

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(Самарский университет)

Институт информатики и кибернетики

Кафедра лазерных и биотехнических систем

Пояснительная записка к курсовому проекту

«ИЗМЕРИТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

Выполнил студент группы 6364-120304D: \_\_\_\_\_ Рожновская Д.О.

Руководитель проекта: \_\_\_\_\_ Корнилин Д.В.

Работа защищена с оценкой: \_\_\_\_\_

Самара 2023

## ЗАДАНИЕ

Разработать измеритель постоянного тока со следующими параметрами:

- Диапазон измеряемых токов:  $1\text{ мкА} - 0.1\text{ А}$ ;
- Максимальная погрешность:  $0.5\%$ ;
- Индикация: цифровая с необходимым количеством разрядов;
- Передача данных: по интерфейсу CAN с фиксированной скоростью.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 20 страниц, 11 рисунков, источников, 1 приложение.

ИЗМЕРИТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА, МИКРОКОНТРОЛЛЕР, CAN, STM32, АЛГОРИТМ, ПРОГРАММА, ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ, ЦИФРОВАЯ ИНДИКАЦИЯ

В курсовом проекте разработаны структурная и принципиальная схемы измерителя постоянного тока, осуществлен выбор микроконтроллера с шиной CAN, подобраны элементы для блока питания и датчика тока. В качестве индикатора выбран IPS дисплей. Разработан алгоритм анализа данных и программа на языке Си, реализующая его.

## СОДЕРЖАНИЕ

1	РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА . . . . .	6
2	РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА . . .	8
2.1	Выбор акселерометра . . . . .	8
2.2	Выбор микроконтроллера . . . . .	12
2.3	Блок питания . . . . .	15
3	РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ . . . . .	17
4	РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА . . . . .	18

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка измерителя постоянного тока является важной задачей в области электротехники и электроники. Такой прибор необходим для точного измерения постоянного тока в различных электрических цепях и системах.

Измерители постоянного тока используются в различных областях, включая промышленность, автомобильную отрасль, энергетику и телекоммуникации. Они помогают обеспечить безопасность и надежность работы систем, а также повышают эффективность использования электроэнергии. Важность измерителей постоянного тока заключается в том, что они позволяют контролировать и оптимизировать работу систем, что в свою очередь повышает качество продукции и уменьшает затраты на производство.

В данном курсовом проекте рассматривается способ создания устройства на базе микроконтроллера, который сможет обеспечить высокую скорость передачи данных, что позволит быстро и точно измерять ток. В процессе был подобран необходимый в задании микроконтроллер с шиной CAN, а также написана управляющая программа на языке Си.

## 1 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА

Структурная схема устройства представлена на рисунке 1.

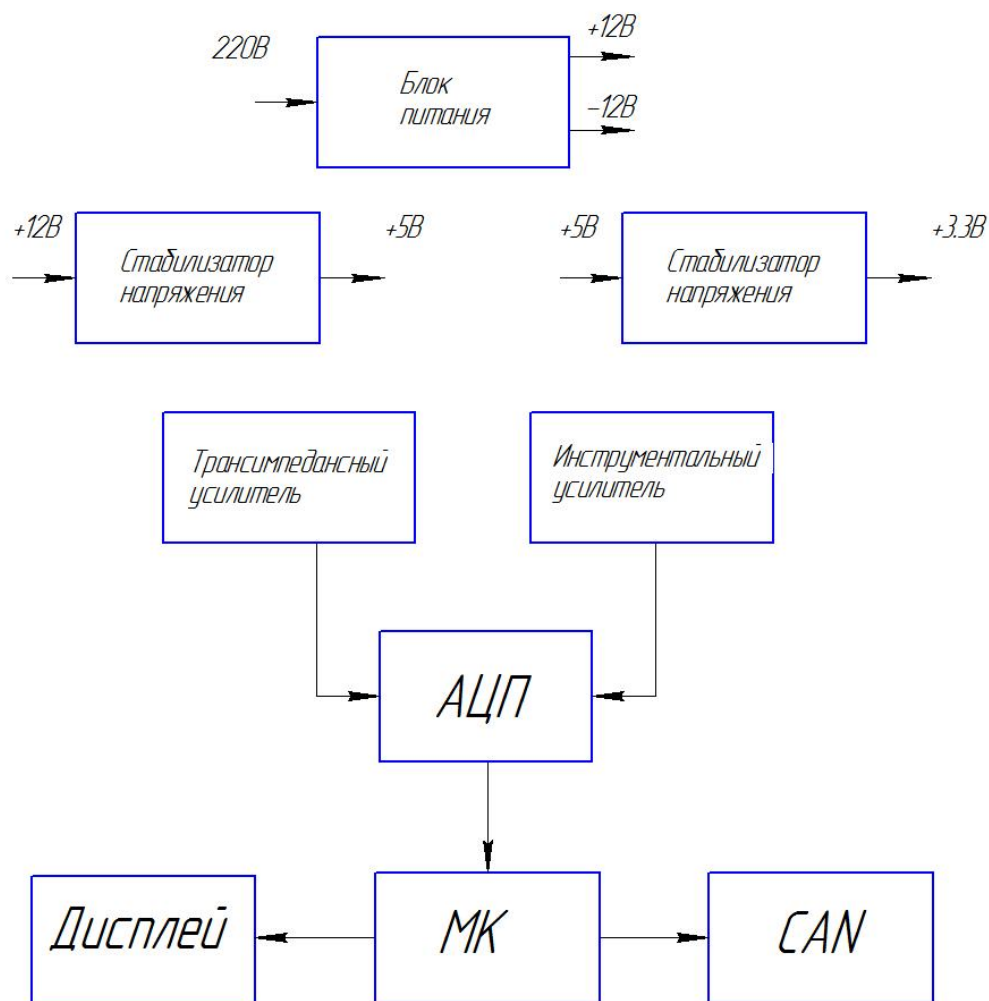
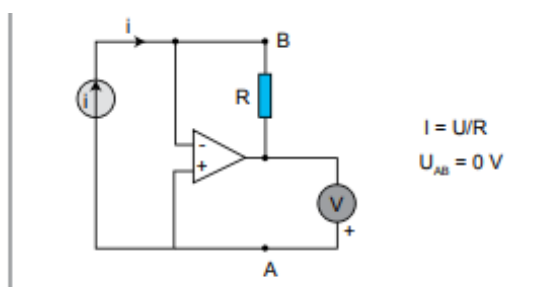


Рисунок 1 – Структурная схема устройства

Стоит отметить, что измерять ток цифровые устройства не умеют, поэтому, ток преобразуют в напряжение, чтобы АЦП мог оцифровать его. Принцип работы устройства заключается в следующем. АЦП имеет два канала. На один канал подключен выход инструментального усилителя, усиливающего напряжение на низкоомном шунте. Данный канал используется для измерения токов в диапазоне 1мА-100мА. Для измерения токов в диапазоне 1мкА-1мА используется схема трансимпедансного усилителя [7], изображенная на рисунке 2.



**Figure 3**—The transimpedance amplifier is a way to automatically adjust the counter voltage. An operational amplifier will set its output in order to have a nearly null voltage offset between its two inputs:  $U_{AB} = 0$ , which is exactly what we are looking for.

Рисунок 2 – Трансимпедансный усилитель

Переключение между каналами осуществляется программно. Измеренное значение напряжения пересчитывается в ток, и выводится на IPS дисплей. Так же, результаты могут быть переданы по интерфейсу CAN с фиксированной скоростью.

Блок питания формирует напряжение +12В и -12В из 220В для питания операционных усилителей. Посредством использования стабилизаторов напряжения из 12В получаем напряжения в 3.3В и 5В, необходимые для питания микроконтроллера и других элементов схемы.

## 2 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА

Электрическая принципиальная схема представлена в приложении.

### 2.1 Выбор акселерометра

Стоит выяснить, как работают и устроены акселерометры. [2] Это датчики движения, входным сигналом которых является скорость и ускорение объекта. Отличительной особенностью данных устройств является их компактность и стоимость за счет налаженного производства микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Основное применение датчики движения нашли в промышленности, а именно в авиации для определения положения летающего аппарата в пространстве и в строительстве. В медицине датчики движения используются редко, однако некоторые методики включают использование акселерометров.

Современные МЭМ акселерометры разделяют по физическому принципу детектирования ускорений, однако широкое распространение получили только 3 вида:

- Пьезоэлектрические, основой которых является пьезокристалл. Деформации кристалл приводят к появлению на нем разности потенциалов. Такие акселерометры имеют широкий диапазон частот и выдерживают значительные нагрузки. Однако пьезоэффект возникает только в момент деформации, что не позволяет измерять статические ускорения наподобие гравитационного. Также пьезоэлектрические акселерометры из-за значительного сопротивления пьезокристалла и малой разности потенциалов при деформации требуют высокоомного соединения со схемой.
- Пьезорезистивные своими характеристиками не сильно отличаются от ПЭА, имея столь же малую термостабильность и стабильность смещения. Однако получение полезного электрического сигнала происходит на



мостовой схеме с пьезорезистивными элементами, при этом нет необходимости использования высокоомного подключения. Также присутствует возможность самотестирования акселерометров и измерения статических нагрузок

- Емкостные – самый распространенный вид МЭМ акселерометров. Принцип действия заключается в измерении реакции измерительной ячейки, состоящей из сложного конденсатора с переменной емкостью на зондирующий сигнал. При измерении ускорения инерционная масса двигает нестатичную обкладку конденсатора, вследствие чего меняется емкость. При этом емкостные конденсаторы не имеют проблем, связанных с природой пьезоэффекта, а именно имеют конструкторскую легкость при подключении в цепь и возможность самотестирования. Также основными преимуществами является высокая термостабильность. Недостатком можно назвать сложность конструкции, однако при налаженном производстве это фактор не оказывает значительного влияния.

Таким образом, современные малогабаритные измерительные модули целесообразно конструировать с емкостными акселерометрами, за счет их стабильности отсутствия требований в схемах высокоомного подключения.

Согласно техническому заданию нам необходим акселерометр с диапазоном регистрируемых ускорений от 2g до 8g и возможностью выдачи показаний с частотой 400 Гц. Данным требованиям соответствует 3-осевой акселерометр ADXL345 [1], его основные характеристики представлены ниже.

- Тип датчика: цифровой, емкостной;
- Диапазон регистрируемых ускорений  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ ,  $\pm 16g$ ;
- Частота обновления показаний: задается пользователем в диапазоне 0.1-3200 Гц;

- Сверхнизкое потребление: 23 мкА в режиме преобразования и 0.1 мкА в режиме ожидания;
- напряжение питания: 2-3.6В;
- Интерфейс цифрового вывода:  $I^2C$ , SPI;
- Разрядность: настраиваемая пользователем – 10 бит в диапазоне  $\pm 2g$ , 13 бит в остальных диапазонах.

Структурная схема акселерометра из даташита ADXL345 приведена на рисунке 3.

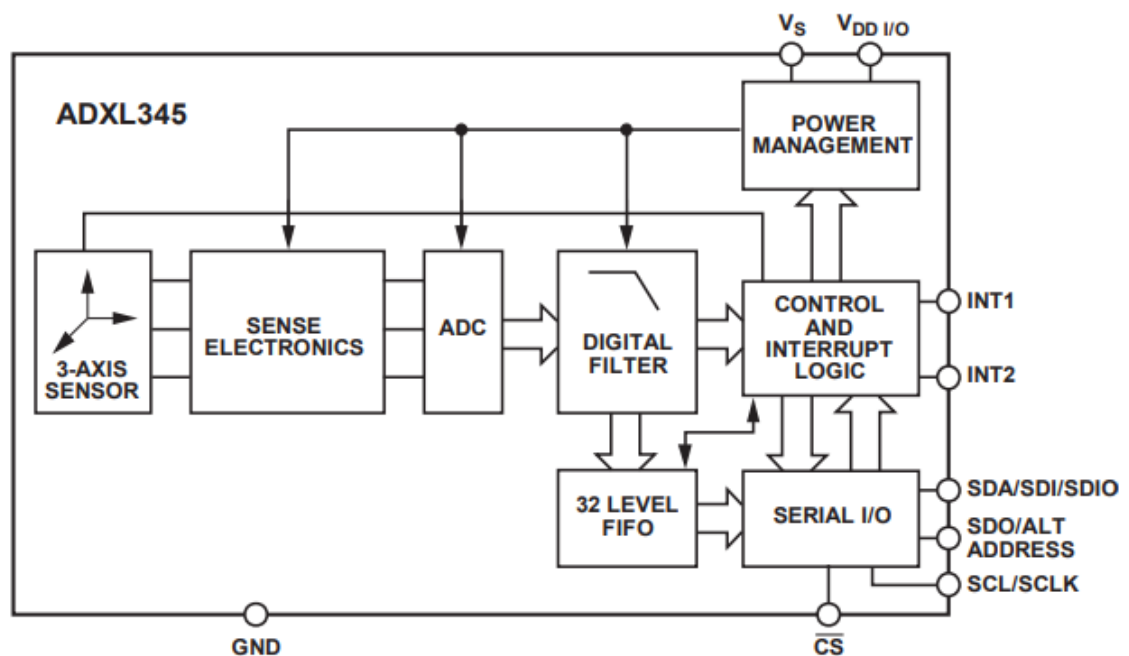


Рисунок 3 – Структурная схема акселерометра

Видно, что устройство состоит из 3-осевого "сенсора", представляющего собой несколько конденсаторов с нестатичными обкладками, "чувствительной электроники", аналого-цифрового преобразователя, цифрового фильтра, буфера FIFO для временного хранения результатов преобразования, контроллера питания и логического устройства, контролирующего работу акселерометра и логику прерываний. Устройство содержит выводы данных, соответствующие интерфейсам  $I^2C$  и SPI. Для связи с акселерометром мы будем использовать  $I^2C$ . Схема подключения представлена на рисунке 4.

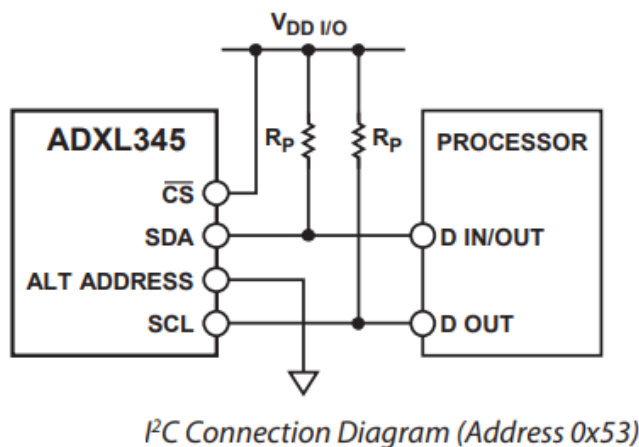


Рисунок 4 – Схема подключения акселерометра к микроконтроллеру по  $I^2C$

Как видно из рисунка 4, для активации интерфейса  $I^2C$  необходимо подтянуть вывод  $\overline{CS}$  к питанию.

Так же, в даташите приведена рекомендованная для минимизации шумов схема включения акселерометра(рисунок 5).

#### POWER SUPPLY DECOUPLING

A 1  $\mu F$  tantalum capacitor ( $C_S$ ) at  $V_S$  and a 0.1  $\mu F$  ceramic capacitor ( $C_{I/O}$ ) at  $V_{DD\ I/O}$  placed close to the ADXL345 supply pins is recommended to adequately decouple the accelerometer from noise on the power supply. If additional decoupling is necessary, a resistor or ferrite bead, no larger than 100  $\Omega$ , in series with  $V_S$  may be helpful. Additionally, increasing the bypass capacitance on  $V_S$  to a 10  $\mu F$  tantalum capacitor in parallel with a 0.1  $\mu F$  ceramic capacitor may also improve noise.

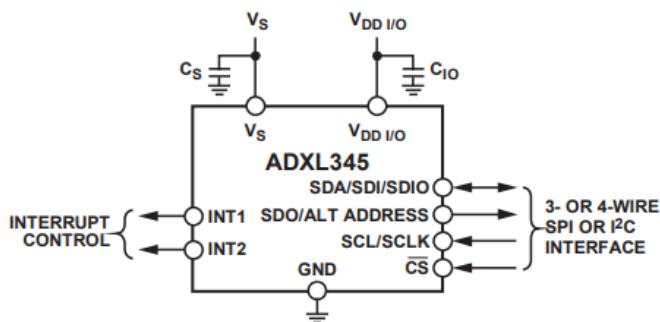


Рисунок 5 – Типовая схема включения акселерометра

Нумерация и назначение выводов ADXL345 приведено ниже (рисунки 6, 7).

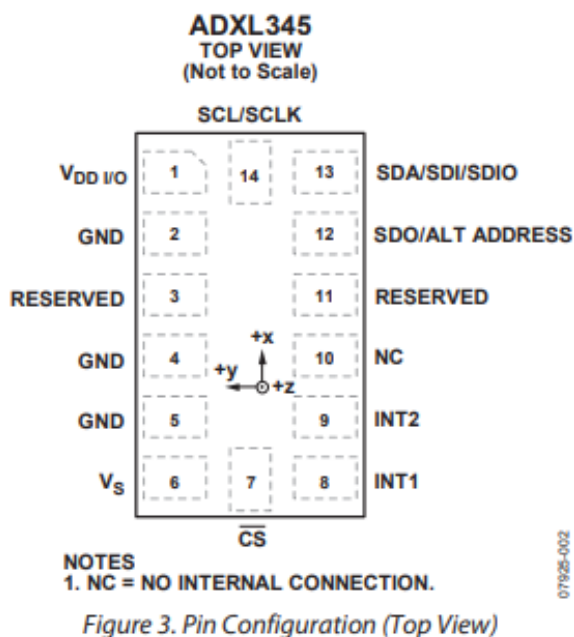


Рисунок 6 – Нумерация выводов

Table 5. Pin Function Descriptions		
Pin No.	Mnemonic	Description
1	V <sub>DD I/O</sub>	Digital Interface Supply Voltage.
2	GND	This pin must be connected to ground.
3	RESERVED	Reserved. This pin must be connected to V <sub>S</sub> or left open.
4	GND	This pin must be connected to ground.
5	GND	This pin must be connected to ground.
6	V <sub>S</sub>	Supply Voltage.
7	$\overline{CS}$	Chip Select.
8	INT1	Interrupt 1 Output.
9	INT2	Interrupt 2 Output.
10	NC	Not Internally Connected.
11	RESERVED	Reserved. This pin must be connected to ground or left open.
12	SDO/ALT ADDRESS	Serial Data Output (SPI 4-Wire)/Alternate I <sup>2</sup> C Address Select (I <sup>2</sup> C).
13	SDA/SDI/SDIO	Serial Data (I <sup>2</sup> C)/Serial Data Input (SPI 4-Wire)/Serial Data Input and Output (SPI 3-Wire).
14	SCL/SCLK	Serial Communications Clock. SCL is the clock for I <sup>2</sup> C, and SCLK is the clock for SPI.

Рисунок 7 – Назначение выводов

## 2.2 Выбор микроконтроллера

С учетом технического задания микроконтроллер должен обладать следующими свойствами:

- Интерфейс для работы с микросхемой акселерометра: SPI или I<sup>2</sup>C;
- Для передачи данных по Bluetooth: встроенный стек протокола Bluetooth;
- Малое энергопотребление;

- Свободные выводы для подключения индикатора и выводов прерываний от акселерометра;

Для решения задачи был выбран микроконтроллер STM32WB35CCU6A фирмы ST Microelectronics [3]. STM32WB35 содержит два производительных ядра ARM-Cortex:

- ядро ARM® -Cortex® M4 (прикладное), работающее на частотах до 64 МГц, для пользовательских задач имеется модуль управления памятью, модуль плавающей точки, инструкции ЦОС (цифровой обработки сигналов), графический ускоритель (ART accelerator);
- ядро ARM®-Cortex® M0+ (радиоконтроллер) с тактовой частотой 32 МГц, управляющее радиотрактом и реализующее низкоуровневые функции сетевых протоколов;

Данный микроконтроллер включает в себя все необходимые периферийные устройства, такие как интерфейсы передачи данных I<sup>2</sup>C, необходимый для подключения к акселерометру, и радиомодуль с поддержкой Bluetooth, диапазон питающего напряжения от 2 до 3,6 В. Основные характеристики:

- типовое энергопотребление 50 мкА/МГц (при напряжении питания 3 В);
- потребление в режиме останова 1,8 мкА (радиочасть в режиме ожидания (standby));
- потребление в выключенном состоянии (Shutdown) менее 50 нА;
- диапазон допустимых напряжений питания 1,7...3,6 В (встроенный DC-DC-преобразователь и LDO-стабилизатор);
- рабочий температурный диапазон -40...105°C.

Структурная схема микроконтроллера приведена на рисунке 8, а назначение выводов портов корпуса на рисунке 9

Figure 2. STM32WB35xx block diagram

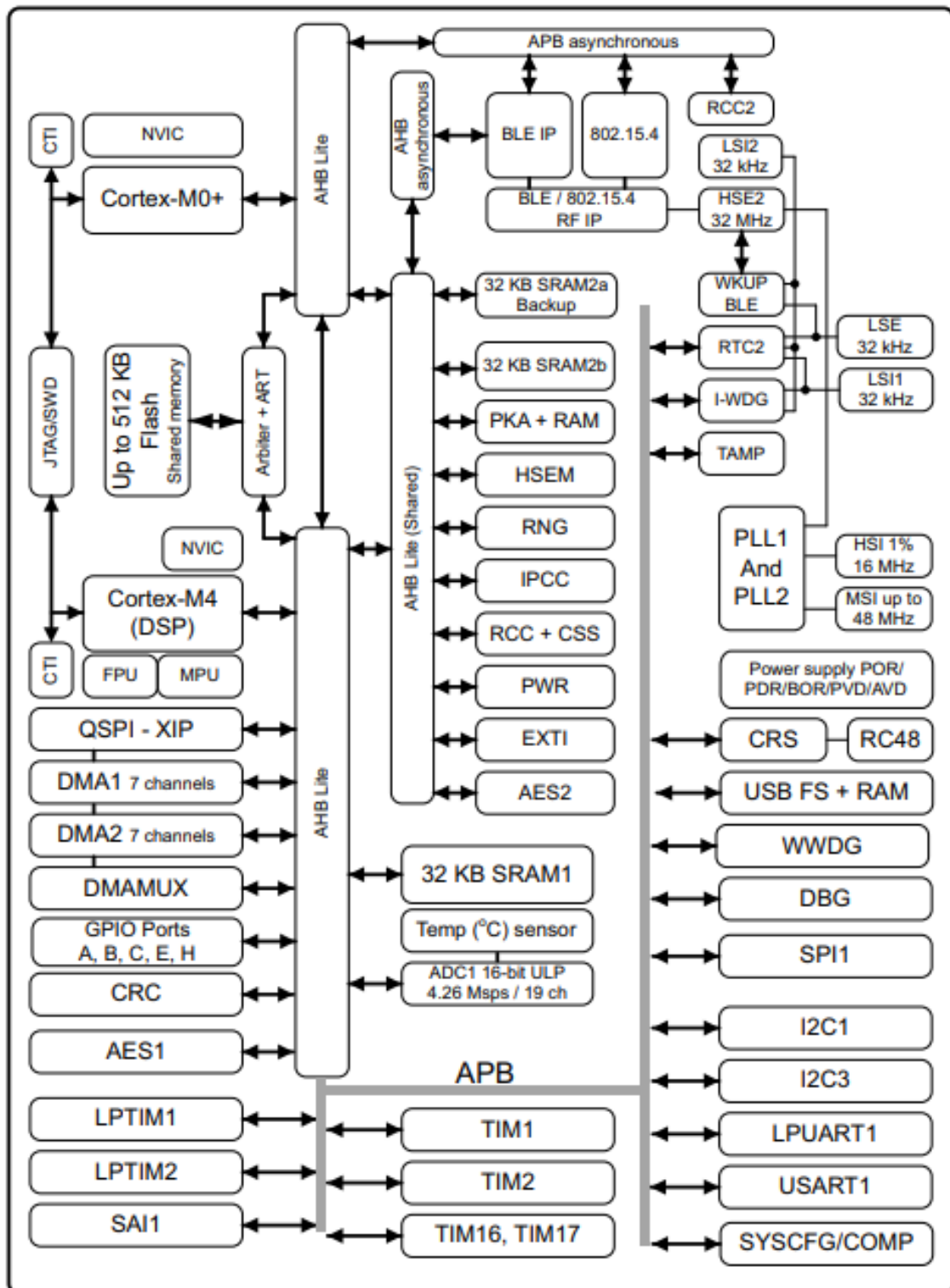


Рисунок 8 – Структурная схема



состоянии - 0.01 мкА, максимальная нагрузка по току 600 мА.

Подключение DC-DC преобразователя будет осуществляться согласно типовой схеме из Data Sheet [6] (рисунок 11)

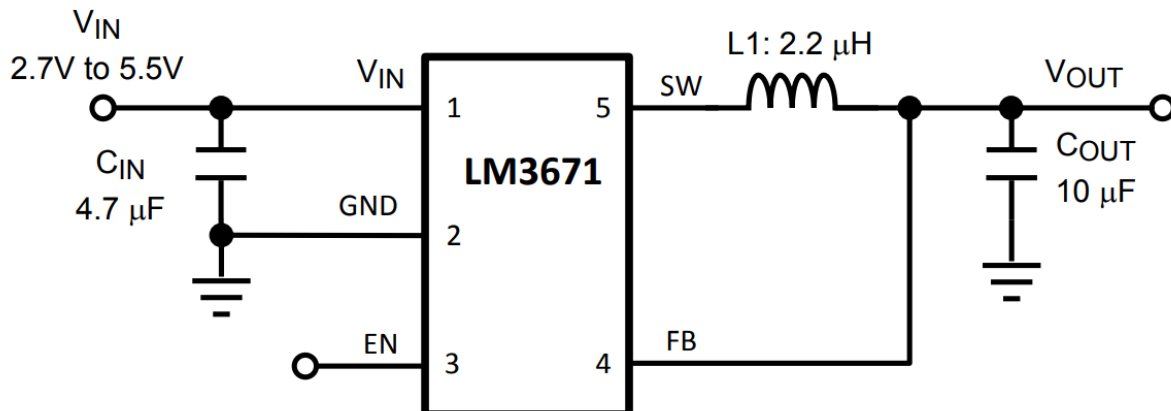


Рисунок 11 – Типовая схема включения DC-DC–преобразователя



### 3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ

Для работы программы необходимо для начала разработать алгоритм. Алгоритм нашего устройства представлен на

#### 4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Data Sheet на акселерометр ADXL345 [Электронный ресурс]. URL:<https://static.chipdip.ru/lib/876/DOC011876534.pdf> (Дата обращения: 15.05.2023)

2 Токарчук, Т. С. Особенности регистрации медико-биологических данных с применением акселерометрических датчиков / Т. С. Токарчук, Ю. О. Боброва // СПБНТОРЭС: труды ежегодной НТК. – 2019. – № 1(74). – С. 367-369.

3 Data Sheet на микроконтроллер STM32WB35CCU6 [Электронный ресурс]. URL:<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32wb35cc.pdf> (Дата обращения: 16.05.2023)

4 Application note на микроконтроллеры серии STM32WB [Электронный ресурс]. URL:[https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an5165-development-of-rf-hardware-using-stm32wb-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an5165-development-of-rf-hardware-using-stm32wb-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf) (Дата обращения: 16.05.2023)

5 Спецификация на Li-pol аккумулятор LP-130-232635 [Электронный ресурс]. URL:<https://static.chipdip.ru/lib/412/DOC005412824.pdf> (Дата обращения: 16.05.2023)

6 Data Sheet на DC-DC преобразователь LM3671/-Q1 [Электронный ресурс]. URL:<https://static.chipdip.ru/lib/091/DOC001091994.pdf> (Дата обращения: 16.05.2023)

7 Robert L., Picoammeter Design[Текст]/Robert Lacoste//CIRCUIT CELLAR –2010. –№237 – С. 62-66.