

Разработка трехмерного четырёхпозиционного датчика магнитного поля

направление 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
кафедра технической электроники

Студент: Наумов Б.С., группа ТЭН-21
Руководитель: Старший преподаватель,
Шабронов А.А.
Новосибирск, 2026



СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
И ИНФОРМАТИКИ

Цель: Разработка бюджетного устройства для определения положения источника магнитного поля и измерение частоты его вращения.

Задачи:

1. Выбор компонентной базы.
2. Разработка принципиальной схемы.
3. Разработка программного обеспечения, для реализации алгоритмов калибровки и спектрального анализа.
4. Проведение экспериментальной проверки.



Анализ существующих решений.



Рисунок 1 – Техномаг
Диапазон: ± 20 Гс
Цена: 110 000 руб



Рисунок 2 – Magex
Диапазон: от 0,2 до 1 Гс
Цена: 3 000 000 руб



Рисунок 3 - Dexinmag
Диапазон: $\pm 300\,000$ Гс
Цена: 1 000 000 руб

Не измеряют частоту вращения МП !



Аппаратная реализация

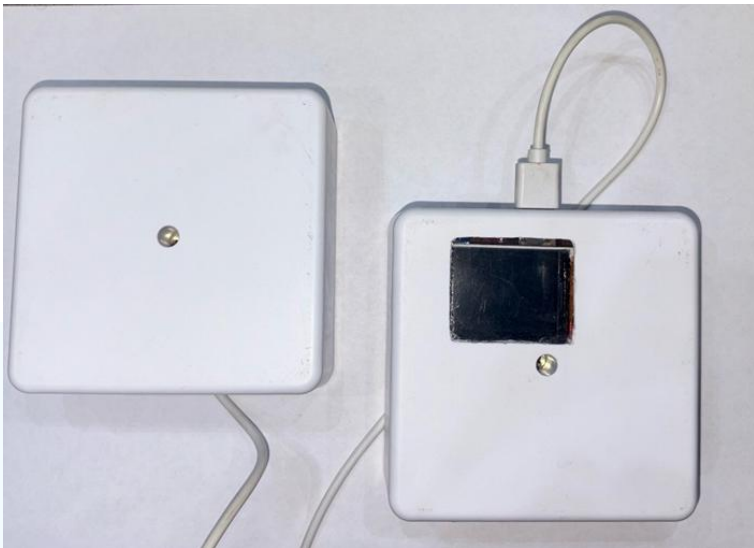


Рисунок 4 – Готовое устройство
Себестоимость: 2000 руб.



Рисунок 5 – Блок с
чувствительными элементами

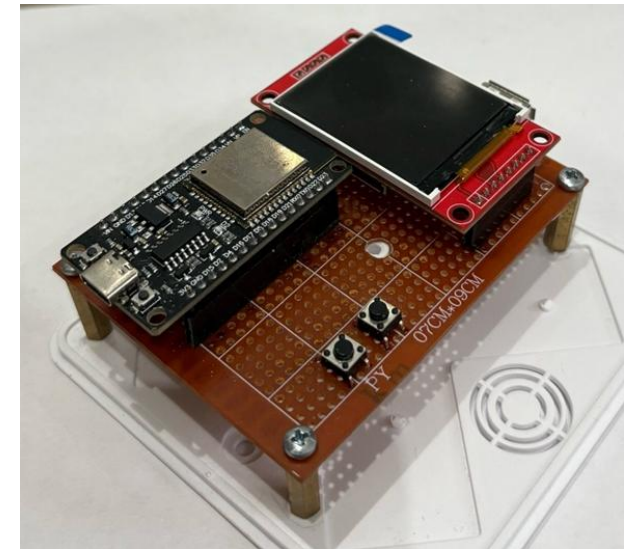


Рисунок 6 – Обработчик данных



Функции прибора

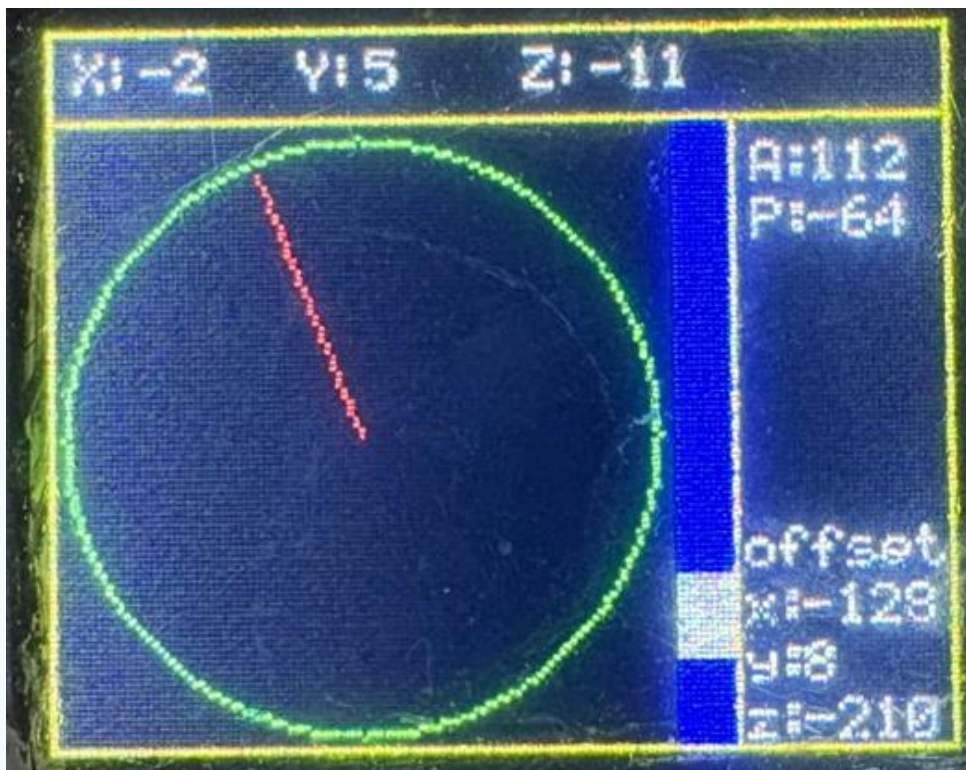


Рисунок 7 – Интерфейс устройства

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS ESP-IDF

I (687) i2cdev: [0x0d at 0] Device added successfully (Device
X= Y= Z= Angle=0.0 Pitch=0.0 Частота:1 Амплитуда:0
X= Y= Z= Angle=0.0 Pitch=0.0 Частота:0 Амплитуда:0
X= Y= Z= Angle=0.0 Pitch=0.0 Частота:0 Амплитуда:0
X= Y= Z= Angle=0.0 Pitch=0.0 Частота:0 Амплитуда:0
X= Y=-5 Z=-2 Angle=0.0 Pitch=0.0 Частота:0 Амплитуда:1
X= Y=-5 Z=-1 Angle=0.0 Pitch=0.0 Частота:0 Амплитуда:0
X= Y=-7 Z= Angle=0.0 Pitch=0.0 Частота:0 Амплитуда:0
X= Y=-5 Z= Angle=0.0 Pitch=0.0 Частота:0 Амплитуда:0
X= Y=-7 Z= Angle=0.0 Pitch=0.0 Частота:0 Амплитуда:0
```

Рисунок 8 – Вывод данных в терминал



Выбор компонентной базы

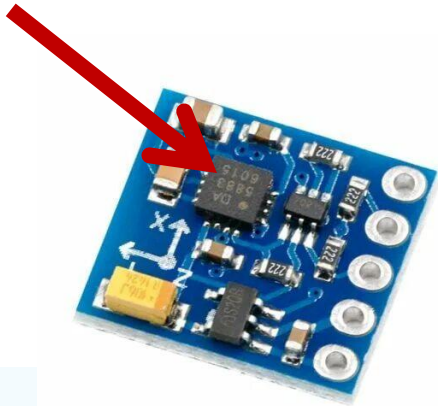


Рисунок 9 – Модуль с микросхемой
QMC5883L



Рисунок 10 – Микроконтроллер
ESP32

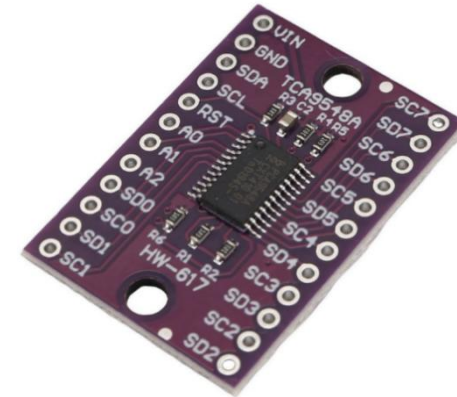


Рисунок 11 – I2C мультиплексор
TCA9548A



Принципиальная Схема

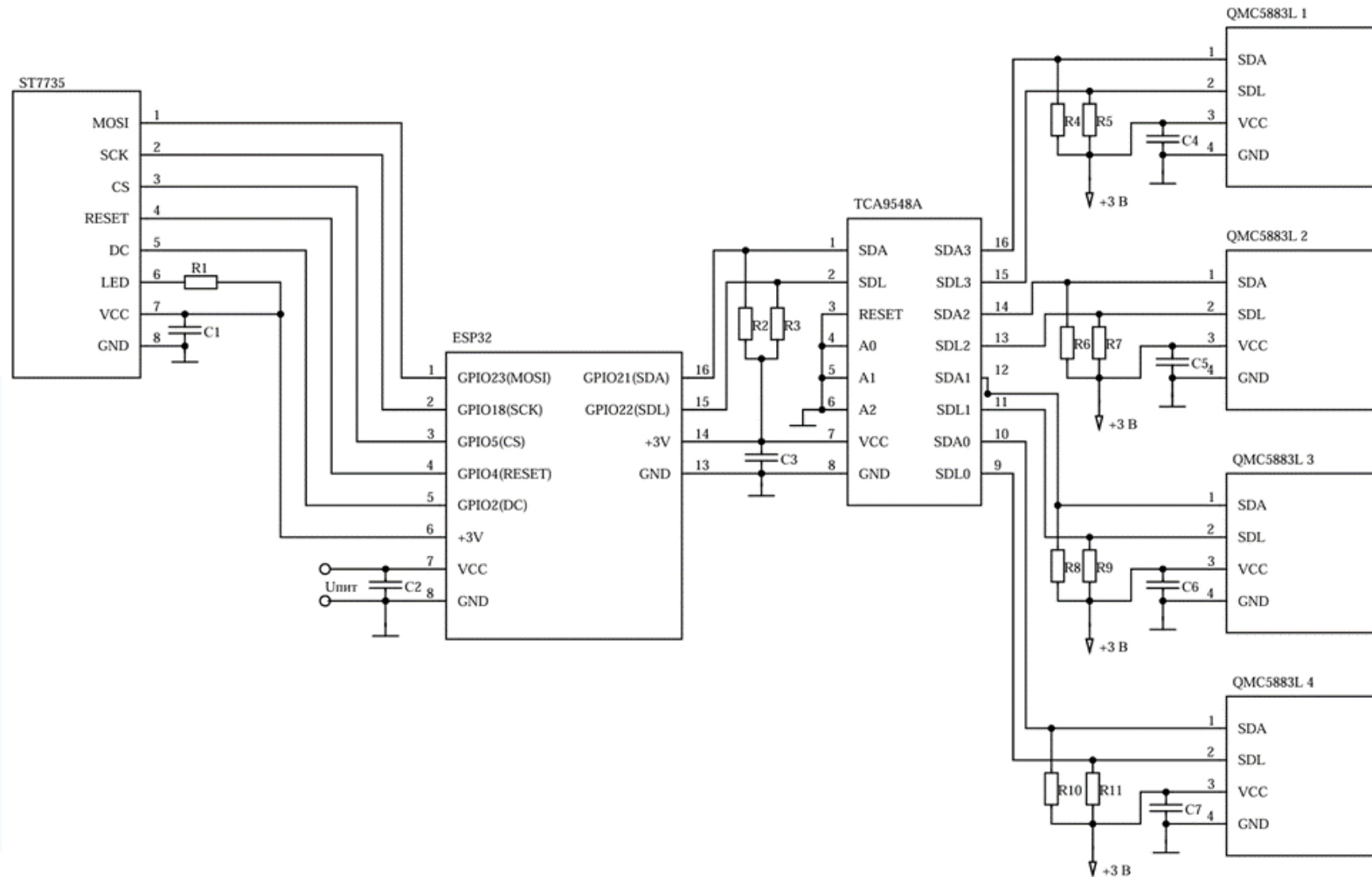


Рисунок 13 – Принципиальная схема устройства



1) Компенсация смещения нуля

$$Offset_x = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}, Offset_y = \frac{y_{max} + y_{min}}{2}, Offset_z = \frac{z_{max} + z_{min}}{2},$$

где $Offset_{x,y,z}$ - смещение по осям

2) Компенсация сжатия

$$S_x = \frac{R_{сред}}{r_x}, S_y = \frac{R_{сред}}{r_y}, S_z = \frac{R_{сред}}{r_z},$$

где $S_{x,y,z}$ - коэффициент масштабирования

3) Откалиброванное значение

$$B_x^{cal} = (B_x^{raw} - Offset_x) \cdot S_x,$$

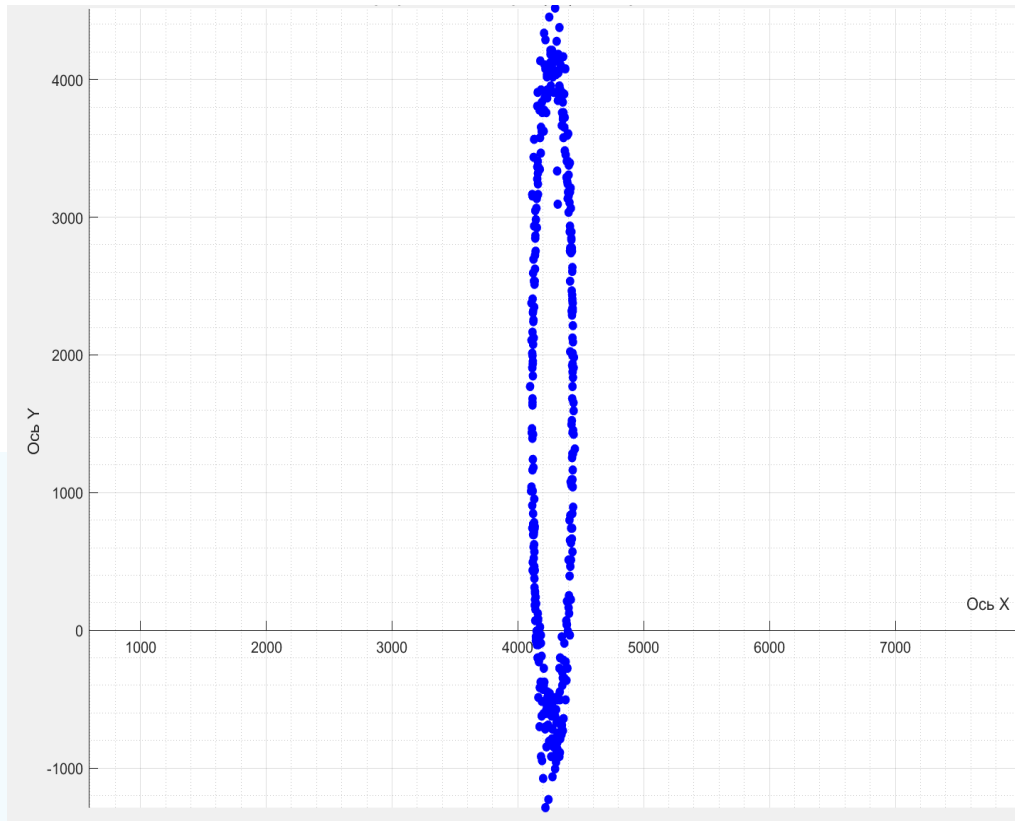


Рисунок 14 – Данные до обработки

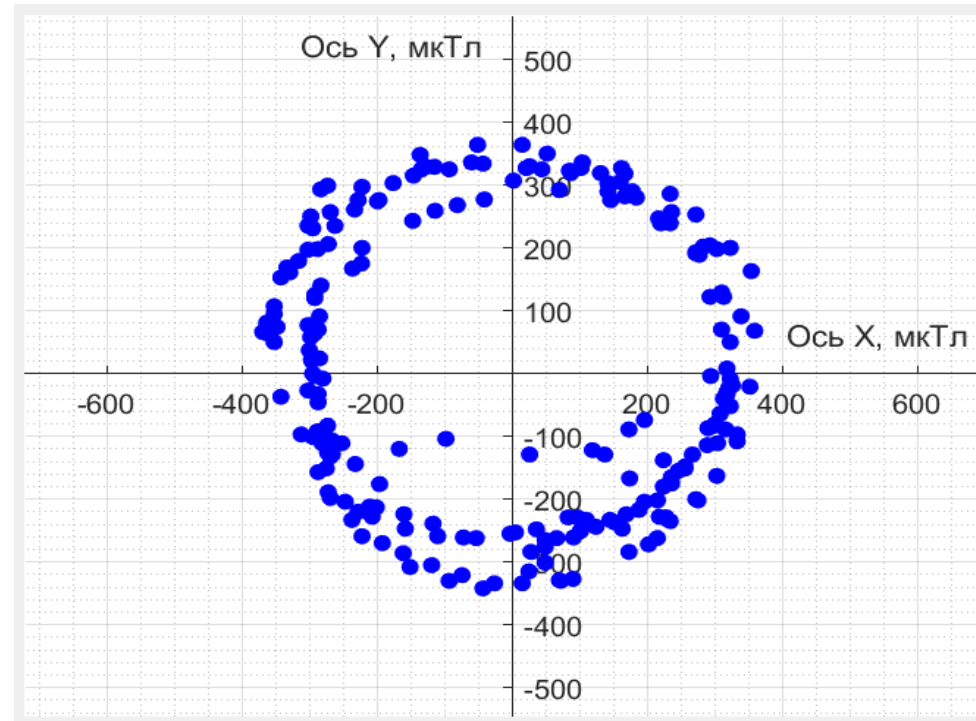


Рисунок 15 – Данные после обработки

Экспериментальная часть

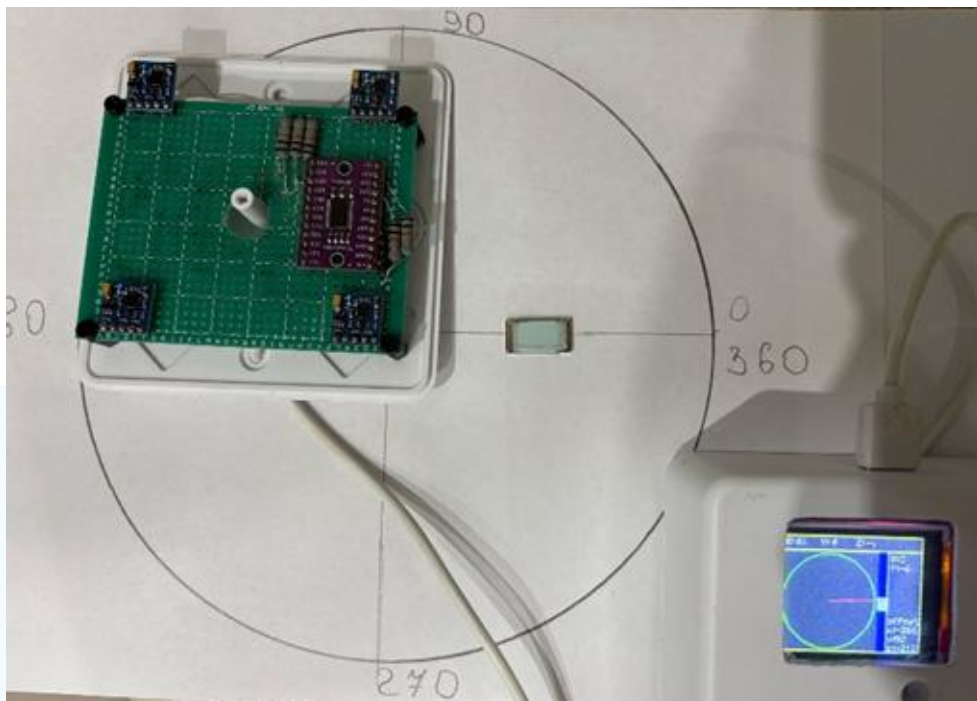


Рисунок 22 – Определение направления до магнита

Для эксперимента была подготовлена бумага с нанесенной на нее градусной шкалой магнит будет перемещаться по окружности с шагом 90 градусов.

В результате измерений прибор показал 3° при отметке 0° , 90° при отметке 90° , 176° при отметке 180° , 270° при отметке 270° .



Рисунок 23 – Определение частоты вращения магнита

Чтобы сравнить результат измерений с действительностью, было подсчитано количество оборотов электродвигателя через камеру замедленной съемки. За время $t = 5$ секунд работы электродвигателя было посчитано $N = 65$ полных оборота, что сравнимо с частотой:

$$f = \frac{N}{t} = \frac{65}{5} = 13 \text{ Гц}$$

В переводе об/мин $13 \text{ Гц} = 780 \text{ об/мин}$

Частота: 13.04 Гц,
Частота: 13.04 Гц,
Частота: 13.04 Гц,
Частота: 13.04 Гц,
Частота: 13.04 Гц,
Частота: 13.04 Гц,

Рисунок 24 – Результат измерения

Итоги

- Разработан магнитометр на 4 датчиках QMC5883L.
С диапазоном измерений ± 2 Гс и ± 8 Гс
- Реализована автоматическая калибровка.
- Азимут: точность $\sim 2^\circ$.
- Вращение: абсолютная погрешность 0.04 Гц.
- Максимальное значение измерений вращения МП: 6000 об/мин
- Себестоимость: 2000руб.

Разработка трехмерного четырёхпозиционного датчика магнитного поля

направление 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
кафедра технической электроники

Студент: Наумов Б.С., группа ТЭН-21
Руководитель: Старший преподаватель, Шабронов А.А.
Новосибирск, 2026



СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
И ИНФОРМАТИКИ

Таблица 1 – Технические характеристики микросхемы QMC5883L.

Параметр	Значение
Тип чувствительного элемента	Магниторезистивная пленка
Напряжение питания	2,16 – 3,6 В
Диапазон измерений	± 2 Гс, ± 8 Гс
Разрядность АЦП	16 бит
Разрешающая способность для ± 8 Гс	0,33 мГс
Разрешающая способность для ± 2 Гс	0,083 мГс
Интерфейс передачи данных	I2C
Адрес на шине I2C	0x0D
Частота обновления данных	10 / 50 / 100 / 200 (Гц)
Потребляемый ток в режиме измерений	75 мкА
Потребляемый ток в режиме ожидания	3 мкА
Рабочий диапазон температур	От -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$
Стоимость	100 руб.

Таблица 2 – Технические характеристики микроконтроллера ESP32.

Параметр	Значение
Процессор	Xtensa LX6, 2 ядра
Архитектура	32 бит
Тактовая частота	До 240 МГц
Оперативная память	520 Кбайт
Флеш-память	16 Мбайт
Аппаратные интерфейсы	I2C (2 шт.), SPI(2 шт.), UART(3 шт.)
Беспроводные модули	Wi-Fi, Bluetooth
Напряжение питания	3,3 В
Потребляемый ток в активном режиме	80 мА
Рабочая температура	От -40°С до +85°С
Стоимость	300 руб.

Таблица 3 – Технические характеристики мультиплексора.

Параметр	Значение
Тип	I2C мультиплексор
Количество каналов	8
Адрес на шине I2C	От 0x70 до 0x77, изменяется комбинацией выводов A0, A1, A2
Поддерживаемые режимы I2C	Standard(100 кГц), Fast(400 кГц)
Напряжение питания	3,3 В
Максимальный ток канала	50 мА
Потребляемый ток	10 мкА
Корпус	TSSOP-24
Стоимость	200 руб.

Таблица 4 – Технические характеристики дисплея.

Параметр	Значение
Контроллер	ST7735
Тип матрицы	TFT
Диагональ	1,8 дюйма
Разрешение	128×160 пикселей
Цветность	16 бит, 65536 цветов
Интерфейс	SPI
Напряжение питания	3,3 В
Потребляемый ток	50 – 60 мА
Габариты модуля	35 ×56 мм
Стоимость	200 – 300 руб.



Искажения и метод их устранения



Рисунок 13 – Принципиальная схема устройства



1) Компенсация смещения нуля

$$Offset_x = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}, Offset_y = \frac{y_{max} + y_{min}}{2}, Offset_z = \frac{z_{max} + z_{min}}{2},$$

где $Offset_{x,y,z}$ - смещение по осям

2) Компенсация сжатия

$$S_x = \frac{R_{сред}}{r_x}, S_y = \frac{R_{сред}}{r_y}, S_z = \frac{R_{сред}}{r_z},$$

где $S_{x,y,z}$ - коэффициент масштабирования

3) Откалиброванное значение

$$B_x^{cal} = (B_x^{raw} - Offset_x) \cdot S_x,$$



Определение частоты вращения источника МП

Если начало и конец не совпадают

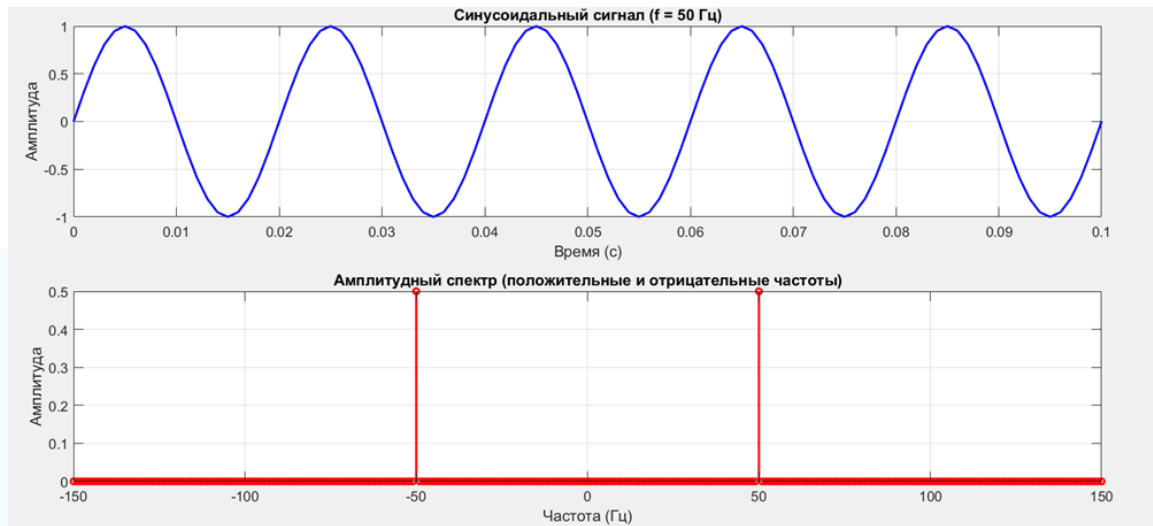


Рисунок 16 – Построение спектра синусоиды частотой 50 Гц

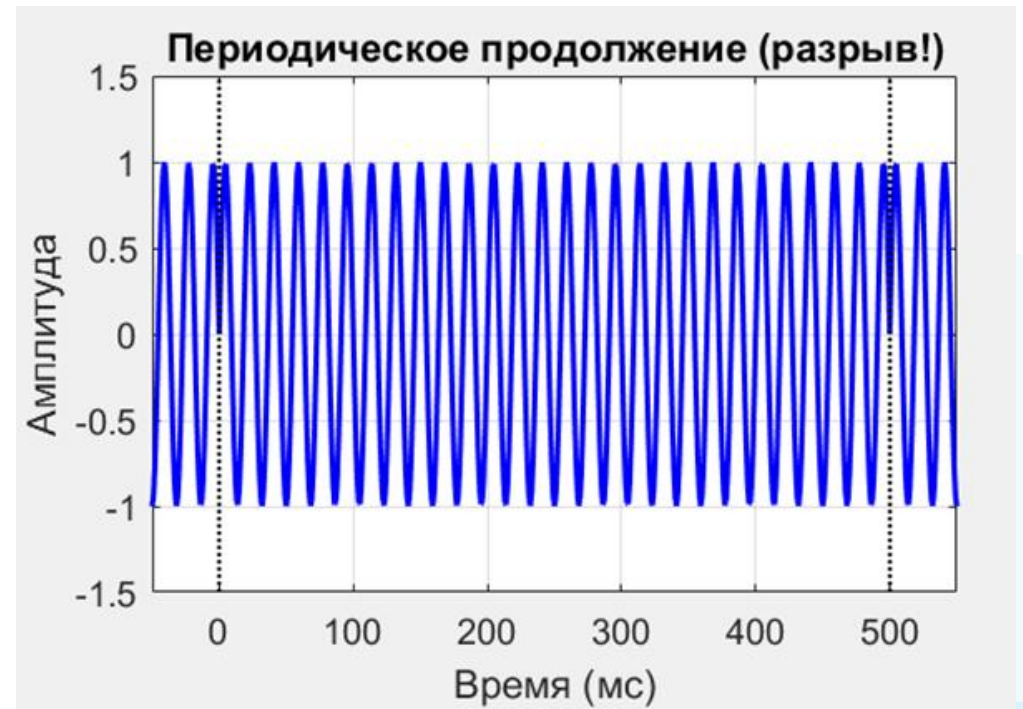


Рисунок 17 – Пример периодического продолжения синусоиды с частотой 55 Гц.

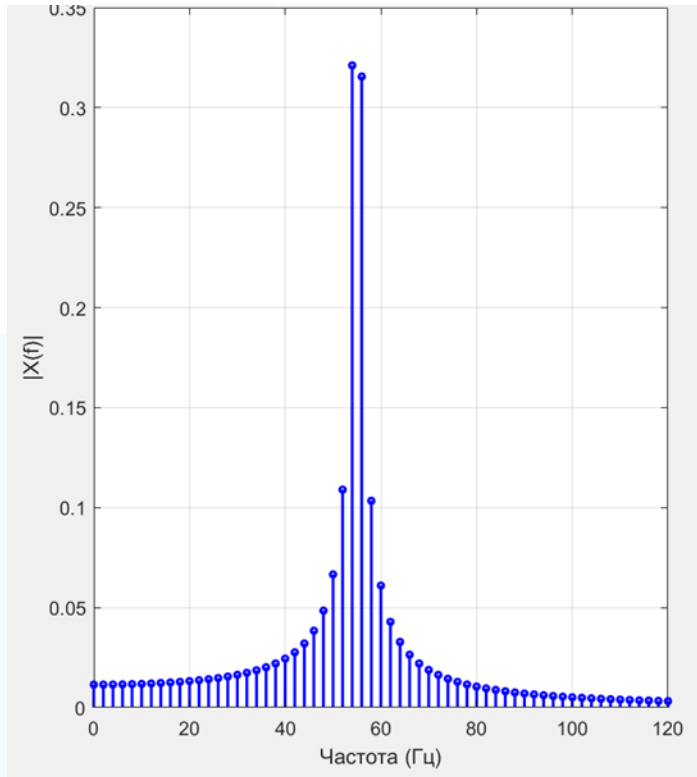


Рисунок 18 – Построение спектра синусоиды частотой 55 Гц

Для решения данной проблемы используется оконная функция Ханна

$$W_n = 0.5 \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{(N-1)} \right) \right)$$



Рисунок 19 – Оконная функция

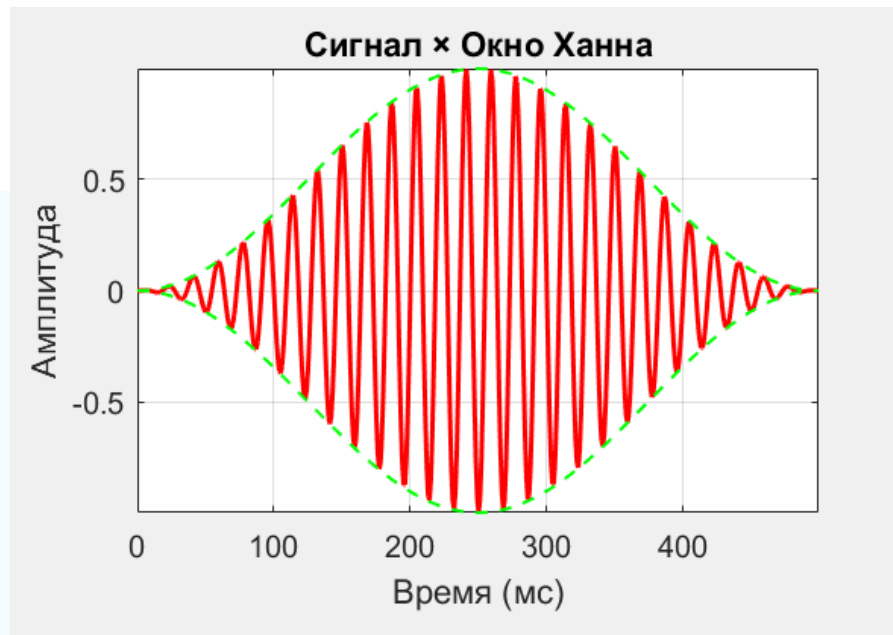


Рисунок 20 – Сигнал после умножения на окно Ханна.

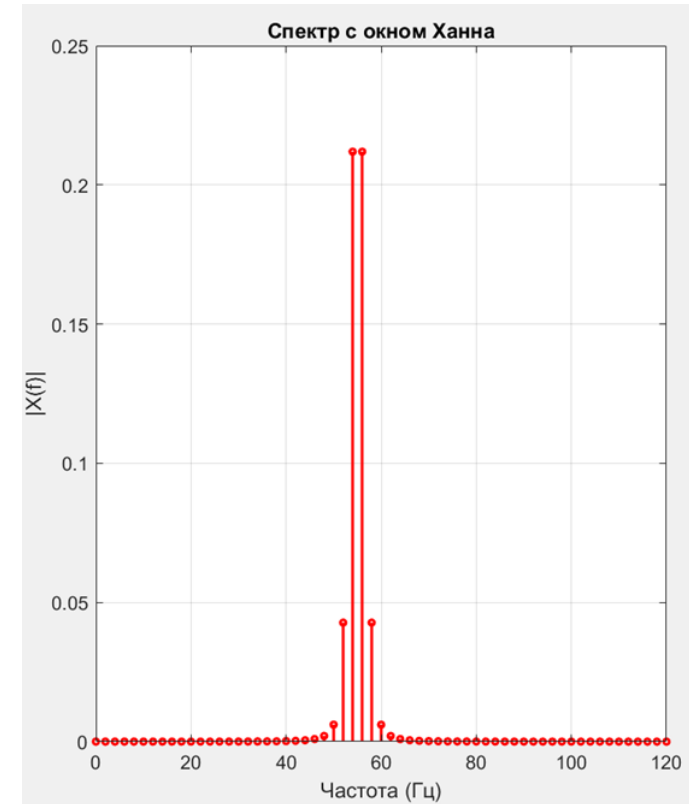
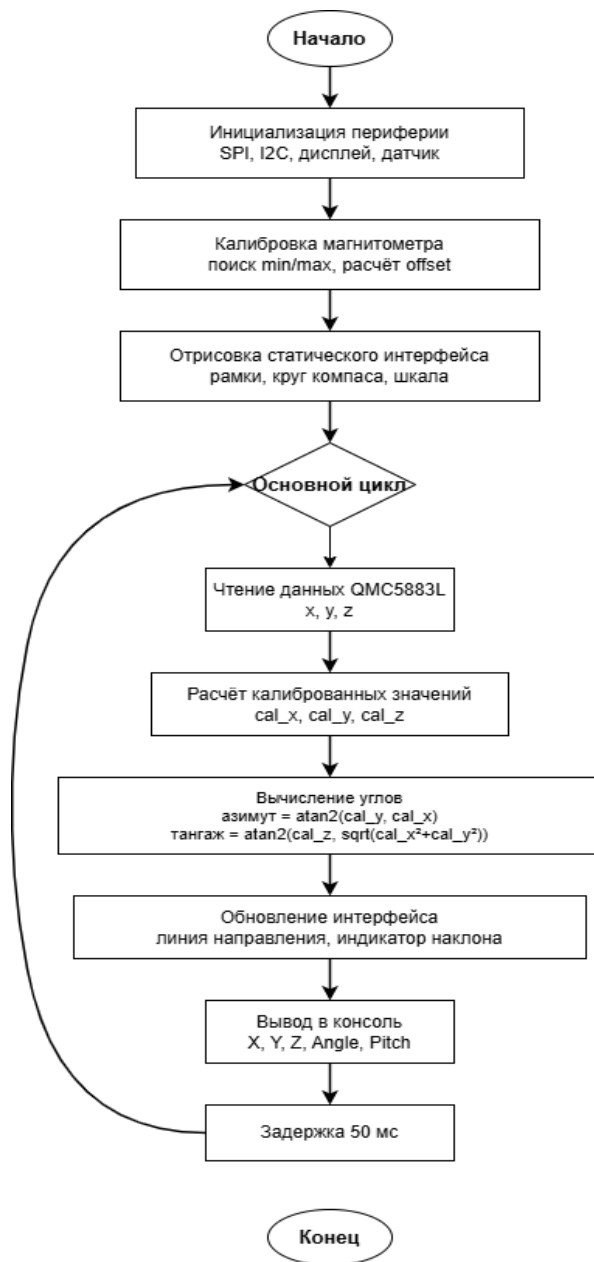


Рисунок 21 – построение спектра синусоиды 55 Гц
используя оконную функцию



```
dsps_wind_hann_f32(hann_buffer, N);//  
dsps_fft2r_fc32(complex_table, N);//
```

