

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 емкостного сенсора**

Методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Сенсорные системы роботов» для студентов направлений 09.03.01 Информатика и вычислительная техника.

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 емкостного сенсора: 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 емкостного сенсора» 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
Оборудование .....	4
Краткие теоретические сведения.....	4
Описание программного продукта Arduino IDE.....	12
Описание лабораторной установки.....	16
Программа работы .....	18
Содержание отчета.....	19
Контрольные вопросы .....	19
Литература .....	24

# **Лабораторная работа**

## **Изучение емкостного сенсора**

### **Цель**

Изучение емкостного сенсора.

### **Задачи**

Познакомиться с принципом работы емкостного сенсора. Определить характеристику емкостного сенсора. Определить чувствительность и разрешающую способность емкостного сенсора. Определить погрешность емкостного сенсора.

### **Оборудование**

Лабораторный стенд, персональный компьютер с программным продуктом Arduino IDE

### **Краткие теоретические сведения**

Емкостные сенсоры работают на принципе изменения емкостного сопротивления при изменении измеряемой величины. Емкостные сенсоры предназначены для определения расстояния, влажности различных сред, управления электронными замками, а также биометрической автоматизированной системой учёта рабочего времени и т.п.

Емкостные датчики определения приближения (присутствия) имеют высокую надежность, сравнительно невысокую стоимость. Эти датчики нашли применение во всех отраслях промышленности, например:

- Определение уровня заполнения емкостей;
- Регулировка натяжения ленты;
- Поштучный счет любого вида продукции.

В робототехнических устройствах и системах для контроля за угловыми перемещениями узлов и механизмов используются различные датчики,

наибольшее распространение получили датчики емкостного типа, изменяющие свое емкостное сопротивление в зависимости от положения чувствительного элемента.

Емкостные датчики нашли свое применение при определении уровня жидкости, уровня сыпучего материала, пульпы. Применяется для определения влажности среды, в которой находится датчик. Для измерения давления, толщины нанесения диэлектрических материалов.

#### **Преимущества емкостных датчиков определения угла наклона:**

- низкие масса-габаритные показатели;
- простота изготовления и дешевые материалы для производства;
- низкое потребление энергии;
- высокая чувствительность;
- отсутствие контактов;
- долгий срок эксплуатации;
- минимальное усилие для перемещения чувствительного элемента;

#### **Недостатки емкостных датчиков:**

- плохая защита от внешних помех;
- низкий КПД;
- необходимость работы на высоких частотах,  $> 50$  Гц, в большинстве случаев 400 Гц.;

Существующие недостатки емкостных датчиков возможно нивелировать, используя металл в качестве материала для корпуса, это позволит избавиться от внешних помех и снизить уровень шумов до оптимального уровня. Широко распространённая частота в 400 Гц в полной мере обеспечивают работоспособность емкостных датчиков. Краевой эффект, наблюдаемый в конструкциях конденсаторов, становится значительным при малом расстоянии между обкладками сравнимыми с линейными размерами рассматриваемых поверхностей. Используя защитное кольцо можно

нивелировать краевой эффект, за счет вынесения этого влияния за границы поверхностей обкладок.

Простота конструкции позволила сделать датчики надежными и дешевыми в изготовлении. Параметры емкостных датчиков зависят только от геометрических размеров измерительных обкладок и не зависят от применяемых материалов. Правильно подобранная марка материала способно нивелировать негативное влияние температуры. Необходимо предусмотреть защиту от влияния окружающей среды (пыли, коррозии, влажности) способной ухудшить изоляцию между измерительными обкладками.

Ценные качества емкостных датчиков – малая величина механического усилия, необходимого для перемещения его подвижной части, возможность регулировки выхода следящей системы и высокая точность работы – делают емкостные датчики незаменимыми в приборах, в которых допускаются погрешности лишь в сотые и даже тысячные доли процента.

### **Типы емкостных преобразователей и их конструктивные особенности**

Конструктивно емкостной датчик состоит из двух обкладок представляющий собой обычный конденсатор, одна из обкладок которого способна изменять свое расстояние относительно второй обкладки, тем самым изменяя расстояние между обкладками и меняя свою емкость. Для плоского конденсатора емкость можно рассчитать по следующему выражению:

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

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками,  $S$  – площадь поверхности обкладок и  $d$  – расстояние между обкладками.

Изменение площади поверхности или расстояния между обкладками приведет к изменению емкости при неизменной среде между обкладками. В емкостных датчиках один из этих параметров обязательно должен иметь

постоянную величину. Также, при постоянных площади поверхности и расстоянии между обкладками, можно контролировать среду между обкладками, поскольку диэлектрическая проницаемость является функцией свойств вещества. На этих принципах основаны все емкостные датчики и сенсоры.

Емкостные датчики нашли свое применение для анализа состава вещества находящегося между обкладками конденсатора, контролируемое вещество может быть в трех фазовых состояниях: газ, жидкость, твердое вещество. Линейные перемещения обкладок электродов конденсатора изменяющие расстояние между ними изменяет емкость конденсатора. На этом принципе построены датчики линейных и угловых перемещений, вибрации, скорости и ускорения. На принципе изменения площади обкладок конденсатора построены приборы, измеряющие усилие прижатия, давления, деформации (экстензометры).

### **Классификация емкостных датчиков**

По способу исполнения все емкостные измерительные преобразователи можно разделить на одноемкостные и двухемкостные датчики. Двухемкостные по способу подключения двух конденсаторов разделяют на схему с дифференциальным подключением и полудифференциальными.

Одноемкостные датчики просты и дешевы в изготовлении, но имеют значительное влияние внешних факторов окружающей среды на измеряемую величину, таких как влажность и температура. Применяя схему с дифференциальным подключением конденсаторов, можно нивелировать влияние внешних факторов окружающей среды. Повышая точность и стабильность показаний приборов. Однако изготовление дифференциальной схемы соединения конденсаторов затруднительно, особенно дифференциальный датчик с переменным зазором. Поэтому в большинстве случаев применяется полудифференциальная схема подключения емкостей. Двухемкостные датчики в качестве выходного параметра используют

отношение контрольной емкости к измерительной, их называют еще датчиками отношения.

### **Датчики линейных перемещений**

Неэлектрические величины, подлежащие измерению и контролю, в робототехнических системах весьма многочисленны и разнообразны. Значительную их часть составляют линейные и угловые перемещения. Емкостные датчики способны проводить измерения линейных и угловых перемещений движущихся объектов. Существуют два типа емкостных датчиков:

- с переменной площадью электродов;
- с переменным зазором между электродами.

Первый тип с изменяемой площадью поверхности чувствительного элемента конденсатора способен измерять большие перемещения – единицы, десятки и сотни миллиметров. Второй тип с изменяющимся зазором между обкладками электродов конденсатора, способен измерять сверхмалые перемещения объектов – доли миллиметра, микрометры и менее.

### **Инклинометры**

Инклинометр прибор предназначен для измерения угла наклона относительно гравитационного поля Земли различных объектов. Прибор выполнен в виде закрытой капсулы с жидкостью. Внутри расположен дифференциальный емкостной преобразователь, выполняющий функции чувствительного элемента.

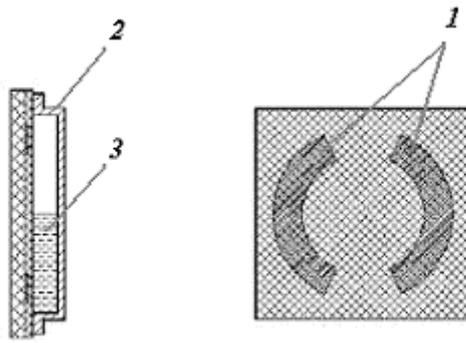


Рис. 1 Устройство емкостного инклинометра

В закрытом корпусе – 2 расположены чувствительный элемент на подложке, залитый не до конца проводящей жидкостью – 3. Чувствительный элемент, расположенный на подложке, представляет из себя два электрода выполненных в виде полукруглых колец – 1. Общий электрод – корпус образует с измерительными электродами дифференциальную схему измерения емкости, которая линейно зависит от положения корпуса в пространстве.

Инклинометры разделяются на три группы по способу измерения углов наклона в плоскостях: в одной плоскости (ось X), в двух плоскостях (оси X и Y) и в трех плоскостях (оси X, Y и Z).

Современные приборы определения угла наклона имеют малые массогабаритные параметры, высокую точность измерения, отсутствие подвижных механических узлов и низкую стоимость. На сегодняшний день применяются для определения крена беспилотных летательных аппаратов, углов наклона механизмов крановых установок, в робототехнике применяется для поддержания равновесия и определения положения роботов на неровной поверхности.

### **Бесконтактные сенсоры**

Большую популярность получили бесконтактные датчики, применяемые в качестве клавиатур на бытовых приборах, таких как: варочные панели, осушители воздуха и т.п. достоинствами является единообразие общего вида прибора, простота и дешевизна реализации, легкость герметизации. Сенсор считается бесконтактным, так как не требует непосредственного

соприкосновения с телом человека и может срабатывать на расстоянии до 5 мм. Кнопку возможно размещать под закрытыми диэлектрическими поверхностями, такими как стекло, пластик и т.п.

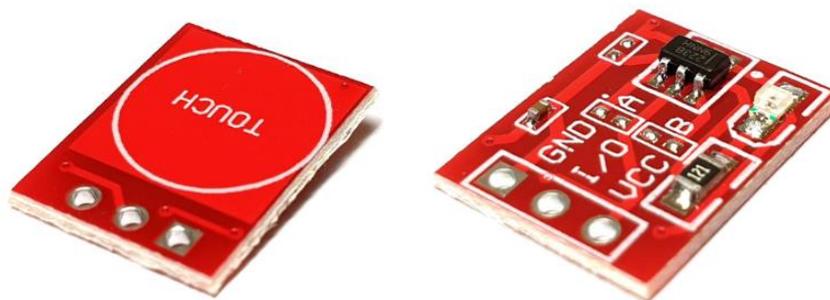


Рис. 2 Емкостная сенсорная кнопка ttp223

Принцип работы сенсора состоит в измерении частоты задающего генератора тока. При изменении емкости изменяется частота задающего генератора или амплитуда сигнала. При прикосновении тела человека с датчиком, человек вносит сопротивление конденсатора, образованного человеком, которое изменяет частоту задающего генератора. При помощи измерения несущей частоты можно сделать вывод о наличии контакта или его отсутствии.

### **Датчики влажности различных сред**

Емкостные датчики влажности различных сред широко используются в робототехнических устройствах и системах, в промышленном оборудовании, и системах сбора метеорологических данных.

Конструкция датчиков представляет из себя подложку, на которую нанесен полимерный материал между двумя измерительными электродами. Подложка изготавливается из стекла, кремния или керамики. Инкрементальные изменения в диэлектрической проницаемости емкостного датчика влажности имеют прямую зависимость от относительной влажности окружающего воздуха. При изменении влажности на 1% емкость между измерительными электродами изменяется на 0.2-0.5 пФ. При изменении на 50% влажности (25°C) емкость между измерительными электродами может достигать от 100 до 500 пФ.

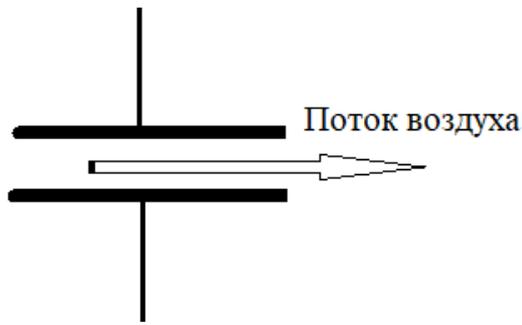


Рис. 3 Принципиальная схема измерения

Особенностью емкостных датчиков является работа при высоких температурах вплоть до 200 °С, а также не меняют свои характеристики при химических испарениях. Время, затрачиваемое для изменения диэлектрической проницаемости при изменении влажности в 63%, занимает до 1 минуты.

Применение современных технологий производства емкостные датчики располагаются на одной плате с микросхемами усиления сигналов. Позволяющее минимизировать смещение параметров и гистерезиса при длительной эксплуатации. Для сглаживания выходного сигнала усилители имеют CMOS генератор.

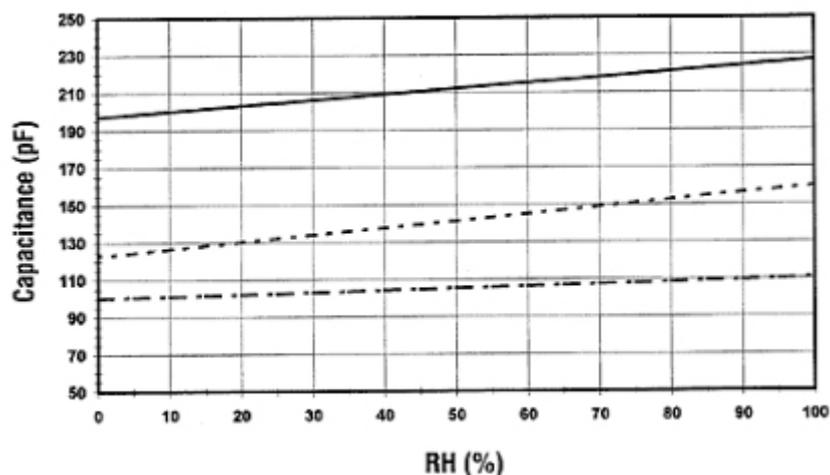


Рис. 4 зависимость емкости датчика от влажности

Точность емкостных датчиков влажности составляет  $\pm 2\%$  в диапазоне измерений влажности от 5 до 95 %, откалиброванных по двум точкам.

## Емкостные сканеры отпечатка пальца

Наибольшую популярность для получения рисунка отпечатка пальца получили емкостные сенсоры. Работа сенсоров отпечатка пальца основана на явлении переноса зарядов в полупроводнике через электронно-дырочный переход, называемый р-n переход. Касание пальца со сканером происходит не всей площадью пальца, а только выступами, образованными папиллярным рисунком. Каждая линия рисунка папиллярного узора с элементами полупроводниковой матрицы образуют емкость. Величина емкости зависит от высоты выступа папиллярного рисунка. Значения этих емкостей образуют цифровой код рисунка отпечатка пальца.

Популярность таких датчиков обусловлена низкой стоимостью изготовления и надежностью работы готового устройства. Емкостные сенсоры отпечатка пальца не устойчивы к применению муляжа узора папиллярных линий.

## 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.

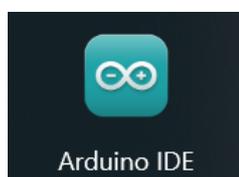


Рис. 5 – Пиктограмма программы Arduino IDE

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

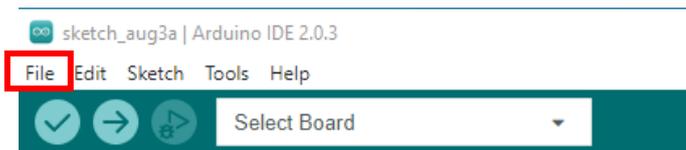


Рис. 6 – Вкладка «File» программы Arduino IDE

4. Откроется окно с основной структурой вашей программы.

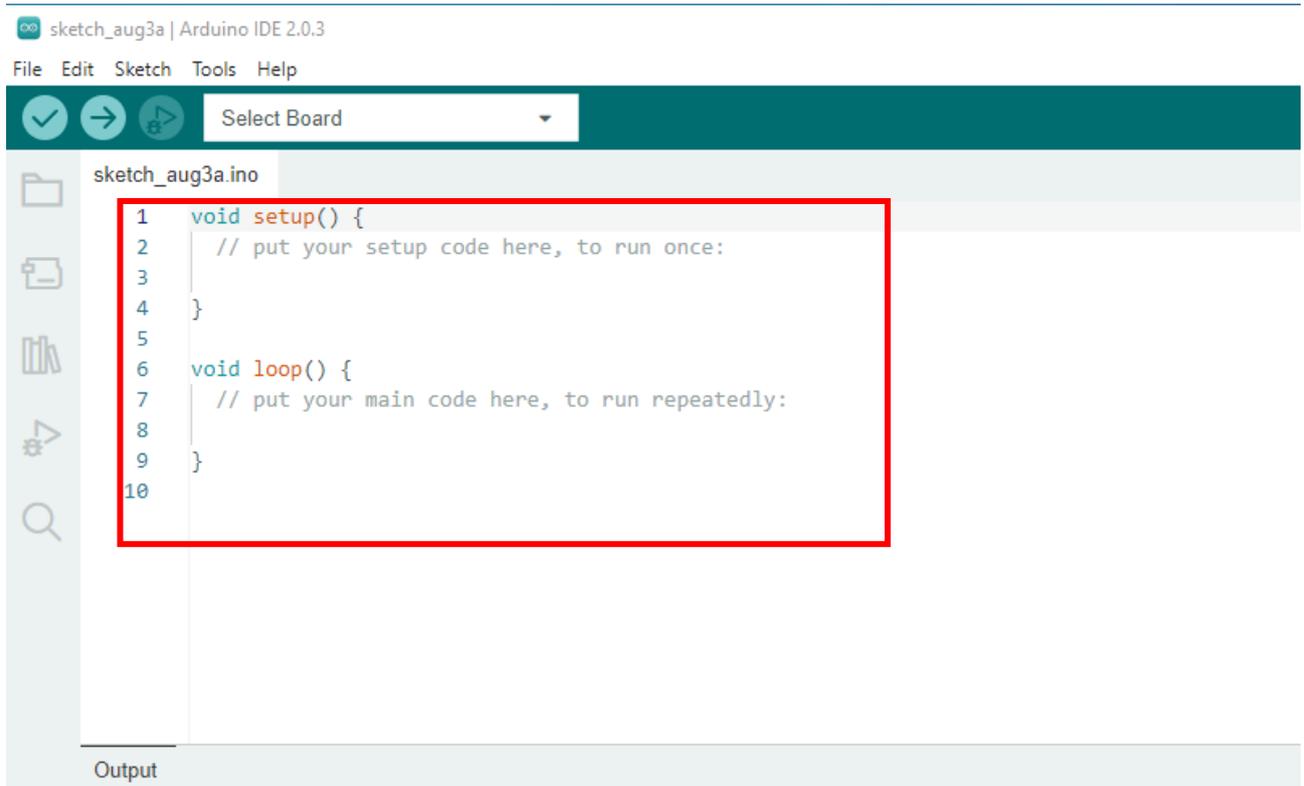


Рис. 7 – Окно редактора Arduino IDE

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).

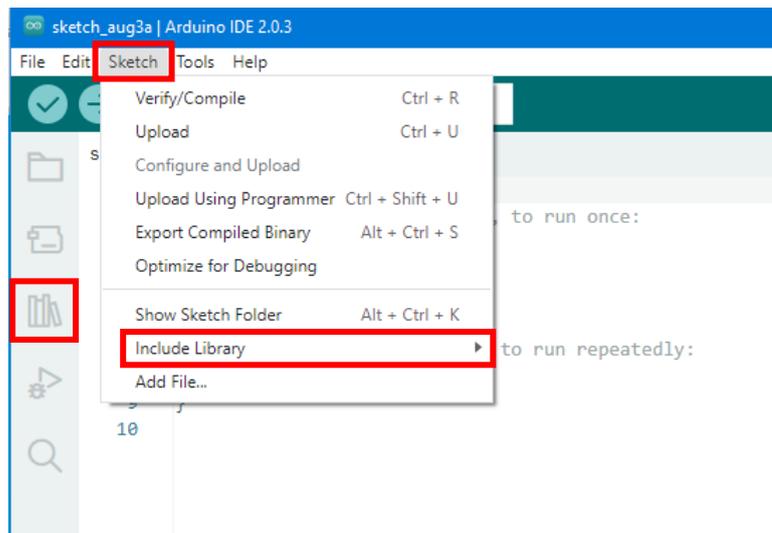


Рис. 8 – Вкладка «Sketch» для выбора встроенных библиотек Arduino

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

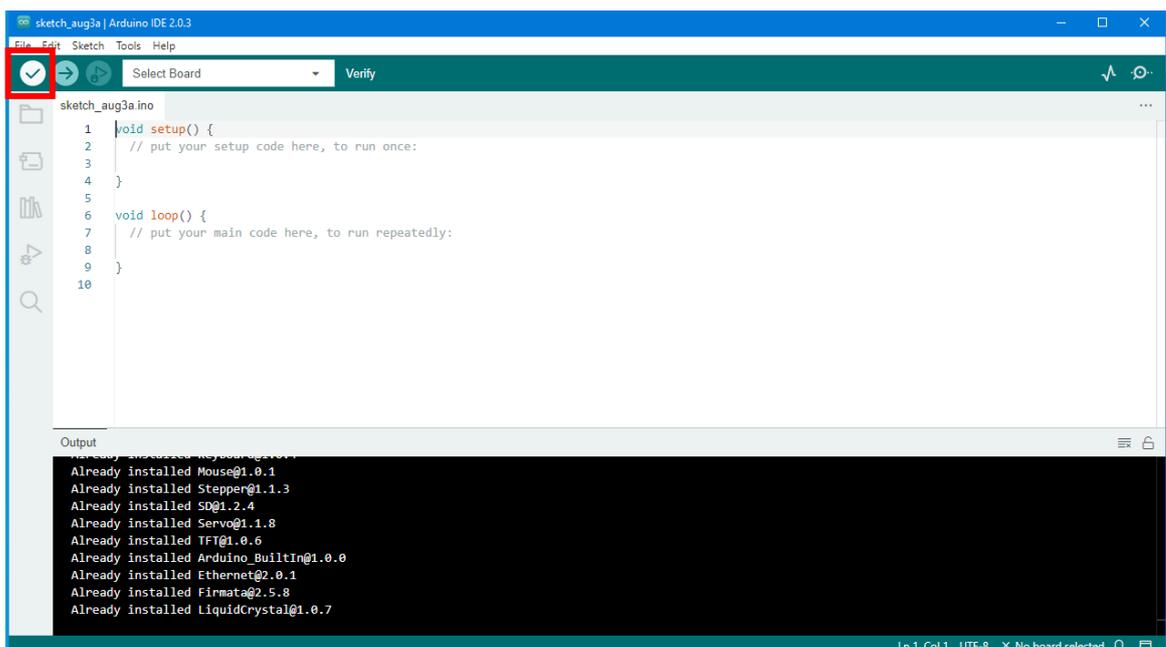


Рис. 9 – Кнопка «Verify» программы Arduino IDE

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».

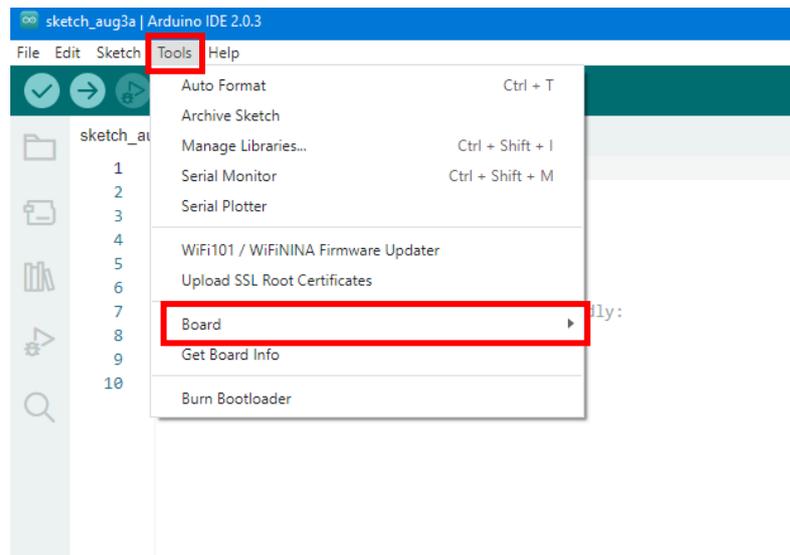


Рис. 10 – Вкладка «Tools» для выбора платы

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

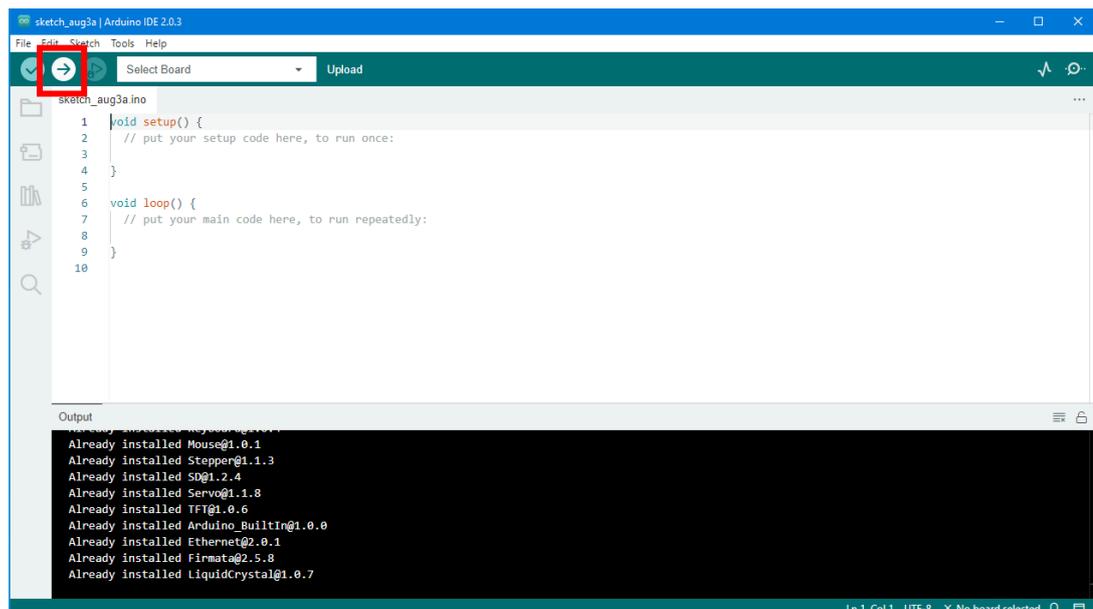


Рис. 11 – Кнопка «Upload» программы Arduino IDE

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».

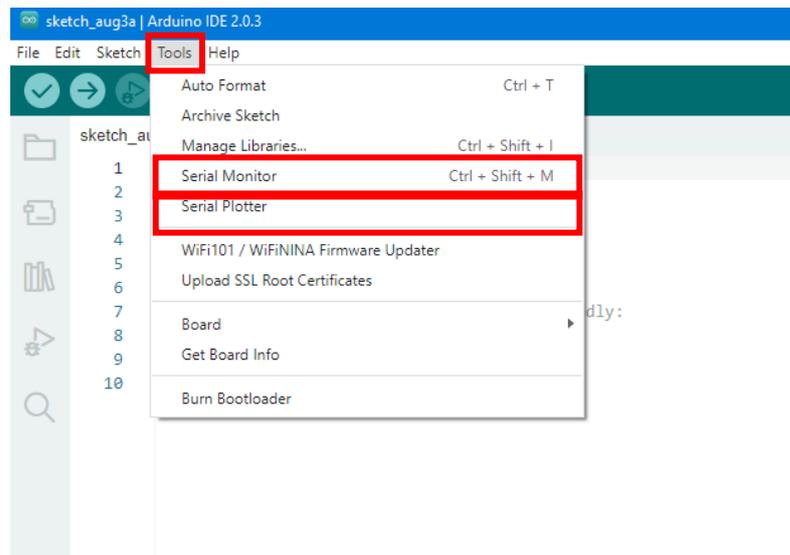


Рис. 12 – Вкладка «Tools» для выбора просмотра полученных данных

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](http://Arduino.cc)

Модуль аналого-цифрового преобразования платформы Arduino Mega 2560, преобразует напряжение на входе с вывода A0 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.

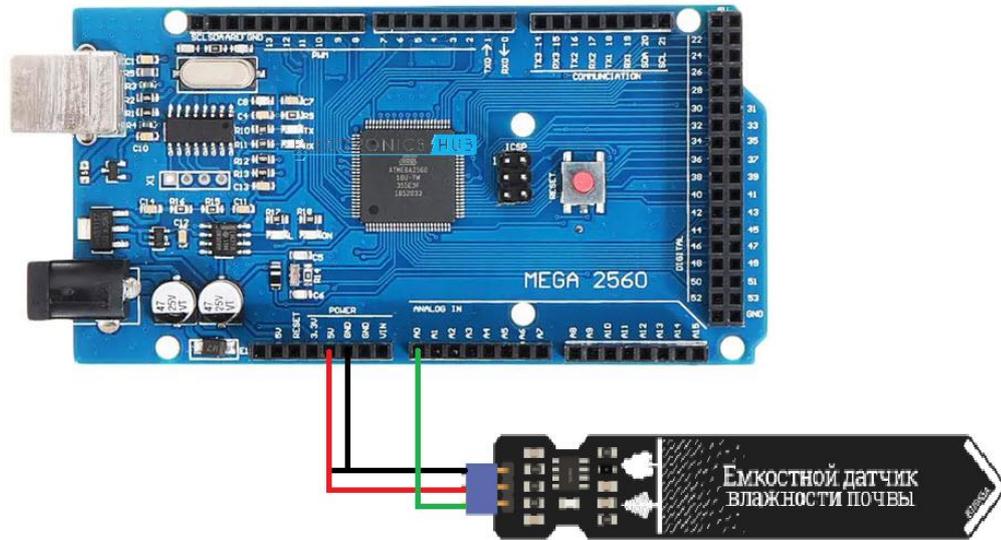


Рис. 13. Подключение датчика влажности почвы к Arduino Mega 2560.

Пример программы для оцифровки аналогового сигнала приведен ниже:

```
#define SENSOR A0

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);
}
```

Зависимость влажности почвы от выходного оцифрованного кода приведена на рисунке 14.

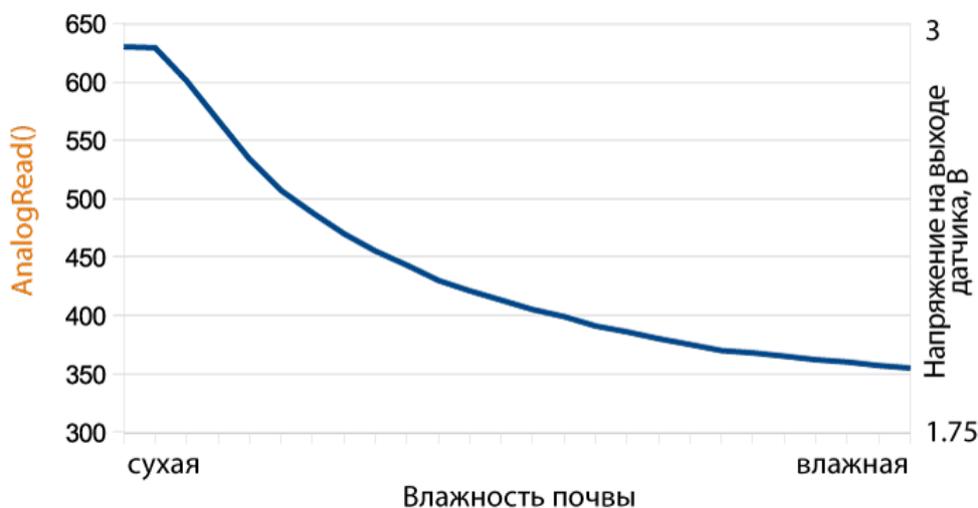


Рис. 14 Оцифрованные значения влажности исследуемой среды

### Программа работы

1. Подключить Arduino Mega 2560 к ЭВМ;
2. Запустить Arduino IDE;
3. Запрограммировать микроконтроллер;
4. Снять показания с аналогового датчика;
5. Подключить питание датчика к 5 В и слабо смочить датчик, определить уровень влажности;
6. Подключить питание датчика к 5 В и сильно смочить датчик, определить уровень влажности;
7. Подключить питание датчика к 3,3 В и слабо смочить датчик, определить уровень влажности;
8. Подключить питание датчика к 3,3 В и сильно смочить датчик, определить уровень влажности;
9. Снять характеристику зависимости аналогового сигнала от погружения датчика в контролируемую среду. В качестве контролируемой среды используем поролоновую губку.

10. Определить чувствительность датчика. Для этого разместить датчик в поролоновой губке и из дозатора повышать влажность губки, добавляя по 0,5 мл. воды.

Повторить п.п. 5 – 10 три раза, провести статистическую обработку накопленных данных. Рассчитать:

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

Построить зависимость аналогового сигнала от величины погружения

### **Содержание отчета**

- Цель лабораторной работы;
- Методы измерения;
- Структурная схема прибора и описание по ней принципа работы прибора;
- Расчетные и экспериментальные зависимости;
- Получить аппроксимирующее уравнение для полученных графиков;
- Выводы по проделанной работе;
- Ответы на контрольные вопросы;

### **Контрольные вопросы**

1. Какие типы измерительных преобразователей используются в работе? Объяснить их устройство, принцип действия.
2. Для измерения каких неэлектрических величин используются емкостные ИП?

3. Каковы преимущества дифференциальных емкостных ИП перед одинарными?
4. Как определить погрешность от нелинейности характеристики емкостного ИП?
5. Исходя из каких соображений задается частота питания схемы с емкостным ИП и как выбрать оптимальную частоту?
6. Чем определяется начальная емкость емкостного измерительного преобразователя?
7. В какие измерительные схемы включаются емкостные ИП, пояснить эти схемы.
8. Какие причины приводят к появлению погрешностей емкостных ИП?

### **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  $\sigma$  (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 расчетного 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 1.

Таблица 1 — 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 емкостного датчика**

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

Разрешающая способность емкостного датчика определяется по формуле 1:

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

где  $p_a$  - разрешающая способность датчика,  $p_{max}$  - максимальное значение емкости, 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 емкостного датчика**

Чувствительность емкостного датчика — это отношение изменения выходного сигнала датчика к изменению емкости, действующего на датчик.

Чувствительность емкостного датчика определяется по формуле 2:

$$S = (V_2 - V_1) / (P_2 - P_1), \quad (2)$$

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

Чувствительность емкостного 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. Емкостные датчики. URL: [https://studopedia.ru/3\\_184136\\_emkostnie-datchiki.html/](https://studopedia.ru/3_184136_emkostnie-datchiki.html/) (дата обращения 21.08.2023).
2. Емкостные датчики схемы. URL: <http://www.texnic.ru/konstr/avtomatika/001/avtomatika030.html> (дата обращения 21.08.2023).
3. Емкостные датчики малых перемещений. URL: <http://megaobuchalka.ru/2/11469.html> (дата обращения 24.08.2023).
4. Резонансные измерительные системы. URL: <http://referat-web.ru/content/referat/electronics/electronics38.php> (дата обращения 21.08.2023).