

Министерство науки и высшего образования 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
Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор
_____ А.Л. Шестаков
_____ 2020 г.

**РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ КАЛИБРОВКИ
МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ–12.03.01.2020.279. ВКР

Руководитель проекта,
ст. преподаватель кафедры ИнИТ
_____ / С.В. Пашнин
_____ / 2020 г.

Автор проекта
студент группы КЭ-414
_____ / Е.Г. Вакуленко
_____ / 2020 г.

Нормоконтролер,
доцент кафедры ИнИТ
_____ / А.А. Лысова
_____ / 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Вакуленко Е.Г. «Разработка лабораторной установки калибровки МЭМС-акселерометра». – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-414, 77 с., 31 ил., 15 табл., библиогр. список – 16 наим., 10 прил.

В данной работе описывается разработка установки на базе поворотного стола для проведения калибровки микромеханического акселерометра модели ADXL345.

Представлены две выбранные методики проведения калибровки для МЭМС-акселерометра, каждая методика предлагает математическую модель калибровки МЭМС-акселерометра. Так же, на основе анализа методик был составлен план проведения эксперимента.

Модернизирован поворотный стол, разработана 3D-модель лабораторной установки, разработан корпус для электронного блока и крепление к поворотному столу.

Проведена калибровка акселерометра. Рассчитаны абсолютные погрешности результатов измерений до и после калибровки, проведен сравнительный анализ двух методик. Методика 6-точечной калибровки по результатам расчетов признана наилучшей.

Результатом работы является разработанная лабораторная установка, полностью отвечающая поставленным требованиям.

Расчеты выполнены в прикладном пакете MathCad, моделирование системы проводилось в программе КОМПАС – 3D. Подключение акселерометра к ПК производилось с помощью программы Arduino. Пояснительная записка оформлена в текстовом редакторе MS Word 2016.

					ЮУрГУ-12.03.01.2020.279 ПЗ ВКР			
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата				
Разраб.		Вакуленко Е.Г.			Разработка лабораторной установки калибровки МЭМС-акселерометра	Лит.	Лист	Листов
Проверил		Пашнин С.В.					5	77
Н. контр.		Лысова А.А.			ЮУрГУ Кафедра ИНИТ			
Утвердил		Лапин А.П.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОИСК	6
1.1 Анализ технического задания.....	6
1.2 Обзор аналогов.....	6
1.3 Принцип действия и виды МЭМС-акселерометров.....	12
1.3.1. Емкостные акселерометры	13
1.3.2. Пьезорезистивные акселерометры	14
1.3.3. Пьезоэлектрические акселерометры	15
2 МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА.....	17
2.1 Метод шести-точечной калибровки МЭМС-акселерометра.....	17
2.2 Метод калибровки по восьми точкам	19
2.3 Подготовка и план эксперимента.....	22
3 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ	26
3.1 Модернизация поворотного стола.....	26
3.2 Корпус и крепление электронного блока	30
3.3 3D-модель лабораторной установки	32
3.3.1. Анализ эргономических показателей конструкции.....	33
3.3.2. Анализ эстетических показателей конструкции.....	34
4 КАЛИБРОВКА АКСЕЛЕРОМЕТРА	35
4.1 Расчет по методике восьми точек	38
4.2 Расчет по методике шести точек	43
4.3 Сравнение результатов расчета двух методик.....	47
4.4 Перепрошивка МЭМС-акселерометра	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	58
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Технические характеристики МЭМС-акселерометра ADXL345	60
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Листинг программы работы МЭМС-акселерометра ADXL345	64
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Листинг программы работы МЭМС-акселерометра ADXL345 с режимами калибровки	65
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Спецификация к сборочному чертежу установки для калибровки МЭМС-акселерометра	70
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Сборочный чертеж установки для калибровки МЭМС-акселерометра	72
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Рабочий чертеж вала	73
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Рабочий чертеж малого полуцилиндра	74
ПРИЛОЖЕНИЕ З. Рабочий чертеж крепления для стола	75
ПРИЛОЖЕНИЕ И. Спецификация к электронному блоку	76
ПРИЛОЖЕНИЕ К. Сборочный чертеж электронного блока	77

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время микроэлектромеханические системы (МЭМС) находят широкое применение, в их числе и МЭМС-акселерометры, которые имеют низкую стоимость, сравнительно малый вес и габаритные размеры, приемлемую точность. Они используются для навигации летательных аппаратов, играют немаловажную роль для контроля перемещения автомобилей, используются в системах ориентации.

В современных смартфонах акселерометры также встроены для многих функций, например, таких как, автоповорот экрана, счет шагов и ориентация.

Бюджетные версии датчиков не всегда соответствуют своим паспортным параметрам, заявленные характеристики могут отличаться от реальных и иметь погрешности. Для уменьшения погрешности измерений любой датчик можно откалибровать. Для калибровки МЭМС-акселерометра используются различные методики, отличающиеся математической моделью. В большинстве методик принцип калибровки акселерометра заключается в повороте прибора относительно его осей чувствительности на 90 градусов в поле силы тяжести.

Актуальность данной работы заключается в том, чтобы сделать доступным и наглядным для изучения студентов принцип калибровки микромеханического акселерометра.

В ходе информационного поиска не было обнаружено подобных лабораторных установок.

Целью ВКР является разработка лабораторной установки для демонстрации и проведения процесса калибровки трёхосного МЭМС-акселерометра с использованием двух методик.

Задачи:

- проведение информационного поиска по теме работы;
- обзор и анализ методик калибровки;

									Лист
									4
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	ЮУрГУ-12.03.01.2020.279 ПЗ ВКР				

- разработка 3D-модели прототипа лабораторной установки;
- проведение эксперимента по измерению углов наклона акселерометра по двум осям, а также проведение калибровки акселерометра по двум методикам.

					ЮУрГУ-12.03.01.2020.279 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		5

1 ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОИСК

1.1 Анализ технического задания

Прежде чем приступить к проектированию установки необходимо провести анализ технического задания (ТЗ).

Информационный поиск по теме должен включать анализ существующих акселерометров и поворотных установок, а также методов калибровки акселерометра. Выявление достоинств и недостатков, реализации наиболее оптимального решения.

При проектировании прототипа установки необходимо, чтобы она отвечала следующим требованиям:

- малый вес, не более 5 кг;
- габариты, не превышающие значений 400x400x600мм;
- эргономичность;
- мобильность.

Алгоритм работы

После того, как будет разработана 3D-модель прототипа, необходимо провести опыт на экспериментальном макете. Произвести статистическую обработку результатов измерения, определить погрешности измерения. Далее провести калибровку ММА. Оценить результаты и сравнить с изначально полученными результатами до калибровки.

1.2 Обзор аналогов

В качестве прототипа лабораторной установки был выбран поворотный стол КПА 5 (контрольно-поверочная аппаратура). Данная установка предназначена для задания углов поверяемому прибору. Наличие платформы обеспечивает возможность закрепления изделия и вращения его вокруг трёх взаимно перпендикулярных осей. Устанавливаемое изделие по массе не должно превышать 25 кг. Прототип установки представлен на рисунке 1.

										Лист
										6
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	ЮУрГУ-12.03.01.2020.279 ПЗ ВКР					



Рисунок 1 – Аналог поворотная установка КПА 5

Технические характеристики поворотного стола КПА 5 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики поворотного стола КПА 5

Параметр	Значение
Угол поворота вокруг оси: - вертикальной - первой горизонтальной - второй горизонтальной	не менее $\pm 360^\circ$ не менее $\pm 25^\circ$ не менее $\pm 45^\circ$
Точность установки горизонтального стола	до $\pm 10'$
Точность отсчета по нониусам	не хуже $\pm 6'$
Суммарные угловые люфты стола относительно горизонтальных осей	не более $12'$
Суммарный угловой люфт стола относительной вертикальной оси	не более $10'$
Составляющие величины угловых люфтов, фиксируемые по составляющим шкалам и нониусам	не более $6'$

Окончание таблицы 1

Параметр	Значение
Габаритный размер	428x436x288 мм
Масса изделия	30 кг

В ходе анализа прототипа были выявлены следующие недостатки:

- большие габаритные размеры;
- масса изделия;
- низкая мобильность;
- ограниченный диапазон угла поворота по горизонтальной оси;
- установка позволяет производить измерения в диапазоне $\pm 1g$.

В результате изучения рынка изделий, производящих ММА, были выявлены следующие фирмы Analog Devices, Hitachi, Motorola и др. Широким спектром характеристик и разнообразием моделей обладают акселерометры серии ADXL, производимые фирмой Analog Devices. ММА данной серии являются осевыми и бывают прямого и компенсационного преобразования.

В качестве прототипа калибруемого акселерометра примем ADXL345. Данный ММА является компактным и миниатюрным изделием, выполненным в тонком корпусе и имеющим 10 контактов с габаритами 3 мм х 5 мм х 1 мм.

ADXL345 имеет три оси чувствительности, высокое разрешение (13 бит) и диапазон измерения до $\pm 16g$. Цифровой результат измерения имеет 16-разрядную форму чисел, представленную в дополнительном коде и доступную через цифровые интерфейсы I²C или SPI. Датчик измеряет как динамическое ускорение, возникающее в результате движение или удара так и статическое ускорение, а именно ускорение свободного падения, что позволяет использовать устройство в качестве датчика наклона.

Датчик представляет собой поликремниевую поверхностно-микрообработанную структуру, построенную на кремниевой пластине.

Прогиб конструкции измеряется с помощью дифференциальных конденсаторов, которые состоят из независимых фиксированных пластин и пластин, прикрепленных к инерционной массе. Ускорение отклоняет контрольную массу и разбалансирует дифференциальный конденсатор, в результате чего на выходе датчика, амплитуда которая пропорциональна ускорению. Фазочувствительная демодуляция используется для определения величины и полярности ускорения.

Функциональная блок-схема ADXL345 представлена на рисунке 2.

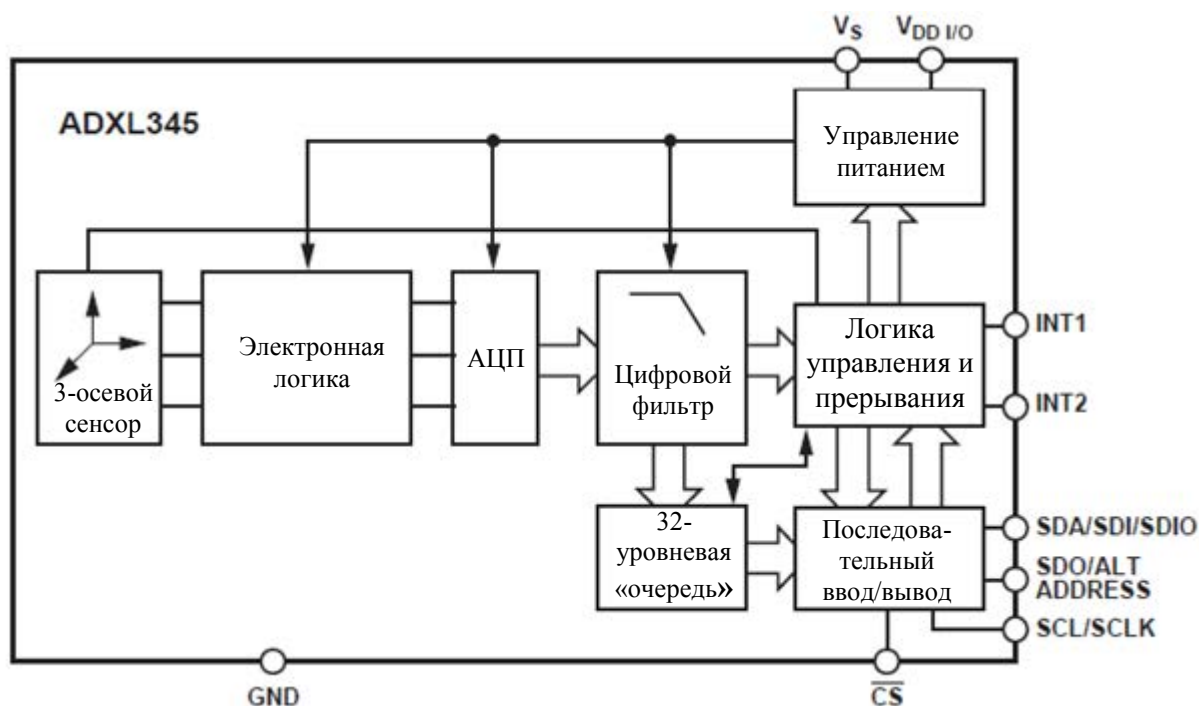


Рисунок 2 – Функциональная блок-схема ADXL345

Функции контактов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Функции контактов ADXL345

Контакт	Мнемоническое описание
$V_{DD I/O}$	Напряжение питания цифрового интерфейса ввода-вывода V_{DD}
V_S	Напряжение питания
INT1	Прерывание 1 Выход
INT2	Прерывание 2 Выход

Окончание таблицы 2

Контакт	Мнемоническое описание
SDA/SDI/SDIO	Последовательные данные (I2C) / Ввод данных (SPI 4-Wire) / Ввод и вывод данных (SPI 3-Wire)
SDO/ALT ADDRESS	Последовательный выход данных (SPI 4-Wire) / Выбор альтернативного адреса (I2C)
SCL/SCLK	Часы последовательной связи. SCL - это часы для I2C, а SCLK - это часы для SPI
CS	Выбор чипа
GND	Этот контакт должен быть заземлен

$T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_S = 2,5 \text{ В}$, $V_{DD I/O} = 1,8 \text{ В}$, $a = 0 \text{ г}$, $C_S = 10 \text{ мкФ тантал}$, $C_{I/O} = 0,1 \text{ мкФ}$, выходная скорость передачи данных (ODR) = 800 Гц. Все минимальные и максимальные характеристики гарантированы. Типичные характеристики не гарантируются.

Основные технические характеристики ADXL345 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные технические характеристики ADXL345

Параметр	Условие	Min	Typ	Max	Обозначение
Диапазон измерений	Выбирается пользователем		$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$		g
Нелинейность	Процент полной шкалы		$\pm 0,5$		%
Ошибка выравнивания между осями			$\pm 0,1$		градусы

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------

Окончание таблицы 3

Параметр	Условие	Min	Typ	Max	Обозначение
Перекрестная чувствительность			± 1		%
Разрешение на выходе все g-диапазоны	Разрешение 10-бит		10		биты
Диапазон ± 16 g	Полное разрешение		13		биты
Чувствительность по $X_{\text{ВЫХ}}$, $Y_{\text{ВЫХ}}$, $Z_{\text{ВЫХ}}$	Все g-диапазоны, полное разрешение	230	256	282	LSB/g
	± 16 g, 10-бит	29	32	35	LSB/g
Отклонение чувствительности от идеальной	Все g-диапазоны		$\pm 1,0$		%
Изменение чувствительности от температуры			$\pm 0,1$		% / °C
Выходное смещение нуля для $X_{\text{ВЫХ}}$, $Y_{\text{ВЫХ}}$		-150	0	+150	mg
Выходное смещение нуля для $Z_{\text{ВЫХ}}$		-250	0	+250	mg
Отклонение смещения нуля от идеального для $X_{\text{ВЫХ}}$, $Y_{\text{ВЫХ}}$			± 35		mg

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------

Окончание таблицы 3

Параметр	Условие	Min	Typ	Max	Обозначение
Отклонение смещения нуля от идеального для $Z_{\text{вых}}$			± 40		mg
Температурный дрейф нуля по осям X и Y			$\pm 0,4$		mg/ °C
Температурный дрейф нуля по оси Z			$\pm 1,2$		mg/ °C
Выходная скорость передачи данных (ODR)		0,1		3200	Гц
Диапазон рабочего напряжения (V_s)		2,0	2,5	3,6	В

Полное техническое описание ADXL345 представлено в Приложении А.

Проведя анализ технических параметров данного МЭМС-акселерометра можно выделить следующие достоинства:

- 1) наличие нескольких диапазонов измерений $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$;
- 2) акселерометр измеряет как динамическое, так и статическое ускорение, что упрощает задачу калибровки датчика;
- 3) имеет перекрестную чувствительность, это означает, что при ускорении вдоль одной оси чувствительности, на других также будет наблюдаться небольшое ускорение.

1.3 Принцип действия и виды МЭМС-акселерометров

Акселерометр – прибор для измерения ускорения, как правило, он измеряет так называемое кажущееся ускорение – разность векторов абсолютного ускорения и ускорения силы тяготения [1].

Чувствительный элемент (ЧЭ) акселерометра состоит из массы на элементах подвеса, смонтированной в корпус. В зависимости от вида перемещения массы различают осевые и маятниковые акселерометры. В осевых – прямолинейное движение массы, в маятниковых – угловое.

Все акселерометры наделены осью чувствительности – это ось, в направлении которой возможно перемещение массы, обусловленное конструкцией подвеса [1]. Соответственно исходя из количества осей чувствительности акселерометры бывают одно- двух- и трехкомпонентными. Двух- и трехкомпонентные акселерометры могут быть реализованы с помощью компоновки двух или трех однокомпонентных акселерометров.

1.3.1. Емкостные акселерометры

Рассмотрим принцип работы осевого емкостного МЭМС-акселерометра, представленного на рисунке 3.

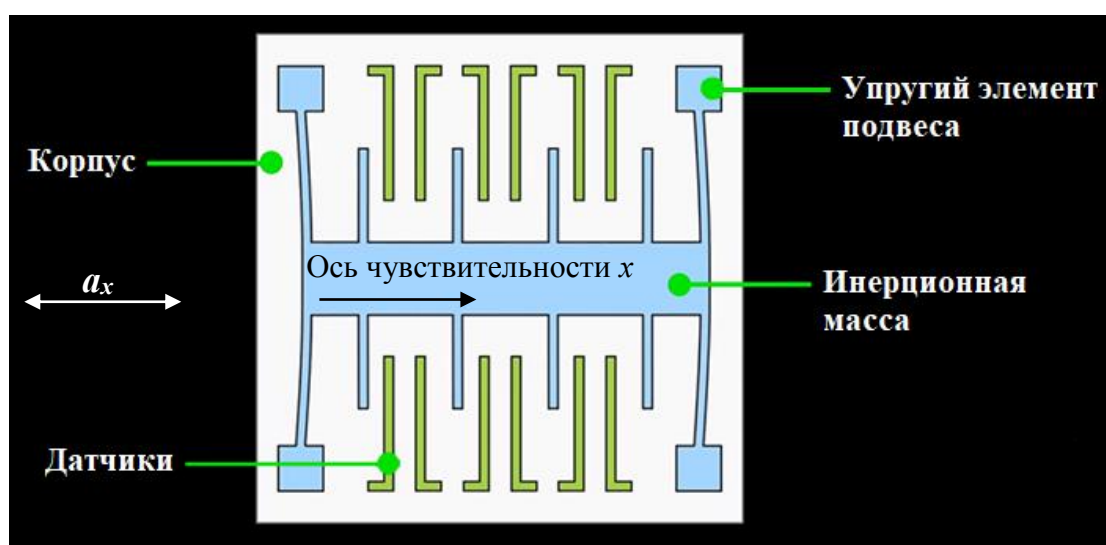


Рисунок 3 – Конструктивная схема осевого емкостного МЭМС-акселерометра

Инерционная масса (ИМ), смонтированная в корпус на элементах подвеса, выполненных в виде плоских пружин, обеспечивает ИМ перемещение только вдоль оси чувствительности, ввиду перемещения основания с ускорением a_x . Перемещение ИМ измеряется датчиками, состоящими из двух электродов, емкость между которыми изменяется при движении массы [1]. Следовательно, целью датчика является детектирование

перемещения ИМ относительно корпуса и преобразование его в пропорциональный электрический сигнал.

Определяемое емкостным акселерометром максимально возможное перемещение редко превышает 20 мкм. Для компенсации дрейфа параметров датчика и подавления всевозможных помех, в акселерометр вводится дополнительный конденсатор, емкость которого близка к емкости основного конденсатора. Подаваемые на конденсаторы напряжения должны быть со сдвигом фаз 180° . Таким образом, величина ускорения будет пропорциональна разности емкостей конденсаторов [2].

1.3.2. Пьезорезистивные акселерометры

В качестве ЧЭ пьезорезистивного акселерометра выступает тензодатчик, измеряющий деформацию пружин, поддерживающих ИМ. Эта деформация пропорциональна величине скорости, следовательно, и ускорению.

Частотный диапазон измерения пьезорезистивных акселерометров составляет 0..13 кГц, также они способны выдерживать перегрузку равную 10000g.

На рисунке 4 [2] показано устройство пьезорезистивного акселерометра фирмы Endevco/Allied Signal Aerospace Co. Датчик состоит из трех слоев кремния. Внутренний слой состоит из ИМ и упругого подвеса. Масса на подвесе крепится внутри рамки, сделанной методами травления, по обе стороны расположены тензодатчики, фиксирующие движение массы. Крышка и основание – внешние слои, защищающие подвижные части от загрязнений [2].

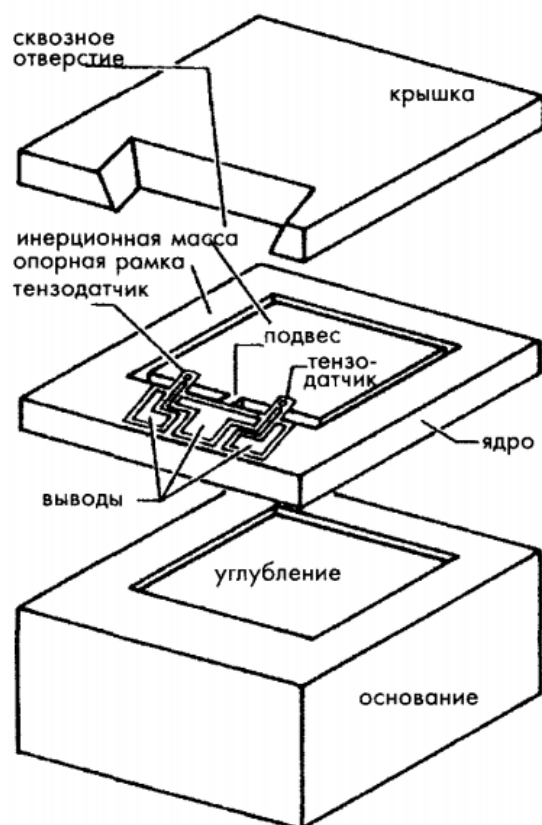


Рисунок 4 – Устройство пьезорезистивного акселерометра

1.3.3. Пьезоэлектрические акселерометры

Пьезоэлектрический эффект заключается в преобразовании механической энергии в электрическую в материалах кристаллической структуры, имеющих электрические диполи.

Пьезоэлектрические акселерометры работают в частотном диапазоне менее 2 Гц – 5 кГц. К достоинствам таких датчиков можно отнести высокую линейность, подавление внеосевых шумов и широкий температурный диапазон. В качестве ЧЭ применяются кварцевые кристаллы, а также титанат бария и титанат цирконат свинца.

Принципиальная схема пьезоэлектрического акселерометра представлена на рисунке 5 [2].

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

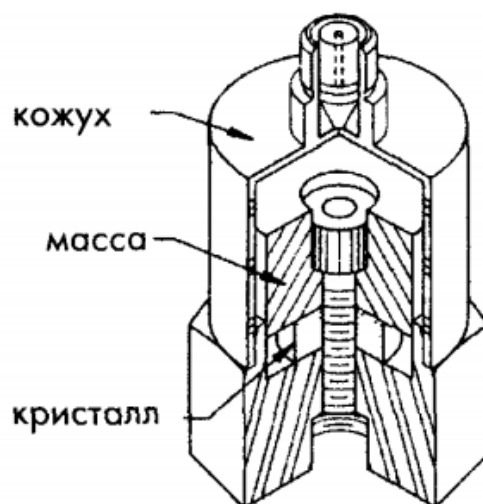


Рисунок 5 – Принципиальная схема пьезоэлектрического акселерометра

Принцип работы такого прибора заключается в появлении разности перемещений кожуха и ИМ, вследствие действия ускорения, что приводит к появлению силы, действующей на кристалл. Датчик выполнен из кремния, поскольку он не обладает пьезоэлектрическими свойствами [2].

Вывод по 1 разделу: в ходе информационного поиска был изучен аналог поворотной установки, были выявлены его недостатки, которые будут учтены при дальнейшей разработке лабораторной установки.

Был проведен анализ видов МЭМС-акселерометров и методик его калибровки, для эксперимента выбран МЭМС-акселерометр модели ADXL345.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

2 МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

Прежде всего калибровка – это совокупность операций, направленная на сопоставление полученной с помощью средства измерения (СИ) величины с некоторым эталонным значением этой величины, с целью определения метрологических характеристик данного СИ [3]. Калибровку не следует путать с понятием поверки. Поверка СИ – это установление пригодности СИ официально уполномоченным органом на основании экспериментально определенных метрологических характеристик и соответствии их установленным требованиям [3].

Существует несколько методик проведения калибровки для МЭМС-акселерометров. Рассмотрим некоторые из них.

2.1 Метод шести-точечной калибровки МЭМС-акселерометра

Уравнение связи истинного ускорения с измеренным [4]:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & k_{21} & k_{31} \\ k_{12} & K_2 & k_{32} \\ k_{13} & k_{23} & K_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{\text{ист } 1} \\ a_{\text{ист } 2} \\ a_{\text{ист } 3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{\text{см } 1} \\ \delta_{\text{см } 2} \\ \delta_{\text{см } 3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где i – номер оси акселерометра (1 – x , 2 – y , 3 – z);

a_i – измеренные ускорения;

k_{ii} – коэффициенты перекрестной чувствительности осей;

K_i – коэффициенты чувствительности осей;

$a_{\text{ист } i}$ – истинное ускорение;

$\delta_{\text{см } i}$ – погрешность смещения нуля.

Вектора истинного ускорения для шести вариантов ориентации [Методика]:

- 1) \vec{g} направлен вдоль оси $+x$: $a_{\text{ист}} = [1, 0, 0]$;
- 2) \vec{g} направлен вдоль оси $-x$: $a_{\text{ист}} = [-1, 0, 0]$;
- 3) \vec{g} направлен вдоль оси $+y$: $a_{\text{ист}} = [0, 1, 0]$;
- 4) \vec{g} направлен вдоль оси $-y$: $a_{\text{ист}} = [0, -1, 0]$;
- 5) \vec{g} направлен вдоль оси $+z$: $a_{\text{ист}} = [0, 0, 1]$;

б) \vec{g} направлен вдоль оси $-z$: $a_{\text{ист}} = [0, 0, -1]$.

Положения в шести точках и направления вращения вокруг осей чувствительности акселерометра представлены на рисунке 6.

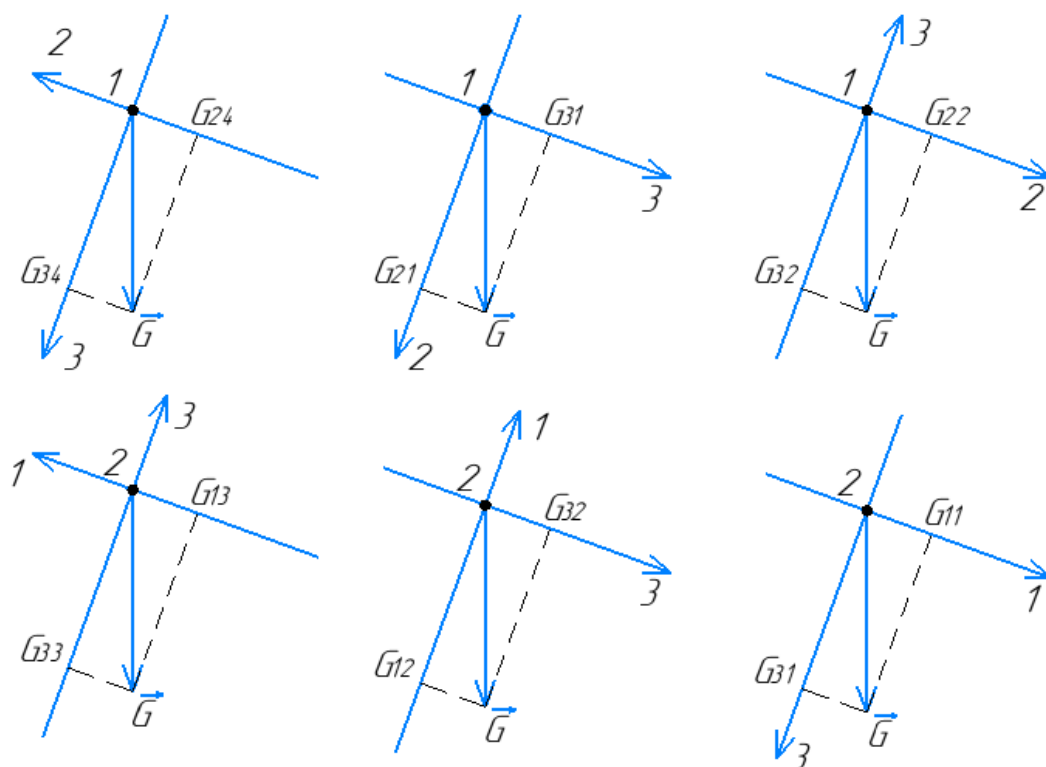


Рисунок 6 – Ориентация датчика при выполнении 6-точечной калибровки

Ось чувствительности акселерометра может быть:

- $\parallel \vec{g}$, тогда $a_i = \pm g$;
- $\perp \vec{g}$, тогда $a_i = 0$.

Поворот вокруг вертикальной оси не изменит a_i .

В измеренное ускорение a_{ij} для каждой позиции $j = 1..6$, полученное из уравнения 1, подставим значения, перечисленные выше для истинного ускорения, получим [4]:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= K_1 + \delta_{\text{см } 1}, a_{21} = k_{12} + \delta_{\text{см } y}, a_{31} = k_{13} + \delta_{\text{см } z}; \\
 a_{12} &= -K_1 + \delta_{\text{см } 1}, a_{22} = -k_{12} + \delta_{\text{см } y}, a_{32} = -k_{13} + \delta_{\text{см } z}; \\
 a_{13} &= k_{21} + \delta_{\text{см } 1}, a_{23} = K_2 + \delta_{\text{см } y}, a_{33} = k_{23} + \delta_{\text{см } z}; \\
 a_{14} &= -k_{21} + \delta_{\text{см } 1}, a_{24} = -K_2 + \delta_{\text{см } y}, a_{34} = -k_{23} + \delta_{\text{см } z}; \\
 a_{15} &= k_{31} + \delta_{\text{см } 1}, a_{25} = k_{32} + \delta_{\text{см } y}, a_{35} = K_3 + \delta_{\text{см } z};
 \end{aligned}$$

$$a_{16} = -k_{31} + \delta_{\text{см } 1}, a_{26} = -k_{32} + \delta_{\text{см } y}, a_{36} = -K_3 + \delta_{\text{см } 3}. \quad (2)$$

Смещения можно рассчитать несколькими способами, суммируя два из шести перечисленных значений выше, тщательно подобранные таким образом, чтобы коэффициенты усиления и перекрестного усиления по осям подавлялись [4]:

$$\begin{aligned} a_{11} + a_{12} &= 2\delta_{\text{см } 1}, a_{13} + a_{14} = 2\delta_{\text{см } 1}, a_{15} + a_{16} = 2\delta_{\text{см } 1}; \\ a_{21} + a_{22} &= 2\delta_{\text{см } 2}, a_{23} + a_{24} = 2\delta_{\text{см } 2}, a_{25} + a_{26} = 2\delta_{\text{см } 2}; \\ a_{31} + a_{32} &= 2\delta_{\text{см } 3}, a_{33} + a_{34} = 2\delta_{\text{см } 3}, a_{35} + a_{36} = 2\delta_{\text{см } 3}. \end{aligned}$$

После вычисления смещений коэффициенты усиления и коэффициенты перекрестного усиления по осям x , y , z можно рассчитать следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} K_1 &= a_{11} - \delta_{\text{см } 1}, K_1 = -a_{12} + \delta_{\text{см } 1}; \\ k_{12} &= a_{21} - \delta_{\text{см } 2}, k_{12} = -a_{22} + \delta_{\text{см } 2}; \\ k_{13} &= a_{32} - \delta_{\text{см } 3}, k_{13} = -a_{32} + \delta_{\text{см } 3}; \\ k_{21} &= a_{13} - \delta_{\text{см } 1}, k_{21} = -a_{14} + \delta_{\text{см } 1}; \\ K_2 &= a_{23} - \delta_{\text{см } 2}, K_2 = -a_{24} + \delta_{\text{см } 2}; \\ k_{23} &= a_{33} - \delta_{\text{см } 3}, k_{23} = -a_{34} + \delta_{\text{см } 3}; \\ k_{31} &= a_{15} - \delta_{\text{см } 1}, k_{31} = -a_{16} + \delta_{\text{см } 1}; \\ k_{32} &= a_{25} - \delta_{\text{см } 2}, k_{32} = -a_{26} + \delta_{\text{см } 2}; \\ K_3 &= a_{35} - \delta_{\text{см } 3}, K_3 = -a_{36} + \delta_{\text{см } 3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Теперь смещения могут быть вычтены и умножение на обратную матрицу осуществляет переход от измеренного ускорения к истинному.

2.2 Метод калибровки по восьми точкам

Измерения акселерометра по трем его осям чувствительности можно представить в виде [5]:

$$A_{ij} = kG + m_j, \quad (4)$$

где i – номер оси вокруг которой производится вращение;

j – номер измерения от 1 до 4;

A_{ij} – измеренное ускорение акселерометром по оси чувствительности;

G – действительное значение проекции вектора гравитационного ускорения на ось чувствительности;

m_j – статическая ошибка акселерометра по оси;

k – коэффициент чувствительности.

Для калибровки акселерометр устанавливают таким образом, чтобы одна его ось, будем называть ее первой, пересекалась с вектором гравитационного ускорения \vec{G} , предпочтительно под углом 90° .

Оси 2 и 3 целесообразно развернуть под углом 45° к вектору гравитационного ускорения \vec{G} . Это требование не обязательно, но повышает точность калибровки.

Вторая и третья оси акселерометра калибруются путем вращения вокруг первой оси, фиксируют четыре ортогональных положения $i=1\div 4$, в каждом измеряют проекции A_{2i} и A_{3i} на вторую и третью оси вектора \vec{G} . Статическая ошибка по второй и третьей оси акселерометра m_2 и m_3 вычисляется методом усреднения измеренных проекций вектора \vec{G} на эту ось по следующей формуле [5]:

$$m_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{j=4} A_{ij} \quad (5)$$

Затем аналогично калибруют вторую ось, измеряя A_{2i} и вычисляют статическую ошибку для первой оси m_1 . Ориентация акселерометра представлена на рисунке 7.

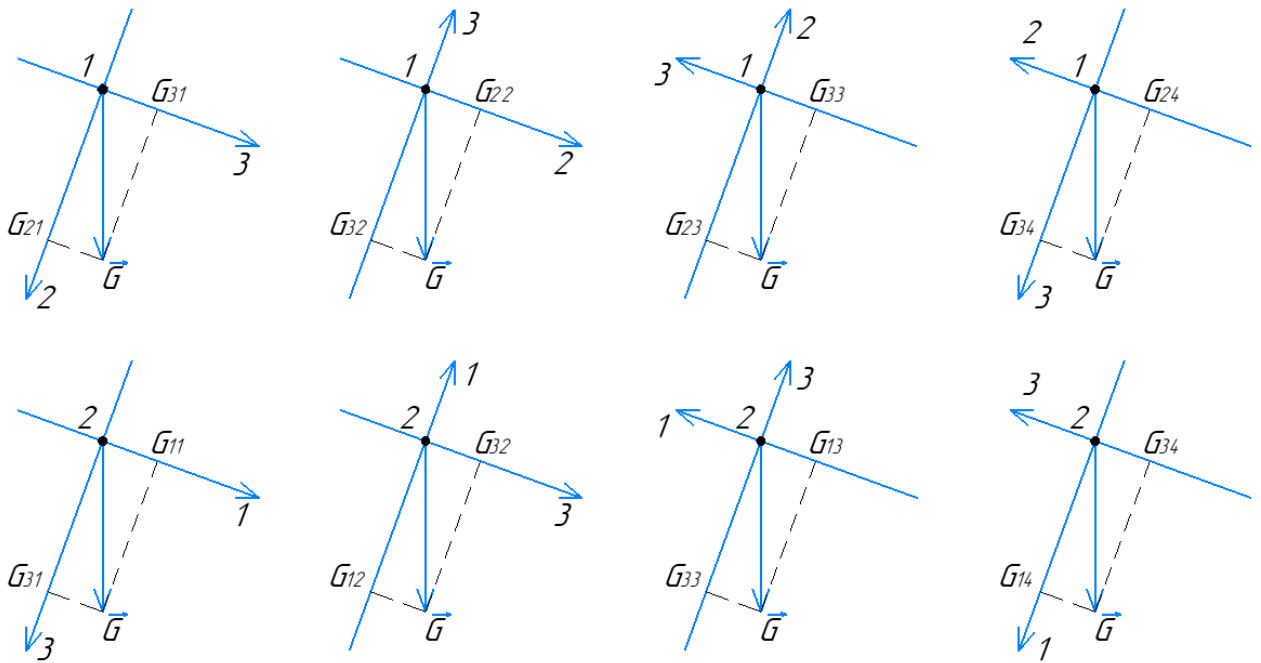


Рисунок 7 – Ориентация акселерометра при выполнении 8-точечной калибровки

Относительный коэффициент чувствительности третьей и второй осей k_{32} вычисляется по следующей формуле [5]:

$$k_{32} = \frac{k_3}{k_2} = \sqrt{\frac{(A_{31} - A_{33})^2 + (A_{32} - A_{34})^2}{(A_{21} - A_{23})^2 + (A_{22} - A_{24})^2}} \quad (6)$$

Аналогично вычисляется относительный коэффициент чувствительности третьей и первой осей k_{31} [5]:

$$k_{31} = \frac{k_3}{k_1} = \sqrt{\frac{(A_{31} - A_{33})^2 + (A_{32} - A_{34})^2}{(A_{11} - A_{13})^2 + (A_{12} - A_{14})^2}} \quad (7)$$

Важно отметить, что для вычисления коэффициента чувствительности по третьей и второй осям не нужно знать коэффициенты чувствительности по каждой из них, а также величины и ориентации вектора \vec{G} .

Далее определяют углы α_i между вектором \vec{G} и каждой осью акселерометра по формулам [5]:

$$\alpha_1 = \frac{G_1}{\sqrt{G_2^2 + G_3^2}} = \text{arcctg} \left(\frac{k_{31}(B_1 - m_1)}{\sqrt{[k_{32}(B_2 - m_2)]^2 + (B_3 - m_3)^2}} \right)$$

$$\alpha_2 = \frac{G_2}{\sqrt{G_1^2 + G_3^2}} = \text{arcctg} \left(\frac{k_{32}(B_2 - m_2)}{\sqrt{[k_{31}(B_1 - m_1)]^2 + (B_3 - m_3)^2}} \right)$$

$$\alpha_3 = \frac{G_3}{\sqrt{G_1^2 + G_2^2}} = \text{arcctg} \left(\frac{(B_3 - m_3)}{\sqrt{[k_{31}(B_1 - m_1)]^2 + [k_{32}(B_2 - m_2)]^2}} \right)$$

где α_1, α_2 и α_3 – углы наклона акселерометра по трем осям;

$B_j, j = 1, 2, 3$ – измеренный угол наклона по каждой из трех осей.

2.3 Подготовка и план эксперимента

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 – Функциональная схема лабораторной установки

С помощью поворотной установки (ПУ) осуществляется вращение акселерометра (А) вокруг фиксированной оси чувствительности на заданный угол. Ускорение, регистрируемое акселерометром, поступает в микроконтроллер Arduino (МК), который в свою очередь через USB-интерфейс передает информационный сигнал в персональный компьютер (ПК). С помощью среды Arduino происходит вывод данных в единицах измерения акселерометра (LSB) на монитор.

Схема подключения ADXL345 к микроконтроллеру Arduino представлена на рисунке 9.

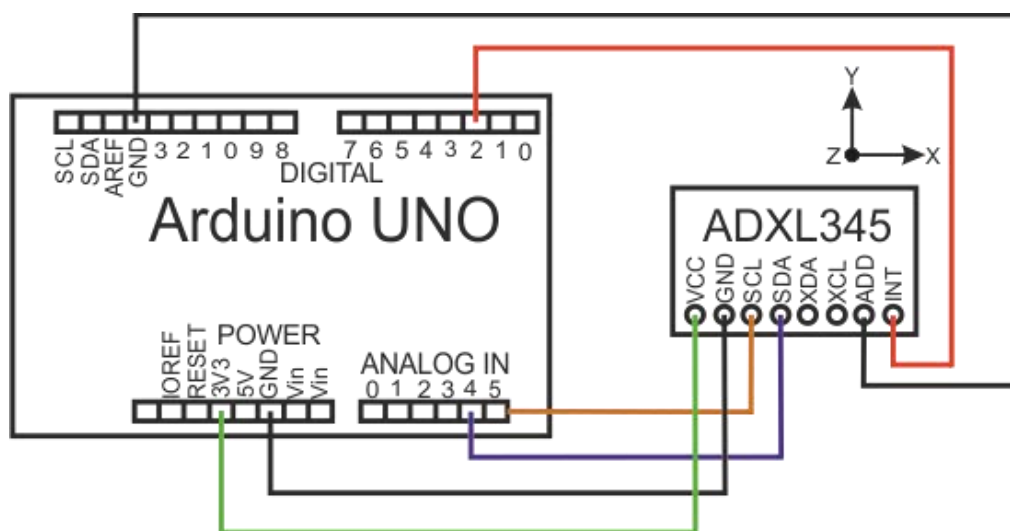


Рисунок 9 – Схема подключения ADXL345

Листинг программы приведен в приложении Б.

В качестве макетного образца был использован поворотный кронштейн, представленный на рисунке 10.

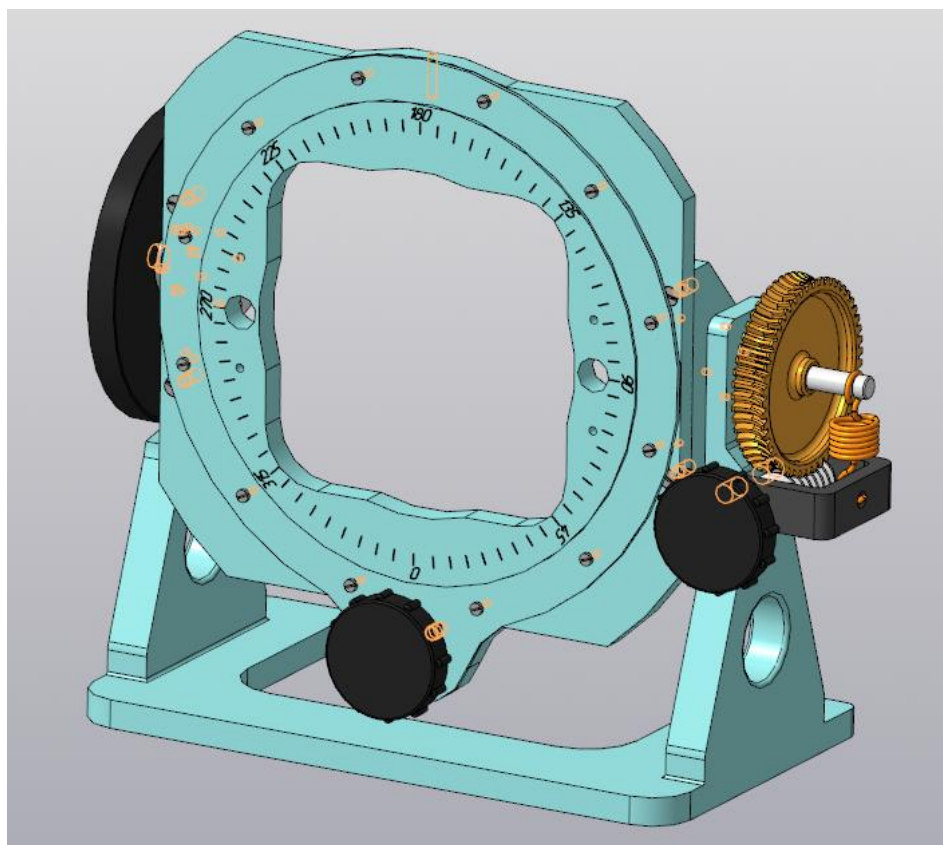


Рисунок 10 – Поворотный кронштейн

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Эксперимент – система операций или наблюдений, направленных на получение информации об объекте исследования при проведении испытаний [6].

В качестве объекта исследования выступает МЭМС-акселерометр.

Дополнительное оборудование: поворотный кронштейн, микроконтроллер Arduino UNO, соединительные провода, USB-интерфейс, ПК.

Прежде чем начать проведение опытов составим **план эксперимента**, который состоит из следующих этапов:

1) внешний осмотр оборудования на отсутствие внешних повреждений;
2) сбор схемы экспериментальной установки: подключение акселерометра к микроконтроллеру, установка акселерометра и микроконтроллера на поворотный кронштейн (они должны быть надежно закреплены), подключение микроконтроллера к ПК, запуск программы в среде Arduino;

3) проведение серии экспериментов по измерению проекции вектора гравитационного ускорения на чувствительные оси МЭМС-акселерометра, осуществляя поворот акселерометра на 90° вокруг первой фиксированной оси и вокруг второй фиксированной оси (съем 8 показаний);

4) проведение серии экспериментов по измерению проекции вектора гравитационного ускорения на чувствительные оси МЭМС-акселерометра, осуществляя поворот акселерометра на 10° в диапазоне от -90° до 90° вокруг первой фиксированной оси, далее вокруг второй фиксированной оси;

5) обработка полученных результатов измерения в MS Excel.

При проведении эксперимента необходимо выполнить ряд требований:

1) температура в помещении 20°C , атмосферное давление 760 мм.рт.ст., относительная влажность 60%;

2) поворотный кронштейн должен быть закреплен на ровной горизонтальной поверхности.

Вывод по 2 разделу: в данной главе представлены две выбранные методики проведения калибровки для МЭМС-акселерометра, каждая методика предлагает математическую модель калибровки МЭМС-акселерометра. Так же, на основе анализа методик был составлен план проведения эксперимента.

3 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

В конструкторскую часть данной работы входит модернизация существующего поворотного стола, разработка 3D-модели лабораторной установки и крепления электронного блока, в который входит МЭМС-акселерометр и микроконтроллер Arduino UNO.

3.1 Модернизация поворотного стола

Для проведения экспериментов необходимо, чтобы угол поворота по двум осям составлял $\pm 90^\circ$, в существующем аналоге КПА5 диапазон углов поворота по крену составляет $\pm 60^\circ$, диапазон углов поворота по тангажу $\pm 45^\circ$.

В данной установке так же имеется возможность осуществлять поворот вокруг вертикальной оси. Для проведения экспериментов калибровки нет необходимости вращать акселерометр вокруг вертикальной оси чувствительности, так как проекция гравитационного ускорения на две другие оси не изменится.

Таким образом, модернизация заключается в расширении диапазонов поворота по крену и тангажу и удалении лишней червячной передачи, отвечающей за поворот вокруг вертикальной оси.

Прежде чем приступить к 3D-моделированию необходимо произвести расчет червячных передач. Расчет был произведен в соответствии с ГОСТ 19650-97 [7].

Межосевые расстояния были выбраны, такими чтобы минимизировать габариты данной установки, межосевые расстояния так же были выбраны по рекомендации ГОСТ 2144-76 [8].

Расчет выполнен в MS Excel и представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Геометрический расчет червячных передач

Параметр	Обозначение	Малая передача	Большая передача
Кол-во зубьев червячного колеса	Z2	40,00	55,00

Окончание таблицы 4

Параметр	Обозначение	Малая передача	Большая передача
Кол-во витков червяка	$Z1$	4,00	4,00
Модуль	m	4,00	5,00
Коэф-т диаметра червяка	q	10,00	10,00
Номинальное передаточное число	$u \text{ ном}$	14,00	14,00
Межосевое расстояние	aw	100,00	160,00
Коэф-т смещения червяка	x	0,00	-0,50
Делительный угол подъема (винтовой линии)	γ	24,22	24,22
Основной угол подъема	γb	31,02	31,02
Начальный угол подъема	γw	21,80	23,96
Угол профиля в осевом сечении	αx	22,86	22,86
Минимальное значение коэф-та смещения червяка	x_{\min}	-2,02	-3,15
Максимальное значение коэф-та смещения	x_{\max}	1,81	2,56
Делительный диаметр червяка	$d1$	40,00	50,00
Делительный диаметр колеса	$d2$	160,00	275,00
Начальный диаметр червяка	$dw1$	40,00	45,00
Основной диаметр червяка	db	26,61	33,26
Высота витка червяка	$h1$	4,00	5,00
Высота головки витка червяка	$ha1$	4,00	5,00
Диаметр вершин витков червяка	$da1$	48,00	60,00
Диаметр вершин зубьев червячного колеса	$da2$	168,00	280,00
Наибольший диаметр червячного колеса	$dae2$	172,00	285,00
Радиус кривизны переходной кривой червяка	$\rho f1$	0,80	1,00
Длина нарезной части червяка	$b1$	81,47	117,78
Ширина венца червячного колеса	$b2$	32,16	40,20
Радиус выемки	rk	16,00	20,00

Смоделируем предварительный макет для проверки осуществления поворотов на $\pm 90^\circ$. Иллюстрация поворотов представлена на рисунке 11.

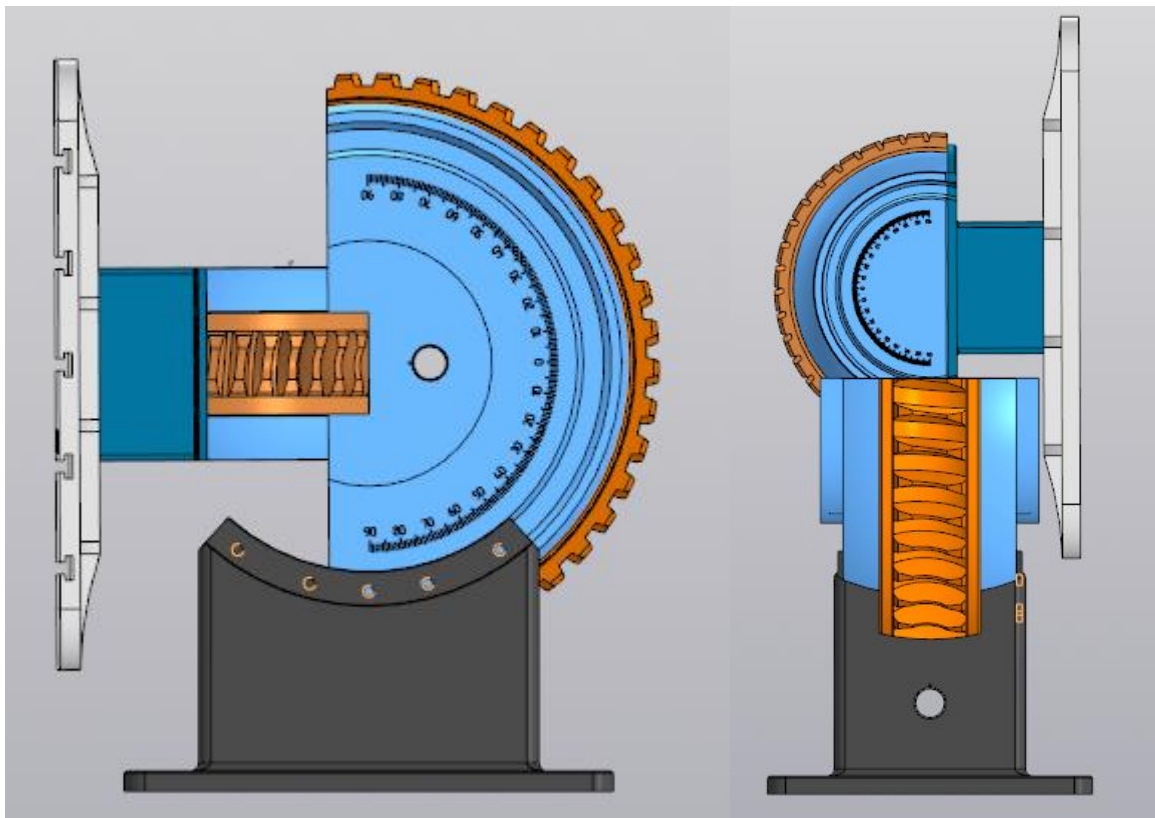


Рисунок 11 – Иллюстрация поворотов установки

Ограничение поворотов на больший угол осуществляется за счет упора стола в другие детали установки (в корпус в случае поворота по тангажу, в вал в случае поворота по крену), что позволяет осуществлять контроль сопряжения червячных передач и предотвращать «выпадение» поворачиваемых деталей.

Так как при повороте по тангажу вал будет ограничивать возможность поворота на 90° , необходимо сделать этот вал разборным. Таким образом, вал можно вставить с другой стороны и осуществлять вращение на максимальный угол.

На рисунке 11 отражена защитная оболочка для червяка. Так как имеются зазоры между корпусом и червячным венцом 5 мм, зазоры между валом и корпусом 1 мм, следовательно, данной оболочке присваивается степень защиты от внешних твердых предметов 2 – защищено от внешних твердых предметов диаметром больше или равным 12,5 мм (щуп-предмет – сфера диаметром 12,5 мм – не должен проникать полностью) [9].

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Червяк выполнен из марки стали, которая не подвержена ржавчине, тогда следует присвоить степень защиты 1 – вертикально падающие капли не должны оказывать вредного воздействия [9].

Степень защиты, присваиваемая данной оболочке – IP21.

3D-модель поворотного стола и диапазон по второй оси представлены на рисунке 12 и 13 соответственно.

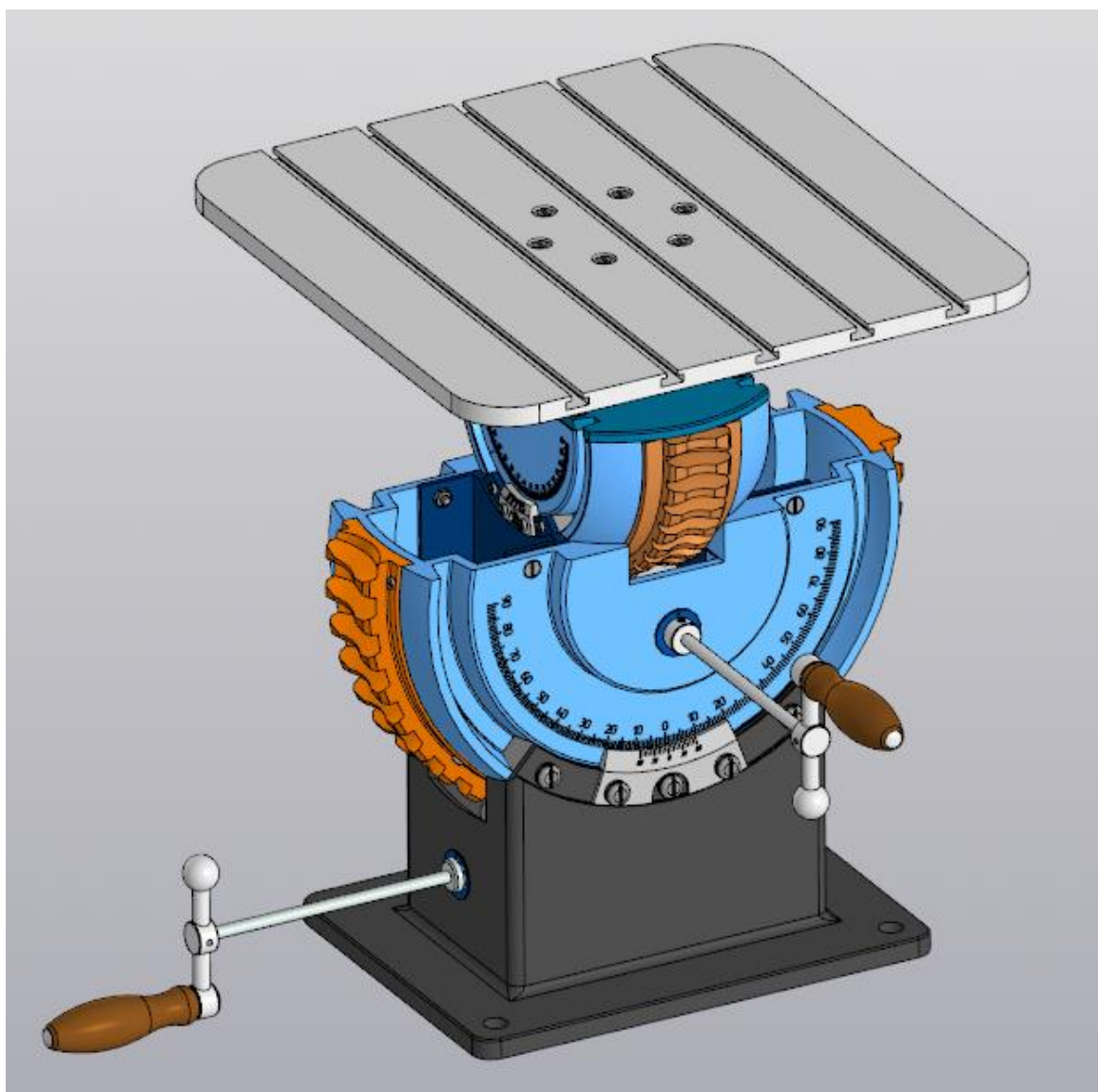


Рисунок 12 – 3D-модель поворотного стола

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

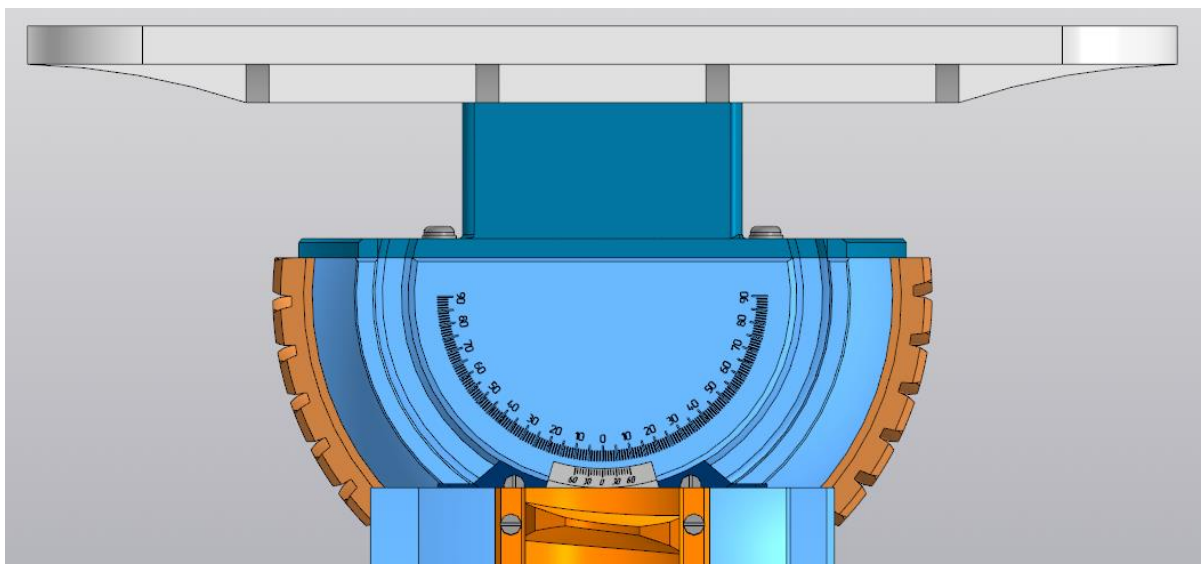


Рисунок 13 – Диапазон по второй оси

3.2 Корпус и крепление электронного блока

В столе установки предусмотрены прямоугольные пазы для крепления различного рода приборов. Иллюстрация пазов представлена на рисунке 14.

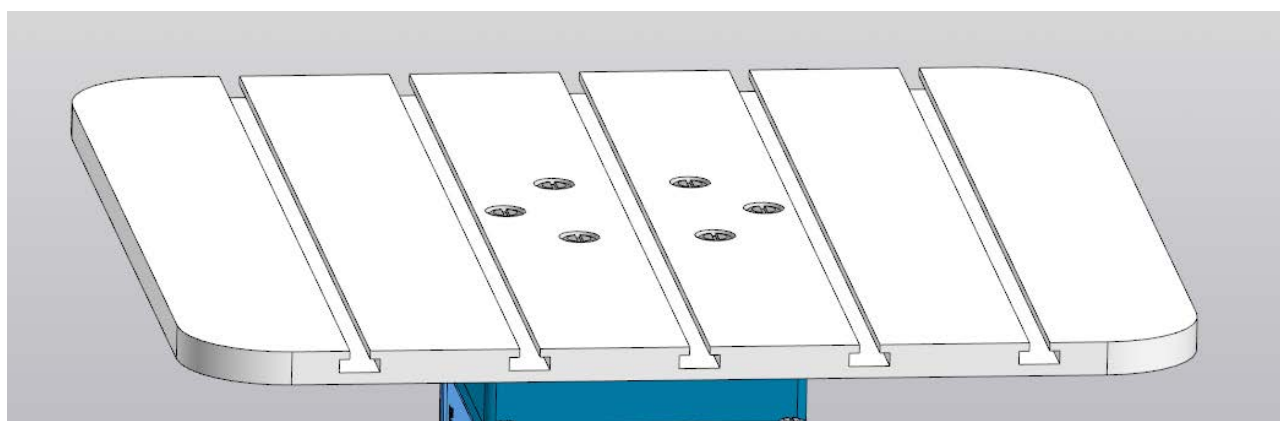


Рисунок 14 – Прямоугольные пазы

Поэтому для крепления электронного блока будет использоваться узел, состоящий из винта с шестигранной головкой ГОСТ Р ИСО 2017 - М6х20, 2 гаек М6-6Н ГОСТ 5929-70 и пружинной шайбы А 6.37 ГОСТ 10450-78. Сам блок необходимо расположить на макетной плате. Для МЭМС-акселерометра и микроконтроллера Arduino NANO так же стоит предусмотреть защитную оболочку с отверстиями для крепления на стол.

Присваиваемая степень защиты для данной оболочки – IP14.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Первая характеристическая цифра 1 означает, что оболочка защищена от внешних твердых предметов диаметром больше или равным 50 мм. Сфера диаметром 50 мм не должна проникать внутрь. Присвоение этой цифры связано с наличием в оболочке отверстия (15 мм x 6 мм) для USB-интерфейса.

Вторая характеристическая цифра 4 означает, что оболочка защищена от сплошного обрызгивания. Вода в виде брызг, попадающая на оболочку не должна оказывать вредного воздействия.

3D-модель акселерометра и микроконтроллера в защитной оболочке представлена на рисунках 15 и 16.

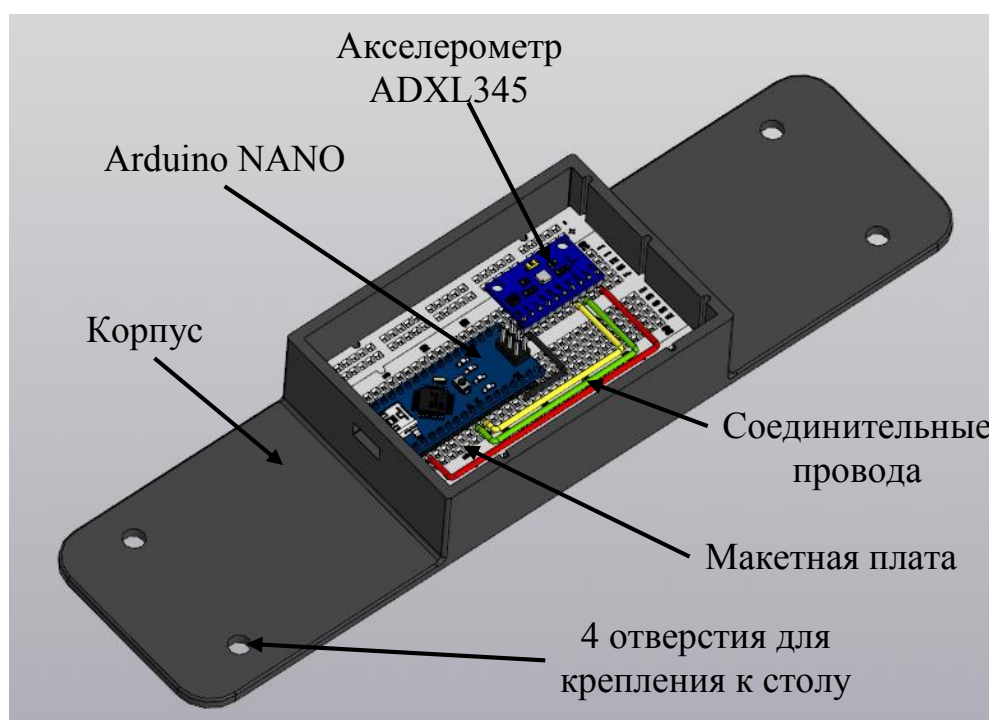


Рисунок 15 – 3D-модель электронного блока

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

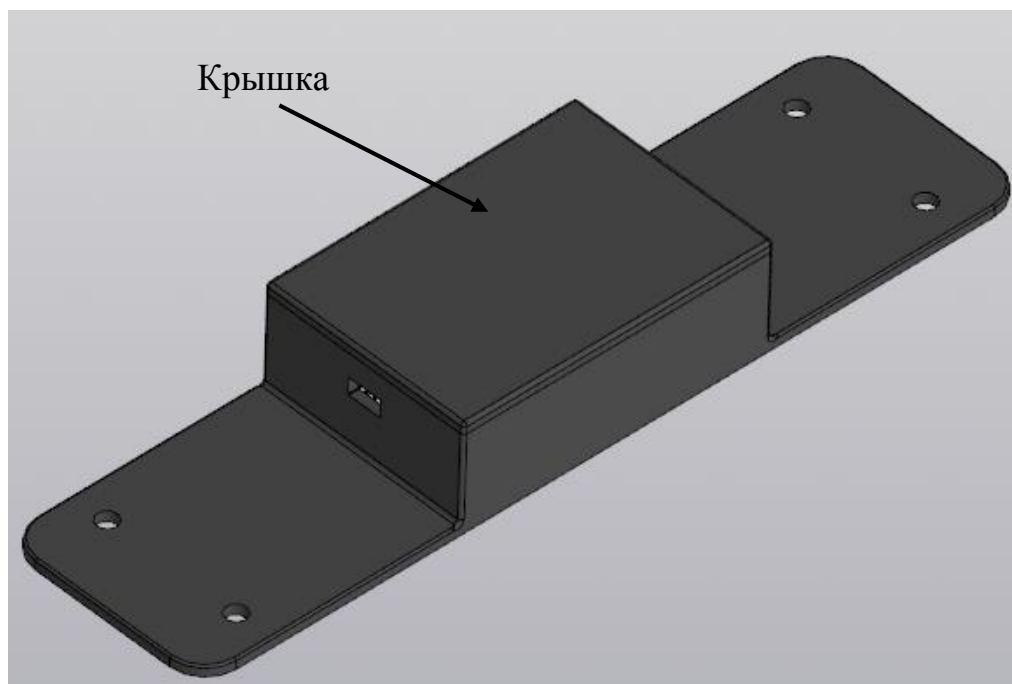


Рисунок 16 – 3D-модель электронного блока с крышкой

Крепление электронного блока в корпусе на стол поворотной установки представлено на рисунке 17.

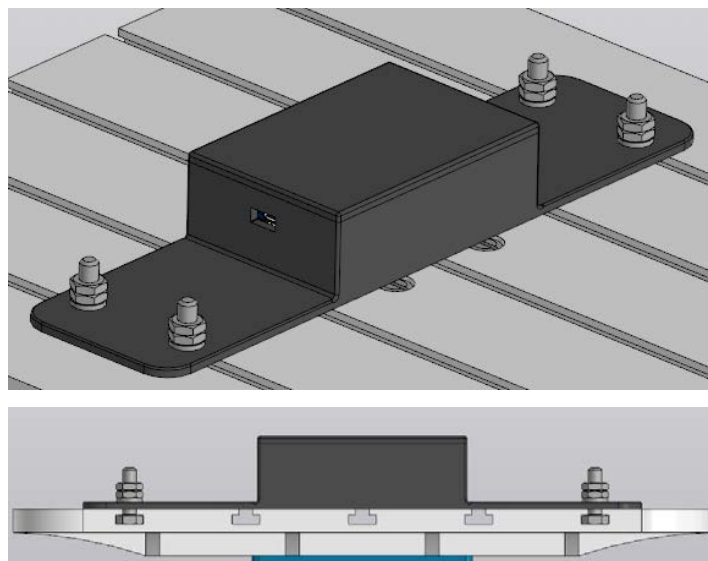


Рисунок 17 – Крепление электронного блока в корпусе на стол

3.3 3D-модель лабораторной установки

3D-модель лабораторной установки представлена на рисунке 18.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

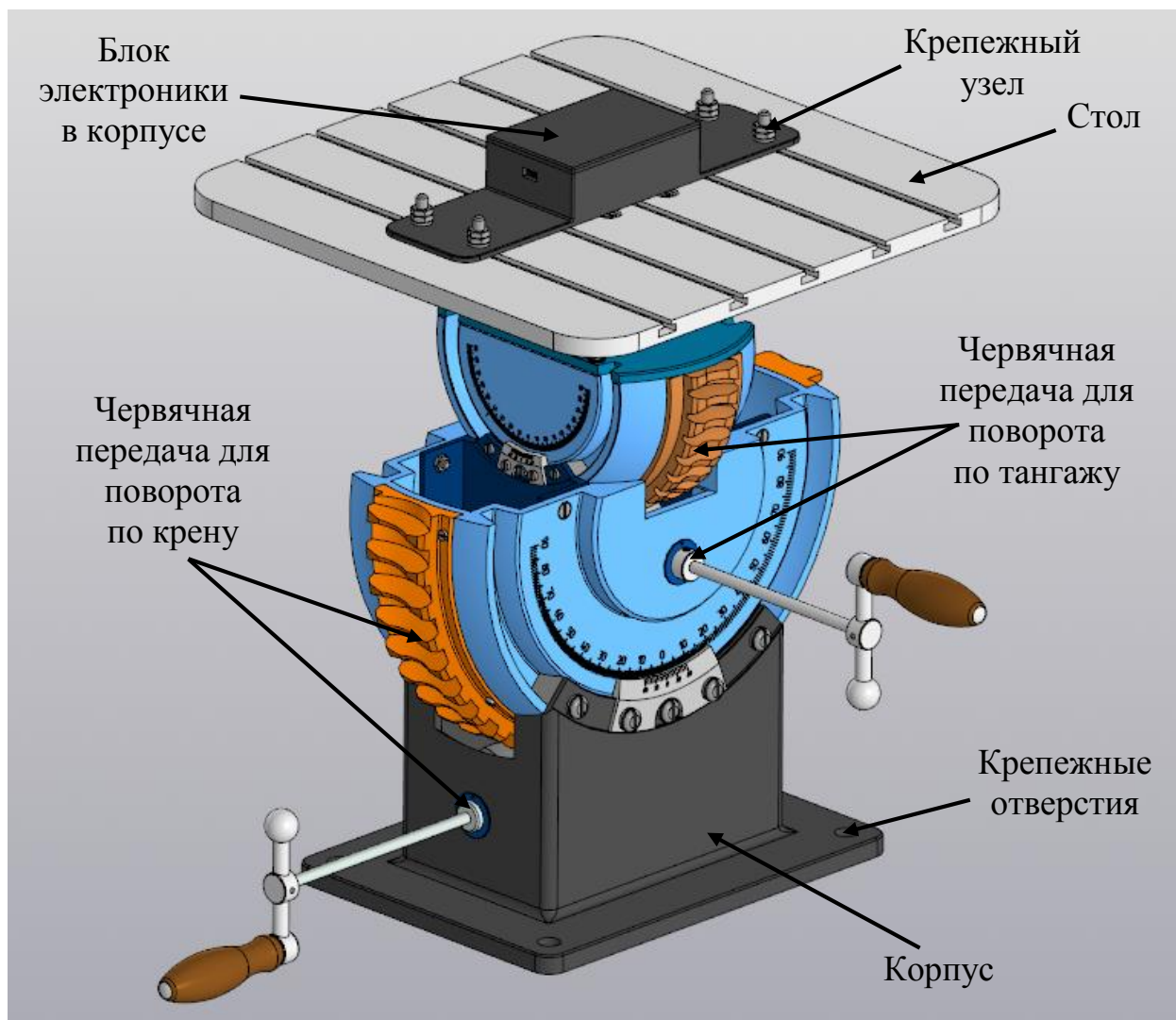


Рисунок 18 – 3D-модель лабораторной установки

3.3.1. Анализ эргономических показателей конструкции

Расположение установки должно занимать половину рабочего пространства, а именно рабочего стола, так как данная лабораторная установка подразумевает съем и фиксацию показаний, следовательно, на рабочем столе человека-оператора должно быть место для установки компьютера и расположения письменных принадлежностей. По высоте установка находится в поле зрения человека [10].

Данная установка предполагает наличие вращающихся ручек, форма ручек выполнена в соответствии с рекомендациями эргономики, удобно ложатся в руку. Материал ручек – дерево.

Прилагаемые усилия для вращения ручек в пределах 10Н.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

4 КАЛИБРОВКА АКСЕЛЕРОМЕТРА

После того как соблюдены все условия для проведения эксперимента, акселерометр установлен и надежно закреплен на поворотной установке, поворачиваем акселерометр вокруг его оси чувствительности Ox с шагом 10° в диапазоне $\alpha_{зад} = -90^\circ \div 90^\circ$. Показания акселерометра по трем осям записываем в таблицу. Учитывая, что проекция вектора гравитационного ускорения равна тангенсу угла наклона, найдем расчетный угол поворота $\alpha_{расч}$ акселерометра:

$$\alpha_{расч} = \arctg \frac{y}{z},$$

где y – результат измерения проекции \vec{g} по оси Y ;

z – результат измерения проекции \vec{g} по оси Z .

Для оценки результатов измерения рассчитаем абсолютную погрешность по следующей формуле:

$$\Delta = \alpha_{расч} - \alpha_{зад}.$$

Результаты измерения вектора гравитационного ускорения для фиксированной оси чувствительности Ox представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты измерения вектора гравитационного ускорения в поле силы тяжести для фиксированной оси чувствительности Ox

$\alpha_{зад},$ град.	x, LSB	y, LSB	z, LSB	$\alpha_{расч},$ град.	$\Delta,$ град.
-90	38	-267	30	-83,589	6,411
-80	39	-262	73	-74,431	5,569
-70	38	-251	119	-64,634	5,366
-60	37	-231	157	-55,798	4,202
-50	38	-200	193	-46,02	3,98
-40	37	-167	224	-36,706	3,294
-30	38	-128	252	-26,928	3,072
-20	38	-80	270	-16,504	3,496

Окончание таблицы 5

$\alpha_{\text{зад}}$, град.	x, LSB	y, LSB	z, LSB	$\alpha_{\text{расч}}$, град.	Δ , град.
-10	38	-34	281	-6,899	3,101
0	38	14	288	2,78302	2,783
10	23	64	281	12,8307	2,831
20	24	112	272	22,3801	2,38
30	27	157	254	31,7206	1,721
40	29	198	228	40,9717	0,972
50	28	233	196	49,9294	-0,071
60	29	262	162	58,2706	-1,729
70	31	282	122	66,6055	-3,394
80	30	299	77	75,5587	-4,441
90	31	303	34	83,5976	-6,402

Для калибровки датчика необходимо снять показания акселерометра в 4-х ключевых положениях: 0° , 90° , 180° , 270° . Для этого проводится вторая серия измерений, результаты которой приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты измерения вектора гравитационного ускорения в четырех ортогональных положениях с фиксированной осью Ox

№ измерения	1	2	3	4
α , град.	0	90	180	270
x, LSB	45,333	51,333	54,333	52,333
y, LSB	14,333	303	18,333	-266,3
z, LSB	290,33	35,333	-220,7	25,667

Аналогично, зафиксировав ось Oy , проведем две серии измерений.

Результаты измерения вектора гравитационного ускорения для фиксированной оси чувствительности Oy представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты измерения вектора гравитационного ускорения в поле силы тяжести с фиксированной осью чувствительности Oy

$\alpha_{\text{зад}}$, град.	x, LSB	y, LSB	z, LSB	$\alpha_{\text{расч}}$, град.	Δ , град.
-90	-250	12	18	-85,882	4,118
-80	-249	12	62	-76,018	3,982

Окончание таблицы 7

$\alpha_{зад},$ град.	x, LSB	y, LSB	z, LSB	$\alpha_{расч},$ град.	$\Delta,$ град.
-70	-229	13	105	-65,368	4,632
-60	-209	13	145	-55,248	4,752
-50	-180	13	184	-44,37	5,63
-40	-141	12	216	-33,136	6,864
-30	-103	14	245	-22,802	7,198
-20	-57	14	264	-12,184	7,816
-10	-9	13	267	-1,9306	8,069
0	48	14	289	9,4302	9,43
10	91	23	270	18,626	8,626
20	142	24	276	27,225	7,225
30	182	23	259	35,096	5,096
40	223	21	235	43,499	3,499
50	257	23	206	51,286	1,286
60	271	23	160	59,442	-0,558
70	272	22	111	67,8	-2,2
80	305	20	82	74,952	-5,048
90	312	20	38	83,056	-6,944

Результаты измерения вектора гравитационного ускорения в четырех ортогональных положениях с фиксированной осью Oy представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты измерения вектора гравитационного ускорения в четырех ортогональных положениях с фиксированной осью чувствительности Oy

№ измерения	1	2	3	4
$\alpha,$ град.	0	90	180	270
x, LSB	71	333	35,333	-236,33
y, LSB	20	22,333	17,333	18,333
z, LSB	-221,7	37,333	287,33	15,667

Так как для подобранных методик калибровки акселерометра используется расчет калибровочных коэффициентов на основе измерения вектора гравитационного ускорения в ортогональных положениях, то данные серии измерений можно использовать для обеих методик.

4.1 Расчет по методике восьми точек

В данной методике измеренное ускорение можно описать уравнением (4), следовательно, для расчета откалиброванных значений необходимо рассчитать смещение нуля по трем осям и коэффициенты чувствительности k_{32} и k_{31} .

Рассчитаем смещения нуля акселерометра по формуле (5).

$$m_1 = 50,75;$$

$$m_2 = 17,33;$$

$$m_3 = 32,67.$$

Рассчитаем коэффициенты чувствительности k_{32} и k_{31} по формулам (6) и (7).

$$k_{32} = 0,90;$$

$$k_{31} = 0,89.$$

Далее определяют углы α_i между вектором \vec{G} и каждой осью акселерометра по формулам (8) и (9). Результат калибровки для оси Ox представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Результат калибровки для оси Ox

$\alpha_{зад},$ град.	$\alpha_{калибр},$ град.	$\Delta,$ град.
-90	-90,57	-0,57
-80	-81,33	-1,33
-70	-71,24	-1,24
-60	-62,15	-2,15
-50	-52,10	-2,10
-40	-42,39	-2,39
-30	-32,12	-2,12
-20	-21,24	-1,24
-10	-11,09	-1,09
0	-0,79	-0,79
10	10,65	0,65
20	20,77	0,77

Окончание таблицы 9

$\alpha_{\text{зад}}$, град.	$\alpha_{\text{калибр}}$, град.	Δ , град.
30	30,97	0,97
40	41,27	1,27
50	51,40	1,40
60	60,86	0,86
70	70,40	0,40
80	80,57	0,57
90	89,72	-0,28

Результат калибровки для оси Oy представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Результат калибровки для оси Oy

$\alpha_{\text{зад}}$, град.	$\alpha_{\text{калибр}}$, град.	Δ , град.
-90	-93,24	-3,24
-80	-83,51	-3,51
-70	-73,23	-3,23
-60	-63,18	-3,18
-50	-52,37	-2,37
-40	-41,38	-1,38
-30	-30,99	-0,99
-20	-20,49	-0,49
-10	-10,57	-0,57
0	1,79	1,79
10	10,99	0,99
20	20,62	0,62
30	29,33	-0,67
40	38,97	-1,03
50	48,23	-1,77
60	58,35	-1,65
70	69,31	-0,69
80	78,24	-1,76
90	88,74	-1,26

Среднее квадратическое отклонение (СКО) вычисляют по формуле [11]:

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

где x_i – i -й результат измерений;

n – число результатов измерений;

\bar{x} – среднее арифметическое результатов измерений.

Результаты расчета среднего квадратического отклонения абсолютной погрешности измерения для метода восьми точек представлены в таблице 11. Таблица 11 – Среднее квадратическое отклонение абсолютной погрешности измерения для метода восьми точек

	СКО до калибровки, град.	СКО после калибровки, град.
Калибровка по оси Ox	3,92	1,36
Калибровка по оси Oy	6,09	1,97

На рисунке 19 представлены зависимости углов до и после калибровки для фиксированной оси Ox .

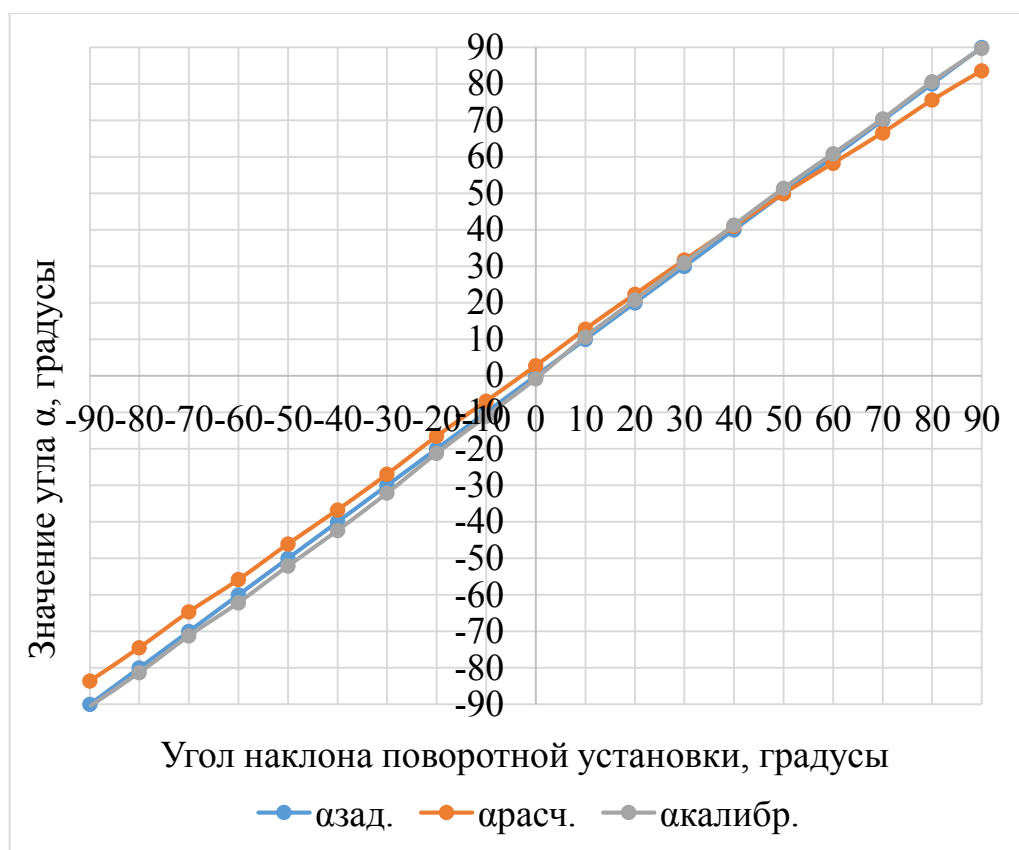


Рисунок 19 – Зависимости углов до и после калибровки для фиксированной оси Ox

Для сравнения результатов расчета построим графики абсолютной погрешности до и после калибровки, графики представлены на рисунке 20.

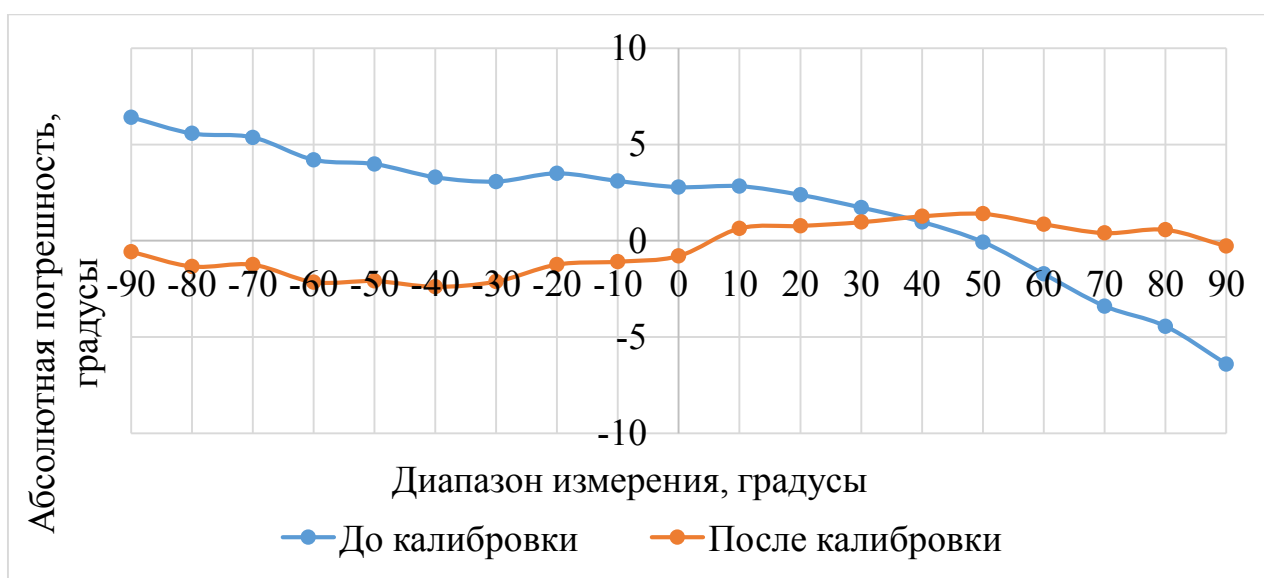


Рисунок 20 – Графики абсолютной погрешности до и после калибровки для фиксированной оси Ox

На рисунке 21 представлены зависимости углов до и после калибровки для фиксированной оси Ox .

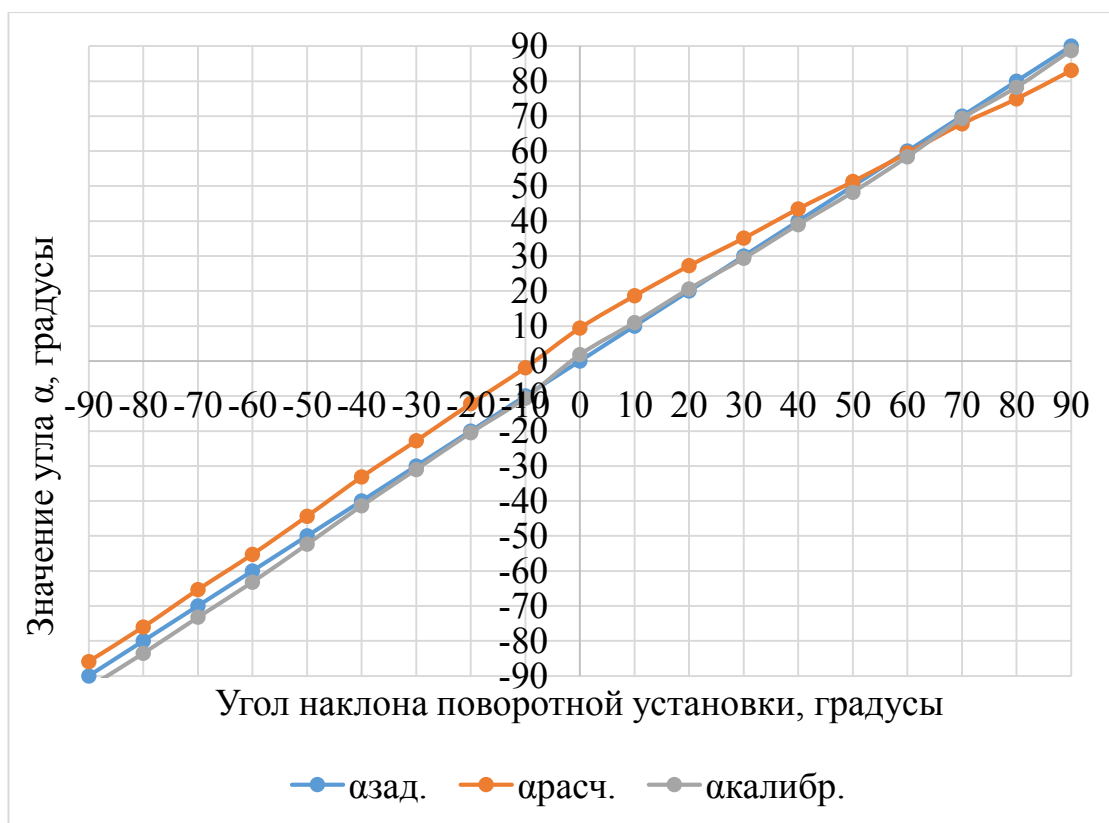


Рисунок 21 – Зависимости углов до и после калибровки для фиксированной оси Oy

Построим графики абсолютной погрешности до и после калибровки, графики представлены на рисунке 22.

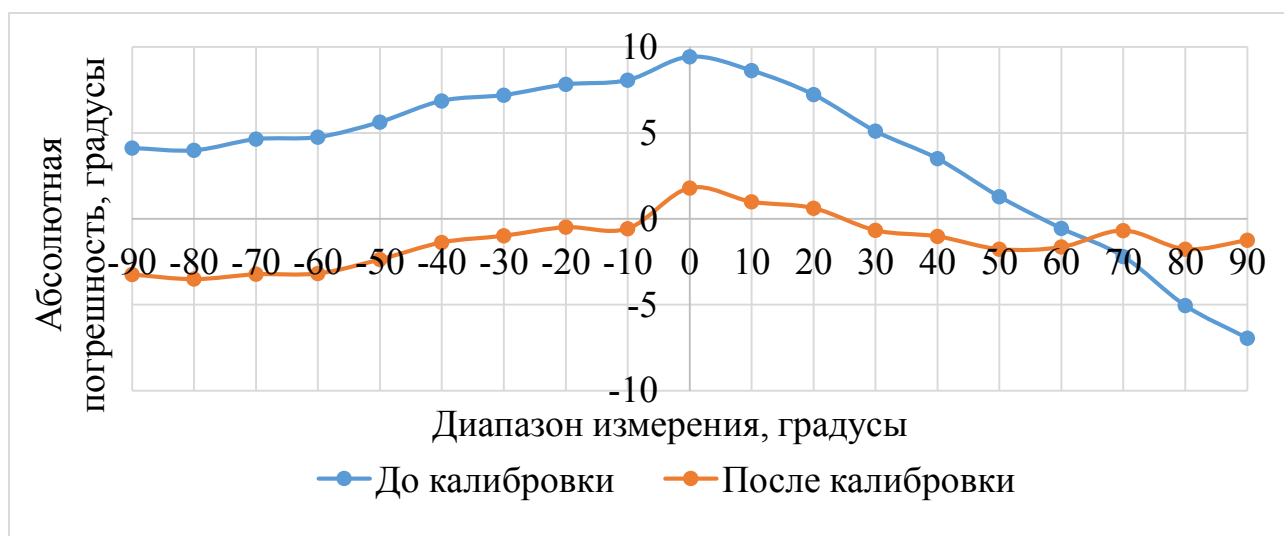


Рисунок 22 – Графики абсолютной погрешности до и после калибровки для фиксированной оси Oy

Вывод: как видно из графиков, откалиброванные значения углов почти идеально совпадают с эталонными – заданными значениями углов. Абсолютные погрешности для откалиброванных значений изменяются в меньшем диапазоне нежели для значений до калибровки. Так же это подтверждает СКО для обеих осей оно заметно уменьшилось после калибровки. Для оси Ox в 2,88 раз, для оси Oy в 3,09 раз.

4.2 Расчет по методике шести точек

В соответствии с уравнением связи измеренного и истинного ускорения (1), необходимо рассчитать матрицу коэффициентов чувствительности и вектор, содержащий погрешности смещения нуля по трем осям.

Следуя методике сначала рассчитаем погрешности смещения нуля по формулам (2):

$$\delta_{см 1} = 50,06 \text{ LSB};$$

$$\delta_{см 2} = 18,33 \text{ LSB};$$

$$\delta_{см 3} = 30,61 \text{ LSB}.$$

Далее вычислим коэффициенты чувствительности и перекрестной чувствительности по формулам (3) и получим следующую матрицу коэффициентов:

$$\begin{bmatrix} 284,67 & -0,67 & -4,5 \\ 2,00 & 284,67 & -2,00 \\ 10,83 & 4,83 & 255,50 \end{bmatrix}.$$

Далее вычисляем истинное ускорение, для этого вычитаем из измеренного ускорения погрешности смещения нуля и умножаем на обратную матрицу коэффициентов чувствительности. Рассчитаем так же абсолютную погрешность. Результат расчета представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Результат калибровки по осям Ox и Oy

$\alpha_{зад}$, град.	Ось Ox фиксированная		Ось Oy фиксированная	
	$\alpha_{калибр}$, град.	Δ , град.	$\alpha_{калибр}$, град.	Δ , град.
-90,00	-88,95	1,05	-89,76	0,24
-80,00	-79,28	0,72	-80,92	-0,92
-70,00	-68,82	1,18	-71,16	-1,16
-60,00	-59,54	0,46	-61,69	-1,69
-50,00	-49,48	0,52	-51,52	-1,52
-40,00	-39,95	0,05	-41,17	-1,17
-30,00	-30,06	-0,06	-31,32	-1,32
-20,00	-19,72	0,28	-21,26	-1,26
-10,00	-10,18	-0,18	-11,66	-1,66
0,00	-0,45	-0,45	0,50	0,50
10,00	9,72	-0,28	9,68	-0,32
20,00	19,65	-0,35	19,67	-0,33
30,00	29,64	-0,36	28,66	-1,34
40,00	39,85	-0,15	38,70	-1,30
50,00	50,05	0,05	48,39	-1,61
60,00	59,79	-0,21	58,89	-1,11
70,00	69,76	-0,24	70,27	0,27
80,00	80,48	0,48	79,71	-0,29
90,00	89,83	-0,17	89,37	-0,63

Результаты расчета среднего квадратического отклонения абсолютной погрешности измерения для метода шести точек представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Среднее квадратическое отклонение абсолютной погрешности измерения для метода шести точек

	СКО до калибровки, град.	СКО после калибровки, град.
Калибровка по оси Ox	3,92	0,50
Калибровка по оси Oy	6,09	1,13

На рисунке 23 представлены зависимости углов до и после калибровки для фиксированной оси Ox .

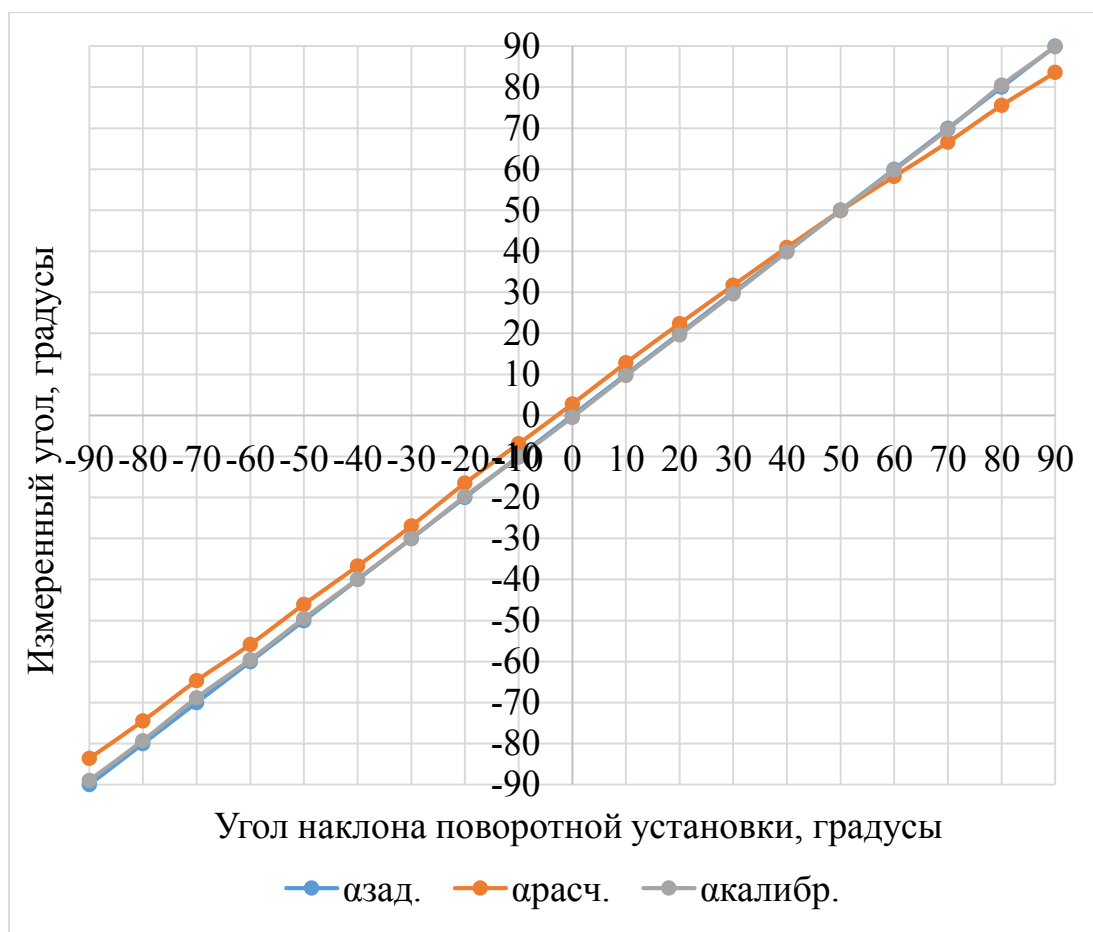


Рисунок 23 – Зависимости углов до и после калибровки для фиксированной оси Ox

Для сравнения результатов расчета построим графики абсолютной погрешности до и после калибровки, графики представлены на рисунке 24.

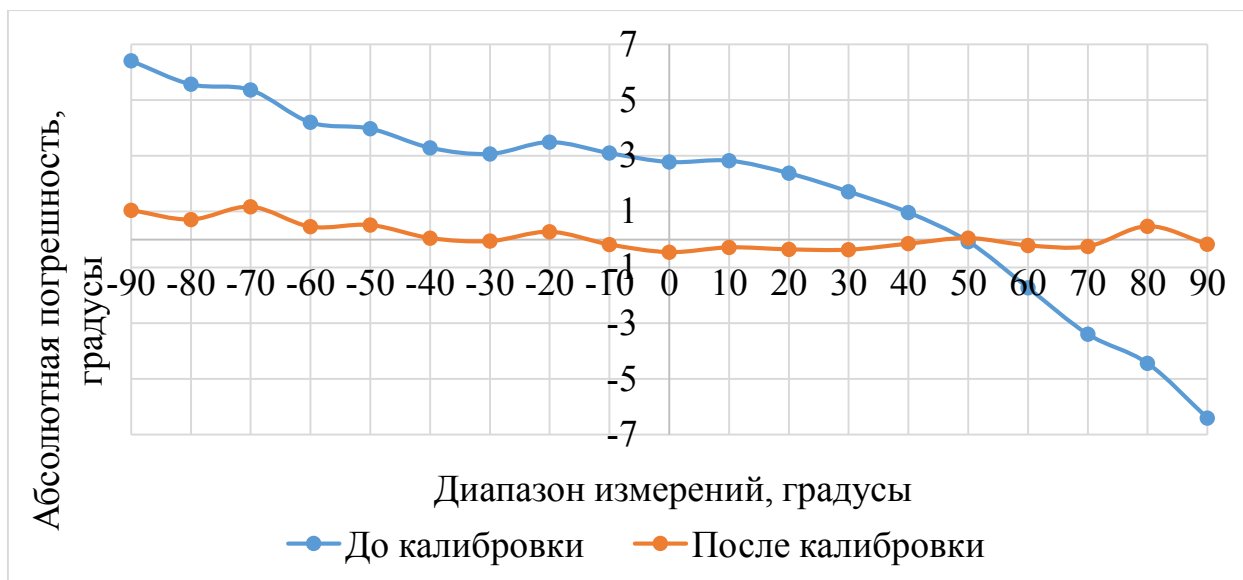


Рисунок 24 – Графики абсолютной погрешности до и после калибровки для фиксированной оси Ox

На рисунке 25 представлены зависимости углов до и после калибровки для фиксированной оси Oy .

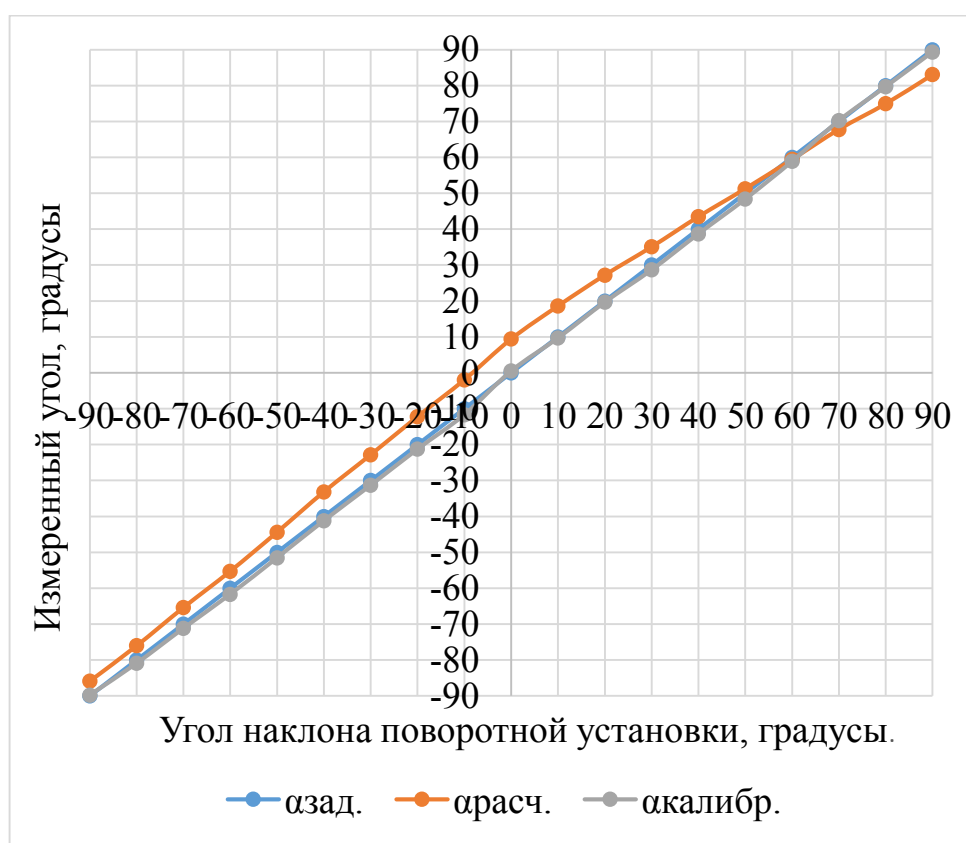


Рисунок 25 – Зависимости углов до и после калибровки для фиксированной оси Oy

Построим графики абсолютной погрешности до и после калибровки, графики представлены на рисунке 26.

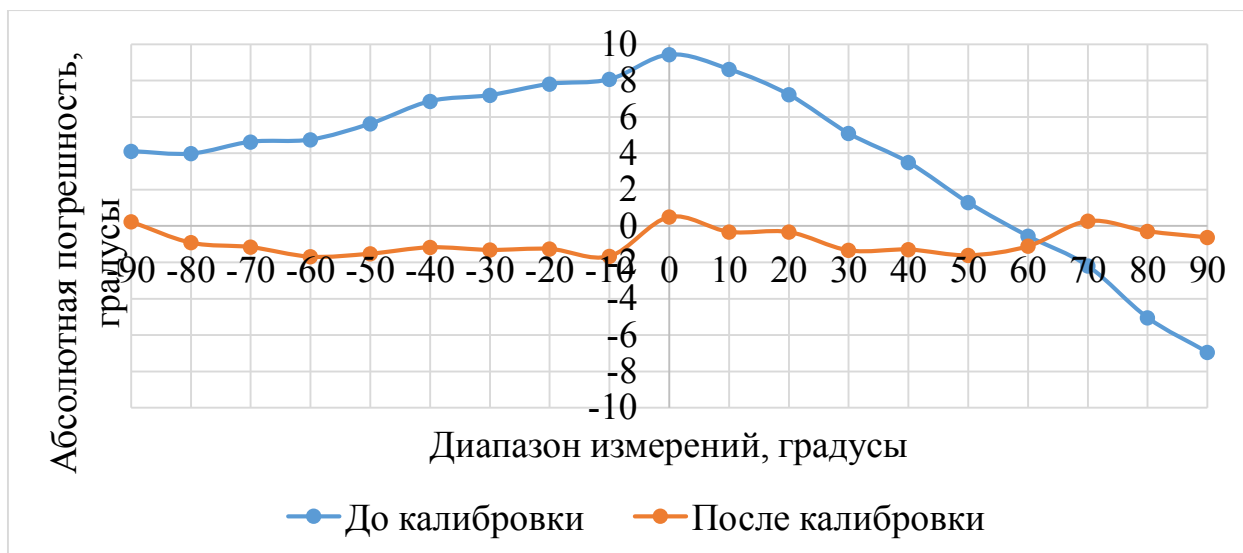


Рисунок 26 – Графики абсолютной погрешности до и после калибровки для фиксированной оси Oy

Вывод: как видно из графиков, откалиброванные значения углов почти идеально совпадают с эталонными – заданными значениями углов. Абсолютные погрешности для откалиброванных значений изменяются в меньшем диапазоне нежели для значений до калибровки. Так же это подтверждает СКО для обеих осей оно заметно уменьшилось после калибровки. Для оси Ox в 7,84 раз, для оси Oy в 5,39 раз.

4.3 Сравнение результатов расчета двух методик

Для удобства сравнения представим результаты расчета для двух методик в таблице 14.

Таблица 14 – Таблица сравнения результатов двух методик калибровки

$\alpha_{зад}$, град.	Метод 8 точек				Метод 6 точек			
	Ось Ox		Ось Oy		Ось Ox		Ось Oy	
	$\alpha_{калибр}$, град.	Δ , град.	$\alpha_{калибр}$, град.	Δ , град.	$\alpha_{калибр}$, град.	Δ , град.	$\alpha_{калибр}$, град.	Δ , град.
-90	-90,57	-0,57	-93,24	-3,24	-88,95	1,05	-89,76	0,24
-80	-81,33	-1,33	-83,51	-3,51	-79,28	0,72	-80,92	-0,92
-70	-71,24	-1,24	-73,23	-3,23	-68,82	1,18	-71,16	-1,16
-60	-62,15	-2,15	-63,18	-3,18	-59,54	0,46	-61,69	-1,69

Окончание таблицы 14

$\alpha_{зад},$ град.	$\alpha_{калибр},$ град.	$\Delta,$ град.	$\alpha_{калибр},$ град.	$\Delta,$ град.	$\alpha_{калибр},$ град.	$\Delta,$ град.	$\alpha_{калибр},$ град.	$\Delta,$ град.
-50	-52,10	-2,10	-52,37	-2,37	-49,48	0,52	-51,52	-1,52
-40	-42,39	-2,39	-41,38	-1,38	-39,95	0,05	-41,17	-1,17
-30	-32,12	-2,12	-30,99	-0,99	-30,06	-0,06	-31,32	-1,32
-20	-21,24	-1,24	-20,49	-0,49	-19,72	0,28	-21,26	-1,26
-10	-11,09	-1,09	-10,57	-0,57	-10,18	-0,18	-11,66	-1,66
0	-0,79	-0,79	1,79	1,79	-0,45	-0,45	0,50	0,50
10	10,65	0,65	10,99	0,99	9,72	-0,28	9,68	-0,32
20	20,77	0,77	20,62	0,62	19,65	-0,35	19,67	-0,33
30	30,97	0,97	29,33	-0,67	29,64	-0,36	28,66	-1,34
40	41,27	1,27	38,97	-1,03	39,85	-0,15	38,70	-1,30
50	51,40	1,40	48,23	-1,77	50,05	0,05	48,39	-1,61
60	60,86	0,86	58,35	-1,65	59,79	-0,21	58,89	-1,11
70	70,40	0,40	69,31	-0,69	69,76	-0,24	70,27	0,27
80	80,57	0,57	78,24	-1,76	80,48	0,48	79,71	-0,29
90	89,72	-0,28	88,74	-1,26	89,83	-0,17	89,37	-0,63

Графики абсолютной погрешности для двух методов с фиксированными осями Ox и Oy представлены на рисунках 27 и 28 соответственно.

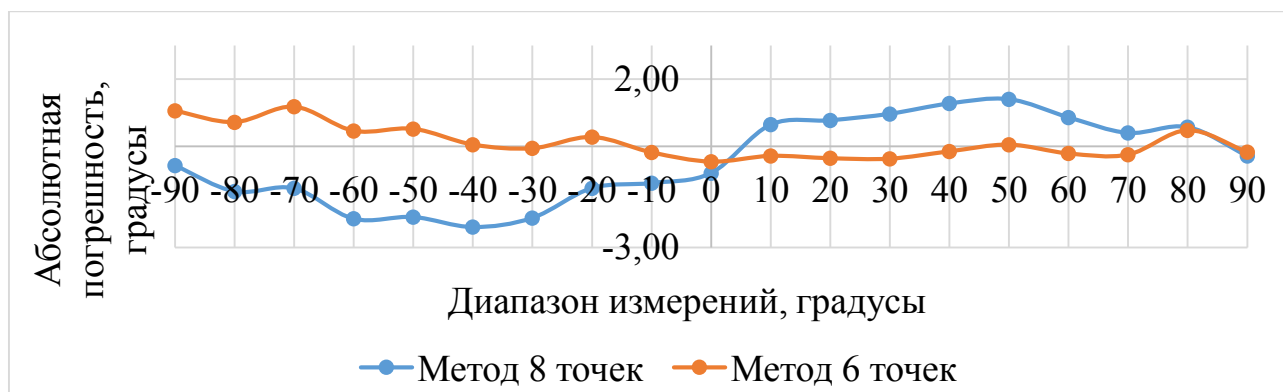


Рисунок 27 – Графики абсолютной погрешности для двух методов с фиксированной осью Ox

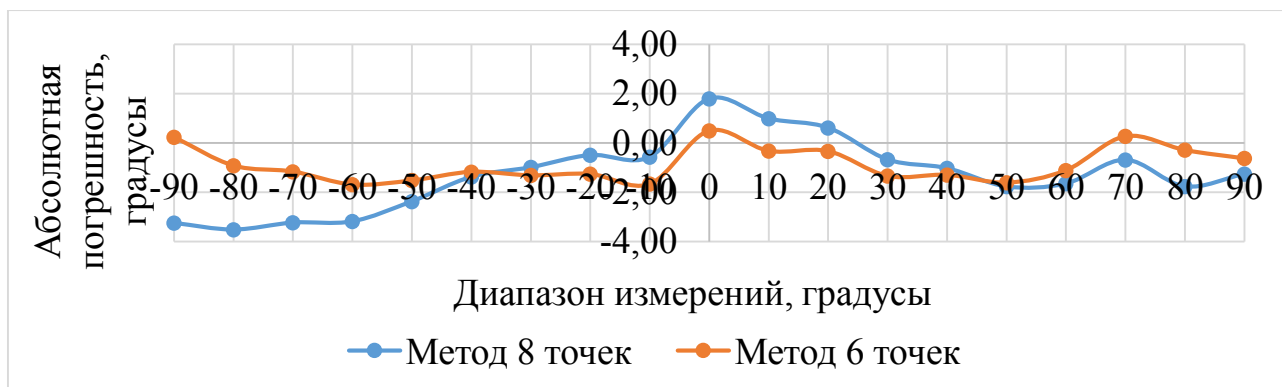


Рисунок 28 – Графики абсолютной погрешности для двух методов с фиксированной осью Oy

Значение СКО по обоим методикам представлено в таблице 15.

Таблица 15 – Значение СКО для двух методик

	СКО по методу 8 точек, град.	СКО по методу 6 точек, град.
Калибровка по оси Ox	1,36	0,50
Калибровка по оси Oy	1,97	1,13

Вывод: как видно из графиков, значения абсолютной погрешности для откалиброванных значений по методу 6 точек по обеим осям гораздо меньше и изменяются в более узком диапазоне измерения. Если сравнивать значения СКО, то следует отметить, что по методу 6 точек значения СКО гораздо меньше (в 2,72 раза по оси Ox и в 1,74 раз по оси Oy меньше чем по методу 8 точек).

Наличие меньших погрешностей откалиброванных значений углов по методу 6 точек можно объяснить тем, что в данной методике используется матрица коэффициентов, которая содержит коэффициенты чувствительности для каждой оси и кроме того коэффициенты, которые учитывают влияние ускорения осей друг на друга. В расчете по методу 8 точек так же используются коэффициенты чувствительности (k_{31} , k_{32}), но они учитывают чувствительность сразу для двух осей, так как математическая модель основана на измерении проекции вектора гравитационного ускорения на плоскость, образованную двумя осями чувствительности акселерометра.

4.4 Перепрошивка МЭМС-акселерометра

Для калибровки акселерометра необходимо дополнить алгоритм имеющейся программы поправочными коэффициентами и формулами для вычисления истинного ускорения по двум методикам. Так как данная работа подразумевает обучение студентов, необходимо сделать программу интерактивной, это означает, что студент должен рассчитать значения поправочных коэффициентов в доступной среде (Excel, Mathcad и др.), после чего включив программу, ему необходимо будет ввести коэффициенты и получить вывод данных уже откалиброванного датчика. Так же сделать доступным выбор методики калибровки и вывод данных без калибровки.

Блок-схема программы представлена на рисунке 29.

Листинг дополненной программы представлен в Приложении В.

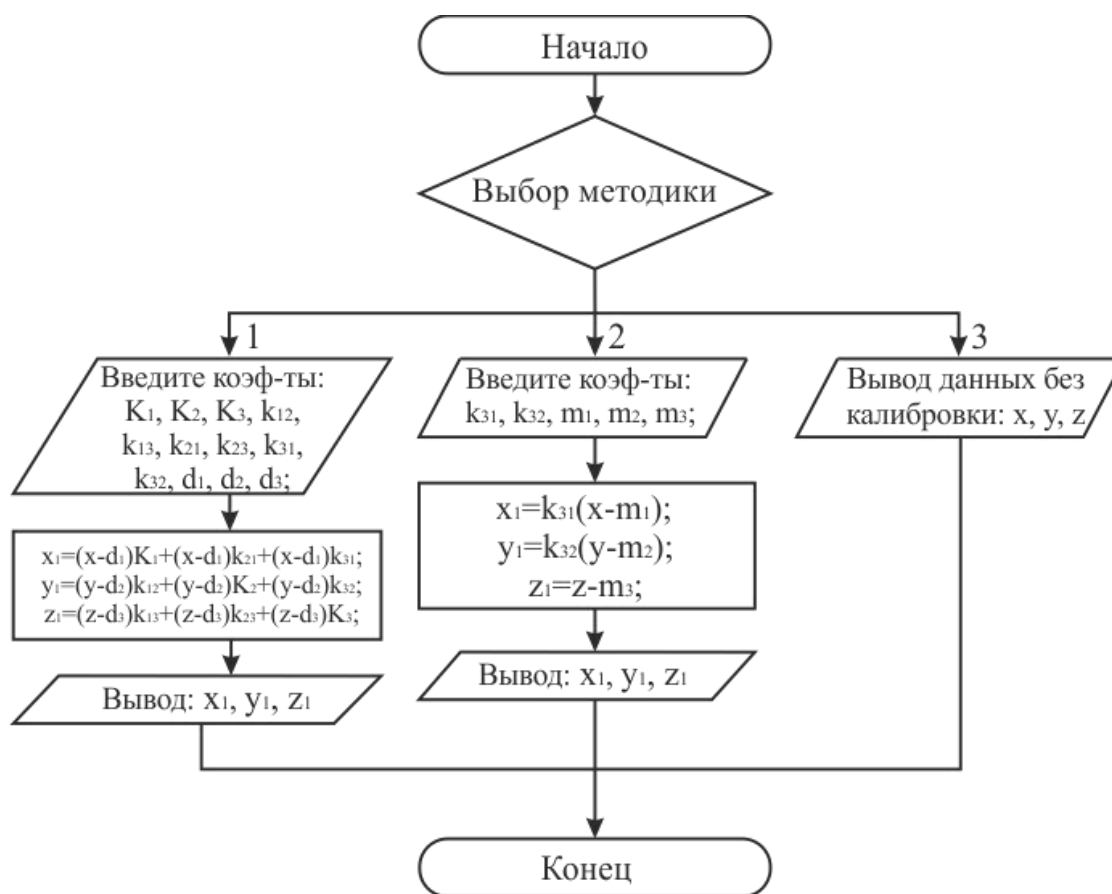


Рисунок 29 – Блок-схема алгоритма программы

1 – Метод шести точек; 2 – Метод восьми точек; 3 – Вывод данных без калибровки

В методе шести точек используются коэффициенты обратной матрицы:

$$\begin{bmatrix} 284,67 & -0,67 & -4,5 \\ 2,00 & 284,67 & -2,00 \\ 10,83 & 4,83 & 255,50 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0,00351 & -0,0000257 & -0,000148 \\ 0,00000717 & 0,00351 & -0,0000667 \\ 0,0000618 & 0,0000618 & 0,00391 \end{bmatrix}.$$

Окно результатов доработанной программы представлено на рисунках 30 и 31.

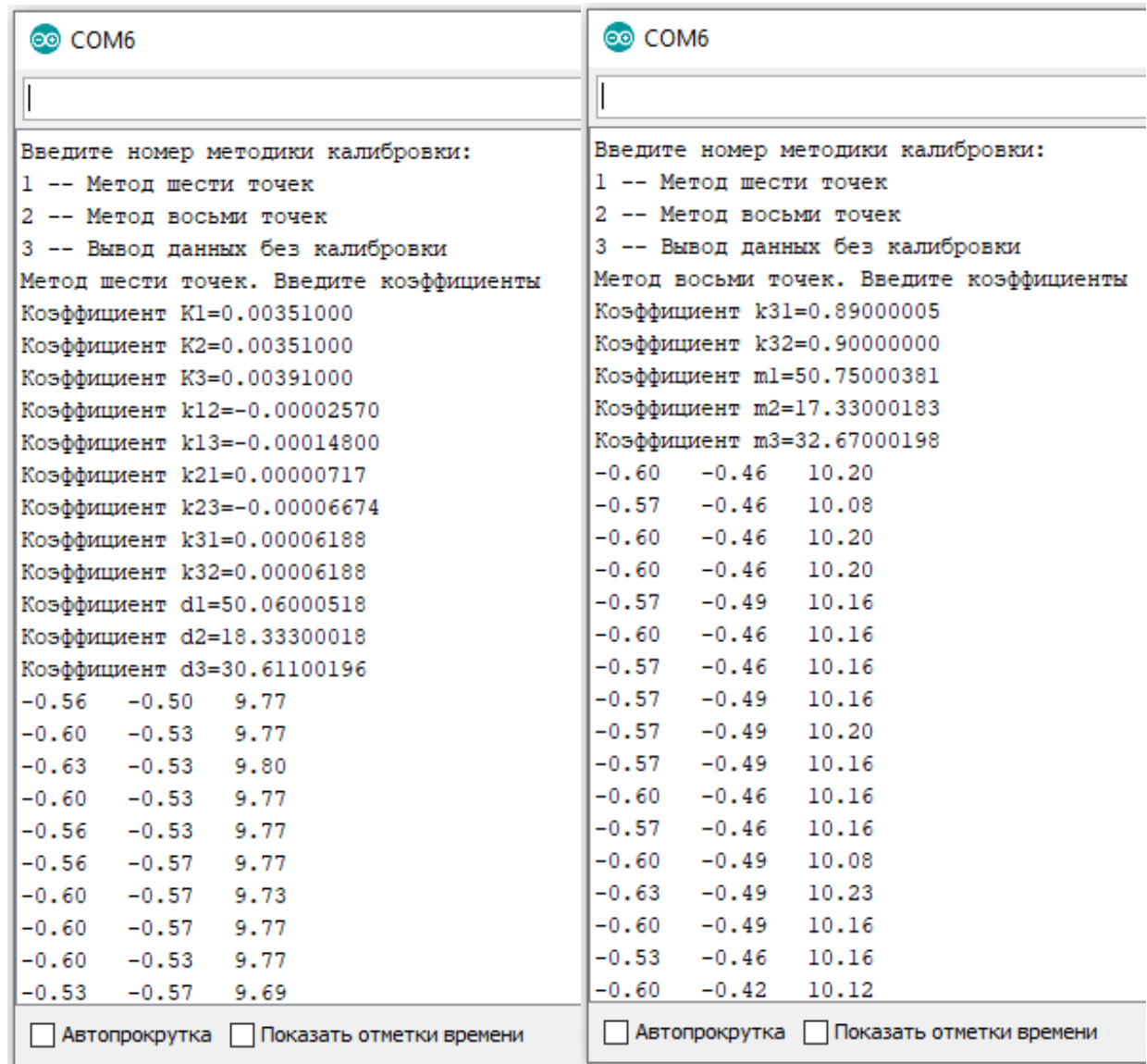


Рисунок 30 – Окно результатов программы

Для удобства конечный вывод данных для всех режимов производится в единицах измерения ускорения м/с^2 . На рисунке 31 слева отражен вывод данных в единицах измерения акселерометра г/LSB , такой режим был использован для снятия данных изначально. Справа же вывод данных в м/с^2 , который используется в конечном варианте программы.

Для проведения лабораторной работы рекомендуется выполнять съем показаний в m/s^2 для избежания ошибок из-за несоответствия единиц измерения.

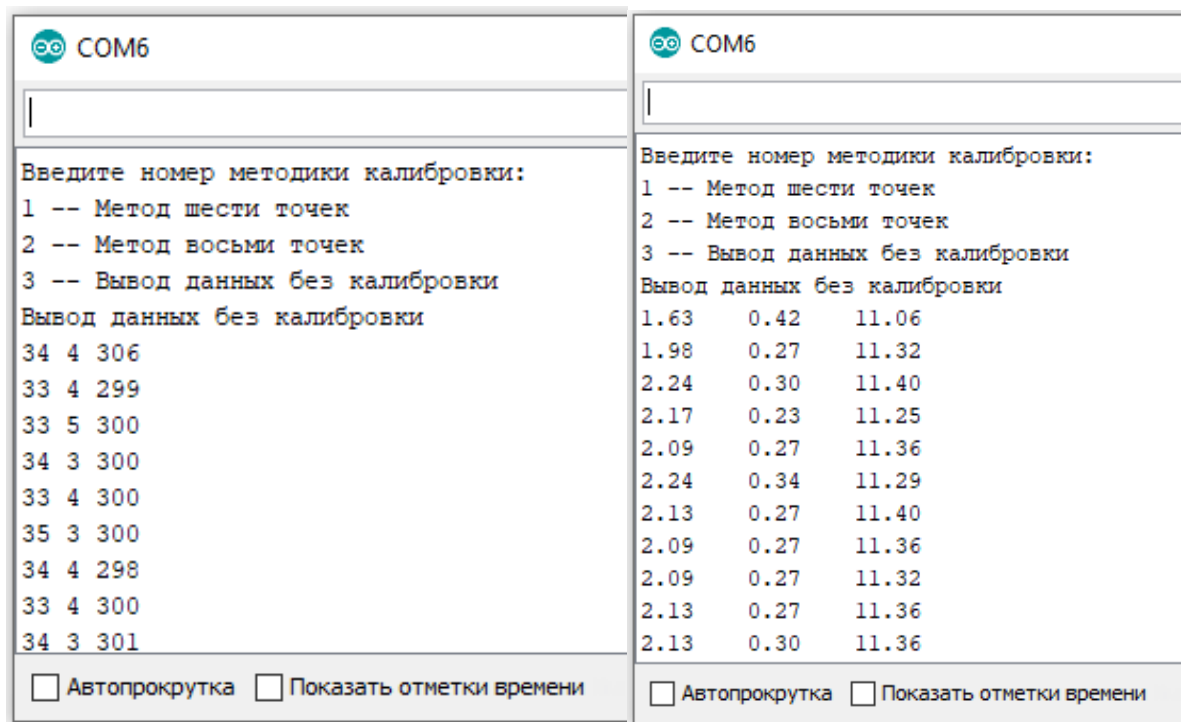


Рисунок 31 – Окно результатов программы без калибровки

Вывод по 4 разделу: для проведения эксперимента по измерению проекции вектора гравитационного ускорения собрана экспериментальная установка. Были проведены измерения проекции \vec{g} на две оси чувствительности акселерометра. Рассчитаны калибровочные коэффициенты чувствительности и смещение нуля по двум методикам калибровки. Проведена калибровка акселерометра. Рассчитаны абсолютные погрешности результатов измерений до и после калибровки, проведен сравнительный анализ двух методик. Методика 6-точечной калибровки по результатам расчетов признана наилучшей.

11. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019 г. – 23 с.

12. ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Стадии разработки (С поправками). – М.: Стандартинформ, 2019 г. – 9 с.

13. ГОСТ Р 52931-2008. Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2009 г. – 31 с.

14. ГОСТ 2.102-68 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов. – М.: Стандартинформ, 2011 г. – 29 с.

15. Пат.120215 Российская Федерация, МПК G01C 19/00. Кронштейн поворотный для проверки гироскопического оборудования и приспособления для калибровки его / Ю.А. Борисов, П.Л. Серов, И.С. Новик. – №2012110983/28; заявл. 21.03.2012; опубл. 10.09.2012, Бюл.№25. – 32 с.

16. Аврутов, В.В. Испытания инерциальных приборов: учебное пособие / В.В. Аврутов. – К.: НТУУ "КПИ им. Игоря Сикорского", 2016. – 205 с.