



«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»

Выпускная квалификационная работа на тему:

Малогабаритная бесплатформенная курсовертикаль

Студент Толсточенко Даниил Игоревич
Группа ПС4-121

Москва, 2019г.

Цель работы

Разработка малогабаритного бесплатформенного инерциального измерительного блока (БИИБ), решающего задачу определения параметров ориентации объекта и имеющего низкую стоимость.

Актуальность работы

В областях техники таких как робототехника, гражданские БПЛА, системы ориентации и стабилизации подвижных объектов на которые наложены ограничения: по габаритам, по энергопотреблению, массе, стоимости и существует потребность в использовании БИИБ, соответствующих определённым требованиям при минимальных габаритах и стоимости.

Задачи ВКР

- Анализ погрешностей датчиков угловых скоростей и линейных ускорений
- Моделирование работы БИИБ для системы ориентации курсовертикали с целью определения её точностных характеристик
- Разработка алгоритма системы ориентации курсовертикали на основе БИИБ
- Разработка конструкции БИИБ
- Разработка ПО определения калибровочных параметров БИИБ и алгоритма расчёта параметров системы ориентации

Технические характеристики разрабатываемой курсовертикали

Точностные параметры

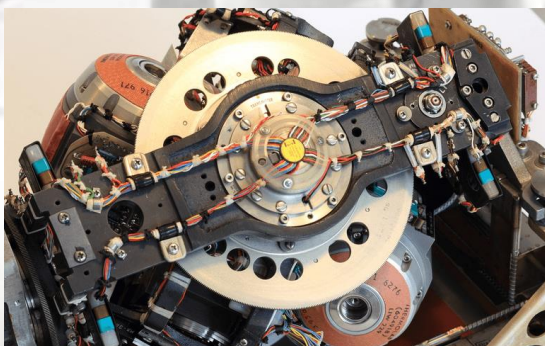
- Углы ориентации «связанной» системы координат:
 - Статический режим до $\pm 1.0^\circ$
 - Динамический режим до $\pm 2.5^\circ$
- Угол курса: не более 10° за 10 мин
- Угловые скорости: $0.1^\circ/\text{сек}$
- Кажущиеся ускорения: 0.05 м/с/с

Конструктивные требования

- Габариты:
 - Длина не более **60** мм
 - Ширина не более **60** мм
 - Высота не более **30** мм
- Масса до **100** г

Сравнение систем ориентации

Курсовертикаль платформенного типа



Курсовертикаль
в навигационном
комплексе КН-23

Платформенная
Курсовертикаль
КВ-1



Курсовертикаль бесплатформенного типа

БИНС Ellipse2-E



БИНС INS-B

БИНС VN-200



Высокая точность определения
параметров ориентации

Малые габариты, потребление,
вес

MPU6050

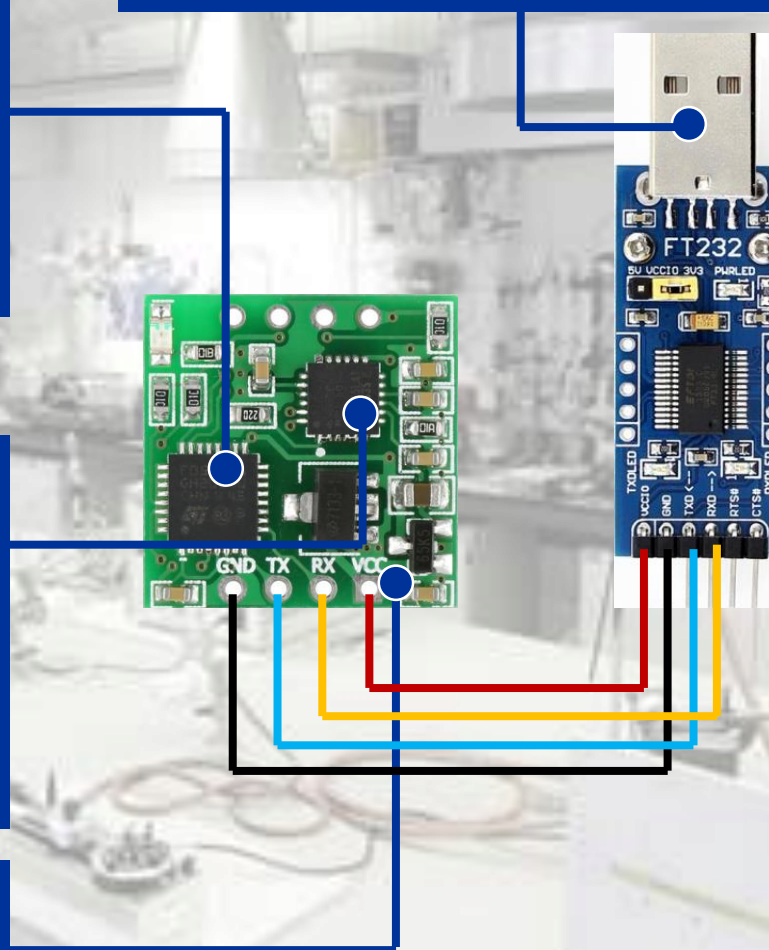
- 3-осевой гироскоп
- 3-осевой акселерометр
- Температурный датчик
- Интерфейс I2C

STM32F051

- Питание 2..3.6 В
- Объем памяти 64 кбайт
- Интерфейсы: UART, I2C

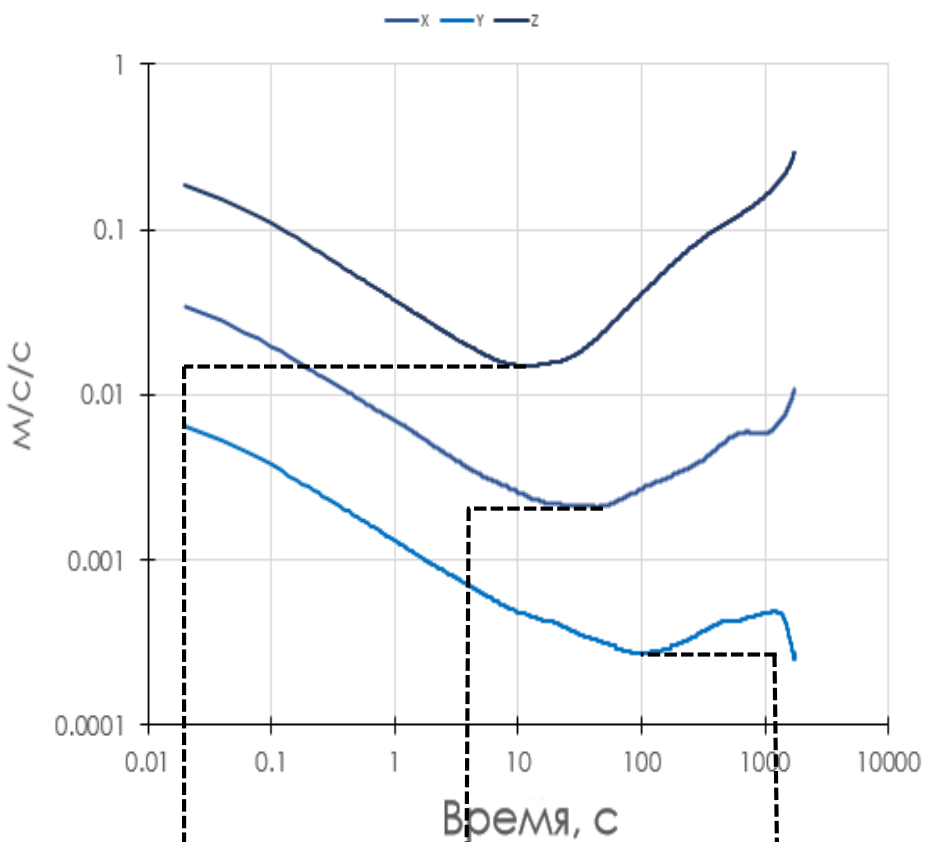
Габариты: 17.5x17.5x1.2 мм

UART-USB конвертер



Анализ погрешностей датчиков первичной информации

Отклонение Аллана для акселерометров



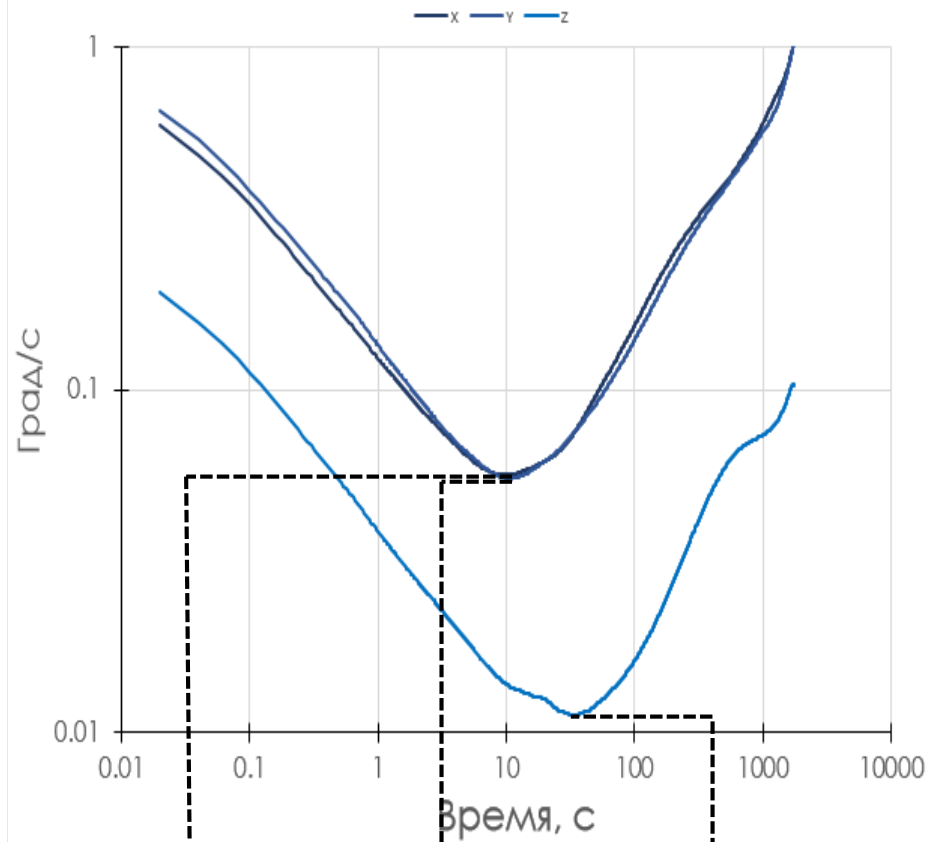
X, м/с/с
0.0024

Y, м/с/с
0.0002

Z, м/с/с
0.0154

Нестабильности нуля
акселерометров

Отклонение Аллана для гироскопов



X, °/ч
131.4

Y, °/ч
126.7

Z, °/ч
42.5

Нестабильности нуля
гироскопов

Модель ошибок определения углов ориентации

Уравнения модели ошибок

Для северного канала

$$\delta \dot{V}_E^{sch} = -g \cdot \Omega_N^{sch} + B_E$$

$$\dot{\Omega}_N^{sch} = \frac{\delta V_E^{sch}}{R} + \omega_N^{dr}$$

Для восточного канала

$$\delta \dot{V}_N^{sch} = g \cdot \Omega_E^{sch} + B_N$$

$$\dot{\Omega}_E^{sch} = -\frac{\delta V_N^{sch}}{R} + \omega_E^{dr}$$

Для азимутального канала

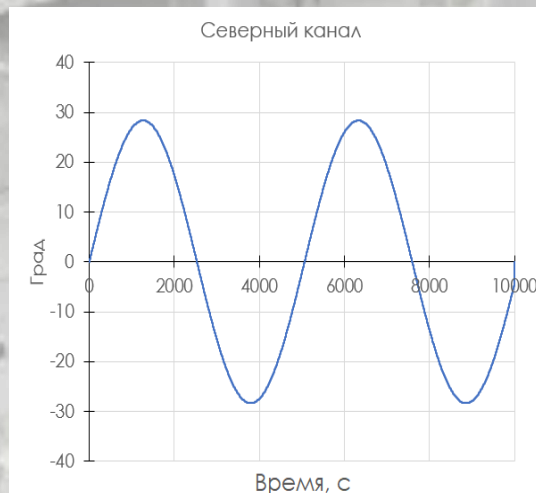
$$\dot{\Omega}_{UP}^{sch} = -\frac{\delta V_E^{sch}}{R} \cdot \operatorname{tg} \varphi + \omega_{UP}^{dr}$$

где $\delta \dot{V}_E^{sch}, \delta \dot{V}_N^{sch}$ - ошибки расчета линейных ускорений;

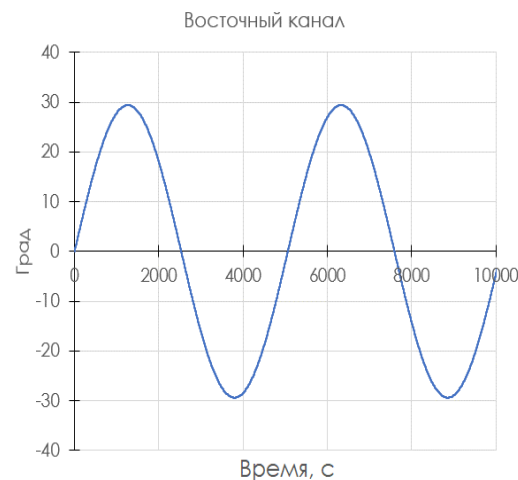
$\dot{\Omega}_E^{sch}, \dot{\Omega}_N^{sch}$ - ошибки расчета угловых скоростей;

B_E, B_N - нестабильность нуля акселерометров;

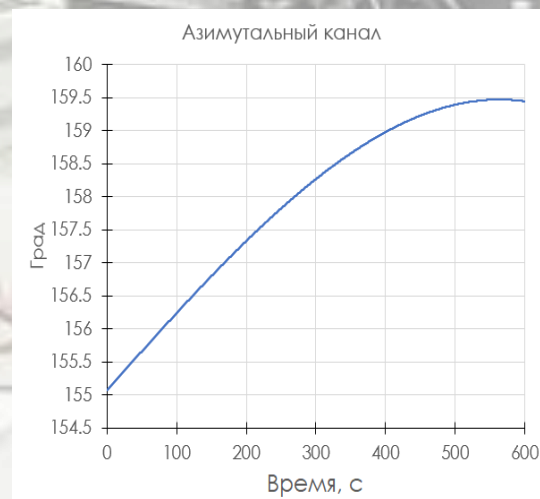
$\omega_E^{dr}, \omega_N^{dr}$ - нестабильность нуля ДУСов.



Ошибка: 28,5°



Ошибка: 30,0°



Ошибка: 4,5°

Модель ошибок

Статический режим с радиальной коррекцией

Уравнения модели ошибок

Для северного канала

$$\delta \dot{V}_E^{sch} = -g \cdot \Omega_N^{sch} + B_E$$

$$\dot{\Omega}_N^{sch} = \omega_N^{dr} + K \cdot \delta \dot{V}_E^{sch}$$

Для восточного канала

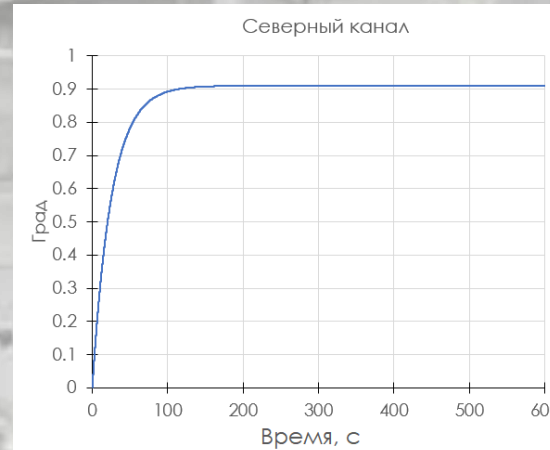
$$\delta \dot{V}_N^{sch} = g \cdot \Omega_E^{sch} + B_N$$

$$\dot{\Omega}_E^{sch} = \omega_E^{dr} - K \cdot \delta \dot{V}_N^{sch}$$

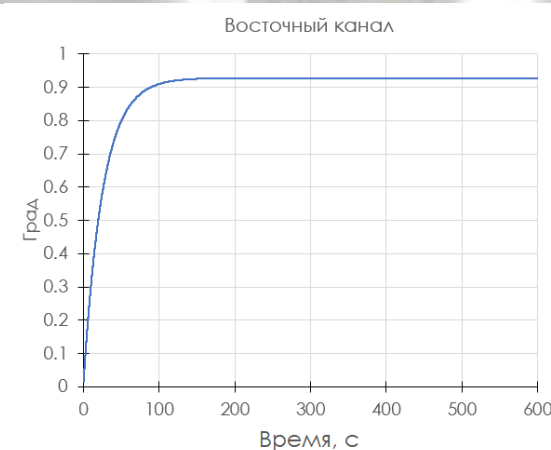
Для азимутального канала

$$\dot{\Omega}_{UP}^{sch} = -\frac{\delta V_E^{sch}}{R} \cdot tg\varphi + \omega_{UP}^{dr}$$

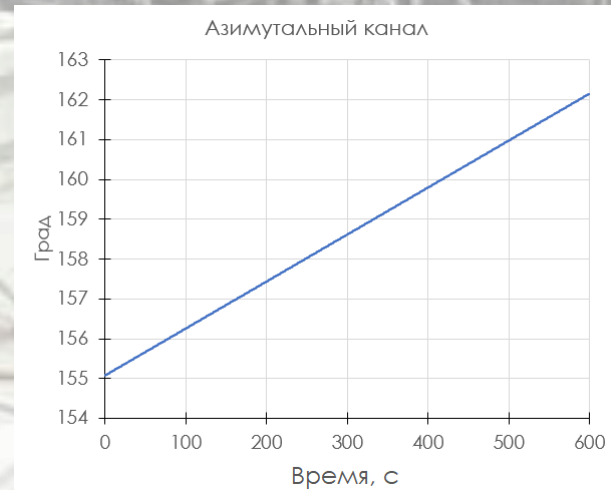
Коэффициент радиальной коррекции **K = 0.00022**



Ошибка: 0,91°



Ошибка: 0,93°



Ошибка: 7,1°

Модель ошибок

Динамический режим с радиальной коррекцией

Уравнения модели ошибок

Для северного канала

$$\delta \dot{V}_E^{nst} = -g \cdot \Omega_N^{nst} + a_N \cdot \Omega_{UP}^{nst} + \mu_E \cdot a_E + B_E$$

$$\dot{\Omega}_N^{nst} = \omega_N^{dr} + K \cdot \delta \dot{V}_E^{nst}$$

Для восточного канала

$$\delta \dot{V}_N^{nst} = g \cdot \Omega_E^{nst} - a_E \cdot \Omega_{UP}^{nst} + \mu_N \cdot a_N + B_N$$

$$\dot{\Omega}_E^{nst} = \omega_E^{dr} - K \cdot \delta \dot{V}_N^{nst}$$

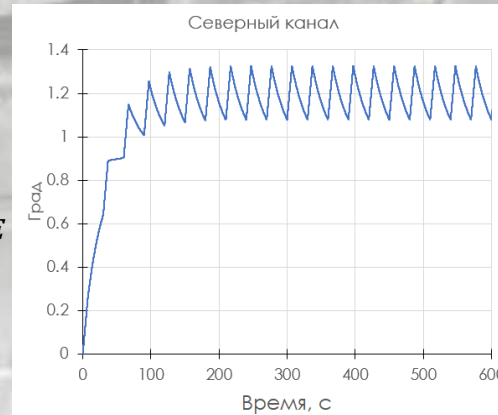
Для азимутального канала

$$\dot{\Omega}_{UP}^{sch} = -\frac{\delta V_E^{sch}}{R} \cdot tg\varphi + \omega_{UP}^{dr}$$

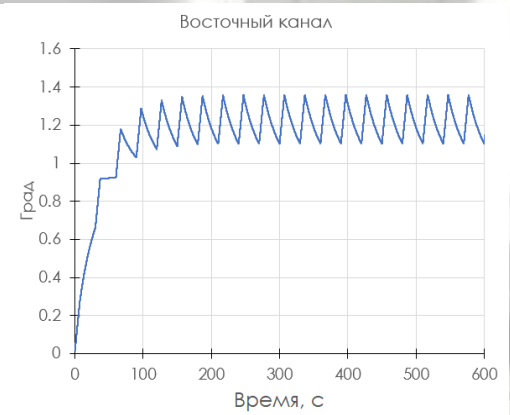
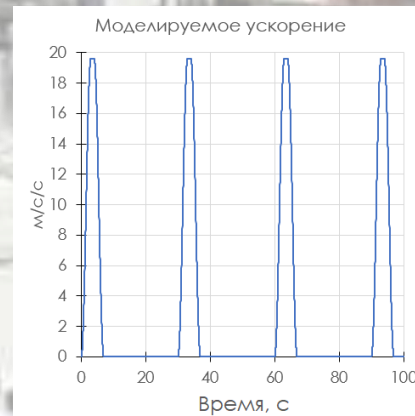
где a_E, a_N - ускорения;

μ_E, μ_N - погрешность масштабного коэффициента.

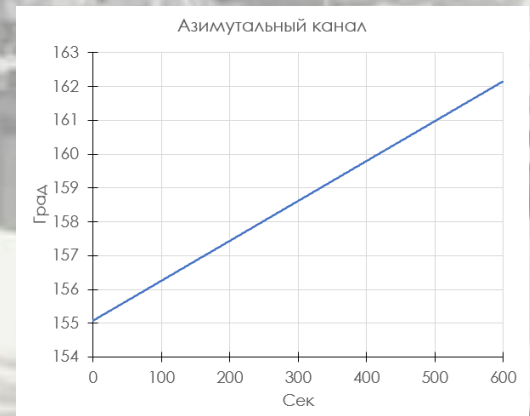
Коэффициент радиальной коррекции **K = 0.004**



Ошибка: 1,3°

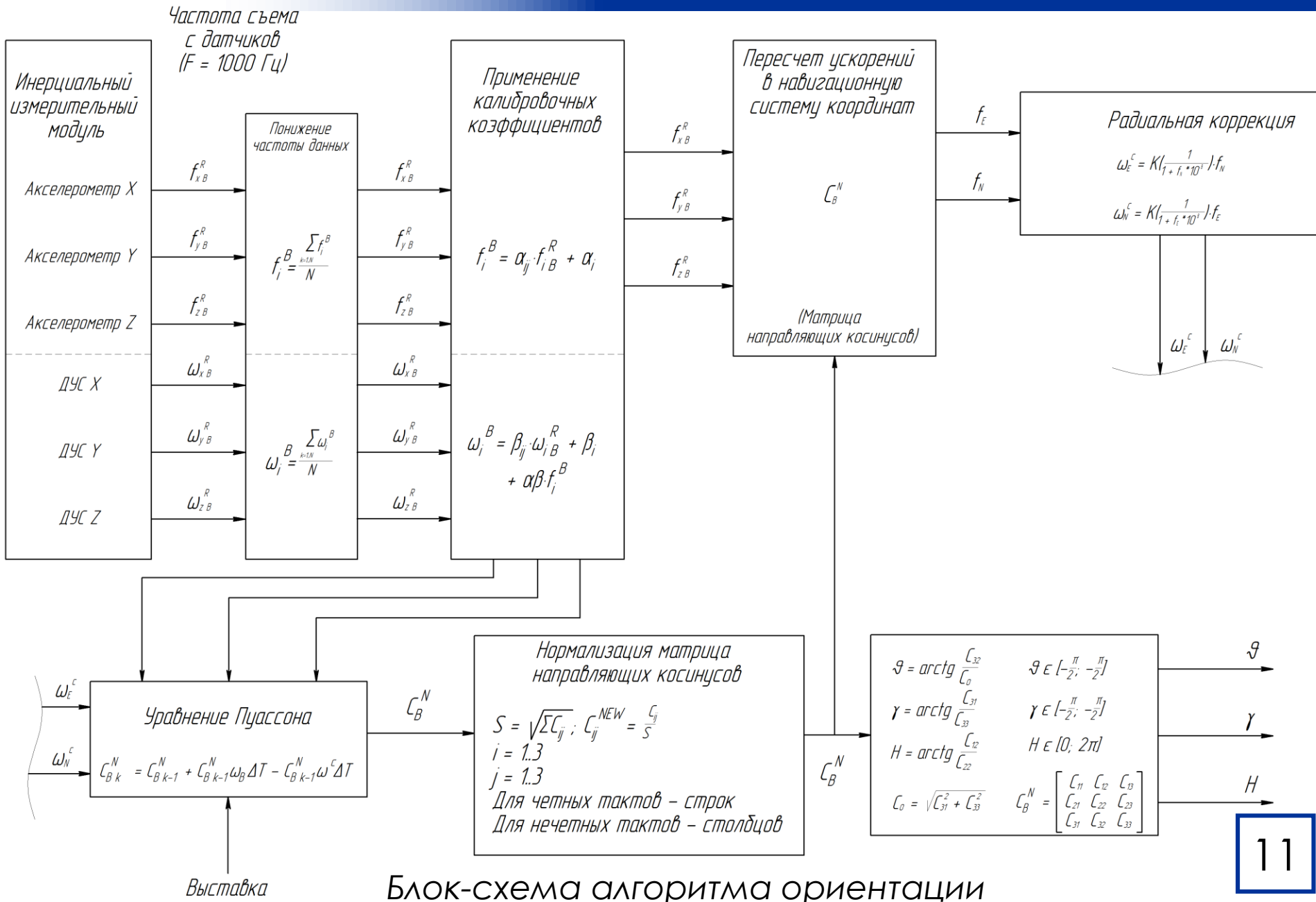


Ошибка: 1,4°

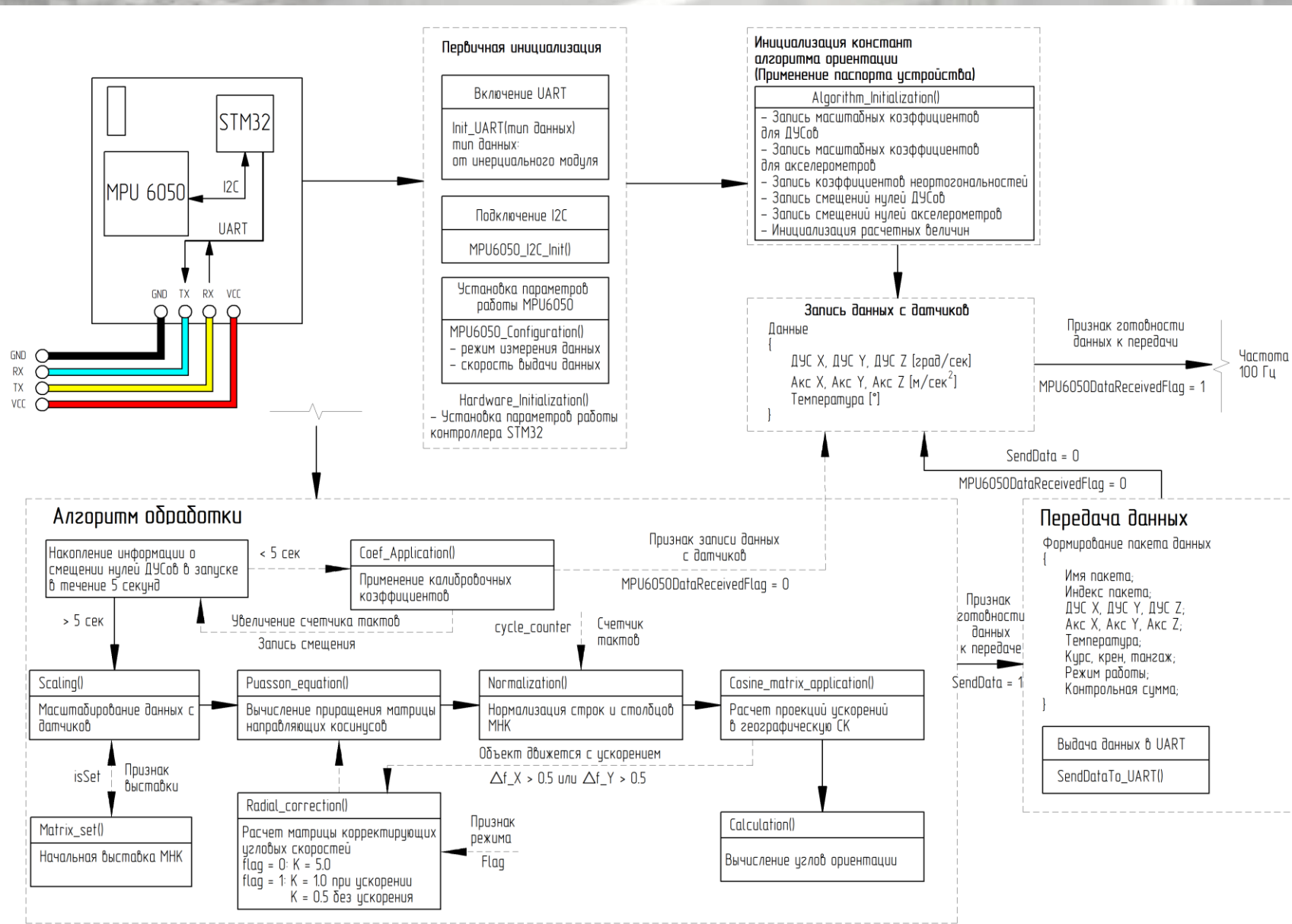


Ошибка: 7,5°

Алгоритм ориентации



Структура ПО микроконтроллера

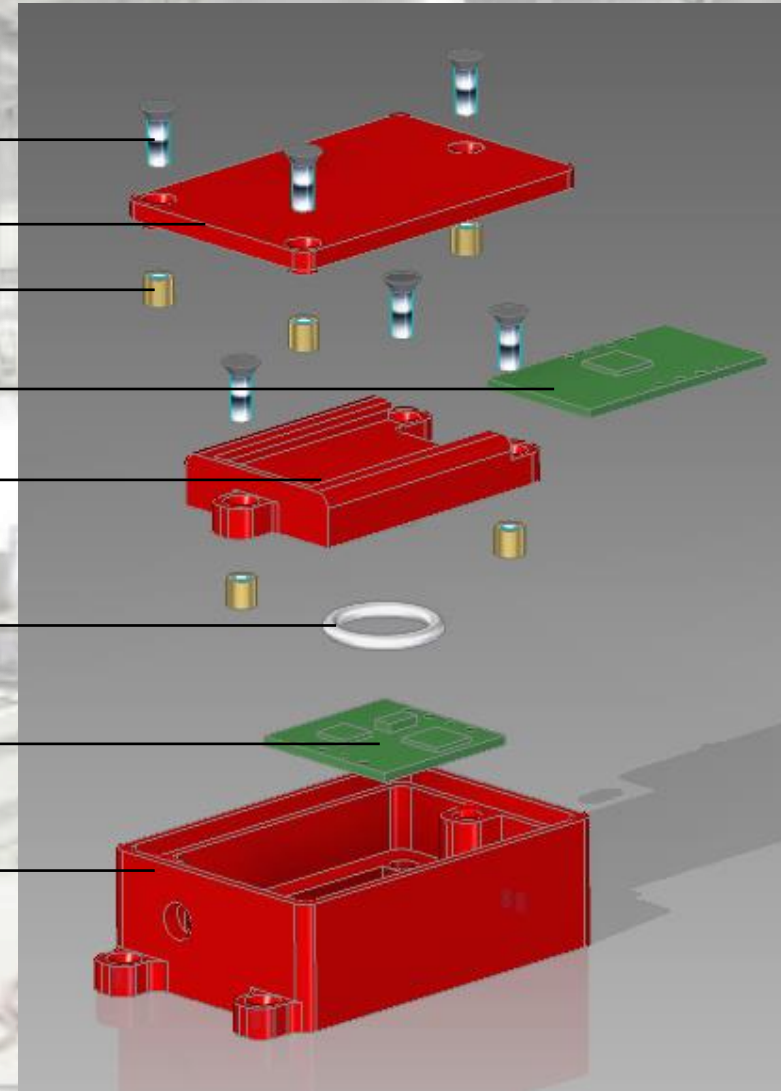


Конструкция курсовертикали



Габариты корпуса
курсовертикали

- Болт M2
- Крышка
- Бобышка M2
- Устройство
обмена
- Прижим
- Резиновая
прокладка
- Плата
микроконтроллера
- Корпус



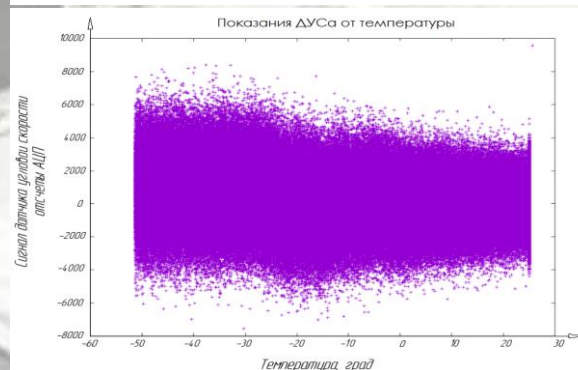
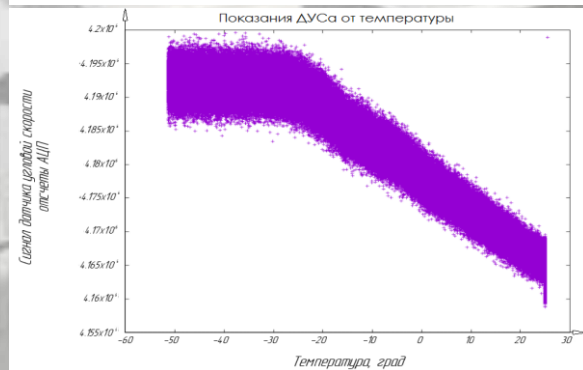
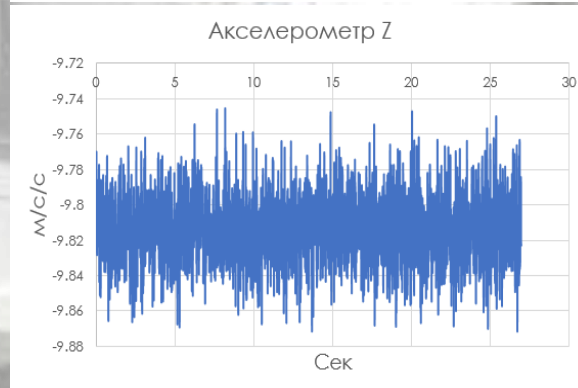
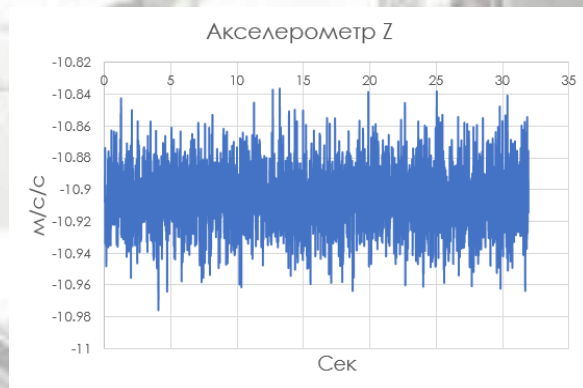
Размеры конструкции: 52x28x13,8 мм

Разнесение сборки

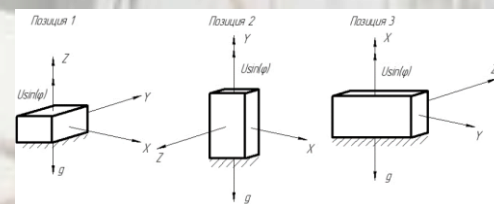
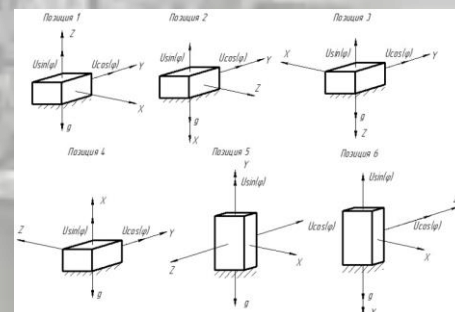
Калибровка датчиков курсовертикали

До калибровки

После калибровки



Установка системы на технологическом столе

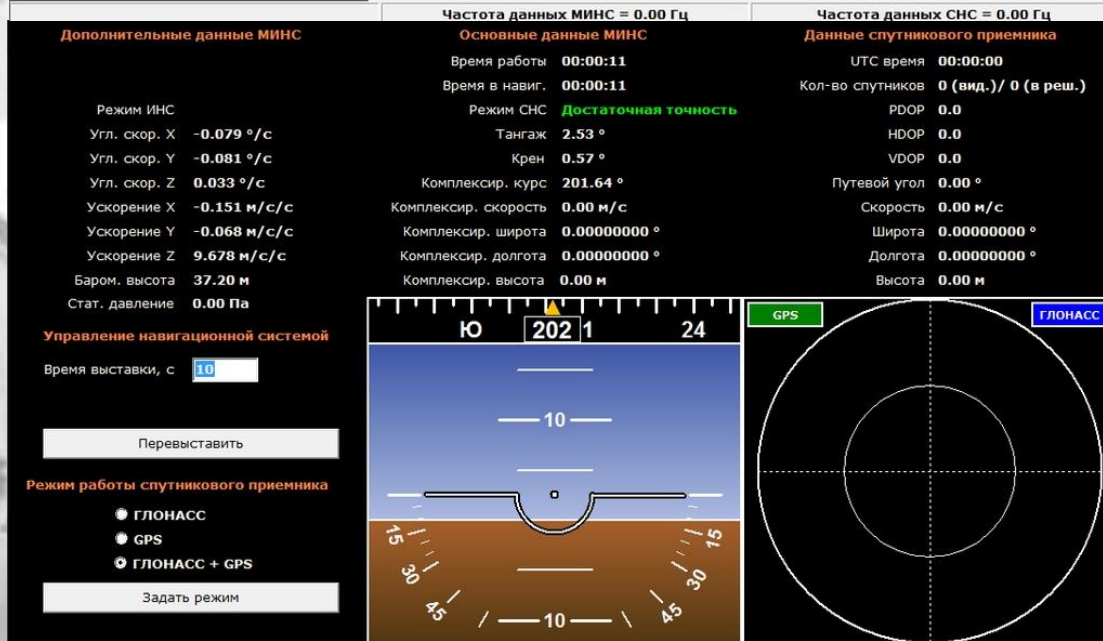


Позиции системы для записи данных

Результаты калибровки

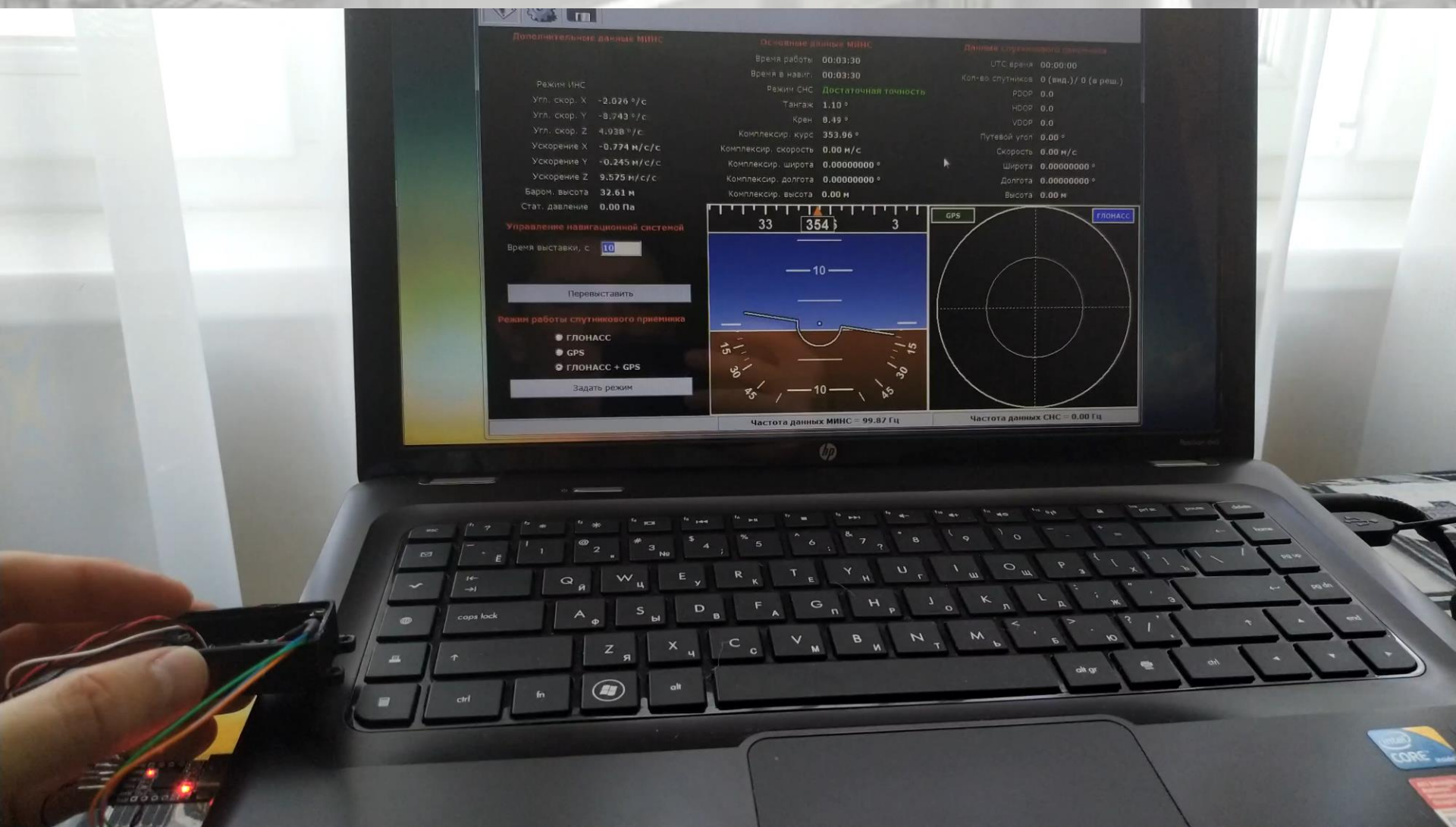


Показания курсовертикали до применения паспорта устройства



Показания курсовертикали после применения паспорта устройства

Демонстрация работы устройства



В ходе работы выполнено:

1. Анализ датчиков угловых скоростей и линейных ускорений в соответствии с выбранной моделью ошибок
2. Разработана конструкция прибора ориентации
3. Разработано программное обеспечение для проведения калибровки датчиков первичной информации системы
4. Разработано программное обеспечение для микроконтроллера STM32 семейства ARM cortex-M для расчета параметров ориентации

Области применения:



Промышленные роботы



Беспилотники



Радиолокаторы

Результаты разработки:

1. Габариты – 52x28x13,8 мм
2. Выполнены требования по точности
3. Стоимость - < 500 рублей
4. Разработано программное обеспечение