

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

А.И. Солдатов

### **Изучение датчиков давления**

Методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Сенсорные системы роботов» для студентов направления Информационное и программное обеспечение программно-аппаратных комплексов робототехнических систем

Томск 2023

УДК 372.862

ББК 30

С 60

Рецензент:

**Костина М.А.**, доцент каф. управления инновациями ТУСУР,  
канд. техн. наук

**Солдатов, Алексей Иванович**

С 60 Изучение датчиков давления: метод. указания по выполнению студентами лабораторных работ/ А.И.Солдатов. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 31 с.

Методические указания по выполнению студентами лабораторной работы «Изучение датчиков давления» разработаны для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника.

Одобрено на заседании научно-методической комиссии ФИТ, протокол № 5 от 28.12.2022 г.

УДК 372.862

ББК 30

© Солдатов А.И., 2023

© Томск.гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023

## Оглавление

Цель .....	4
Задачи .....	4
Краткие теоретические сведения.....	4
Описание лабораторного стенда .....	15
Задание .....	27
Отчет.....	27
Контрольные вопросы .....	28
Расчет погрешности .....	28
Определение разрешающей способности датчика давления .....	29
Определение чувствительности датчика давления .....	30
Контрольные вопросы .....	30

## **Лабораторная работа.**

### **Изучение датчиков давления**

#### **Цель**

Изучить принцип работы датчика давления, определить погрешности измерения, разрешающую способность и чувствительность датчика давления.

#### **Задачи**

Изучение принципа работы и конструкции датчика давления. Изучение характеристики датчика давления. Определение высоты полета робота или глубины погружения по характеристике датчика давления. Определить чувствительность и разрешающую способность датчика давления. Изучение погрешности датчика давления. Определение усилия захвата детали различных размеров.

#### **Краткие теоретические сведения**

Датчики давления применяются для измерения давления различных сред: атмосферного, подводного или давления в сосудах высокого давления, а также для определения усилия захвата детали роботом.

Для каждого типа давления могут применяться различные методы измерения, включая датчики, основанные на электрических, механических, оптических или других физических принципах. Наиболее распространенные типы датчиков давления:

1. Пьезорезистивные датчики давления: Используют пьезорезисторы, материалы, изменяющие свое сопротивление под воздействием давления. При приложении давления сопротивление пьезорезисторов изменяется, что позволяет измерить изменение давления.

2. Капацитивные датчики давления: Измеряют изменение емкости или диэлектрической проницаемости между двумя электродами под воздействием

давления. По мере изменения давления меняется и емкость, что затем переводится в соответствующий сигнал давления.

3. Пьезоэлектрические датчики давления: Используют кристаллы или керамические материалы, способные возвращаться к начальному состоянию при приложении давления. Материалы проявляют пьезоэлектрические свойства, то есть генерируют электрический сигнал при механическом деформировании.

4. Термокапацитивные датчики давления: Основаны на изменении теплопередачи между двумя областями с разной температурой. Такие датчики измеряют изменение теплоотдачи под воздействием давления и преобразуют его в информацию о давлении.

5. Оптические датчики давления: Работают на основе изменения светового потока или светорассеяния при приложении давления.

### **Применение датчиков давления**

Измерение давления в подводной среде представляет свои особенности, связанные с высокими давлениями и наличием воды. Рассмотрим способы измерения давления в подводной среде:

1. Использование погружных гидростатических датчиков давления (рисунок 1). Основные компоненты погружного датчика давления включают корпус, уплотнительные кольца, мембрану и элементы пьезорезистора, которые преобразуют давление жидкости в электрический сигнал.



Рисунок 1 – Гидростатические датчики давления

Погружные датчики давления работают на основе закона Паскаля, согласно которому давление, производимое на жидкость, распространяется одинаково во всех направлениях. Поэтому, измерив давление жидкости на глубине, можно рассчитать уровень или глубину жидкости по формуле 1:

$$d = (P - P_0) / (\rho * g) \quad (1)$$

где  $d$  - глубина погружения в метрах,  $P_0$  - давление на уровне моря (101325 Па),  $P$  - измеренное давление в Па,  $\rho$  - плотность жидкости в  $\text{кг}/\text{м}^3$  (для морской воды примерно  $1025 \text{ кг}/\text{м}^3$ ),  $g$  - ускорение свободного падения ( $9.81 \text{ м}/\text{с}^2$ ).

График зависимости атмосферного давления от глубины погружения приведен на рисунке 2.

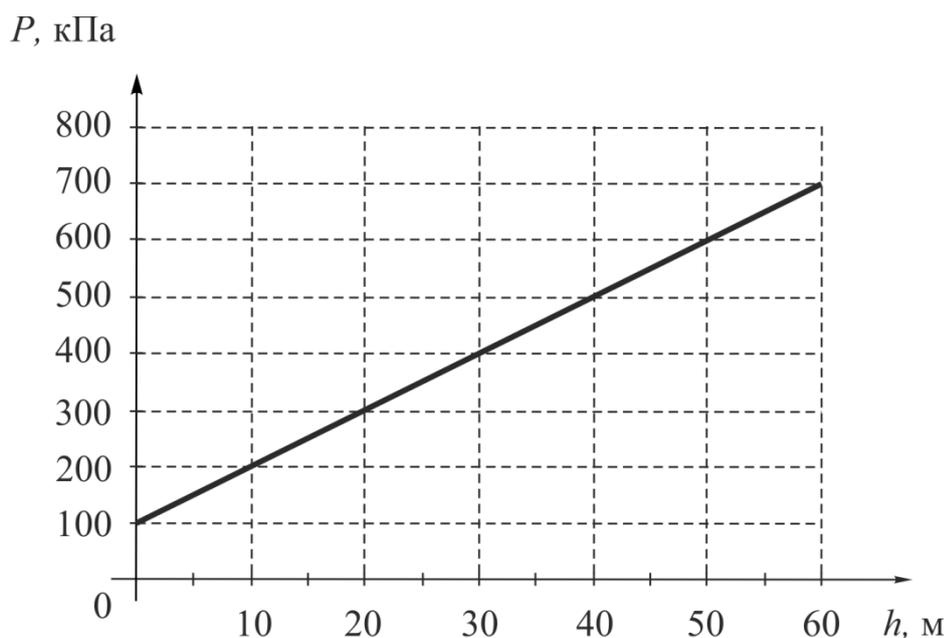


Рисунок 2 – Зависимость атмосферного давления от глубины погружения

Чтобы установить погружной датчик давления, его помещают в жидкость на нужную глубину и закрепляют. После этого датчик может передавать показания давления в реальном времени через соответствующее устройство, например, через сигнальный провод или беспроводной приемник.

2. Использование специальных датчиков давления, разработанных для работы в водной среде и с высокими давлениями. Они могут быть монтируемыми на подводном оборудовании или использоваться в специальных корпусах для измерения давления. Например, датчик давления MUR Depth sensor (рисунок 3а), который базируется на микросхеме MS5837-30BA (рисунок 3б).

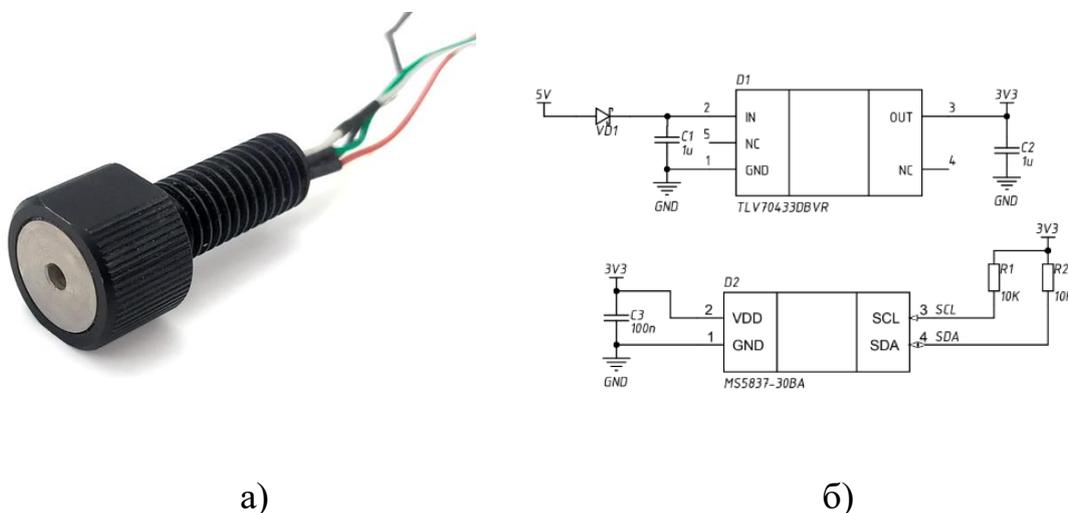


Рисунок 3 – Датчик давления MUR Depth sensor, а) фотография, б) принципиальная схема

Датчик давления MS5837-30BA - это компактный цифровой датчик давления, который может измерять давление до 30 бар (глубина 300 м / 1000 футов), температуру, а также высоту воздушного столба над уровнем моря. Он работает при напряжении от 3,3 до 5,5 В.

MS5837-30BA имеет высокую точность и низкий уровень шума. MS5837-30BA имеет два интерфейса передачи данных - I2C и SPI, что обеспечивает его совместимость с различными микроконтроллерами и другими устройствами обработки данных. Датчик имеет малые габариты, что делает его легко интегрируемым в водонепроницаемый корпус на автономные необитаемые

подводные аппараты (АНПА) или телеуправляемые обитаемые подводные аппараты (ТНПА), или системы мониторинга.

Для определения глубины воды необходимо прочитать значение абсолютного давления с датчика и затем применить формулу 1, которая соотносит давление с глубиной воды. Значение глубины воды можно вывести на дисплей или передать на другое устройство для последующей обработки или анализа.

Важно учитывать, что при работе в подводной среде необходимо учитывать высокие давления, прочность и защиту от коррозии оборудования, а также применение специализированных материалов и методов герметизации для обеспечения надежной работы датчиков и приборов в условиях под водой.

Для измерения давления в сосудах высокого давления могут использоваться датчики, основанные на изменении сопротивления материала под воздействием высокого давления. Например, датчик давления USP-G41-1.2 (рисунок 4)



Рисунок 4 – Датчик давления USP-G41-1.2

USP-G41-1.2 - это датчик давления воды, газа, масла используемый для измерения давления жидкостей в системе. Он работает на основе электронного преобразования давления в электрический сигнал, который может быть прочитан компьютером или другим устройством. Датчик USP-G41-1.2 имеет диапазон измерения 0-1.2 МПа и точность измерения  $\pm 0.5\%$ . Он использует

мембранную технологию и имеет высокую устойчивость к перегрузкам, коррозии и воздействию различных химических веществ воды.

Для измерения усилий, например, в рамках систем контроля и управления роботизированными устройствами, используют **резистивные датчики давления** (рисунок 5).



Рисунок 5 – Резистивный датчик давления

Резистивный датчик давления - это тип датчиков, которые изменяют свое электрическое сопротивление в зависимости от давления, действующего на его поверхность. Обычно в резистивном датчике давления используются тонкие пленочные пьезорезисторы, которые изменяют свое сопротивление в зависимости от деформации при давлении. Когда на датчик давления воздействует давление, происходит механическая деформация пьезорезисторов, в результате чего меняется их сопротивление. Изменение сопротивления пьезорезисторов связано с изменением длины и ширины резисторов и их электрических свойств, таких как специфическое сопротивление материала. Измерение изменения сопротивления в пьезорезисторах позволяет определить изменение давления, действующего на датчик. Для этого сопротивление пьезорезисторов может быть измерено с использованием мостовой схемы с определенной электрической схемой,

которая преобразует изменение сопротивления в сигнал напряжения или тока, пропорциональный давлению.

На рисунке 6 приведён график, взятый из технической документации. Он наглядно позволяет оценить нелинейную зависимость изменения сопротивления от силы нажатия на чувствительный элемент датчика.

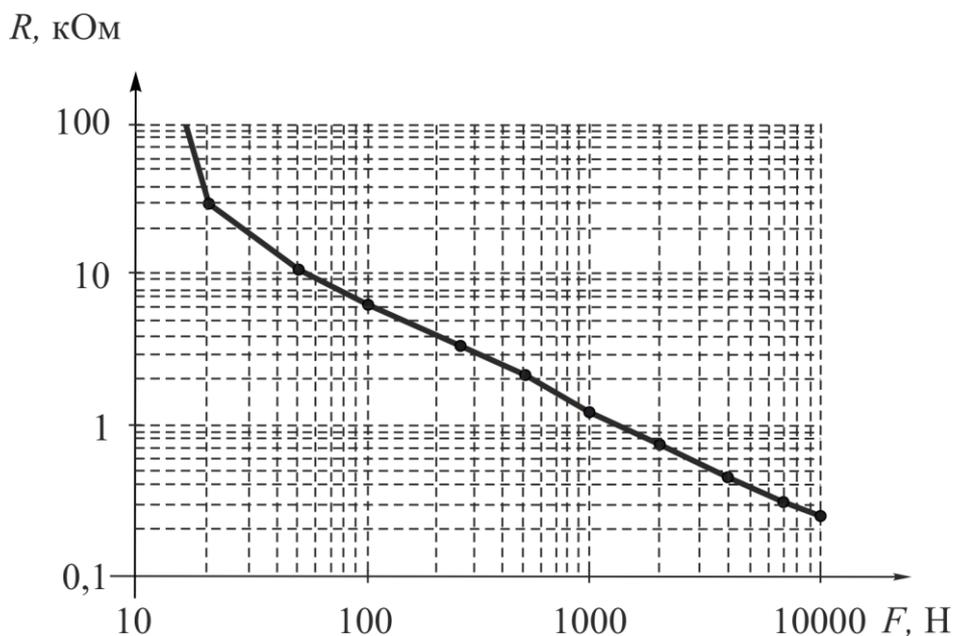


Рисунок 6 – График зависимости сопротивления от силы нажатия

Конструкция резистивного датчика давления может различаться в зависимости от конкретной модели и применения, но обычно она состоит из следующих элементов:

1. Мембраны – тонкой, гибкой пластины, которая деформируется под действием давления. Мембрана может быть сделана из различных материалов, включая металлы (такие как нержавеющая сталь) или полимеры (такие как силикон).

2. Пьезорезистивного элемента, состоящего из пьезорезистора или набора пьезорезисторов, размещенных на подложке, которые изменяют свое сопротивление в зависимости от давления. Пьезорезисторы могут быть изготовлены из материалов, таких как кремний или полипропилен, которые обладают пьезоэлектрическими свойствами и изменяют свое сопротивление при деформации.

3. Контактные провода, которые соединяют элемент датчика с внешней цепью и устройством измерения.

4. Защитный корпус – оболочка, которая обеспечивает защиту датчика от воздействия окружающей среды и воздушных потоков.

Конструкция резистивного датчика давления приведена на рисунке 7.

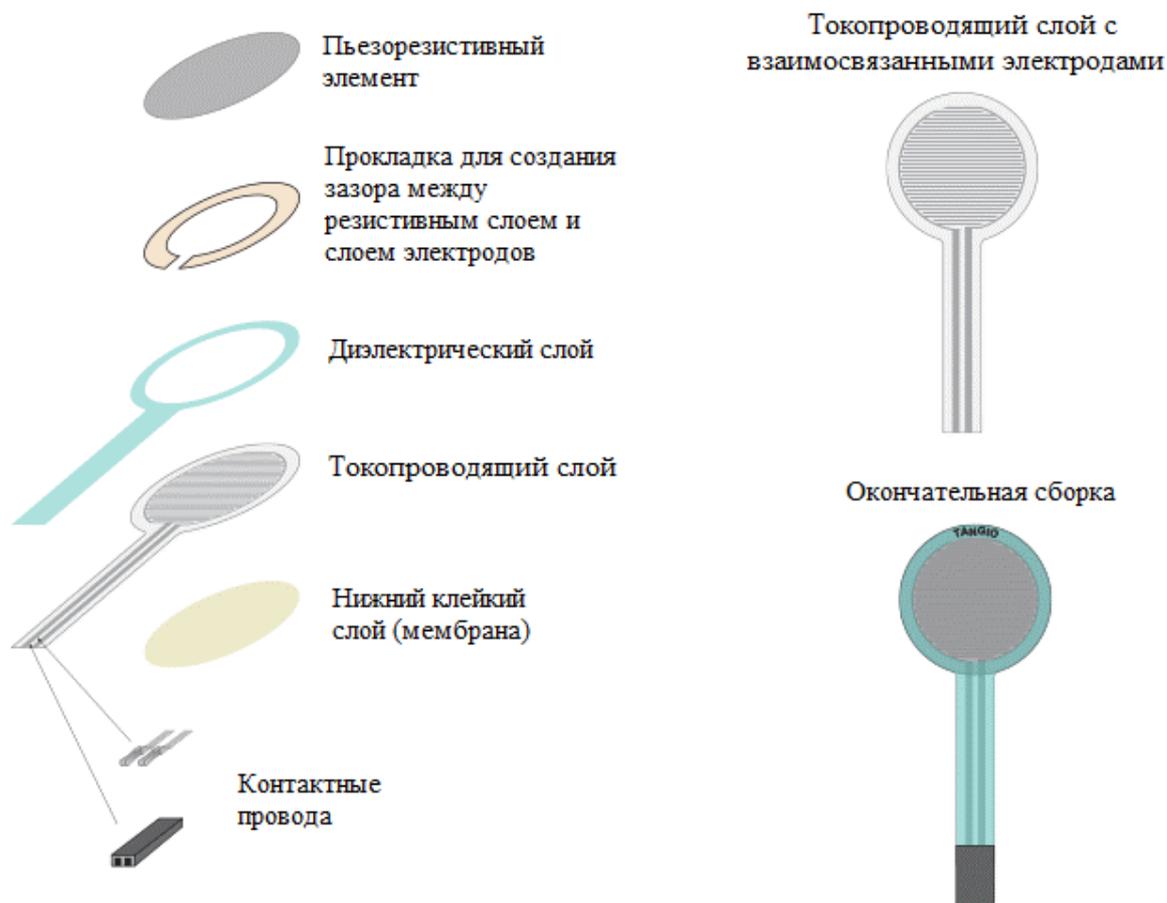


Рисунок 7 – Конструкция резистивного датчика давления

Преимуществами резистивных датчиков давления являются их простота и надежность. Они имеют простую конструкцию и мало подвержены поломкам или сбоям, что делает их надежными в использовании. Резистивные датчики давления относительно недорогие по сравнению с другими типами датчиков давления и могут быть произведены с различными диапазонами измерений, что позволяет измерять как низкие, так и высокие значения давления. Благодаря их аналоговому сигналу, Резистивные датчики давления

могут использоваться с различными типами управляющих и измерительных устройств

Недостатками резистивных датчиков давления является меньшая точностью по сравнению с другими типами датчиков давления, такими как пьезорезистивные или мембранные. Но в устройствах, где точность измерения до грамм не нужна, этот датчик хорошо подойдет для измерения приблизительно приложенной силы. Это тактильные датчики для роботов и протезов (круглые датчики как будто уже повторяют очертания пальца), датчики присутствия пассажиров на сиденье автомобиля, различные кнопочные устройства и так далее. Изменение температуры может влиять на сопротивление чувствительного элемента резистивного датчика давления, что может вызвать погрешности в измерениях. При проектировании резистивного датчика давления могут потребоваться дополнительные механические компоненты, такие как диафрагма или мембрана, чтобы обеспечить механическую деформацию и изменение сопротивления.

**Барометр** в робототехнике - это датчик, который измеряет атмосферное давление. Этот тип датчика может быть использован в робототехнике для различных целей, включая навигацию и управление дронами. Одним из основных применений барометра в робототехнике является определение высоты и изменения высоты. Барометр позволяет роботу определить свою высоту относительно уровня моря или исходной точки, что может быть полезно для навигации и автономного управления. Например, датчик барометра может использоваться в дронах для контроля высоты при полете или для точного приземления. Другое применение барометра в робототехнике - это обнаружение изменений в атмосферном давлении, которые могут указывать на изменения погодных условий или перемещение робота относительно окружающей среды. Например, робот, оснащенный барометром, может обнаружить изменение давления и, основываясь на этой информации, принять соответствующие решения или изменить свое поведение. В целом,

барометр в робототехнике обеспечивает дополнительный способ восприятия окружающей среды для робота, позволяя ему определять высоту и обнаруживать изменения давления, которые могут быть полезными в контексте навигации, управления и адаптации к окружающим условиям.

В качестве барометра в лабораторной работе будем использовать датчик BME280, внешний вид которого показан на рисунке 8.

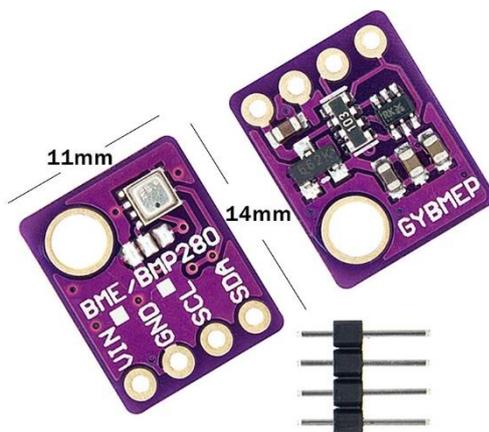


Рисунок 8 – Модуль датчика давления BME280

BME280 - это компактный и высокоточный датчик давления, температуры и влажности, разработанный компанией Bosch. Он основан на технологии MEMS (микроэлектромеханических систем) и имеет миниатюрный размер, что делает его идеальным для встраивания в различные устройства и системы.

#### Основные параметры

- Измерение давления в диапазоне от 300 до 1100 гПа с точностью до  $\pm 1,0$  гПа.
- Измерение температуры в диапазоне от  $-40$  до  $+85$  °C с точностью до  $\pm 1,0$  °C.
- Диапазон измерения влажности от 0 до 100 % с точностью до  $\pm 3$  %.
- Рабочее напряжение от 3 до 5 В.

Датчик имеет интерфейсы для взаимодействия с микроконтроллерами и другими устройствами, включая интерфейсы I2C и SPI. Это обеспечивает

легкую интеграцию датчика в различные системы. ВМЕ280 имеет низкое энергопотребление и поддерживает различные режимы работы, позволяя устройствам использовать его в энергоэффективном режиме. Датчик ВМЕ280 широко применяется в различных областях, включая метеорологию, климатические системы, автоматизацию зданий, промышленные приложения и др. Он обеспечивает точные и надежные измерения давления, температуры и влажности, что делает его незаменимым инструментом во многих системах.

Датчик ВМЕ280 также может функционировать как альтиметр (высотомер) с точностью  $\pm 1$  м, поскольку давление изменяется с высотой, но для того, чтобы высота была точной, необходимо знать давление на уровне моря, для использования его в качестве исходного уровня. Чаще всего, этот прибор используют на летательных аппаратах для определения высоты полета. Чем выше аппарат поднимается над уровнем моря, тем меньшее давление испытывает бортовой барометр. График зависимости атмосферного давления от высоты приведен на рисунке 9.

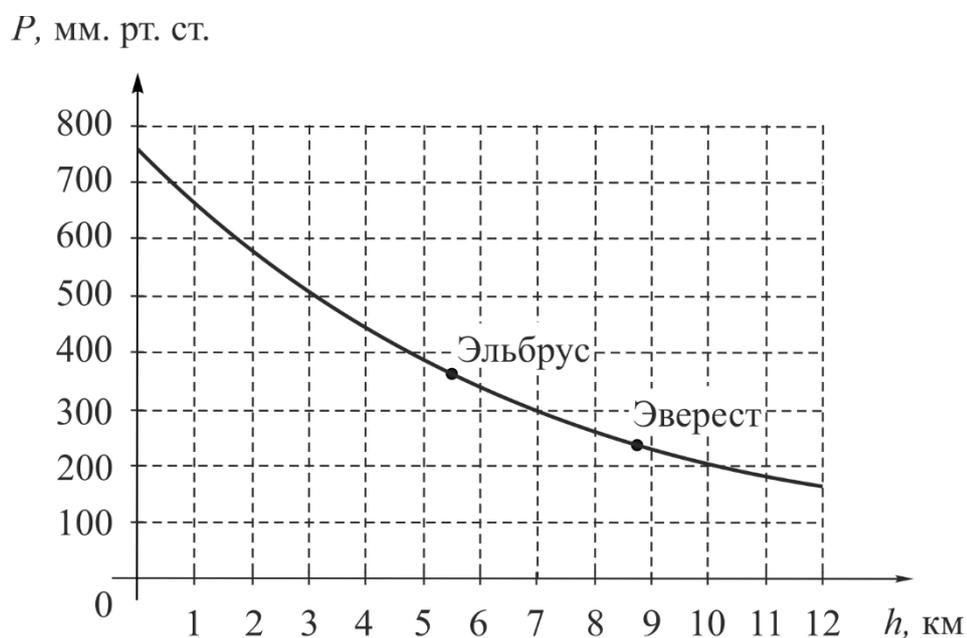


Рисунок 9 – Зависимость атмосферного давления от высоты

Закон убывания давления газа с высотой в поле силы тяжести дает барометрическая формула:

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu g h}{RT}}, \quad (2)$$

откуда,

$$\frac{p}{p_0} = e^{-\frac{\mu g h}{RT}}, \quad (3)$$

логарифмируя обе части уравнения, получим:

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{\mu g h}{RT}. \quad (4)$$

Для определения высоты полета робота выразим высоту из формулы 4:

$$h = -\frac{RT \ln p / p_0}{\mu g}. \quad (5)$$

где  $h$  – высота полета в метрах,  $P_0$  – давление на уровне моря (101325 Па),  $P$  – измеренное давление в Па,  $T$  – измеренная температура в градусах Цельсия,  $R$  – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/моль·К),  $\mu$  – молярная масса воздуха (28,8 г/моль),  $g$  – ускорение свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>).

### **Описание лабораторного стенда**

Блок-схема датчика давления ВМЕ280, используемого в лабораторной работе, показана на рисунке 10.

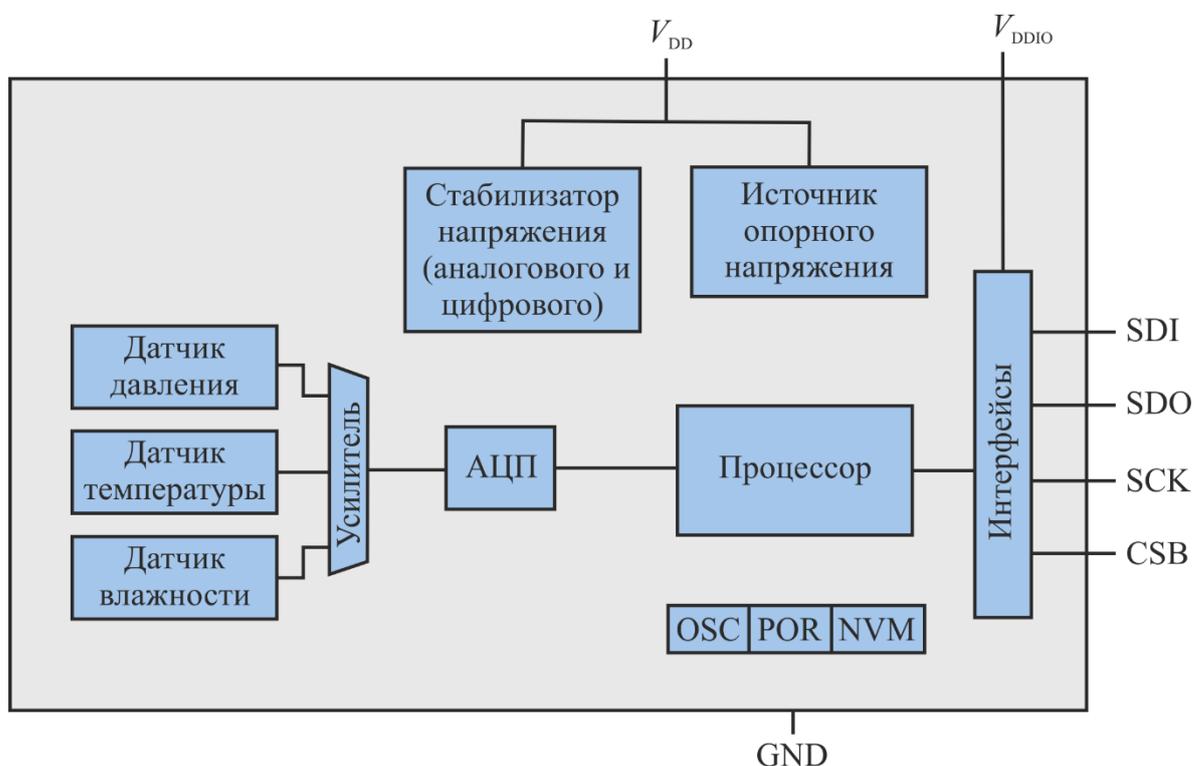


Рисунок 10 – Блок-схема датчика давления VME280

Принцип работы датчика VME280 основан на измерении изменения сопротивления полупроводника внутри датчика под воздействием температуры и давления. Внутри VME280 есть тонкая пленка с полупроводником, которая изменяет свое сопротивление при изменении окружающего давления. Эта пленка является основной частью датчика давления и называется пьезорезистором. Для измерения температуры VME280 использует термистор, который изменяет свое сопротивление при изменении температуры. Термистор расположен внутри датчика и измеряет температуру окружающей среды. Для измерения влажности VME280 использует технологию емкости, которая основана на изменении емкости при изменении влажности. Датчик имеет два электрода, которые образуют конденсатор. Один электрод заполнен материалом, способным поглощать воду, тогда как другой электрод находится на расстоянии от материала. При изменении влажности материал насыщается водой, что приводит к изменению емкости конденсатора. Измеряя изменение емкости, можно рассчитать изменение влажности. Полученные данные усиливаются и преобразуются в цифровой формат и передаются в процессор. Процессор, который

используется в датчике давления BME280, представляет собой однокристалльный микроконтроллер, который управляет всеми операциями датчика. Этот микроконтроллер имеет встроенную память и управляет выполнением всех задач, связанных с измерением параметров атмосферы, таких как давление, температура и влажность. Процессор BME280 используется для выполнения различных функций, например, для выполнения алгоритмов компенсации. Эти алгоритмы позволяют учесть возможные ошибки, такие как влияние температуры на измерение давления. Он также преобразует измеренные значения давления, температуры и влажности в единицы измерения, и передает в микроконтроллер Arduino через интерфейс I2C или SPI. Микроконтроллер Arduino принимает данные и выполняет дополнительную обработку для вычисления значений давления, температуры и влажности. Все три измерения давления, температуры и влажности объединяются с помощью компьютерной обработки данных, чтобы предоставить точные и надежные показания окружающей среды.

Датчик давления BME280 может быть чувствителен к изменениям напряжения питания. Стабилизатор напряжения используется для поддержания стабильного и точного напряжения питания независимо от внешних факторов, таких как вариации входного напряжения или нагрузки. Это обеспечивает стабильные и надежные измерения давления и других параметров датчика. Для определения точного значения давления или других параметров, датчик BME280 может использовать внутренний источник опорного напряжения. Точность измерений может зависеть от стабильности опорного напряжения. Источник опорного напряжения обеспечивает стабильное и точное напряжение, которое используется как эталон для сравнения сигналов от других частей датчика. Оба этих элемента (стабилизатор напряжения и источник опорного напряжения) помогают обеспечить стабильность и точность работы датчика давления BME280, что является особенно важным при проведении измерений давления, температуры и влажности в различных условиях.

На рисунке 11 приведена принципиальная схема модуля датчика давления BME280.

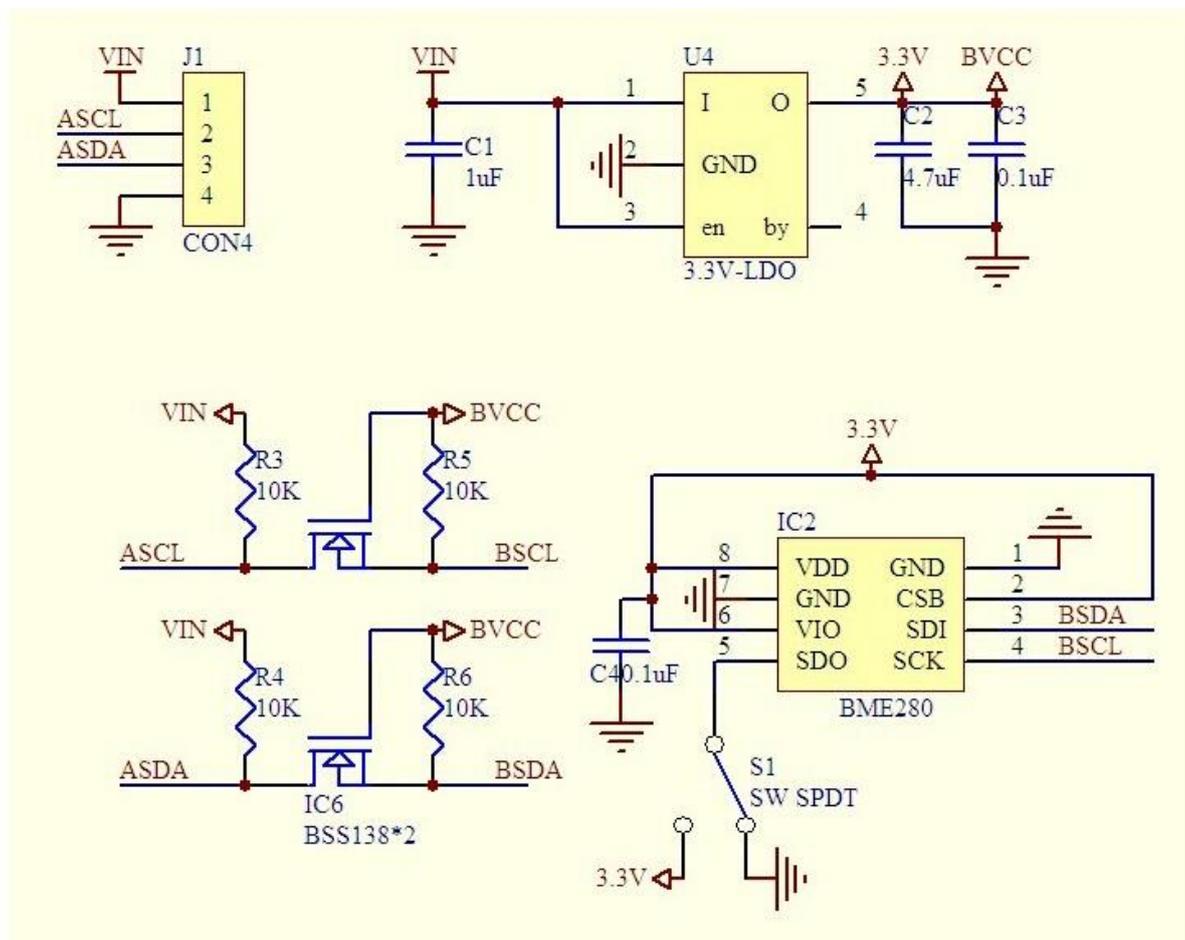


Рисунок 11 – Принципиальная схема модуля датчика давления BME280

Датчик давления BME280 использует транзисторы BSS138 для управления питанием внутренних компонентов датчика и для изменения режимов работы. С помощью транзисторов BSS138 датчик может переключаться между режимами измерения, ожидания и сна, что позволяет экономить энергию и увеличивать срок службы батарейного питания, если датчик используется в портативных устройствах. Транзисторы BSS138 контролируют питание каждой части датчика отдельно, и это позволяет выбирать, какие части датчика могут быть отключены или включены, в зависимости от режима работы. Например, когда датчик находится в режиме сна, можно отключить питание части измерительной цепи, которая не используется в этот момент. Также можно использовать транзисторы BSS138 для управления индикаторными светодиодами, которые указывают текущий режим работы

датчика. Также транзисторы используются для управления коммуникационным интерфейсом датчика BME280, таким как I2C или SPI, и обеспечения стабильной передачи данных между датчиком и микроконтроллером или другим управляющим устройством.

Расположение контактов датчика давления BME280 приведены на рисунке 12.

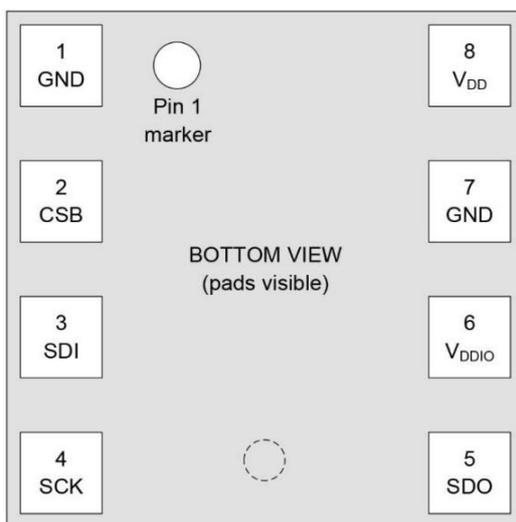


Рисунок 12– Расположение контактов датчика давления BME280

Описание контактов датчика давления BME280 приведено в таблице 1

Таблица 1 – Описание контактов датчика давления BME280

№	Имя	Тип ввода/вывода	Описание	Подключение по интерфейсу		
				SPI 4W	SPI 4W	I2C
1	GND	Источник	Заземление	GND		
2	CSB	Вход	Выбор чипа	CSB	CSB	V <sub>DDIO</sub>
3	SDI	Вход/выход	Последовательный ввод данных	SDI	SDI/SDO	SDA
4	SCK	Вход	Последовательный тактовый вход	SCK	SCK	SCL
5	SDO	Вход/выход	Последовательный вывод данных	SDO	DNC	GND для адреса по умолчанию
6	V <sub>DDIO</sub>	Источник	Питание цифровое/интерфейса	V <sub>DDIO</sub>		
7	GND	Источник	Заземление	GND		

8	V <sub>DD</sub>	Источник	Аналоговое питание	V <sub>DD</sub>
---	-----------------	----------	--------------------	-----------------

В качестве микроконтроллера используем Arduino Mega. Сердцем платформы Arduino Mega является 8-битный микроконтроллер семейства AVR — ATmega2560 с тактовой частотой 16 МГц. Контроллер предоставляет 256 КБ Flash-памяти для хранения программного кода, 8 КБ оперативной памяти SRAM и 4 КБ энергонезависимой памяти EEPROM для хранения данных. Arduino Mega имеет 54 цифровых входа/выхода (включая 15 PWM выходов), 16 аналоговых входов и 4 UART порта (серийный порт).

Микроконтроллер ATmega16U2 обеспечивает связь микроконтроллера ATmega2560 с USB-портом компьютера. При подключении к ПК Arduino Mega 2560 определяется как виртуальный COM-порт.

Датчик давления подключаем к микроконтроллеру по интерфейсу I2C, для этого контакты SCL и SDA датчика давления BME280 соединяем с контактами SCL(21-й контакт) и SDA(20-й контакт) Arduino. Землю и питание соединяем с «GND» и «Vin» Arduino. Схема подключения датчика BME280 приведена на рисунке 13.

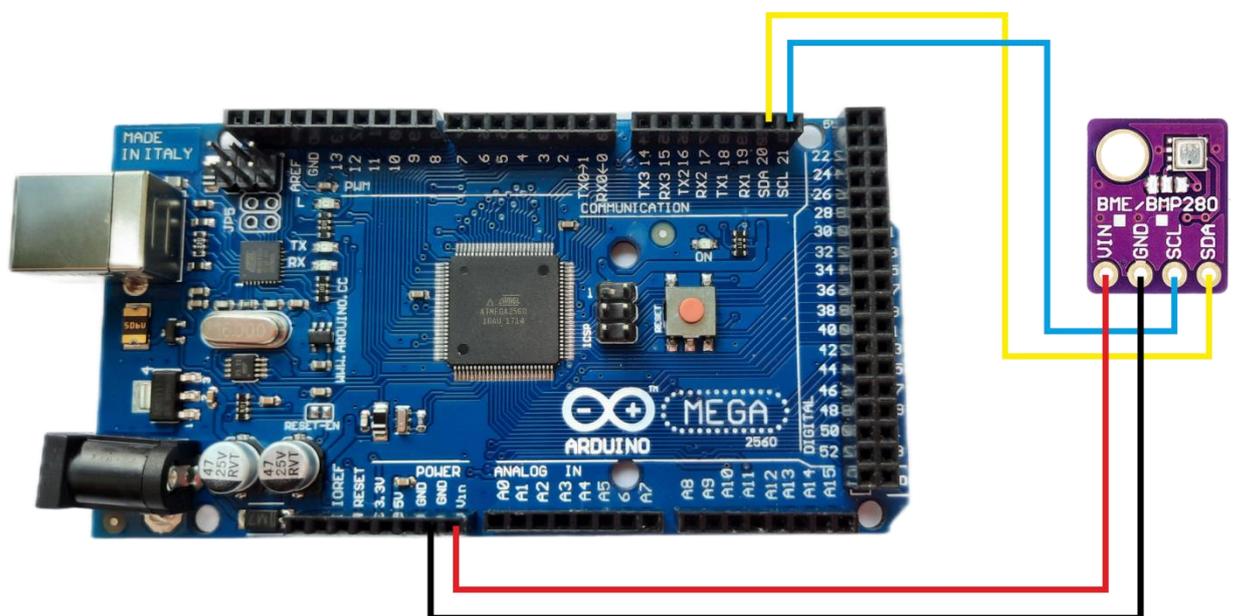


Рисунок 13 – Схема подключения датчика давления BME280 к Arduino Mega

После подключения необходимо запрограммировать датчик давления, для этого выполните следующие действия:

1. Подключите Arduino-плату к компьютеру через USB-порт.
2. Для создания нового проекта откройте Arduino IDE.

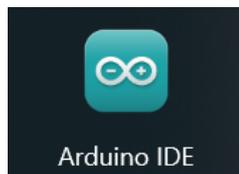


Рисунок 14 – Пиктограмма программы Arduino IDE

3. Создайте новый файл проекта, выбрав пункт «Файл» -> «Новый» в верхнем меню.

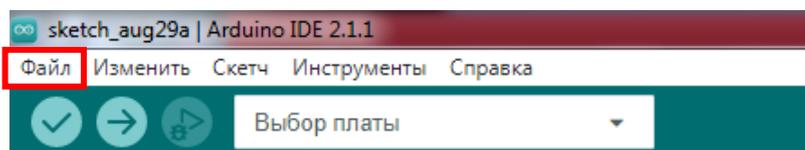


Рисунок 15 – Вкладка «Файл» программы Arduino IDE

4. Откроется окно с основной структурой вашей программы.

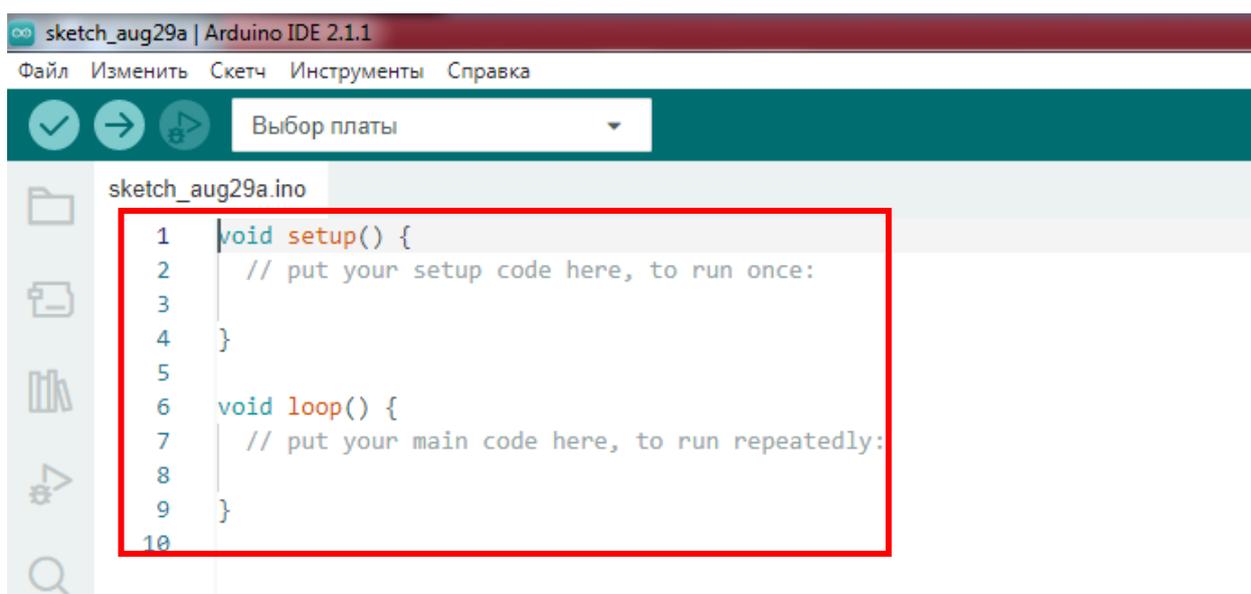


Рисунок 16 – Окно редактора Arduino IDE

Для минимальной программы требуется всего 2 блока: **setup** и **loop**. Их присутствие обязательно в любой программе на C++ для Arduino, иначе на стадии компиляции можно получить ошибку.

- **setup()**: Функция вызывается один раз в начале программы и используется для инициализации выходных портов, устройств или других параметров вашей программы.

- **loop()**: Функция выполняется бесконечно и является основным циклом вашей программы. В ней содержится основная логика управления или задачи, которые вам нужно выполнить.

#### 5. Напишите код вашей программы в окне редактора Arduino IDE.

```
1 // Подключаем библиотеку Wire
2 #include <Wire.h>
3 // Подключаем библиотеку Adafruit_Sensor
4 #include <Adafruit_Sensor.h>
5 // Подключаем библиотеку Adafruit_BME280
6 #include <Adafruit_BME280.h>
7 // Задаем высоту
8 #define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)
9 Adafruit_BME280 bme;
10 void setup() {
11     // Открытие последовательного порта на скорости 9600
12     Serial.begin(9600);
13     // Инициализация датчика BME280 по интерфейсу I2C
14     if (!bme.begin(0x76)) {
15         // Печать сообщения об ошибке
16         Serial.println("Could not find a valid BME280!");
17         while (1);
18     }
19 }
20 void loop() {
21     // Вывод слова Pressure =
22     Serial.print("Pressure = ");
23     // Вывод измеренного значения атмосферного давления
24     Serial.print(bme.readPressure() / 100.0F);
25     // Вывод единицы измерения давления
26     Serial.println("hPa");
27
28     // Вывод слова Approx. Altitude =
29     Serial.print("Approx. Altitude = ");
30     // Вычисление высоты (в метрах) исходя из текущего атмосферного
31     // давления (в гПа) и давления на уровне моря (в гПа);
32     Serial.print(bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA));
33     // Вывод единицы измерения высоты
34     Serial.println("m");
35
36     // Новая строка
37     Serial.println();
38     // Пауза 1 с
39     delay(1000);
40 }
```

Для работы с датчиком подключите библиотеку «Adafruit\_BME280», для этого выберите пункт «Скетч» в верхнем меню -> «Подключить библиотеку» -> «Управление библиотеками» или на панели слева.

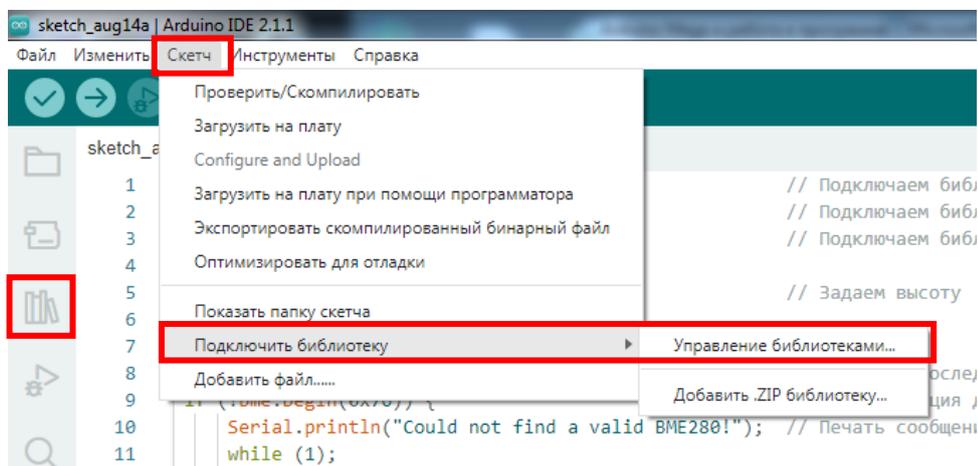


Рисунок 17 – Вкладка «Скетч» для выбора встроенных библиотек Arduino

В открывшемся меню найдите библиотеку «Adafruit\_BME280» и нажмите «Установка»

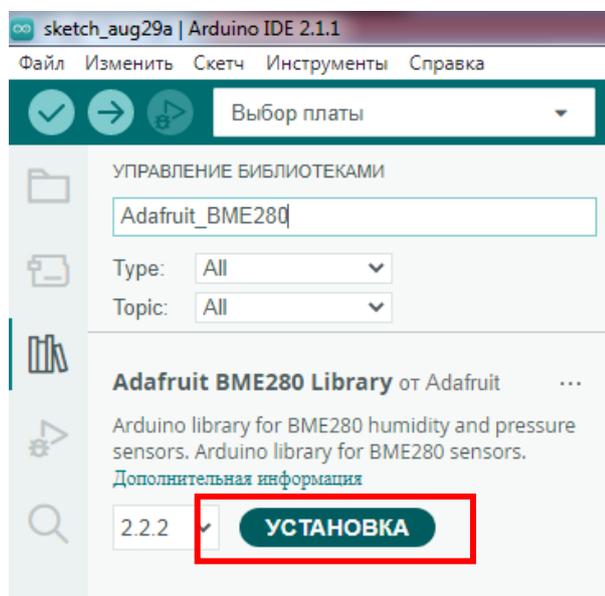


Рисунок 18 – Вкладка «Скетч» для выбора встроенных библиотек Arduino

6. Убедитесь, что выбрана правильная плата и порт коммуникации.

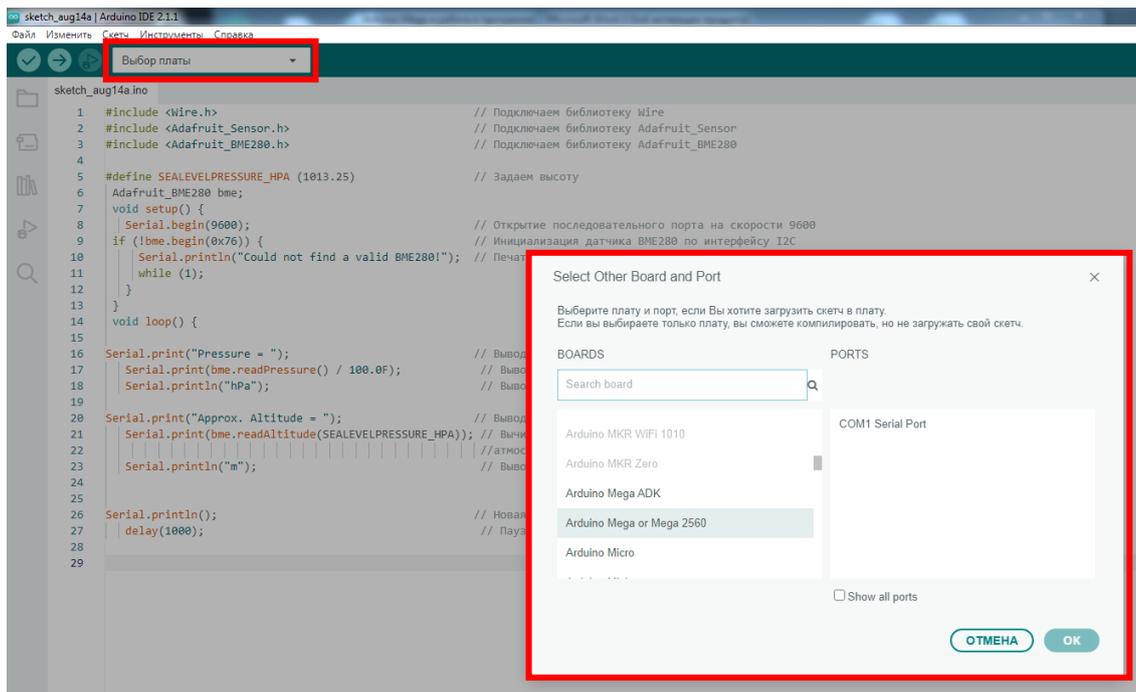


Рисунок 19 – Окно для выбора платы и порта

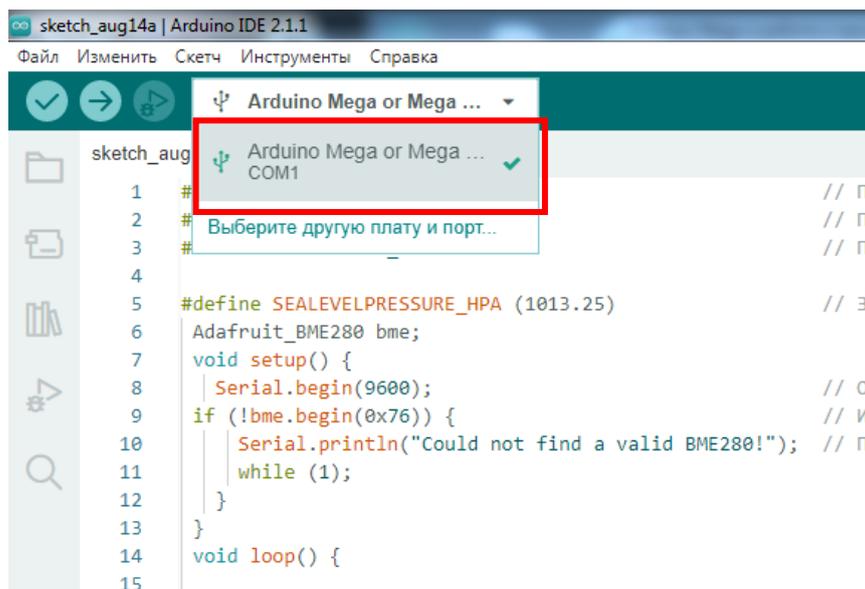


Рисунок 20 – Отображение выбранной платы и порта на верхней панели Arduino IDE

7. Проверьте синтаксис вашего кода, нажав кнопку «Проверить» (галочка) в верхней панели Arduino IDE.

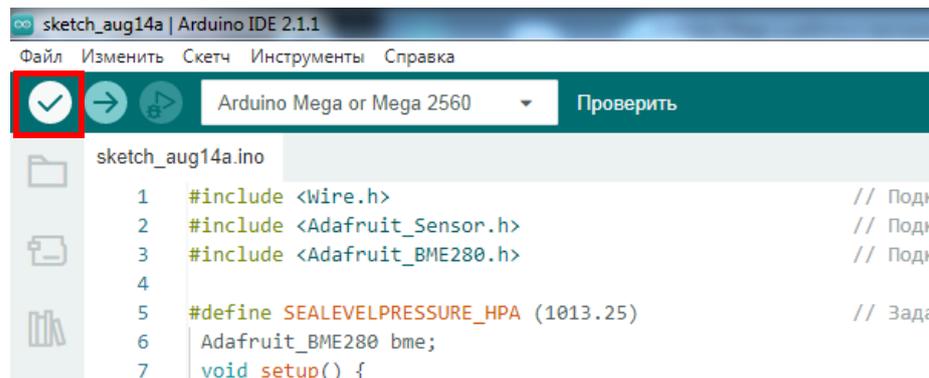


Рисунок 21 – Кнопка «Проверить» программы Arduino IDE

Если нет ошибок, ваш код будет успешно скомпилирован в машинный код, готовый для загрузки на Arduino-плату.

8. Нажмите кнопку «Загрузить» (стрелка вниз) в верхней панели Arduino IDE, чтобы загрузить скомпилированный код на Arduino.

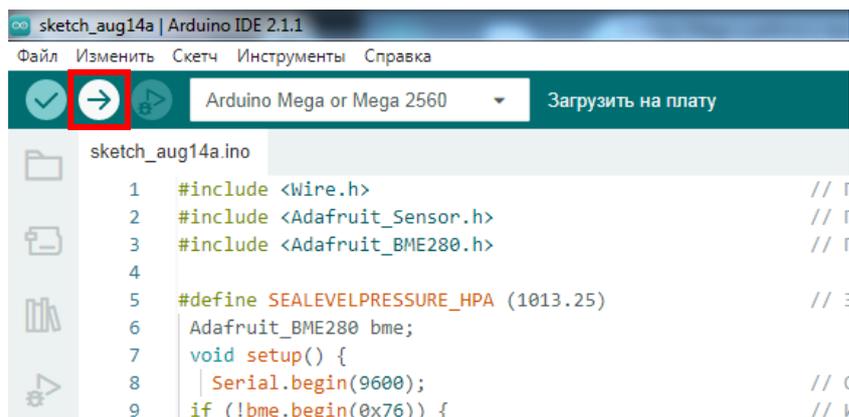


Рисунок 22 – Кнопка «Загрузить» программы Arduino IDE

Плата будет перезагружена и начнет выполнять Вашу программу.

9. Откройте монитор порта, выбрав пункт «Инструменты» -> «Монитор порта» в верхнем меню или «Построить графики из данных в мониторе порта».

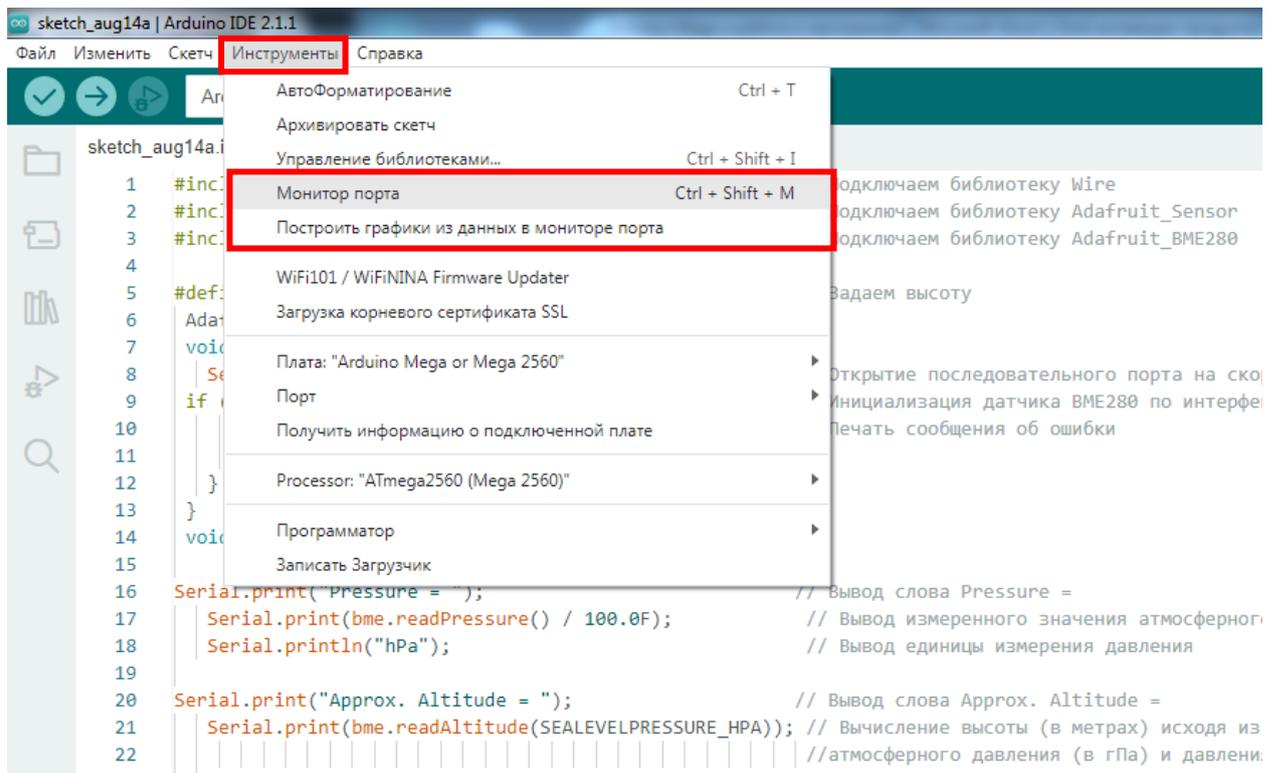


Рисунок 23 – Вкладка «Инструменты» для выбора просмотра полученных данных

В «Мониторе порта» вы сможете просматривать числовые данные, выводимые вашей программой (рисунок 24), а в «Построить графики из данных в мониторе порта» данные отображаются в графическом виде.

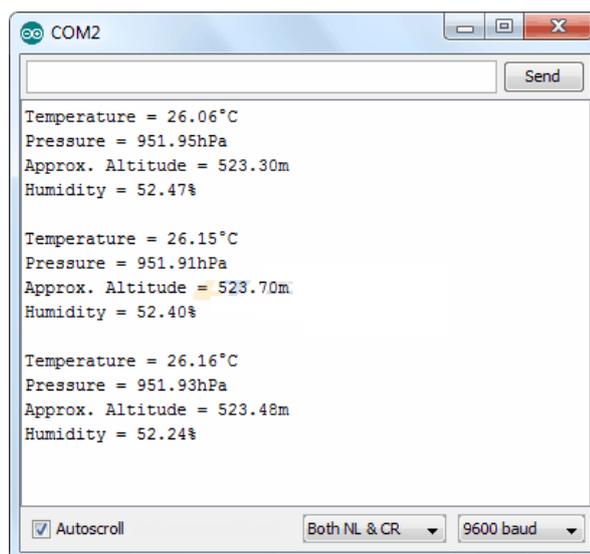


Рисунок 24 – Вывод показаний датчика BME280

## Задание

1. Подключить Arduino к персональному компьютеру.
2. Написать код для вывода давления, высоты.
3. Добавить в программу вывод температуры и влажности.
4. Открыть монитор порта программы Arduino IDE.
5. Расположить датчик bme280 на столе и измерить рулеткой высоту расположения датчика, производить запись значений в течении 1 мин. Повторить 5 раз с интервалом в 5 мин.
6. Расположить датчик bme280 на полу, производить запись значений в течении 1 мин. Повторить 5 раз с интервалом в 5 мин.
7. Расположить датчик bme280 на самой высокой точке аудитории и измерить рулеткой высоту расположения датчика, производить запись значений в течении 1 мин. Повторить 5 раз с интервалом в 5 мин.
8. Рассчитать среднее значение температуры и влажности в помещении за 1 мин.
9. Привести график давления, температуры и влажности в помещении за 1 мин.
10. Построить зависимость давления от высоты расположения датчика. Сравнить экспериментальную зависимость с теоретической.
11. Произвести расчет погрешности, разрешающей способности и чувствительности датчика.

## Отчет

1. Цель лабораторной работы.
2. Описать принцип действия датчика.
3. Алгоритм работы программы и программный код.
4. Проанализировать полученные зависимости.
5. Ответы на контрольные вопросы.

## Контрольные вопросы

1. Где применяются датчики давления?
2. Перечислите наиболее распространенные типы датчиков давления.
3. На каком принципе работают гидростатические датчики давления?
4. Как зависит атмосферное давление от глубины погружения?
5. Из каких элементов состоит резистивный датчик давления?
6. Как зависит сопротивление от силы нажатия на датчик давления?
7. Что такое барометр?
8. Как зависит атмосферное давление от высоты?
9. Объясните принцип работы датчика давления, используемого в лабораторной работе.

## Расчет погрешности

Для того чтобы убедиться в правильности работы системы необходимо провести расчет погрешности измерений.

Для оценки погрешности необходимо выполнить следующие этапы проведения и обработки многократных измерений:

1) Не изменяя условий эксперимента (температуры окружающей среды, величин акустического поля, зондирующего напряжения, положение датчиков и паллеты и тому подобных), провести несколько измерений одной и той же интересующей физической величины. Для удовлетворительной точности в оценке наилучшего значения измеряемой величины  $x$  число этих измерений  $N$  должно быть не менее пяти.

2) На основе полученной ограниченной статистической выборки вычислить по формуле (6) выборочное среднее значение  $\bar{x}$  как наилучшую оценку  $x_{\text{наил}}$  истинного значения  $X$ :

$$x_{\text{наил}} = \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N}{N} \quad (6)$$

где  $x_1, \dots, x_N$  - измеренное значение;

$N$  - число измеренных значений.

3) Средняя абсолютная погрешность любого отдельного измерения из выборки  $x_1 \dots, x_N$  есть стандартное отклонение, определяемое выражением 7):

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

где  $\bar{x}$  - выборочное среднее значение.

4) Рассчитав стандартное отклонение  $\sigma_x$  по формуле (7) можно вычислить стандартное отклонение среднего  $\sigma_{\bar{x}}$  с помощью выражения (8):

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

5) Используя рассчитанное стандартное отклонение среднего  $\sigma_{\bar{x}}$  из выражения (8) рассчитывается абсолютная погрешность (если  $\alpha = 95\%$  то коэффициент Стьюдента равно 1,97 при 120 измерений) по формуле (9):

$$\Delta x = t_\alpha \cdot \sigma_{\bar{x}} \quad (9)$$

где  $t_\alpha$  - коэффициент Стьюдента.

6) Зная абсолютную погрешность из выражения (9) рассчитывается относительная погрешность с помощью выражения (10):

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}} \% \quad (10)$$

### **Определение разрешающей способности датчика давления**

Определение разрешающей способности датчика давления зависит от типа датчика и его параметров, включая диапазон измерения и точность.

Разрешающая способность датчика давления определяется по формуле 10:

$$p_a = \frac{p_{max}}{(2^n - 1)}, \quad (10)$$

где  $p_a$  - разрешающая способность датчика,  $p_{max}$  - максимальное значение давления, измеряемого датчиком, а  $n$  - количество битов (разрядность) АЦП (аналого-цифрового преобразователя), используемого для преобразования аналогового сигнала датчика в цифровой вид.

Однако, стоит учесть, что разрешающая способность датчика может быть ограничена шумом и другими нежелательными факторами, такими как нелинейность, дрейф и шум усиления. Поэтому, чтобы получить точные результаты измерений, необходимо учитывать не только разрешающую способность датчика, но и другие параметры, в том числе частоту дискретизации, уровень шума и допустимую ошибку измерения.

### **Определение чувствительности датчика давления**

Чувствительность датчика давления - это отношение изменения выходного сигнала датчика к изменению давления, действующего на датчик.

Чувствительность датчика давления определяется по формуле 11:

$$S = \frac{V_2 - V_1}{P_2 - P_1}, \quad (10)$$

где  $S$  - чувствительность датчика,  $V_2$  и  $V_1$  - выходные значения датчика при двух различных давлениях  $P_2$  и  $P_1$  соответственно.

Чувствительность датчика давления зависит от его конструкции, свойств материалов и используемых технологий. Обычно, чувствительность датчиков давления указывается в технической спецификации датчика, или может быть определена экспериментально при использовании датчика в определенных условиях эксплуатации.

### **Контрольные вопросы**

1. Зависит ли скорость звука от влажности воздуха?
2. Какие типы датчиков применяют в локахторах?
3. Датчик собран на основе схемы с отдельным излучателем и приемником. Также возможна схема с совмещенными узлами. В чем различия этих схем, опишите их недостатки и достоинства.
4. Чем отличаются акустические датчики для работы в водной среде и в газообразной?

5. Чем отличаются отдельные датчики от раздельно-совмещенных?
6. Почему упругая волна отражается от границы раздела двух сред?
7. Что такое акустический импеданс?
8. Какова роль демпфера в конструкции акустического датчика?
9. Как определяется длина волны излучения пьезоизлучателя?
10. В каких случаях используют иммерсионную жидкость?
11. Нарисуйте схемы включения акустического датчика к усилителю.
12. Какие недостатки присущи совмещенным преобразователям?
13. Зависит ли скорость звука от температуры воздуха?