

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 датчика усилия сжатия

Методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Измерительные преобразователи в робототехнических комплексах» для студентов направлений

15.04.06 Мехатроника и робототехника.

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 датчика усилия сжатия: метод. указания по выполнению студентами лабораторных работ/ А.И.Солдатов. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 24 с.

Методические указания по выполнению студентами лабораторной работы «Изучение датчика усилия сжатия» разработаны для студентов магистратуры, обучающихся по направлению подготовки 15.04.06 Мехатроника и робототехника.

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 программного продукта Arduino IDE.....	14
Описание лабораторной установки.....	18
Программа работы	19
Содержание отчета.....	19
Контрольные вопросы	20
Литература	24

Лабораторная работа.

Изучение датчика усилия сжатия

Цель

Изучение принцип работы датчика усилия.

Задачи

Изучение принцип преобразования усилия в электрический сигнал. Изучение характеристики преобразователя силы сжатия. Определение чувствительности преобразователя. Определение погрешности преобразователя.

Оборудование: лабораторный стенд, персональный компьютер с программным продуктом Arduino IDE

Краткие теоретические сведения.

Робототехнические устройства давно заменили человеческий труд на ответственных технологических операциях. Роботы за последние десять лет появились и в быту. Один из законов робототехники гласит «не навреди человеку», поэтому отслеживать усилие, которым роботы воздействуют на окружение является неотъемлемой частью робототехнического устройства.

Датчики усилия сжатия или датчики силы – это простые в использовании датчики, предназначенные для измерения присутствия и относительной величины локализованного физического давления среды (жидкости, газа или твердого вещества). Предназначены для измерения статических и динамических нагрузок. Применяются в робототехнике, быту, строительной технике и промышленном хозяйстве. В строительной технике и робототехнике применяются в весоизмерительных системах. В быту нашли применение на кухне для определения веса продуктов, а также для определения веса человека.

Наиболее сложная силовая информация необходима для управления манипуляторами в силу того, что здесь может потребоваться ощущение по

большому числу степеней подвижности рабочего органа манипулятора. В самом общем случае это три составляющих вектора силы и три момента по углам ориентации. Поэтому часто применяется термин “силомоментное” ощущение. В предельно простом случае такое ощущение может быть ограничено только одним линейным усилием или моментом по одной угловой координате. Например, это относится к операции зачистки плоской поверхности или внутренней поверхности цилиндра.

Функциональная схема соответствующей системы ощущения имеет типовую структуру, включающую собственно датчики силы (момента), предусилитель и блок обработки информации, где осуществляется необходимое преобразование выходного сигнала датчика.

Конечно, главным элементом системы силового ощущения являются датчики силы, выдающие первичную информацию о силе (моменте). Принцип действия большинства этих датчиков основан на использовании упругого элемента, деформирующегося под действием усилия, и определении величины этой деформации как его меры. На манипуляторах датчики силы и момента размещают на трех основных местах: в шарнирах; у рабочего органа; на рабочем органе.

Существуют датчики давления использующие различные физические методы измеряемого параметра.

Емкостные датчики давления, измеряемый параметр — это емкость конденсатора, которая меняется в зависимости от приложенного усилия. Конструктивно выполняется в виде электрических обкладок, одна из которых расположена не подвижно, а вторая изменяет свое расстояние в зависимости от приложенного усилия. Изменяется расстояние между обкладками, меняется значение величины емкости конденсатора. Основным недостатком данных датчиков является нелинейная зависимость приложенного усилия от емкости.

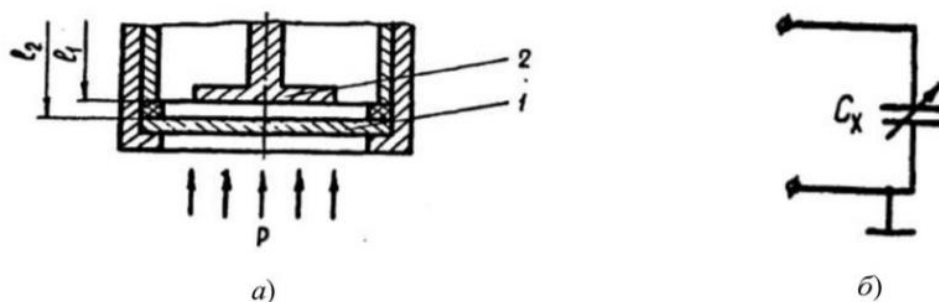


Рис.1 принципиальная схема (а) и графическое обозначение (б) емкостного датчика давления.

Емкостной датчик усилия сжатия в основном выполняются в виде цилиндрического или плоского конденсатора. Чувствительным элементом выступает одна из обкладок конденсатора выполненная из металлического электрода. Обе обкладки измерительного конденсатора подключены к автогенератору высокой частоты, больше 50 Гц. При воздействии усилия сжатия меняется емкость конденсатора, которая оказывает влияние на работу автогенератора, увеличивая частоту колебаний.

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$$

где ε – является диэлектрической проницаемостью материала, d – зазор, S – площадь пластин.

Резистивный датчик усилия (тензодатчик). Измеряемый параметр – это электросопротивление, изменяющаяся под действием давления. Сопротивление резистивного датчика давления, когда на него не действует сила является большой величиной. Стандартные датчики давления имеют сопротивление от единиц кОм до десятка Мом.

Сопротивление проводника рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad 1$$

где R – сопротивление проводника, S – площадь поперечного сечения, L – длина проводника, ρ – удельное сопротивление проводника.

При деформации растяжения длина проводника увеличивается, площадь его поперечного сечения уменьшается, следовательно, сопротивление проводника увеличивается. Кроме того, при деформации изменяется структура

кристаллической решетки проводника, что увеличивает удельное сопротивление и, следовательно, увеличивает общее сопротивление проводника. Учет этих эффектов отражен в формуле 2:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta R}{R} = \frac{(1+2\mu)\Delta L}{L_0} + \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad 2$$

где ε_r — относительное изменение сопротивления; μ — коэффициент Пуассона; ΔL — абсолютное изменение длины проводника тензорезистора вследствие деформации, м; L_0 — начальная длина проводника тензорезистора в недеформированном состоянии, м; $\frac{\Delta L}{L}$ — относительное изменение длины; $\Delta\rho_0$ — абсолютное изменение удельного сопротивления тензорезистора вследствие деформации, Ом\м; ρ_0 — начальное значение удельного сопротивления тензорезистора в недеформированном состоянии, Ом\м; $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ — относительное изменение удельного сопротивления.

Составляющая $\frac{(1+2\mu)\Delta L}{L_0}$ в выражении 2 учитывает геометрические изменения проводника при деформации. Составляющая $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ в этом же выражении учитывает изменение удельного сопротивления проводника из-за деформации.

Проволочный тензорезистор закрепляют на тонкой основе, изготовленной из бумаги, пропитанной клеем, или на лаковой пленке. Для высокотемпературных тензорезисторов используется стеклоткань в качестве основы, пропитанная высокотемпературным цементом.

На тонкую полоску основы наклеивают тонкую проволоку диаметром 0,02...0,05 мм зигзагообразной формы. На концах проволоки закрепляют медные выводы. Для защиты от внешнего воздействия проволока покрывается лаком. Длина полоски, на которой расположена проволока, называется измерительной базой тензорезистора (рис. 1). Широко распространенной базой является база длиной 5...10 мм, при этом сопротивление может варьироваться в диапазоне 30...500 Ом.

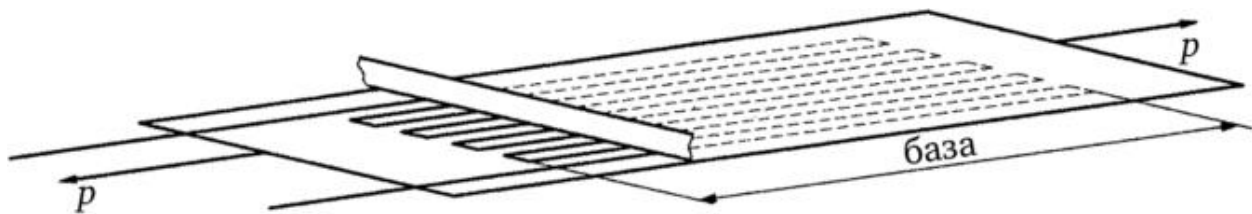


Рис. 2 Схематичное изображение конструкции проволочного тензорезистора

Применяют различные схемы соединения, основные из них, это резистивный делитель, в качестве одного из сопротивлений подключается датчик усилия. Еще одной схемой подключения является мостовая схема Уитстона подключения сопротивлений, в одно из плеч моста подключается датчик усилия.

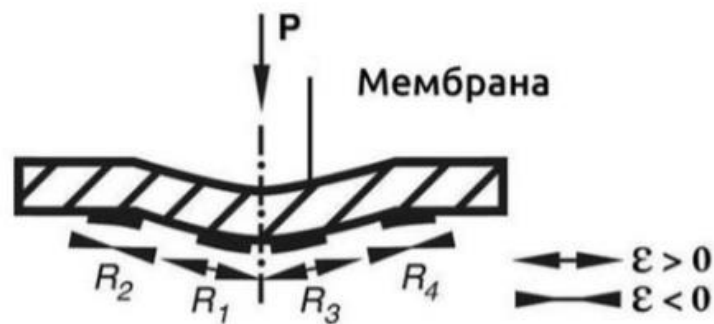


Рис. 3 Деформация чувствительного элемента в тензодатчике

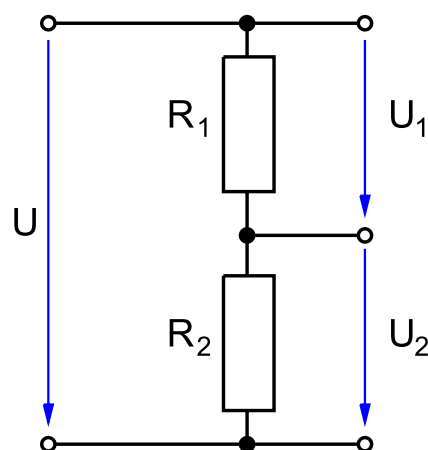


Рис. 4 Резистивный делитель напряжения

В качестве одного из сопротивлений подключается датчик усилия сжатия. Через оба сопротивления протекает ток от приложенного напряжения U . Согласно первому закону Кирхгофа, протекающий ток через оба

сопротивления будет иметь равную величину. Согласно закону Ома, падение напряжения на каждом резисторе будет пропорционально его сопротивлению. Которое можно оцифровать микроконтроллером. Общее напряжение можно рассчитать по формуле:

$$U = I \cdot R$$

Напряжения на резисторах можно рассчитать по формулам:

$$U_1 = I \cdot R_1$$

$$U_2 = I \cdot R_2$$

Измерение сопротивления с помощью моста Уитстона

Принцип основан на измерении уравнивания потенциалов средних выводов между точками В и D.

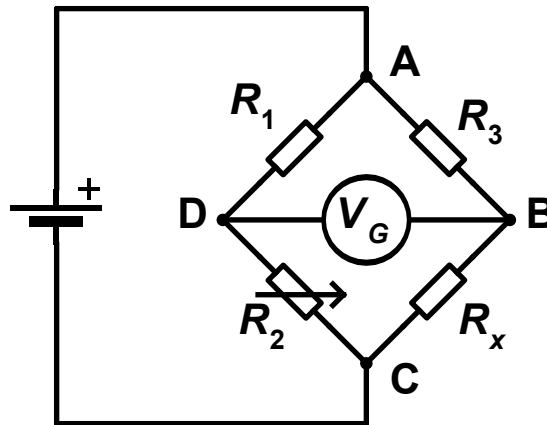


Рис. 5 Мостовая схема измерения сопротивления

R_1 , R_2 , R_3 , R_x – плечи моста, AC – диагональ питания, BD – измерительная диагональ. R_x – сопротивление, которое необходимо определить. V_G – гальванометр.

Нулевое показание гальванометра говорит об уравнивании ветвей измерительно моста. Выражается уравнением:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_x}{R_3},$$

Откуда

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1};$$

Сопротивления R_1 и R_3 являются величинами известными и постоянными. R_2 – подстроечный резистор для уравнивания ветвей моста

В настоящее время R_2 – используют постоянное сопротивление. При изменении сопротивления тензодатчика R_x , происходит дисбаланс моста и появление напряжения на его ветвях. Это напряжение можно фиксировать АЦП микроконтроллера для дальнейшего анализа. Встроенный АЦП модуля Arduino Mega 2560 имеет разрешение 10 бит. Способное почувствовать изменение напряжения с шагом 4,88 мВ. Шаг напряжения получается большим и внутреннее АЦП микроконтроллера обычно не используют. А используют внешнюю микросхему АЦП с разрядностью 24 бит, позволяющую измерить напряжение в диапазоне от 0 до 5 В с шагом 0.3 мВ. АЦП собрана на микросхеме HX711. Данная микросхема имеет 2 дифференциальных входа, позволяющая одновременно оцифровывать 2 тензодатчика, это актуально при применении в весах.

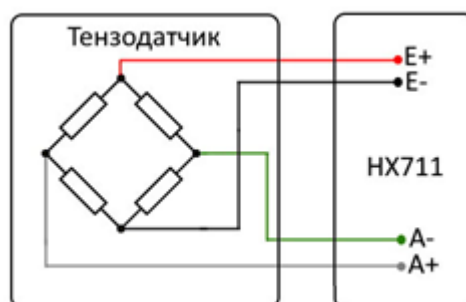




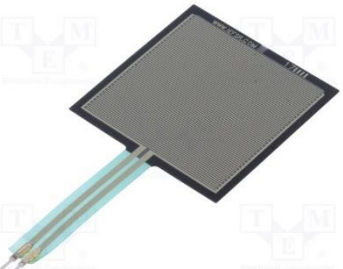

Рис. 6 Соединение ветвей измерительного моста с микросхемой усиления HX711

Данная схема способно измерить сопротивление с высокой точностью, но для этого нужно регулировать сопротивление R_2 для уравнивания ветвей моста.

Обзор различных датчиков усилия

Существует множество вариантов исполнения резистивных датчиков усилия. Наиболее часто применяемые приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики резистивных датчиков усилия

Название	Размер, мм	Диапазон измеряемого усилия, кг	Сопротивление, кОм
 SEN-09673	ø7,62	0,1 – 1	2,5
 SEN-09375	ø12,7	0,1 – 10	1000
 SEN-09376	44,45 x 44,45	0,1 – 10	1000
 SEN-09674	6,35 x 609,6	0,1 – 10	1000

Преобладают датчики с круглой или прямоугольной формой чувствительного элемента, прямоугольные применяются, когда необходима большая площадь чувствительного элемента. Для точных измерений усилия сжатия используют датчики, у которых сопротивление <10 кОм. Однако и диапазон измеряемых величин не велик, обычно это до 3 кг.

На рис. представлен график сопротивления чувствительного элемента от силы прижатия. Из графика следует, что у чувствительного элемента существует порог нечувствительности, называемый мертвой зоной. Усилие до 50 гр, чувствительным элементом не воспринимается, как и усилие, которое выходит за 10 кг.

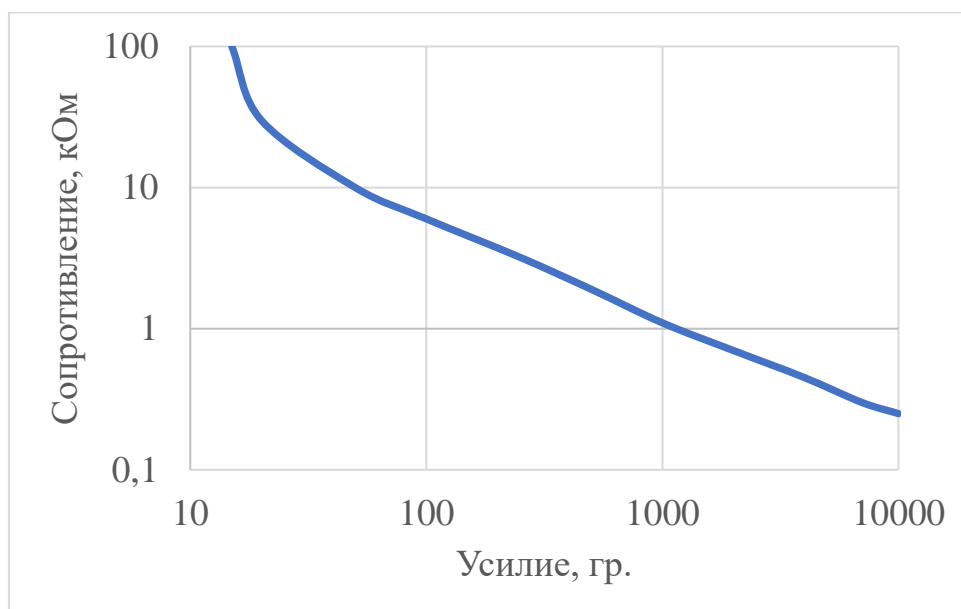


Рис. 7 Зависимость сопротивления от усилия прижатия

Простейший пример подключения датчика является схема на основе резистивного делителя, одним из сопротивлений выступает датчик усилия сжатия. Резистивный делитель подключается к питанию, а средняя точка подключается к измерительному устройству. Второе сопротивление необходимо подобрать таким чтобы протекающий ток в измерительной цепи не превышал 10 мА. В большинстве случаев выбирают сопротивление в диапазоне от 1 до 10 кОм.

Схема проста в изготовлении макета для измерения усилия сжатия. Обладает большой погрешностью измерения, требует градуировки, зависима от температуры. У данной схемы очень много минусов.

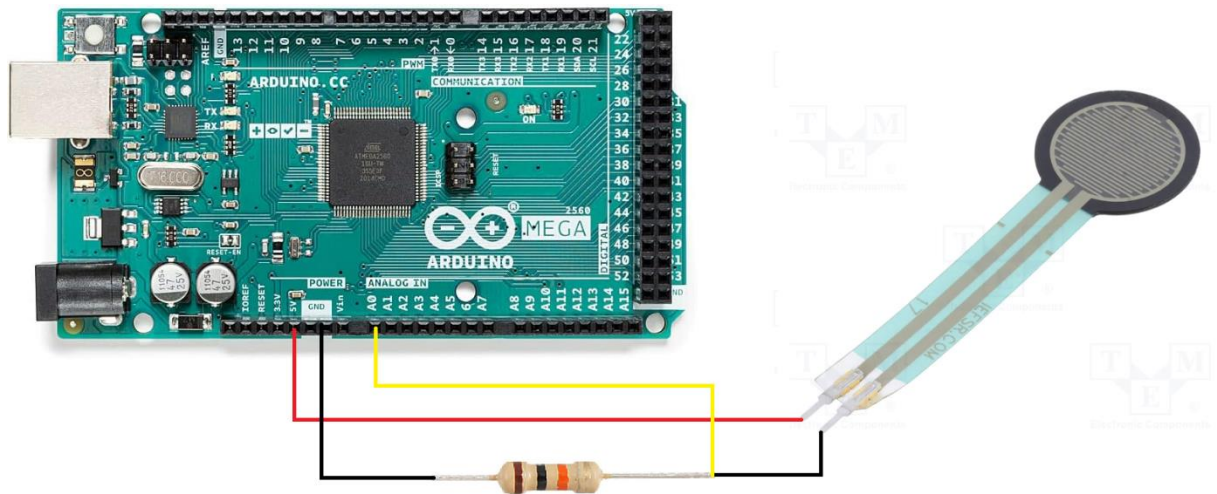


Рис. 8 Схема подключения датчика усилия сжатия

Пример программы, реализующий считывание напряжения с резистивного делителя приведена ниже

```
float result;  
int readValue;  
void setup()  
{  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop()  
{  
  readValue = analogRead(SENSOR);  
  result = (readValue * 5) / 1023.0;  
  Serial.print("U = ");  
  Serial.print(result);  
  Serial.println(" V");  
  Delay(500);  
}
```

}

Описание программного продукта Arduino IDE

Работа в программе Arduino IDE, интегрированной среде разработки (IDE) для программирования платформы Arduino, обычно включает в себя следующие шаги:

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

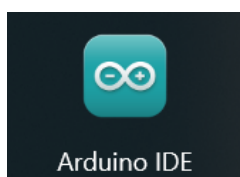


Рис. 9 – Пиктограмма программы Arduino IDE

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

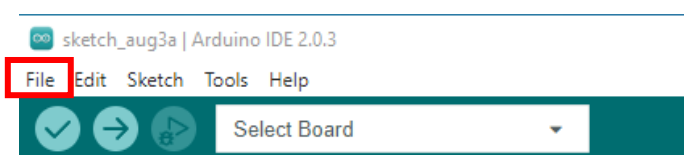


Рис. 10 – Вкладка «File» программы Arduino IDE

4. Откроется окно с основной структурой вашей программы.

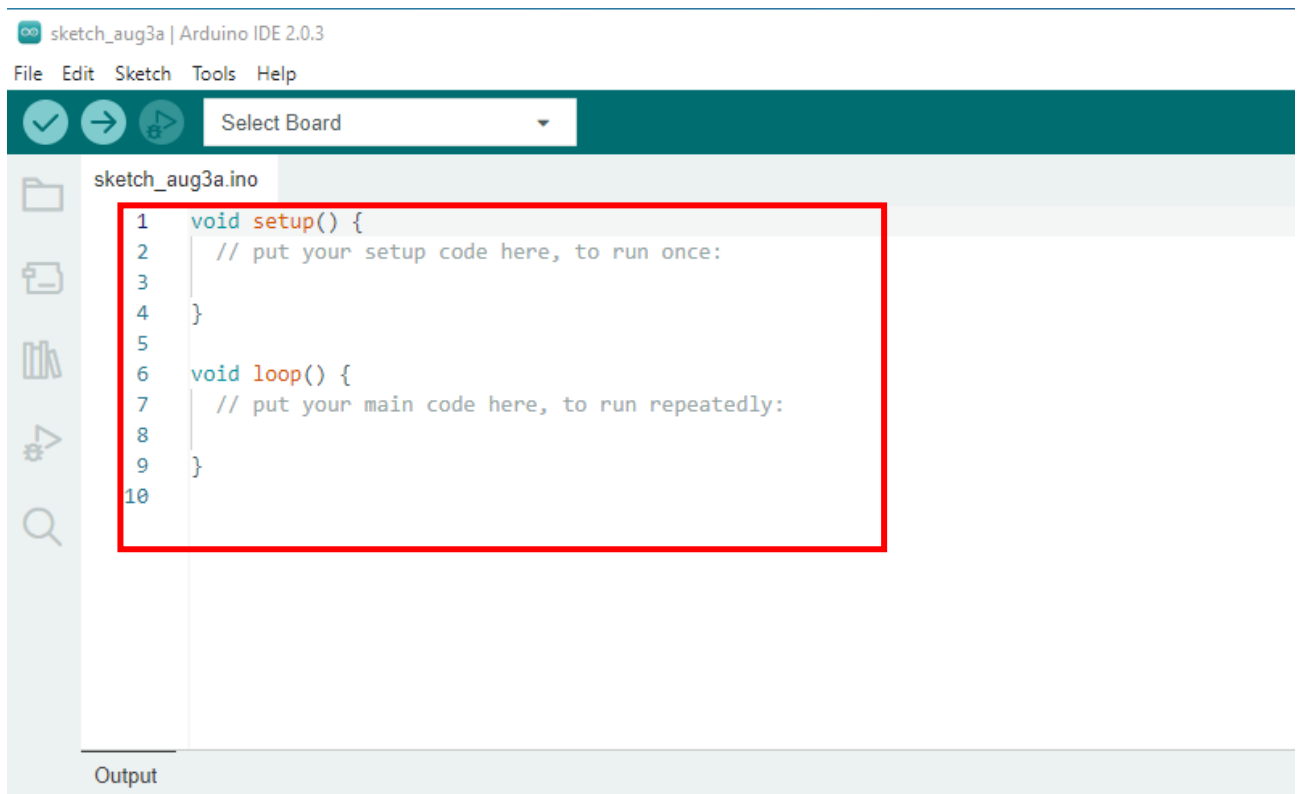


Рис. 11 – Окно редактора Arduino IDE

5. Напишите код вашей программы в окне редактора Arduino IDE, используя вышеуказанные функции, команды и конструкции языка C/C++.

Используйте встроенные библиотеки Arduino, чтобы расширить возможности вашей программы. Интересующие библиотеки можно найти в разделе «Library Manager» в Arduino IDE (пункт «Sketch» -> «Include Library» или на панели слева).

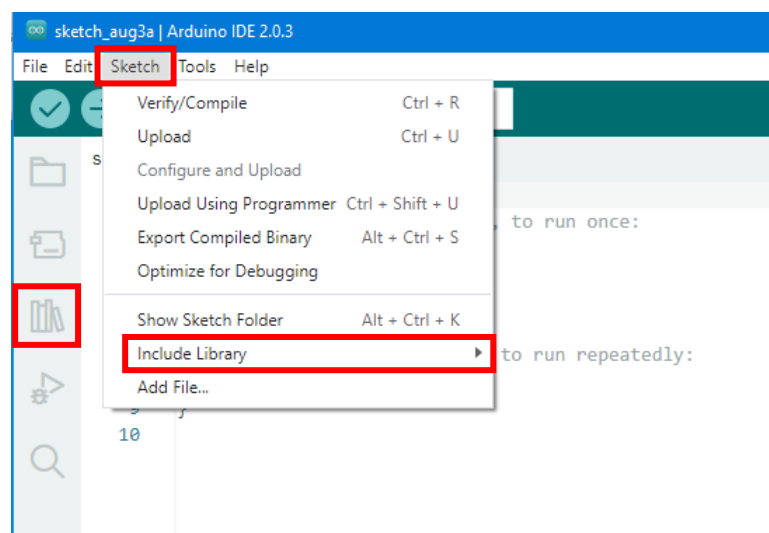


Рис. 12 – Вкладка «Sketch» для выбора встроенных библиотек Arduino

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

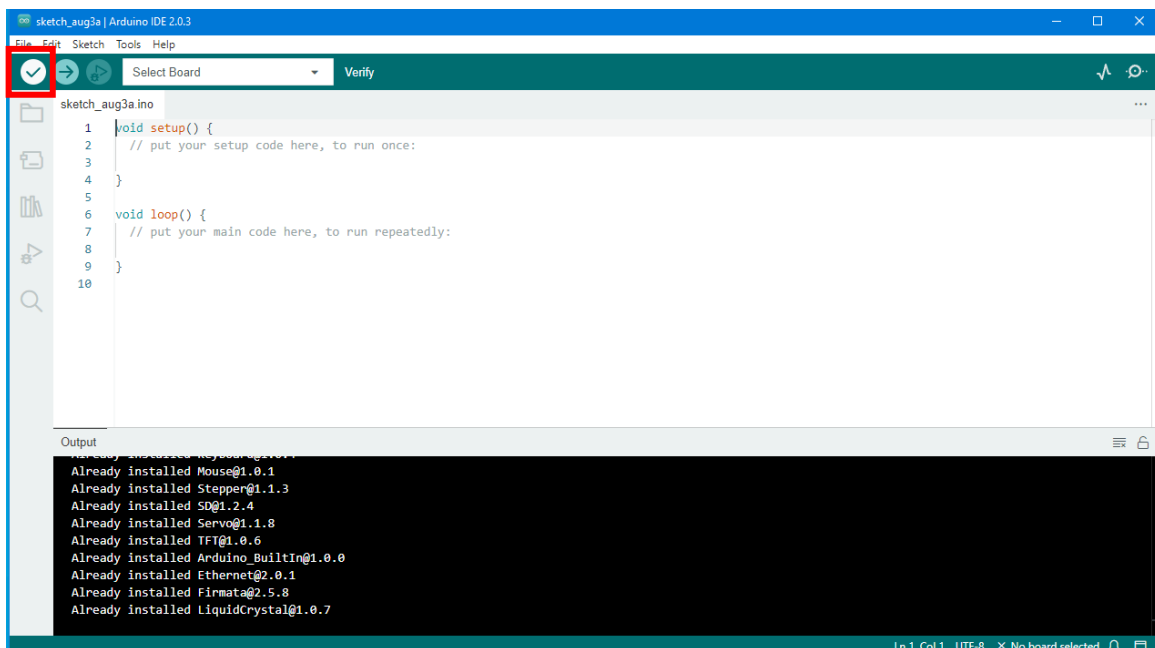


Рис. 13 – Кнопка «Verify» программы Arduino IDE

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

7. Убедитесь, что выбрана правильная плата и порт коммуникации в меню «Tools».

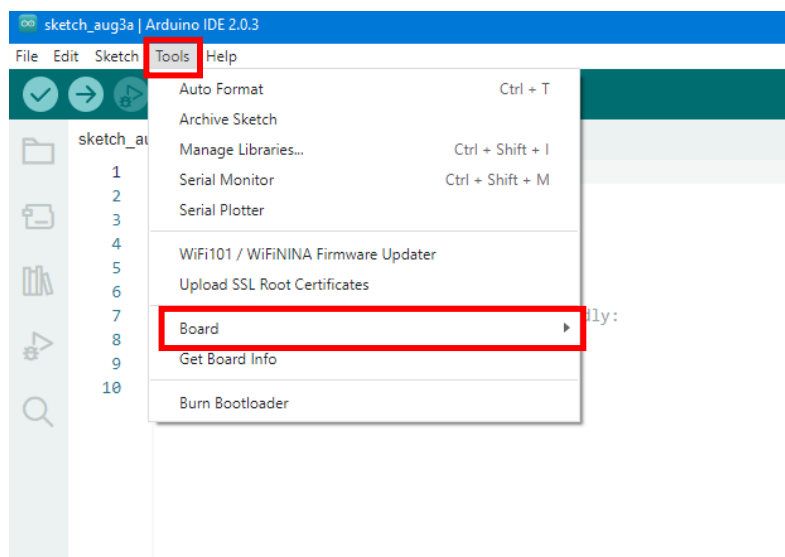


Рис. 14 – Вкладка «Tools» для выбора платы

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

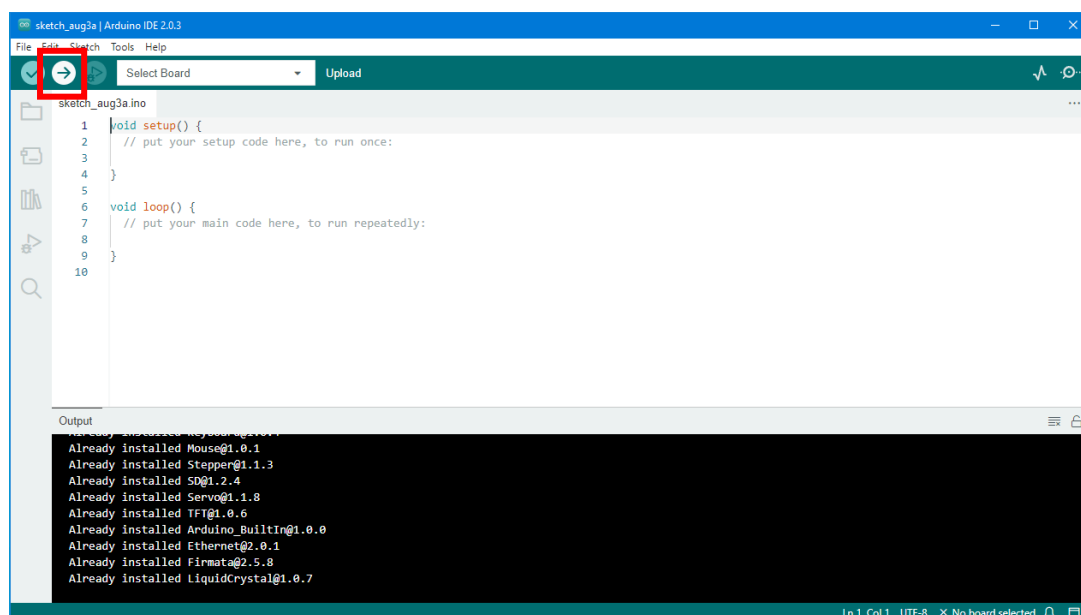


Рис. 15 – Кнопка «Upload» программы Arduino IDE

Плата будет перезагружена и начнет выполнять Вашу программу.

9. Откройте монитор порта, выбрав пункт «Tools» -> «Serial Monitor» в верхнем меню или плоттер по последовательному соединению, выбрав пункт «Serial Plotter».

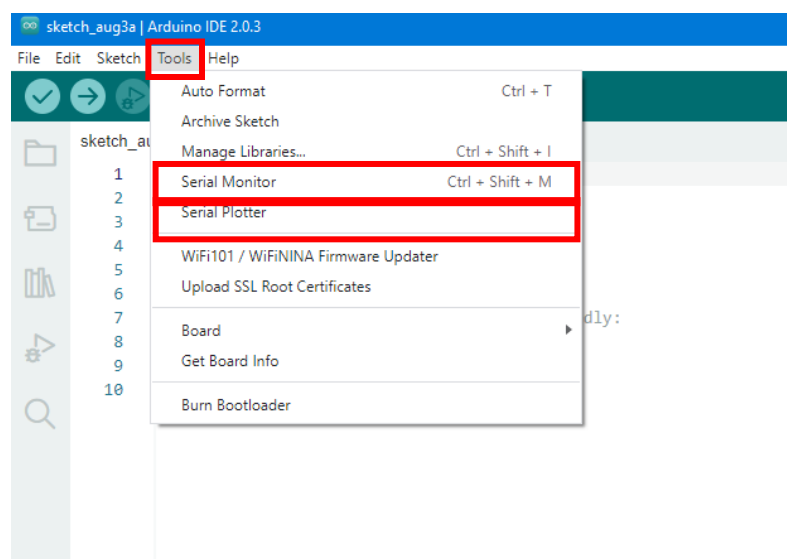


Рис. 16 – Вкладка «Tools» для выбора просмотра полученных данных

В мониторе порта вы сможете просматривать числовые данные, выводимые вашей программой, а в плоттере по последовательному соединению данные отображаются в графическом виде.

Arduino IDE также предлагает другие функции, такие как создание библиотек, сохранение и управление проектами, использование дополнительных инструментов шага за шагом для отладки и т.д.

Описание лабораторной установки

Программу необходимо загрузить в макетную плату на платформе Arduino Mega 2560. Предварительно необходимо установить программное обеспечение Arduino IDE, распространяющееся на безвозмездной основе. Скачать ПО, можно на официальном сайте Arduino.cc

Модуль аналого-цифрового преобразования платформы Arduino Mega 2560, преобразует напряжение на входе с вывода А0 из диапазона от 0 до 5 В в цифровой код разрядностью 10 бит в диапазон значений от 0 до 1023. Считывание аналогового сигнала и перевод в цифровой код происходит в бесконечном цикле, в этом же цикле реализована передача данных на персональный компьютер через виртуальный COM Port со скоростью 9600 бод в секунду. Время между измерениями АЦП составляет примерно 500 мкс.

Полученные значения с аналогового входа передаются на ЭВМ для дальнейшей обработки.

Программу необходимо загрузить в макетную плату на платформе Arduino Mega 2560. Предварительно необходимо установить программное обеспечение Arduino IDE, распространяющееся на безвозмездной основе. Скачать ПО, можно на официальном сайте Arduino.cc

Модуль аналого-цифрового преобразования платформы Arduino Mega 2560, преобразует напряжение на входе с вывода А0 из диапазона от 0 до 5 В в цифровой код разрядностью 10 бит в диапазон значений от 0 до 1023. Считывание аналогового сигнала и перевод в цифровой код происходит в бесконечном цикле, в этом же цикле реализована передача данных на

персональный компьютер через виртуальный COM Port со скоростью 9600 бод в секунду. Время между измерениями АЦП составляет примерно 500 мкс.

Полученные значения с аналогового входа передаются на ЭВМ для дальнейшей обработки. Так как данные

Программа работы

1. Подключить Arduino Mega 2560 к ЭВМ;
2. Запустить Arduino IDE;
3. Запрограммировать микроконтроллер;
4. Снять показания с аналогового датчика;
5. Приложить небольшое усилие на чувствительный элемент датчика и оценить оцифрованное значение этого усилия;
6. Приложить большое усилие на чувствительный элемент датчика и оценить оцифрованное значение этого усилия;
7. Применяя эталонные грузики, построить зависимость аналогового сигнала от усилия прижатия грузиками;
8. Определить чувствительность датчика, для этого необходимо разместить на чувствительном элементе грузик с минимальным весом

Повторить п.п. 5 – 8 три раза, провести статистическую обработку накопленных данных. Рассчитать:

- математическое ожидание;
- среднее арифметическое значение;
- среднеквадратическое отклонение;
- найти дисперсию;
- определить разброс выборки.

Содержание отчета

Титульный лист с указанием названия института, названия кафедры, номер и наименование работы, исполнители, дата выполнения работы.

- Цель работы.
- Программа работы.
- Схема лабораторной установки.
- Таблицы экспериментальных данных, основные соотношения.
- Примеры расчетов.
- Графики зависимостей в соответствии с программой.
- Выводы по отдельным пунктам работы и общие выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие типы измерительных преобразователей используются в работе? Объяснить их устройство, принцип действия.
2. Какое усилие способны измерить датчики давления?
3. Каковы преимущества мостовой схемы измерения усилия сжатия?
4. Как определить погрешность от нелинейности характеристики датчика усилия?
5. Существует ли нижний порог чувствительности датчика усилия сжатия? Какая величина этого порога?
6. Какие причины приводят к появлению погрешностей измерения усилия сжатия?

Статистическая обработка данных

Обработка экспериментальных данных необходима обобщения получаемых данных и выявления скрытых закономерностей. Данные получаемые с модуля АЦП микроконтроллера не используются в «сыром» виде. Данные с АЦП необходимо с начала обработать, есть стандартные методы обработки, включающие в себя накопление необходимого количества данных, нахождение математического ожидания случайной величины, среднее арифметическое значение, среднеквадратическое отклонение, нахождение дисперсии, определение разброса выборки. Оценка этих величин покажет на

сколько накопленные данные различаются между собой, соответственно можно судить о типичности накопленных данных.

Математическое ожидание — в теории вероятности одно из важнейших понятий, определяющее среднее значение выборки случайных величин. Применяется на практике вычислением среднего арифметического накопленных значений аналоговых данных

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Среднеквадратическое отклонение — показатель разброса накопленных аналоговых значений относительно рассчитанного математического ожидания. Обозначается греческой буквой σ (сигма). Среднеквадратическое отклонение рассчитывается как квадратный корень из дисперсии случайной величины:

$$\sigma = \sqrt{D}.$$

Правило 3 сигм. Вероятность того, что случайная величина отклонится от своего математического ожидания более чем на три среднеквадратических отклонения, практически равна нулю. Правило можно применить только для аналоговых значений, распределенных по нормальному закону.

Дисперсия равна разности среднего арифметического квадратов всех аналоговых значений и квадрата среднего самих этих значений:

$$D = \overline{x^2} - \bar{x}^2.$$

Чем меньше расчетные значения дисперсии и стандартного отклонения, тем меньше вариация, тем большее количество аналоговых значений находится вблизи выборочного среднего значения.

Разброс (размахом) аналоговых значений обозначается буквой R. Рассчитывается как разность между максимальным и минимальным значениями накопленных аналоговых данных:

$$R = X_{\max} - X_{\min}.$$

Не стабильность измеряемого параметра при измерении аналогового значения может привести к большому размаху накопленных данных, что приведет к увеличению расчётного параметра R.

Отношение стандартного отклонения к среднему, выраженное в процентах, называется коэффициентом вариации:

$$V = \frac{\sigma}{x_B} \times 100\%.$$

Коэффициент вариации способен помочь оценить на сколько разнообразны накопленные аналоговые данные. И на сколько типичны среднее значение накопленных данных

- при $V < 10\%$ значения данные находятся близко друг к другу, а значит разнообразие слабое;
- при $V = 10\text{--}20\%$ — разнообразие среднее;
- при $V > 20\%$ — разнообразие сильное.

Сильно разбросанные значения накопленных аналоговых данных говорит об ошибочности проведенного эксперимента и такие данные использовать дальше нельзя. Необходимо провести эксперимент еще раз или изменить условия проведения эксперимента.

В качестве примера рассмотрим выборку из 10 измерений. В результате 10 независимых измерений получены экспериментальные данные, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Результаты 10 независимых измерений

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
7,1	6,3	6,2	5,8	7,7	6,8	6,7	5,9	5,7	5,1

Находим среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{7,1+6,3+6,2+5,8+7,7+6,8+6,7+5,9+5,7+5,1}{10} = 6,33.$$

Находим дисперсию

$$D = \overline{x^2} - \bar{x}^2 = 40,591 - 6,33^2 = 0,5221.$$

Среднее арифметическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{0,5221} = 0,7226.$$

Коэффициент вариации

$$V = 11,4\%.$$

Коэффициент вариации получился больше 10 %, но меньше 20 %, это говорит о среднем разнообразии накопленных аналоговых данных. По этим данным можно рассчитывать математическое ожидание и использовать эти данные.

Определение разрешающей способности датчика

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

Разрешающая способность датчика определяется по формуле 10:

$$p_a = p_{max} / ((2^n - 1)), \quad (3)$$

где p_a - разрешающая способность датчика, p_{max} - максимальное значение силы, 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

Чувствительность датчика — это отношение изменения выходного сигнала датчика к изменению усилия нажатия, действующего на датчик.

Чувствительность датчика определяется по формуле 11:

$$S=(V_2-V_1)/(P_2-P_1), , \quad (4)$$

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

Чувствительность датчика 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.

Литература

1. Юревич Е. И. Сенсорные системы в робототехнике: учеб. пособие / Е. И. Юревич. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 100 с.
2. Попов А.В., Юревич Е.И. Роботы с силовым очувствлением. СПб.: Астерион, 2008.
3. Панфилов В. А. Электрические измерения. — Академия, 2006.
4. Электротехнический справочник. В 3-х томах / Герасимов В. Г. и др. — 6-е издание. — М.: Энергия, 1980. — Т. 1. — 520 с.