализируем виды материалов, из которые создают корпуса приборов.

1. Пластмассовые корпуса. Данный вид корпусов является основным для эксплуатации устройства в домашних условиях и в строительстве. Это обусловлено отсутствием необходимости использования массивных корпусов, так как их тяжело перемещать.

Основными преимуществами таких видов материала является дешевизна, имеет малый вес.

Недостаток является диапазон рабочих температур, который ограничивает использование корпусов, изготовленных из таких видов материала.

2. Металлический корпус. Данный вид используется на производстве, в торговых и промышленных структурах. Особенностью таких корпусов является их монтирование на одном месте и после этого они не перемещаются. В связи с этим, есть возможность использования массивных конструкций и защитить внутренние элементы от влаги и взлома.

Для разрабатываемого строительного инклинометра наиболее подходящим является пластмассовый корпус, так как данный вид материала является недорогим, имеет малый вес и разрабатываемый инклинометр используется при нормальных условиях: от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Пластмассы, в свою очередь, делятся на множество видов [18]. В таблице 4.1 представлен анализ пластмасс, которые используются для разработки корпусов различных устройств.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						59
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Таблица 4.1 – Анализ пластмасс для разработки корпусов

Наименование	Плотность, г/см <sup>2</sup>	Механические свойства			Теплофизические свойства
		Предел прочности, МПа		Ударная вязкость, кДж/м <sup>3</sup>	Температура плавления, °С
		При растяжении	При статическом изгибе		
Полистирол	1,05-1,07	40-42	100	20-22	180-220
Поливинилхлорид (ПВХ)	1,34-1,4	45-70	70-120	7-15	180-220
Фторопласт-4	2,19	25	10,7-13,7	125	260
АБС-пластик	1,02-1,08	30-50	50-87	10-30	90-105
Полиэтилен высокого давления	0,918-0,930	10-17	12-17	Не разрушается	108-115
Полиэтилен низкого давления	0,949-0,955	22-30	20-35	Не разрушается	120-125

Проанализировав таблицу 4.1 выбираем в качестве материала корпуса полистирол, который обладает следующими свойствами:

- 1) высокая твердость;
- 2) высокий предел прочности;
- 3) влагуостойчив;
- 4) высокая температура плавления
- 5) имеет низкую стоимость.

### 4.3 Разработка конструкторской документации и 3D-модели

Разрабатываемый инклинометр предназначен для использования в строительной сфере. При разработке его корпуса важно учитывать, чтобы устройство было малогабаритным и удобно в использовании.

На рисунке 4.2 представлен вариант разрабатываемого корпуса инклинометра.

Корпус инклинометра представляет собой короб с габаритными размерами 97×97×43 мм. По углам корпуса расположены уголки. Они позволяют при калибровке устройства не задевать вспомогательные компоненты в виде кнопок и неровностей, что делает сам процесс калибровки наиболее точным и

удобным. Уголки и корпус являются единым объектом. С боку корпуса имеется отверстие под кнопку для калибровки прибора при эксплуатации.

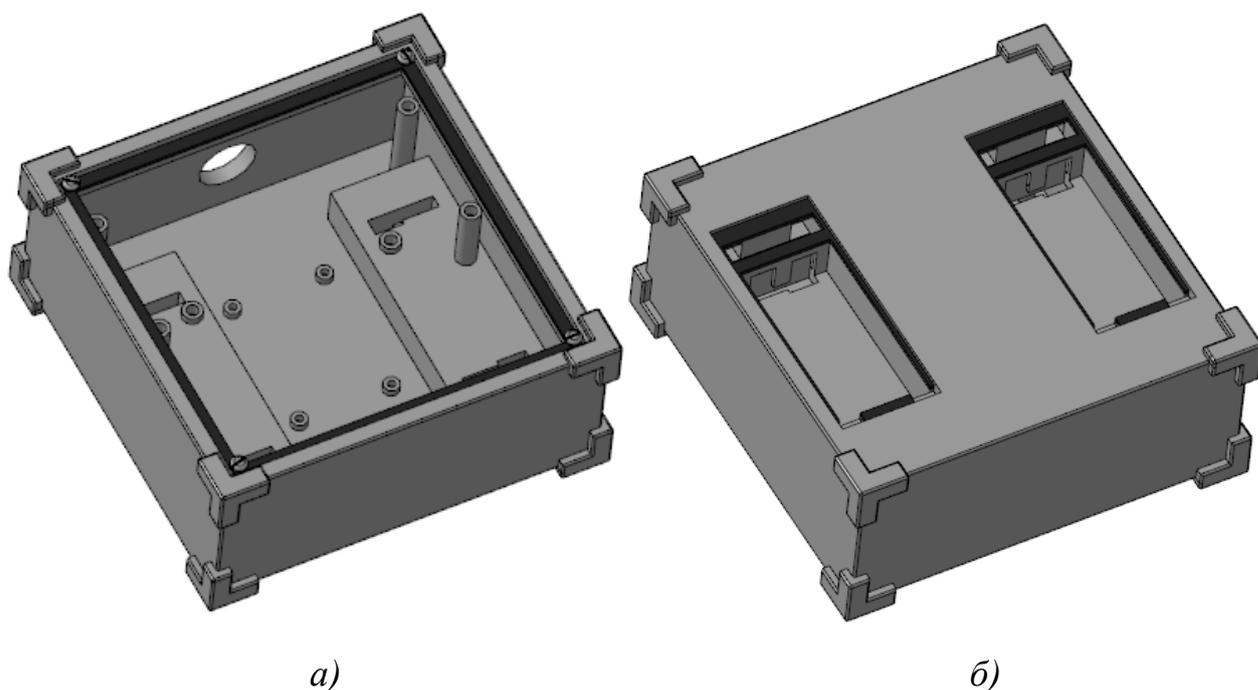


Рисунок 4.2 – Корпус инклинометра:  
а) – вид спереди; б) – вид сзади

Внутри разрабатываемого корпуса имеются стойки для крепления электронных компонентов инклинометра. Высота и диаметры отверстий стоек подгоняются с учетом размещения электронных компонентов в корпусе.

На задней части корпуса (рисунок 4.2 б) расположены места под аккумуляторные батарейки.

Для защиты от влаги в корпусе инклинометра предусмотрены резиновые прокладки толщиной 1 мм. Они размещены по периметру в местах крепления крышки и защелок.

На рисунке 4.3 представлен общий вид разрабатываемого корпуса инклинометра.

В целом, корпус инклинометра состоит из основания 1, крышки 2 и защелок 3 в месте крепления аккумуляторных батареек.

На крышке имеются отверстия под LSD-дисплей 1602 и двух кнопок PBS-11А. Защелки предусмотрены для замены аккумуляторных батареек.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		61

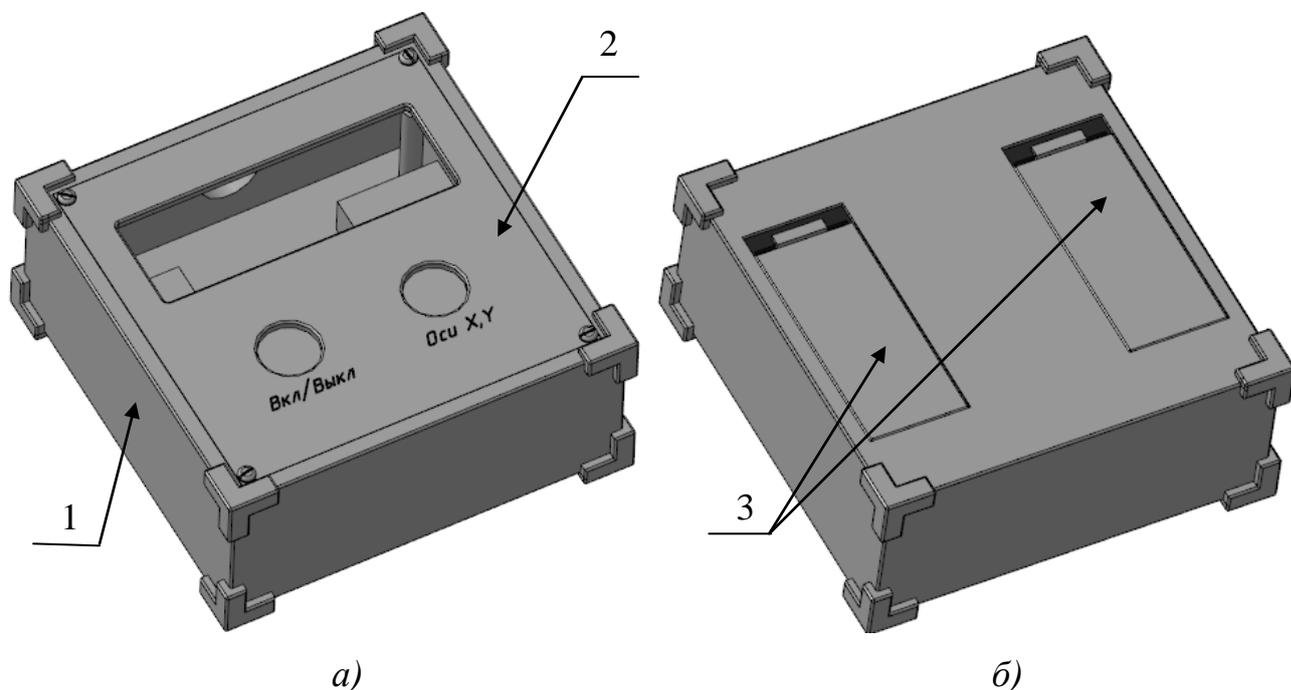


Рисунок 4.3 – Общий вид корпуса инклинометра:  
*а)* – вид спереди; *б)* – вид сзади

Конструкторская документация инклинометра представлена в Приложении Г.

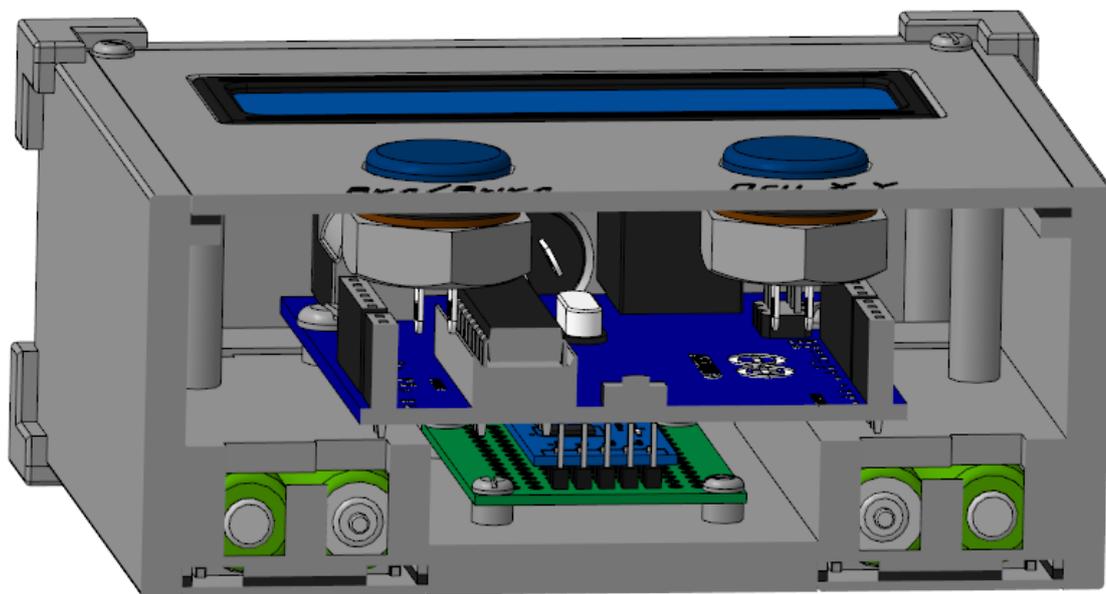
Рассмотрим расположение электронных компонентов в корпусе. На рисунке 4.4 представлена 3D-модель корпуса инклинометра в разрезе.

На дно корпуса прикреплена макетная плата СРТА 065, имеющая габаритные размеры 26,5×36,5 мм, на которой зафиксирован МЭМС-акселерометр. Макетная плата должна быть расположена строго по центру, чтобы при измерении акселерометр измерял угол отклонения без дополнительных погрешностей.

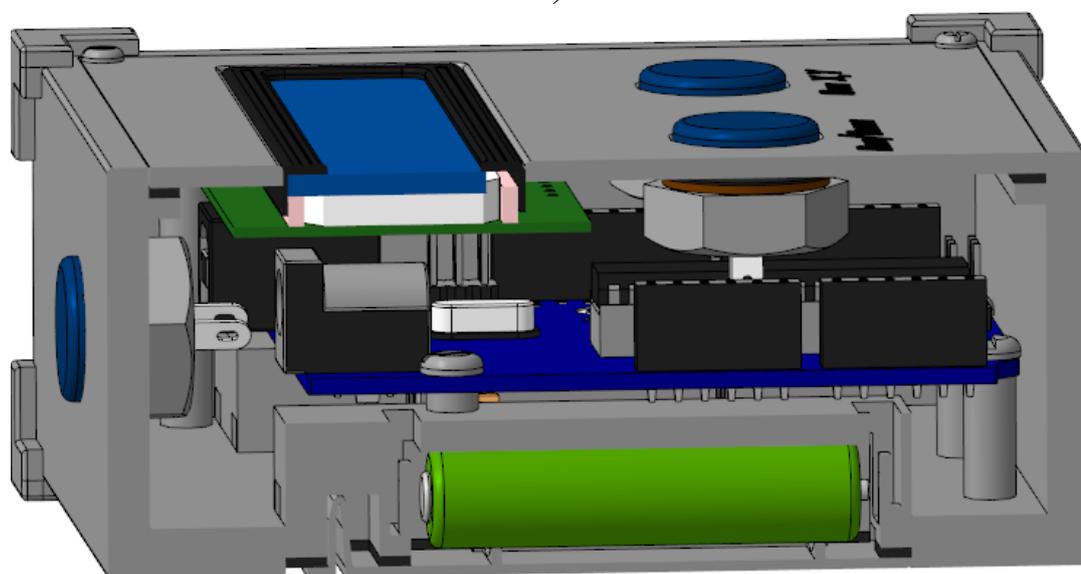
На втором уровне закреплена платформа ArduinoUno, положение которой выбрано таким образом, чтобы она не задевала другие электронные компоненты, и чтобы оставалось свободное место под провода.

На третьем уровне крепится LSD-дисплей. На крышке фиксируются кнопки при помощи гаек.

В нижней части корпуса расположены четыре аккумуляторных батареек по 1,5 В.



*а)*



*б)*

Рисунок 4.4 – Общий вид корпуса инклинометра:  
*а)* – вид спереди; *б)* – вид сбоку

На рисунке 4.5 представлена итоговая 3D-модель инклинометра.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		63

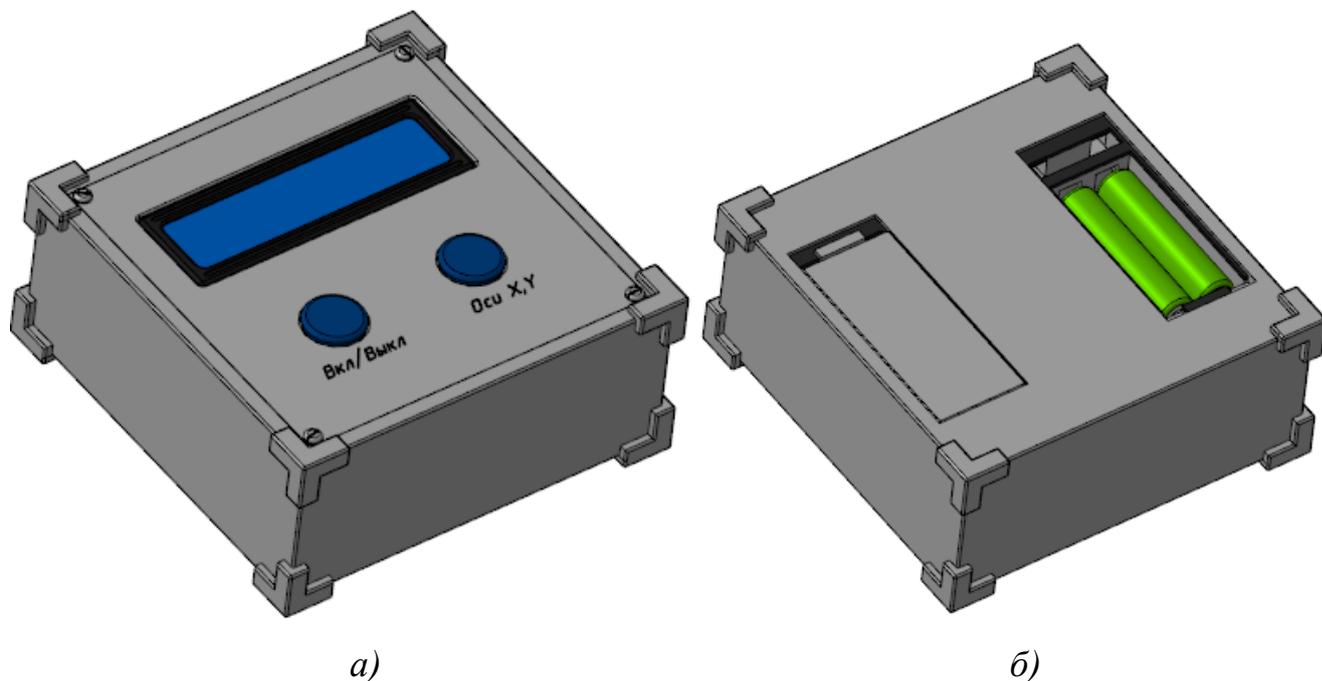


Рисунок 4.5 – Итоговая 3D-модель инклинометра:  
*а)* – вид спереди; *б)* – вид сзади

Таким образом, в корпус инклинометра, размер которого 97×97×43 мм, поместились все заявленные в 1 главе комплектующие. Удалось добиться минимизации габаритов корпуса.

Во время эксплуатации точность инклинометра может понижаться. В связи с этим, в разрабатываемом инклинометре предусмотрена функция калибровки. Ее суть заключается в следующем: при нажатии боковой кнопки инклинометр поворачивают относительно одной оси, фиксируя в четырех ортогональных положениях значения на горизонтальной поверхности. При каждом положении необходимо дождаться, когда инклинометр даст сигнал о том, что он зафиксировал калибровочные значения себе в память. Аналогично операцию проводят со второй осью.

#### 4.4 Расчет размерной цепи методом максимума-минимума

При разработке корпуса и компоновки электронных компонентов важно учесть, чтобы положение МЭМС-акселерометра в корпусе было строго по центру и параллельно дну корпуса с целью обеспечения необходимой точности при эксплуатации прибора.

Для параллельности при креплении монтажной платы относительно дна

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		64

корпуса используются стойки. Однако, при креплении может образоваться зазор, который будет значительно влиять на показания акселерометра.

Для определения этого зазора будет использоваться расчет размерной цепи методом полной взаимозаменяемости [19], при котором требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается у всех объектов путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений.

Расчет параметров замыкающих звеньев при методе полной взаимозаменяемости производят методом максимума-минимума [19].

На рисунке 4.6 представлен фрагмент сборки инклинометра, для которого необходимо произвести размерный расчет.

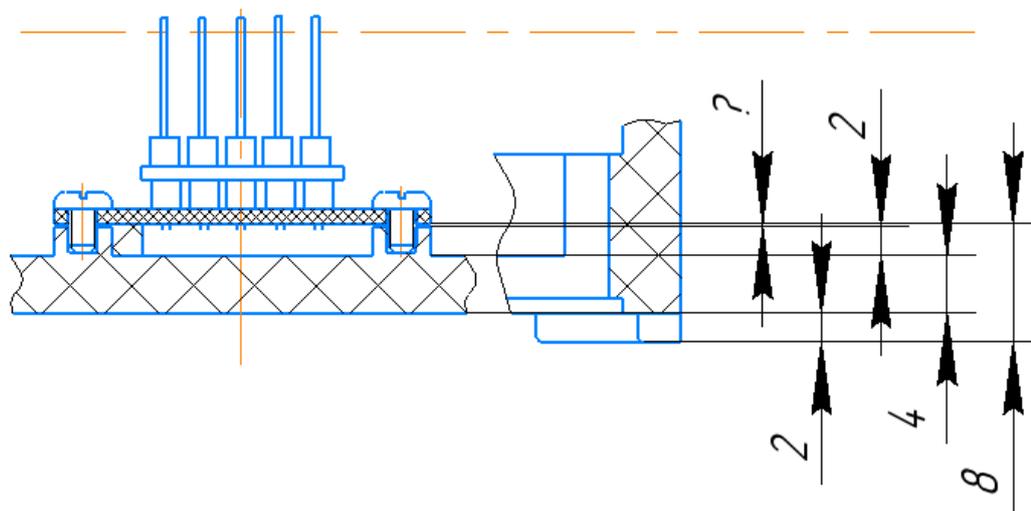


Рисунок 4.6 - Фрагмент сборки

Для расчетов размерных цепей используют прямую и обратную задачи.

Прямая задача заключается в определении допуска и предельных отклонений составляющих размеров по заданным номинальным размерам всех звеньев цепи и заданным предельным отклонениям исходного (замыкающего) звена [19].

Обратная задача заключается в определении номинального значения, допуска и предельных отклонений замыкающего размера по заданным номинальным размерам и предельным отклонениям составляющих звеньев [19].

В данном размерном расчете будет использоваться обратная задача: для узла,

представленного на рисунке 4.5, из условий функционирования необходимо обеспечить величину зазора от 0 до 0,05 мм. Также, при заданных параметрах составляющих звеньев необходимо проверить, обеспечат ли детали с указанными допусками функционирование узла в условиях полной взаимозаменяемости.

При величине зазора, равной 0,05 мм, угол отклонения макетной платы от горизонтали составит:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{A_{\Delta}^{max*}}{b}\right), \quad (4.1.1)$$

где  $A_{\Delta}^{max*}$  - наибольший условный предельный размер;

$b$  – ширина макетной платы ( $b = 26,5$  мм).

Из выражения (4.1.1) получим:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{0,05}{26,5}\right) = 0,1^{\circ}.$$

Полученное значение угла является желательным, так как инклинометр должен измерять угол наклона с этой точностью.

Для решения поставленной задачи необходимо определить величину зазора (номинал, допуск, отклонение, наибольшее и наименьшее предельные значения) после сборки инклинометра.

На рисунке 4.6 представлена размерная цепь, которая определяет взаимосвязь размеров.

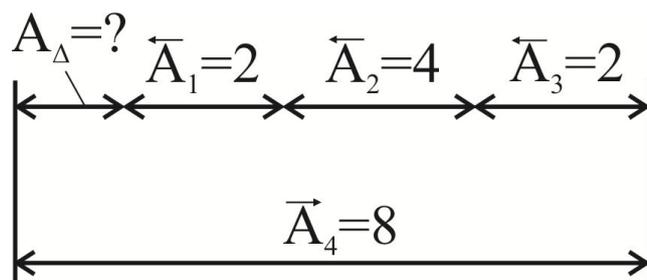


Рисунок 4.6 – Размерная цепь

Определим составляющие и замыкающие размеры:

$A_{\Delta}$  – замыкающий размер;

$A_1, A_2, A_3, A_4$  – составляющие размеры.

Суммарное число размеров:  $n = 5$ .

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		66

Проведем анализ качества составляющих размеров, в котором выявляются увеличивающиеся и уменьшающиеся размеры. Для этого, определяются передаточные отношения для каждого составляющего звена размерной цепи:

$$\xi = \frac{\partial A_{\Delta}}{\partial A_i}$$

Для линейной размерной цепи передаточные отношения увеличивающих звеньев  $\xi = +1$ , уменьшающих звеньев  $\xi = -1$ .

Тогда,  $A_4$  – увеличивающий размер ( $m = 1$ ),  $A_1, A_2, A_3$  – уменьшающие размеры ( $p = 3$ ).

Отсюда,  $n = m + p + 1 = 1 + 3 + 1 = 5$ .

Составим уравнение размерной цепи в номиналах:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^m A_{i_{ув}} - \sum_{i=1}^p A_{i_{ум}}$$

Следовательно,

$$A_{\Delta} = A_4 - (A_1 + A_2 + A_3). \quad (4.1.2)$$

Из выражения (4.1.2) определим значение замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = 8 - (2 + 4 + 2) = 0 \text{ мм.}$$

Так как по условию задачи необходимо обеспечивать полную взаимозаменяемость деталей при сборке, то расчет размерной цепи необходимо вести методом «максимум и минимум», обеспечивающим полную взаимозаменяемость.

Допуск размера определяется по формуле:

$$TA_i = ES_i - EI_i,$$

где  $ES_i$  – верхнее отклонение;

$EI_i$  – нижнее отклонение.

Получим величины допусков размеров по 12 качеству [20]:

$$TA_1 = 100 \text{ мкм;}$$

$$TA_2 = 120 \text{ мкм;}$$

$$TA_3 = 100 \text{ мкм;}$$

$$TA_4 = 150 \text{ мкм.}$$

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Допуск замыкающего звена:

$$TA_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n-1} TA_i. \quad (4.1.3)$$

Тогда,  $TA_{\Delta} = 100 + 120 + 100 + 150 = 470$  мкм.

Определим верхнее и нижнее отклонения замыкающего размера:

$$ES_{\Delta} = \sum_{i=1}^m ES_{i_{yB}} - \sum_{i=1}^p EI_{i_{yM}}. \quad (4.1.4)$$

$$EI_{\Delta} = \sum_{i=1}^m EI_{i_{yB}} - \sum_{i=1}^p ES_{i_{yM}}. \quad (4.1.5)$$

Из выражения (4.1.4):

$$ES_{\Delta} = ES_4 - (EI_1 + EI_2 + EI_3);$$

$$ES_{\Delta} = 150 - 100 - 120 - 100 = 470 \text{ мкм.}$$

Из выражения (4.1.5):

$$EI_{\Delta} = EI_4 - (ES_1 + ES_2 + ES_3);$$

$$EI_{\Delta} = 0 - 0 - 0 - 0 = 0 \text{ мкм.}$$

Запишем чертежный размер замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = 0^{+0,47}.$$

Определим наибольший и наименьший предельные размеры замыкающего звена:

$$A_{\Delta}^{max} = A_{\Delta} + ES_{\Delta} = 0 + 0.470 = 0.470 \text{ мм;}$$

$$A_{\Delta}^{min} = A_{\Delta} + EI_{\Delta} = 0 + 0 = 0 \text{ мм.}$$

Угол отклонения макетной платы от горизонтали:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{0,470}{26,5}\right) = 1^{\circ}.$$

Вывод: допуски размеров по 12 качеству не подходят, так как полученный угол отклонения макетной платы от горизонтали превысил расчетный угол. Для минимизации погрешности необходимо уменьшить качество точности корпуса.

Возьмем допуски размеров по 7 качеству [20]:

$$TA_1 = 10 \text{ мкм;}$$

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$TA_2 = 12 \text{ мкм};$$

$$TA_3 = 10 \text{ мкм};$$

$$TA_4 = 15 \text{ мкм}.$$

Тогда, допуск замыкающего звена получим из выражения (4.1.3):

$$TA_{\Delta} = 10 + 12 + 10 + 15 = 47 \text{ мкм}.$$

Определим верхнее и нижнее отклонения замыкающего размера:

$$ES_{\Delta} = 15 - 10 - 12 - 10 = 47 \text{ мкм};$$

$$EI_{\Delta} = 0 - 0 - 0 - 0 = 0 \text{ мкм}.$$

Запишем чертежный размер замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = 0^{+0,047}.$$

Определим наибольший и наименьший предельные размеры замыкающего звена:

$$A_{\Delta}^{max} = A_{\Delta} + ES_{\Delta} = 0 + 0,0470 = 0,0470 \text{ мм};$$

$$A_{\Delta}^{min} = A_{\Delta} + EI_{\Delta} = 0 + 0 = 0 \text{ мм}.$$

Угол отклонения макетной платы от горизонтали:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{0,0470}{26,5}\right) = 0,101^{\circ}.$$

Отсюда следует, что при уменьшении качества точности с 12 на 7, угол отклонения макетной платы от горизонтали уменьшится с  $1^{\circ}$  до  $0,101^{\circ}$ . Это означает, что рассмотренные поверхности корпуса на производстве должны обрабатываться по 7 качеству точности, чтобы добиться необходимой погрешности измерения МЭМС-акселерометра.

**Выводы по главе 4:** проведя анализ конструкторских параметров электронных компонентов, был разработан корпус инклинометра с габаритными размерами  $97 \times 97 \times 43$  мм. Основными особенностями разработанного корпуса являются его герметичность и возможность калибровать в условиях эксплуатации. Также, был произведен расчет размерной цепи в месте крепления МЭМС-акселерометра в корпусе. Рассчитан качество точности при производстве инклинометра для обеспечения заданной точности. Была разработана конструкторская документация на основе 3D-модели инклинометра.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении информационного поиска были изучены аналоги как самого устройства, так и его элементов. Анализ отечественных аналогов позволил выбрать электрический тип инклинометра и выявить его и недостатки, которые исключены в данном проекте. Изучив представленные в данной главе патенты, в качестве базы для разработки устройства был выбран инклинометр на базе трехкомпонентного акселерометра №2348008, основными достоинствами которого являются малые габариты и вес.

На основании проведенного анализа принципа работы МЭМС-акселерометра было выявлено, что его структура относится к маятниковому типу. Изучены основные величины, характеризующие работу инклинометра, смоделирован процесс работы маятниковой структуры, определены основные погрешности, которые влияют на результат измерения.

После калибровки удалось добиться уменьшения погрешности измерения угла наклона по обеим осям: по оси  $Oy$  с 9,07 до 0,94 градуса, по оси  $Ox$  с 9,39 до 1,41 градуса. Однако, они не удовлетворяют заявленной погрешности  $0,1^\circ$ . Это связано с тем, что в инклинометре используются достаточно дешевые электронные компоненты, у которых качество ниже, чем у аналогов, чья стоимость выше. Отсюда следует, что для увеличения точности инклинометра необходимо использовать более качественные электронные компоненты.

Проведя анализ параметров электронных компонентов, был разработан корпус инклинометра с габаритными размерами  $97 \times 97 \times 43$  мм. Основными особенностями разработанного корпуса являются его герметичность и возможность калибровать в условиях эксплуатации. Также, был произведен расчет размерной цепи в месте крепления МЭМС-акселерометра в корпусе. Рассчитан квалитет точности при производстве инклинометра для обеспечения заданой точности измерения. Была разработана конструкторская документация на основе 3D-модели инклинометра.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Все поставленные задачи в ходе разработки инклинометра были выполнены.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Определение угла наклона акселерометром. <http://bitaks.com/resources/inclinometer/content.html>.
2. Саленко, Д.С. История развития и области применения технологии MEMS / Д.С. Саленко // Автоматика и программная инженерия. – 2013. – Вып. 1. – №3 (5). – С. 68.
3. Инклинометры цифровые СММК.БСГ. – <http://www.all-pribors.ru/opisanie/54559-13-smik-bsg-58149>.
4. УГИ-42.03 гироскопический инклинометр. – [http://td-automatika.ru/upload/iblock/88f/c2981c6c-7434-11e2-ba9b-0030486527a0\\_c2981c7d-7434-11e2-ba9b-0030486527a0.pdf](http://td-automatika.ru/upload/iblock/88f/c2981c6c-7434-11e2-ba9b-0030486527a0_c2981c7d-7434-11e2-ba9b-0030486527a0.pdf).
5. Пат. 2491507 Российская Федерация, МПК G01C 21/10. Измеритель углового положения изделия / Ю.К. Блокин-Мечталин, В.А. Судаков, В.Ю. Заливако, В.А. Малютин. – № 2011153917/28; заявл. 29.12.11; опубл. 27.08.13, Бюл. № 24. – 7 с.
6. Пат. 2348008 Российская Федерация, МПК G01C9/00. Инклинометр / И.В. Конаныхин, Г.С. Сокирский, М.И. Ширманов, А.И. Удовиченко. – № 2006139734/28; заявл. 09.11.06; опубл. 20.05.08, Бюл. № 6. – 6 с.
7. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Джон Фрайден; пер. с англ. Ю. А. Заболотной. – М.: Техносфера, 2005. – 587 с.
8. Рюмик, С.М. 1000 и одна микроконтроллерная схема. Выпуск 3 / С.М. Рюмик. – М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2016. – 356 с.
9. Сравнение плат Arduino. – [http://arduino.proger.site/basic/12\\_select](http://arduino.proger.site/basic/12_select).
10. Павлов, Д.В. Разработка математической модели MEMS-акселерометра / Д.В. Павлов, К.Г. Лукин, М.Н. Петров // Вестник НовГУ. – 2015. – №8 (91). – С. 23.
11. Вострикова, А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие / А.С. Вострикова, Г.А. Французова. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. –364 с.
12. Поляков, К.Ю. Теория автоматического управления для «чайников»:

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						71
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

учебное пособие / К.Ю. Мурзин. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2012. – 234 с.

13. Матюхин, В.И. Управление механическими системами / В.И. Матюхин. – М.: Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 320 с.

14. ГОСТ Р 8.879-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 8 с.

15. Пат. 2577806 Российская Федерация, МПК G01C 25/00. Способ калибровки акселерометрического трехосевого инклинометра / М.Г. Степанов, А.Ю. Каплин. – № 2014147522/28; заявл. 25.11.14; опубл. 20.03.16, Бюл. № 8. – 11 с.

16. Пронкин, Н.С. Основы метрологии: практикум по метрологии и измерениям / Н.С. Пронкин. – М.: Изд-во Логос: Университетская книга, 2007. – 392 с.

17. ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 9 с.

18. Классификация пластмасс. - <https://studopedia.org/14-13534.html>.

19. Мороз, В.Г. Решение размерных цепей методом полной взаимозаменяемости: учебное пособие / В.Г. Мороз; под ред. К.В. Шмат, С.В. Мухин. – М.: РИЦ МГИУ, 2005. – 44 с.

20. ГОСТ 25346-89. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 27 с.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
						72
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Техническое описание трехосевого МЭМС-акселерометра ADXL345

(перевод с англ.)

TA = 25 ° C, VS = 2,5 В, VDD I/O = 1,8 В, ускорение = 0g, CS = 10 мкФ тантала, CI / O = 0,1 мкФ, выходная скорость передачи данных (ODR) = 800 Гц

Таблица А.1 – Технические характеристики трехосевого МЭМС-акселерометра ADXL345

Параметры	Условия испытаний	Min	Среднее	Max	Обозначения
Вход датчика	Каждая ось				
Диапазон измерения	Возможность выбора пользователем	± 2, ± 4, ± 8, ± 16			g
Нелинейность	Процент полной шкалы	± 0,5			%
Ошибка согласования между осями		± 0,1			градуса
Чувствительность поперечной оси		±1			%
Разрешение выхода	Каждая ось				
Все g Диапазоны	10-битное разрешение		10		бит
± 2g Разрешение	Полное разрешение		10		бит
± 4 g	Полное разрешение		11		бит
± 8 g	Полное разрешение		12		бит
± 16 g	Полное разрешение		13		бит
Чувствительность	Каждая ось				
Чувствительность при XOUT, YOUT, ZOUT	Все диапазоны g, полное разрешение	230 282		256	LSB / g
	± 2 g, 10-битное разрешение	230 282		256	LSB / g
	± 4 g, 10-разрядное разрешение	115 141		128	LSB / g

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		73

## Продолжение таблицы А.1

## Продолжение Приложения А

Параметры	Условия испытаний	Min	Среднее	Max	Обозначения
	± 8 г, 10-разрядное разрешение	57	64	71	LSB / g
	± 16 г, 10-разрядное разрешение	29	32	35	LSB / g
Отклонение чувствительности от идеального	Все диапазоны	g ± 1,0			%
Масштабный коэффициент при XOUT, YOUT, ZOUT	Все диапазоны г, полное разрешение	3,5	3,9	4,3	mg/ LSB
	± 2 г, 10-битное разрешение	3,5	3,9	4,3	mg/ LSB
	± 4 г, 10-разрядное разрешение	7,1	7,8	8,7	mg/ LSB
	± 8 г, 10-разрядное разрешение	14,1	15,6 17,5		mg/ LSB
	± 16 г, 10-битное разрешение	28,6	31,2	34,5	mg/ LSB
Изменение чувствительности из-за температуры		± 0,01			% / ° C
0 g OFFSET	Каждая ось				
0 g Выход для XOUT, YOUT		-150	0	+150	mg
0 г Выход для ZOUT		-250	0	+ 250	mg
0 g Выходное отклонение от идеального, XOUT, YOUT		± 35			mg
0 g Выходное отклонение от идеального, ZOUT		± 40			mg
0 g Смещение против температуры для X-, Y-осей		± 0.4			mg / ° C
0 g Отклонение против температуры для Z-оси		± 1,2			mg / ° C

Параметры	Условия испытаний	Min	Среднее	Max	Обозначения
X-, Y-оси	ODR = 100 Гц для $\pm 2$ г, 10-битное разрешение или все g-диапазоны, полное разрешение		0.75		LSB rms
Z-ось	ODR = 100 Гц для $\pm 2$ г, 10-битное разрешение или все g-диапазоны, полное разрешение		1.1		LSB rms
Сравнение данных по выходам	выбирается пользователем				
Выходная скорость передачи данных (ODR)		0,1		3200	Гц
SELF-test					
Выходное изменение в оси X		0,20		2,10	g
Выходное изменение в оси Y		-2.10		-0.20	g
Изменение выходного сигнала в Z-оси		0,30		3,40	g
Диапазон рабочего напряжения (VS)		2,0	2,5	3,6	В
Диапазон напряжения интерфейса (VDD I / O)		1.7	1.8	VS	В
Ток питания	ODR $\geq$ 100 Гц ODR < 10 Гц		140 30		мкА мкА
Резервный режим Ток утечки			0,1		мкА
Время включения и пробуждения	DR = 3200 Гц		1,4		мс

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Листинг программы для экспериментальной установки

```
#include <Wire.h>
#define DEVICE (0x53) // Адрес устройства, указанный в спецификации
byte _buff[6];
char POWER_CTL = 0x2D; //Регистр управления мощностью
char DATA_FORMAT = 0x31;
char DATA_X0 = 0x32; //X-Axis Data 0
char DATA_X1 = 0x33; //X-Axis Data 1
char DATA_Y0 = 0x34; //Y-Axis Data 0
char DATA_Y1 = 0x35; //Y-Axis Data 1
char DATA_Z0 = 0x36; //Z-Axis Data 0
char DATA_Z1 = 0x37; //Z-Axis Data 1

void setup() {
  Wire.begin(); // Подключить шину i2c (адрес необязателен для мастера)
  Serial.begin(9600); // Начать запуск.
  Serial.print("init");
  //Поместить ADXL345 в диапазон +/- 4G, записав значение 0x01 в регистр DATA_FORMAT.
  writeTo(DATA_FORMAT, 0x01);
  //Поместите ADXL345 в режим измерения, записав 0x08 в регистр POWER_CTL.
  writeTo(POWER_CTL, 0x08);
}

void loop() {
  readAccel(); // Читать x / y / z наклон
  delay(500); // Читать только каждые 0,5 секунды
}

void readAccel() {
  uint8_t howManyBytesToRead = 6;
  readFrom(DATA_X0, howManyBytesToRead, _buff); //Прочитать данные ускорения от ADXL345
  // Каждое считывание оси происходит с разрешением 10 бит, то есть 2 байта. Самый младший байт!
  // Таким образом, мы преобразуем оба байта в один int
  int x = (((int)_buff[1]) << 8) | _buff[0];
  int y = (((int)_buff[3]) << 8) | _buff[2];
  int z = (((int)_buff[5]) << 8) | _buff[4];

  Serial.print("x: ");
  Serial.print(x);
  Serial.print(" y: ");
  Serial.print(y);
  Serial.print(" z: ");
  Serial.println(z);
}

void writeTo(byte address, byte val) {
  Wire.beginTransmission(DEVICE); // Начать передачу на устройство
  Wire.write(address); // Отправить регистрационный адрес
  Wire.write(val); // Отправить значение для записи
  Wire.endTransmission(); // Конец передачи
}
```

```

// Считывает num байты, начиная с регистра адреса на устройстве в массив _buff
void readFrom(byte address, int num, byte _buff[]) {
    Wire.beginTransmission(DEVICE); // Начать передачу на устройство
    Wire.write(address); // Отправляет адрес для чтения
    Wire.endTransmission(); // Конец передачи
    Wire.beginTransmission(DEVICE); // Начать передачу на устройство
    Wire.requestFrom(DEVICE, num); // Запросить 6 байтов с устройства
    int i = 0;
    while(Wire.available()) { // Устройство может отправлять меньше запрошенных
        _buff[i] = Wire.read(); // Получить байт
        i++;
    }
    Wire.endTransmission(); // Конец передачи
}

```

					ЮУрГУ – 12.03.01.2018.253 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		77

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Результаты эксперимента

Измерения при повороте относительно оси  $Ox$

Таблица В.1 – Первое измерение в диапазоне  $\pm 90^\circ$  с шагом  $10^\circ$

Градусы	$V_{x_{изм}}$	$V_{y_{изм}}$	$V_{z_{изм}}$
-90	8,0	-124,0	26,00
-80	7,0	-122,5	48,00
-70	6,5	-118,5	69,50
-60	5,5	-108,5	92,00
-50	5,0	-96,50	109,5
-40	4,5	-81,50	126,5
-30	3,5	-64,50	139,5
-20	3,5	-45,00	150,0
-10	3,0	-23,50	157,5
0	3,5	0,500	160,0
10	3,0	25,00	159,0
20	3,5	46,00	153,5
30	4,0	67,50	143,5
40	4,5	86,00	130,5
50	5,5	101,5	114,5
60	6,0	115,0	97,00
70	7,0	124,5	77,00
80	8,0	130,5	55,50
90	9,0	133,0	33,00

Таблица В.2 – Второе измерение в диапазоне  $\pm 90^\circ$  с шагом  $10^\circ$

Градусы	$V_{x_{изм}}$	$V_{y_{изм}}$	$V_{z_{изм}}$
-90	8,0	-124,0	28,00
-80	7,0	-122,5	50,50
-70	6,5	-117,5	71,00
-60	5,5	-106,5	95,00
-50	5,0	-96,00	112,0
-40	4,0	-80,00	128,0
-30	4,0	-63,50	141,5
-20	3,5	-43,00	151,0
-10	3,5	-21,50	157,5
0	3,5	0,500	160,0
10	3,5	24,50	158,5
20	3,5	46,00	153,5
30	4,5	65,50	143,5
40	5,0	85,50	130,5
50	6,5	101,0	115,5
60	6,0	115,0	96,00

Окончание таблицы В.2

Градусы	$V_{x_{изм}}$	$V_{y_{изм}}$	$V_{z_{изм}}$
70	7,0	125,0	75,50
80	8,0	130,5	55,50
90	9,0	133,0	34,00

Таблица В.3 – Третье измерение в диапазоне  $\pm 90^\circ$  с шагом  $10^\circ$ 

Градусы	$V_{x_{изм}}$	$V_{y_{изм}}$	$V_{z_{изм}}$
-90	7,5	-124,0	27,50
-80	6,5	-122,5	49,50
-70	5,5	-117,5	70,50
-60	5,0	-108,5	92,50
-50	4,0	-96,50	110,5
-40	3,5	-81,00	127,5
-30	3,5	-63,50	140,0
-20	3,0	-43,50	150,0
-10	3,5	-21,00	157,5
0	3,5	1,000	160,0
10	3,5	23,50	158,5
20	4,0	46,00	153,5
30	4,5	64,50	144,5
40	4,5	84,50	131,5
50	5,5	101,0	115,5
60	6,5	114,5	97,00
70	7,0	125,0	76,50
80	8,5	130,5	55,00
90	9,0	133,0	32,50

Таблица В.4 – Первое измерение в четырех ортогональных положениях

Градусы	$A_x$	$A_y$	$A_z$
0	3,0	2,0	160
90	9,0	133	32,5
180	9,5	7,0	-96,5
270	8,0	-124	30,5
360	3,5	2,0	160

Таблица В.5 – Второе измерение в четырех ортогональных положениях

Градусы	$A_x$	$A_y$	$A_z$
0	3,5	1,0	160
90	9,0	133	34
180	9,5	7,5	-96
270	8,0	-124	27,5
360	3,5	2,0	160

Таблица В.6 – Третье измерение в четырех ортогональных положениях

Градусы	Ax	Ay	Az
0	3,0	2,0	160
90	9,0	133	33
180	9,0	7,0	-96,5
270	8,0	-124	28
360	3,5	2,0	160

Измерения при повороте относительно оси Oy

Таблица В.7 – Первое измерение в диапазоне  $\pm 90^\circ$  с шагом  $10^\circ$ 

Градусы	Vx <sub>изм</sub>	Vy <sub>изм</sub>	Vz <sub>изм</sub>
-90	-119,0	4,5	25,50
-80	-118,0	5,5	51,00
-70	-112,0	6,0	72,00
-60	-104,0	6,5	91,00
-50	-92,00	7,0	110,5
-40	-76,50	7,0	127,5
-30	-59,00	7,5	141,0
-20	-38,50	7,5	150,5
-10	-19,00	7,5	158,0
0	2,000	7,0	160,0
10	28,00	7,0	158,0
20	49,50	7,0	153,5
30	70,00	7,0	145,0
40	89,00	6,5	132,0
50	105,0	6,0	115,0
60	118,0	6,0	98,00
70	128,5	6,5	77,50
80	135,0	5,0	57,00
90	137,5	4,5	34,50

Таблица В.8 – Второе измерение в диапазоне  $\pm 90^\circ$  с шагом  $10^\circ$ 

Градусы	Vx <sub>изм</sub>	Vy <sub>изм</sub>	Vz <sub>изм</sub>
-90	-119,0	4,5	23,5
-80	-118,5	5,5	46,00
-70	-114,0	5,5	67,00
-60	-105,0	6,0	90,00
-50	-94,00	7,0	108,0
-40	-80,00	7,5	124,5
-30	-61,00	7,5	139,5
-20	-42,50	7,5	150,5
-10	-20,50	7,5	157,0

Окончание таблицы В.8

Градусы	$V_{x_{изм}}$	$V_{y_{изм}}$	$V_{z_{изм}}$
0	2,000	8,0	160,0
10	25,00	8,0	157,0
20	46,50	7,5	155,0
30	66,50	7,5	146,5
40	86,50	7,5	134,0
50	102,5	7,5	119,0
60	116,5	6,5	101,0
70	127,5	6,5	81,50

Таблица В.9 – Третье измерение в диапазоне  $\pm 90^\circ$  с шагом  $10^\circ$ 

Градусы	$V_{x_{изм}}$	$V_{y_{изм}}$	$V_{z_{изм}}$
-90	-119,0	4,5	24,00
-80	-118,5	5,0	47,50
-70	-114,0	6,0	68,00
-60	-105,0	6,0	90,50
-50	-94,50	7,0	107,5
-40	-79,00	7,5	125,5
-30	-61,50	7,5	139,0
-20	-42,00	7,5	150,5
-10	-21,00	8,0	158,0
0	2,000	7,5	160,0
10	25,00	7,5	159,0
20	46,50	8,0	155,5
30	67,00	7,0	146,5
40	86,00	7,0	134,0
50	102,5	6,5	119,5
60	116,5	6,5	100,0
70	127,5	6,0	81,50
80	134,0	6,5	61,00
90	137,5	5,0	38,50

Таблица В.10 – Первое измерение в четырех ортогональных положениях

Градусы	$A_x$	$A_y$	$A_z$
0	2,0	7,0	160
90	137,5	5,0	37,5
180	17,5	2,0	-96,5
270	-119	4,5	24,0
360	7,0	3,5	160

Таблица В.11 – Второе измерение в четырех ортогональных положениях

Градусы	Ax	Ay	Az
0	2,0	7,5	160
90	137,0	5,0	38,0
180	17,0	2,0	-96,0
270	-119	4,5	25,0
360	7,5	3,5	160

Таблица В.12 – Третье измерение в четырех ортогональных положениях

Градусы	Ax	Ay	Az
0	2,0	7,0	160
90	137,5	4,5	38,0
180	17,5	2,0	-96,0
270	-119	4,5	24,0
360	7,0	3,5	160

