

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 температуры

Методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Сенсорные системы роботов» для студентов направлений

09.03.01 Информатика и вычислительная техника.

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 температуры: метод. указания по выполнению студентами лабораторных работ/ А.И.Солдатов. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 51 с.

Методические указания по выполнению студентами лабораторной работы «Изучение датчиков температуры» разработаны для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника. Информационное и программное обеспечение программно-аппаратных комплексов робототехнических систем

.

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
Температурные шкалы.....	4
Датчики температуры	14
Описание лабораторного стенда.....	32
Задание	47
Отчет.....	48
Контрольные вопросы	48

Лабораторная работа.

Изучение датчиков температуры

Цель

Познакомиться с принципом работы полупроводникового, термоэлектрического и резистивного датчиков температуры.

Задачи

Изучить принцип работы и конструкции полупроводникового, термоэлектрического и резистивного датчиков температуры. Изучить характеристики и параметры полупроводникового, термоэлектрического и резистивного датчиков температуры. Определить погрешности полупроводникового, термоэлектрического и резистивного датчиков температуры. Изучить области применения полупроводникового, термоэлектрического и резистивного датчиков температуры. Изучить чувствительность и разрешающую способность температурных датчиков. Провести сравнительный анализ полупроводникового, термоэлектрического и резистивного датчиков температуры.

Краткие теоретические сведения

Температура - физическая величина, определяющая степень нагретости или охлаждения тела или среды. Она характеризует средний кинетический энергетический уровень молекул или атомов вещества. Температура является важной физической величиной, так как она влияет на многие свойства вещества и может влиять на химические и физические процессы. Она участвует в многих областях науки и техники, включая метеорологию, физику, химию, инженерию и многое другое. Температура измеряется в градусах по шкале Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), Кельвина (K), Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$) и других шкалах, и описывает наличие тепловой энергии в системе.

Температурные шкалы

Температурная шкала Ньютона была разработана в 1701 году английским физиком и математиком Исааком Ньютоном. Он хотел создать шкалу,

основанную не на фиксированных точках плавления и кипения воды, как в шкале Цельсия или Фаренгейта, а вместо этого на изменении объема газа при изменении температуры. Шкала Ньютона основана на делении интервала между точками плавления и кипения воды на 33 равных части. Таким образом, точка замерзания воды соответствует 0° Ньютона, а точка кипения воды - 33° Ньютона. На шкале Ньютона температура увеличивается пропорционально силе молекулярного движения. Температурная шкала Ньютона была разработана для проведения теплофизических исследований и стала, вероятно, прообразом шкалы Цельсия. Ньютон использовал льняное масло в качестве термометрической жидкости. Льняной термометр мог быть использован до точки плавления олова. Для более высоких температур Ньютон использовал толстый кусок железа, который нагревался до красна и выставлялся на ветер. Образцы металлов и сплавов помещались на этот нагретый кусок железа, где они плавилась и затвердевали при охлаждении. Ньютон определил степень нагревания этих образцов, измеряя время, за которое они затвердевали, и сравнил это с шкалой льняного семени, измеряя температуру плавления олова в обеих системах. Эта вторая система измерения привела Ньютона к выводу его закона конвективной теплопередачи, который также известен как закон охлаждения Ньютона. Однако шкала Ньютона так и не получила широкого распространения и использования. Недостатком этой шкалы было то, что она была основана на особом веществе (олове), которое в реальной жизни не является стандартной и универсальной точкой для измерения температуры. Кроме того, метод измерения такой шкалы был довольно сложным и не практичным. С появлением других более универсальных и удобных для использования шкал (например, шкалы Цельсия и Фаренгейта), шкала Ньютона была утрачена и сегодня используется очень редко, поскольку оказалась неэффективной и неудобной в сравнении с более современными и широко принятыми температурными шкалами.

Формула преобразования температуры из градусов Ньютона в градусы Цельсия:

$$^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{N} / 0,33 \quad (1)$$

Температурная шкала Рёмер - это шкала температуры, которую разработал датский астроном Оле Кристенсен Рёмер в 1701 году. Шкала Рёмер была создана для использования в астрономии и в физике. Имея цель измерить температуру, Рёмер разработал свою шкалу, основанную на процессе замерзания и кипения воды. На шкале Рёмер точка замерзания воды устанавливалась в $7,5^{\circ}$, а точка кипения воды - в 60° . Шкала Рёмер была разделена на 60 равных градусов между этими двумя точками. Термометр Рёмера состоял из стеклянного трубчатого индикатора, заполненного жидкостью (обычно спиртом), с градуировкой, соответствующей шкале Рёмера. Шкала Рёмера быстро получила широкое распространение и использовалась в Европе в течение двух веков как одна из основных температурных шкал. Однако в 1742 году шведский астроном Андерс Цельсий предложил свою шкалу, основанную на отношении между температурой воды и температурой жидкости, из чего следовало, что шкала Цельсия была более удобной и точной. Тем не менее, история появления температурной шкалы Рёмер является важным этапом в развитии науки и измерения температур.

Формула преобразования температуры из градусов Рёмера в градусы Цельсия:

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{R}\varnothing - 7,5) / 0,525 \quad (2)$$

Температурная шкала Фаренгейта – это шкала измерения температуры, которая была разработана немецким физиком и инженером Габриэлем Даниэлем Фаренгейтом в 1724 году. Фаренгейт был заинтересован в создании универсальной шкалы температуры, которая могла бы использоваться в медицине, промышленности и научных исследованиях. Он предпринял ряд экспериментов и исследований, чтобы разработать свою шкалу. Фаренгейт решил использовать две точки отсчета на своей шкале. Первой точкой была температура здорового человека, которую он оценил в 98.6 градусов. Более

высокой точкой была температура его термометра, помещенного в смеси соли и льда, которую он оценил в 0 градусов. Фаренгейт разделил интервал между этими двумя точками на 180 равных частей, называемых градусами Фаренгейта. Таким образом, он установил, что плавление льда происходит при 32 градусах Фаренгейта, а кипение воды при 212 градусах Фаренгейта. В 1724 году Фаренгейт опубликовал свою работу "О принципах морозного термометра и тепловых индикаторов", в которой он подробно описал свою температурную шкалу и принципы ее измерения. Температурная шкала Фаренгейта была широко принята в Великобритании и США, но в большинстве стран мира она была заменена шкалой Цельсия, которая считается более универсальной. Однако некоторые страны, включая США, все еще используют температурную шкалу Фаренгейта в повседневной жизни и в некоторых областях, таких как метеорология или кулинария.

Формула преобразования температуры из градусов Фаренгейта в градусы Цельсия:

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) * 5/9 \quad (3)$$

Температурная шкала Реомюр - это устаревшая шкала температуры, названная в честь шведского физика и приборостроителя Рене Антуана Фершо де Реомюра. Шкала Реомюра разработана в 1730 году и была широко использована в Европе до середины XIX века. В термометрах Реомюр предложил использовать концентрацию спирта, при которой он начинал кипеть при 80 °Re, что означало увеличение его объема на 8%. Поэтому эту температуру Реомюр установил как 80 градусов на своей шкале, на которой одному градусу соответствовало расширение спирта на 1 тысячную, а ноль шкалы был выбран как температура замерзания воды. Однако из-за использования спирта возникли проблемы, такие термометры были громоздкими и не подходили для многих целей из-за его низкой температуры кипения. По причине использования в то время в качестве жидкости не только спирта, но и его различных водных растворов, многим производителям и

пользователям термометров неправильно казалось, что 80 °Ré это обозначение точки кипения воды, что вызывало путаницу.

Хотя шкала Реомюра была популярна в Европе в XVIII веке, она позже была заменена более простой и понятной шкалой Цельсия. Шкала Реомюра осталась известной историческим достижением в области измерения температуры, но ее использование сократилось и стало ограниченным. В настоящее время шкала Реомюра практически не используется и большинство стран используют шкалу Цельсия или Фаренгейта для измерения температуры.

Для преобразования температур между шкалой Реомюра и шкалой Цельсия используется следующая формула:

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{R} - 7.5) * 5/4 \quad (4)$$

Температурная шкала Делиль была разработана французским физиком и астрономом Жозефом Николасом Делилем в XVIII веке. Шкала Делиля была одной из первых попыток создать шкалу температуры, основанную на измерении температуры воздуха. На шкале Делиля точка замерзания воды устанавливалась в 0° и точка кипения - в 80°. Таким образом, шкала Делиля была разделена на 80 равных градусов между этими двумя точками. Шкала Делиля использовала жидкостной термометр с ртутью, подобно шкале Цельсия. Однако шкала Делиля не получила широкого признания и использования, в основном из-за отсутствия удобных и широкодоступных фиксированных точек плавления и кипения для многих других веществ. Это ограничение привело к тому, что шкала Делиля была заменена более практичными и универсально принятыми шкалами, такими как шкала Цельсия и шкала Фаренгейта. Температурная шкала Делиля, несмотря на то что она уже не широко используется в научных и практических целях, остается частью истории и наследия в измерении температуры.

Формула преобразования температуры из шкалы Делиля в шкалу Цельсия:

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{D} + 100) / 1,5 \quad (5)$$

Температурная шкала Цельсия - это одна из наиболее распространенных шкал температуры, которая используется в большинстве стран мира. Шкала Цельсия была предложена шведским астрономом Андерсом Цельсием в 1742 году. Шкала Цельсия определяет нулевую точку (0°C) как точку замерзания воды при нормальных условиях и ста градусов (100°C) как точку кипения воды при атмосферном давлении. Шкала разделена на 100 равных градусов между этими двумя точками. Важно отметить, что шкала Цельсия была разработана на основе водной шкалы, что делает ее удобной для измерения температур воды и метеорологических условий. Шкала Цельсия широко используется в научных, технических, медицинских областях для измерения температуры, а также в повседневной жизни для измерения температуры окружающей среды. Шкала Цельсия была принята во многих странах и стала широко используемой температурной шкалой. В 1948 году она была официально названа в честь своего создателя.

Температурная шкала Кельвина, обозначаемая как К, является абсолютной температурной шкалой. Она была названа в честь шотландского физика и инженера Уильяма Томсона, более известного как Лорд Кельвин. Кельвин был выдающимся физиком и инженером, который внес значительный вклад в различные области науки, включая термодинамику. В то время, когда Кельвин начал свои исследования, наиболее распространенной температурной шкалой была шкала Цельсия. Кельвин заинтересовался разработкой новой температурной шкалы, которая была бы основана не на свойствах воды, а на физических свойствах. Он провел много исследований в области газовой термодинамики, в частности исследуя связь между температурой и объемом газа при постоянном давлении. По результатам своих исследований, Кельвин предложил новую шкалу, которая была основана на термодинамических свойствах и не зависела от какого-либо вещества. Он предложил назвать ее

"абсолютной шкалой температур". Шкала Кельвина основана на абсолютном нуле, температуре, при которой молекулы перестают двигаться. Температура на шкале Кельвина всегда положительна. Значение абсолютного нуля на шкале Кельвина равно 0 К, и каждый градус Кельвина (К) эквивалентен одному градусу Цельсия (°С). Таким образом, разница в температуре 1 К равна разнице в температуре 1 °С. Температурная шкала Кельвина широко используется в научных и технических расчетах, особенно в области физики, химии, астрономии и других отраслях науки. Она является стандартной шкалой для измерения абсолютной температуры и используется везде, где необходимо точное и однозначное определение температуры.

Относительно шкалы Кельвина, конверсия температур на шкалу Цельсия осуществляется по следующей формуле:

$$^{\circ}\text{C} = (\text{K} - 273,15) \quad (6)$$

Кельвин предложил единицу измерения для своей шкалы - "Кельвин". Эта единица была названа в его честь.

Температурная шкала Ранкина была разработана шотландским физиком Уильямом Джоном Макквори Ранкином в 1859 году. Ранкин был известен своими исследованиями термодинамики и теплопередачи. Ранкин заметил, что существующие на тот момент температурные шкалы, такие как Цельсия и Фаренгейта, имели свои недостатки. Шкала Цельсия, например, основана на отношении точек замерзания и точек кипения воды, но эти точки не являются фундаментальными физическими константами. Ранкин предложил свою шкалу, которая основывается на абсолютной нулевой температуре - наименьшей возможной температуре во Вселенной, где молекулы остановлены в своем движении. Он назвал ее "абсолютной шкалой температуры". В шкале Ранкина, абсолютный ноль соответствует нулю на шкале, точка замерзания воды соответствует 491,67 °Ra, точка кипения воды 671,67 °Ra. Число градусов между точками замерзания и кипения воды по шкале Фаренгейта и Ранкина одинаково и равно 180. Сегодня шкала Ранкина

редко используется в повседневной жизни или в научных исследованиях. Она была замещена шкалой Кельвина, которая также основана на абсолютном нуле, но имеет более удобные для использования значения для обычных температурных диапазонов.

Для преобразования температур между шкалой Цельсия и шкалой Ранкина используется следующая формула:

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{Ra} * 5/9) - 273,15 \quad (7)$$

Преобразование единиц измерения температуры всех рассмотренных шкал приведены в таблице 1

Таблица 1 - Сравнения температурных шкал

Показатель	Делиль	Кельвин	Ньютон	Ранкин	Реомюр	Рёмер	Фаренгейт	Цельсий
Абсолютный нуль	559.73	0.00	-90.14	0.00	-218.52	-135.90	-459.67	-273.15
Самая низкая температура на Земле	284	184	-29	331	-71	-39	-128.6	-89.2
Смесь льда и соли по Фаренгейту	255.37	271.32	0.00	459.67	176.67	-5.87	-14.22	-1.83
Температура таяния льда (стандартные условия)	150.00	273.15	0.00	491.67	0.00	7.50	32.00	0.00
Тройная точка воды	149.985	273.16	0.0033	491.688	0.008	7.50525	32.018	0.01
Средняя температура поверхности Земли	128	288	5	519	12	15	59	15
Средняя температура тела человека	95	310	12	558	29	27	98	37
Самая высокая температура на Земле	63	331	19	596	46	38	136.4	58
Температура кипения воды (стандартные условия)	0.00	373.1339	33.00	671.64102	80.00	60.00	211.97102	99.9839
Температура плавления титана	-2352	1941	550	3494	1334	883	3034	1668
Фотосфера	-8100	5800	1800	10400	4400	2900	9900	5500

Принцип построения температурной шкалы основан на выборе двух фиксированных точек (реперные точки) с температурой t_1 и t_2 , которые можно

легко повторно воспроизвести. Реперные точки температуры – это определенные значения температуры, которые используются как точки отсчета или ориентиры при измерении и сравнении других значений температуры. Эти реперные точки позволяют установить отношение между различными шкалами измерения температуры и сравнивать значения температуры в разных системах измерения. Используя эти две точки, Интервал между этими двумя точками делится на равные отрезки, которые представляют уровни температуры. Далее выбирают физическое свойство – термометрическую величину E , например, объём жидкости, давление газа, электрическое сопротивление, термо-ЭДС и т. д., которую условно полагают линейно зависящей от температуры:

$$t = kE + C, \quad (8)$$

где k – коэффициент пропорциональности, E – термометрическую величину, C – постоянная.

Для определения постоянных k и C используем вышеуказанные температуры t_1 и t_2 . С помощью уравнения (8) по измеренным значениям E находим значения температуры t . Графики рассмотренных температурных шкал, построенные по реперным точкам, показаны на рисунке 1.

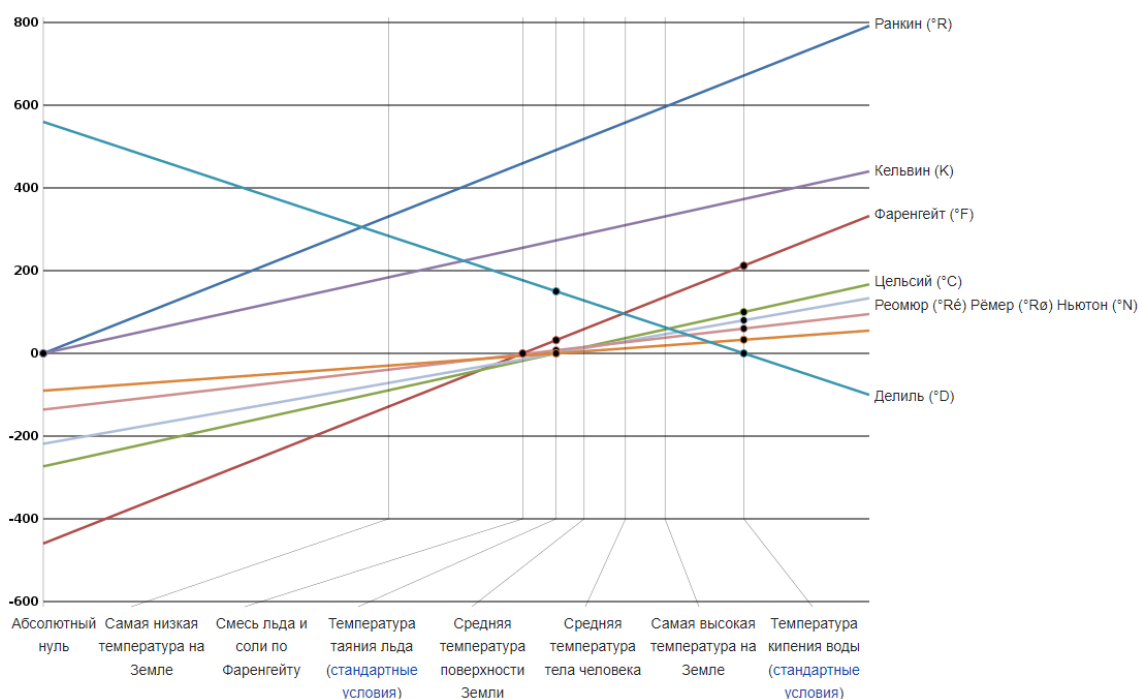


Рисунок 1 – Графики, построенные по реперным точкам, различных температурных шкал

Во всех существующих температурных шкалах для измерения температуры использовались различные точки плавления и кипения веществ, такие как вода, ртуть и свинец. Однако, эти методы имели недостатки, такие как зависимость от атмосферного давления и получение точного значения температуры только на определенной высоте над уровнем моря. Проблема заключалась в том, что нет общепринятой шкалы, которую можно было бы использовать для калибровки научных и технических приборов. Это создавало сложности для научных и технических исследований, требующих точного измерения температуры. Для решения этой проблемы было принято решение разработать **Международную практическую температурную шкалу (МПТШ)**. Цель состояла в том, чтобы создать шкалу, которая была бы удобной в использовании и могла обеспечить наиболее точное соответствие термодинамической шкале, приемлемое для современной техники измерений. Разработка МПТШ началась в XIX веке, и включала в себя серию экспериментов, основанных на физических и химических явлениях, которые можно было использовать для определения температуры. Процесс был сложным и продолжался несколько десятилетий.

В 1927 году была принята МПТШ, которая стала международным стандартом для измерения температуры. Она основана на определенных точках плавления и кипения ряда чистых веществ, таких как вода, свинец, цинк и другие.

МПТШ была усовершенствована и обновлена в последующие годы и стала основой для различных шкал измерения температуры: Цельсия, Фаренгейта, Кельвина и других. Сегодня Международная практическая температурная шкала является важным инструментом для научных исследований, промышленности и международной торговли, и она обеспечивает беспрепятственный обмен результатами измерений температуры во всем мире.

Датчики температуры

Рассмотрим классификацию средств измерений температуры в зависимости от используемого термометрического свойства и диапазона измерения:

Термоэлектрические термометры или термопары.

Термопара состоит из двух проводников различных металлов, соединенных на одном конце (спай). Принцип работы термопары основан на эффекте Зеебека. Этот эффект был открыт немецким физиком Томасом Иоханнесом Зеебеком в 1821 году. Эффект Зеебека, или термоэлектрический эффект, заключается в возникновении разности потенциалов в проводнике при наличии градиента температуры (рисунок 2). При наличии разности температур между концами термопары, электроны начинают перемещаться из области с более высокой температурой в область с более низкой температурой. Это создает электрический ток, который можно измерить с помощью вольтметра или термопарного милливольтметра. Важно отметить, что эффект Зеебека является нелинейным, и для точного измерения температуры с использованием термопары требуется калибровка и использование таблиц компенсации, таких как таблица эмпирических данных NIST или таблицы производителя, чтобы преобразовать измеренное напряжение в соответствующую температуру.

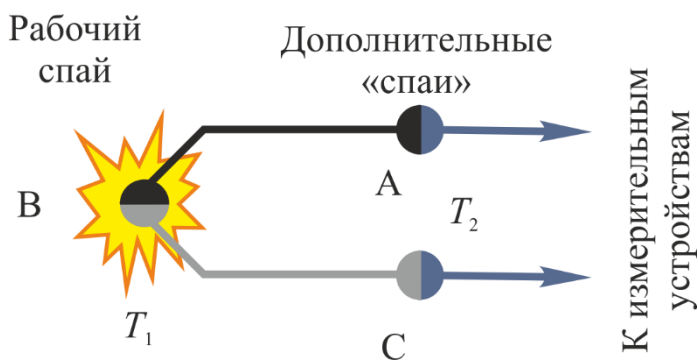


Рисунок 2 – Термопара

При использовании термопар следует руководствоваться следующими термоэлектрическими законами:

Первый закон (закон промежуточных температур Магнуса). В цепи, состоящей из двух различных проводников А и В, температуры мест соединения которых неодинаковы и равны T_1 и T_2 , возникающая термоЭДС контура равна алгебраической сумме термоЭДС той же цепи при температурах контактов (спаев) T_1 и T_3 , T_3 и T_2 :

$$E_{AB}(T_1T_2) = E_{AB}(T_1T_3) + E_{AB}(T_3T_2). \quad (9)$$

Второй закон (закон промежуточных металлов). При соединении двух различных металлов в термопаре, напряжение, создаваемое при изменении температуры, зависит только от температуры и свойств этих двух металлов, а не от свойств промежуточного металла, который используется для соединения.

Это важно для правильной работы термопары, так как позволяет нам использовать промежуточный металл, обеспечивающий механическую прочность и устойчивость соединения, без влияния на точность измерения температуры.

Существует несколько типов термопар, основное различие которых заключается в материалах используемых проводников:

- Термопары типа К (хромель/алюмель) – одна из самых распространенных термопар, которая обеспечивает хорошую точность измерений в широком диапазоне температур от -200 до $+1260$ °С.
- Термопары типа J (железо/константан) – также широко используемые термопары, работающие в диапазоне температур от -200 до $+750$ °С.
- Термопары типа Т (медь/константан) – эти термопары применяются в широком диапазоне температур от -200 до $+350$ °С и обладают высокой стабильностью и точностью измерений.
- Термопары типа Е (никельхром/константан) – эти термопары применяются в диапазоне температур от -200 до $+900$ °С и обладают хорошей стабильностью при экстремальных условиях.
- Термопары типа N (никельхром/никелевая свободная двухфазовая сталь) - эти термопары обеспечивают высокую точность измерений в широком

диапазоне температур от -200 до +1300 °С.

Кроме того, существуют и другие типы термопар, такие как В, R и S, обеспечивающие измерения в еще более широком диапазоне температур и с высокой точностью.

Достоинства термопар:

1. Широкий диапазон измерения температуры: термопары могут измерять температуры от -270 до 3000 градусов Цельсия. Это делает их полезными для измерения температуры в различных приложениях.
2. Термопары могут обеспечить высокую точность измерения температуры, если они правильно калибруются и используются. Обычно они точнее, чем другие типы термометров.
3. Термопары, как правило, довольно прочны и могут использоваться в условиях, которые не подходят для других типов термометров.

Недостатки:

1. Низкая точность при малых температурах.
2. Термопары требуют калибровки перед использованием и периодических калибровок, чтобы обеспечить точные измерения.
3. Поскольку термопары используются с двумя разными металлами, они могут быть несовместимы с некоторыми материалами.

Термопары используются для измерения температуры в промышленных процессах, таких как производство стекла, металлургия, плавка металлов, печные работы, нагрев и охлаждение систем и другие промышленные процессы. Также термопары применяются для измерения температуры в энергетических установках, парогенераторах, турбинах, конденсаторах, котлах и других системах и оборудовании. Термопары используются в бытовых приборах для контроля и регулировки температуры, в научных исследованиях для измерения температуры в экспериментах, испытаниях и лабораторных условиях, в пищевой промышленности для контроля температуры в процессе приготовления, хранения и транспортировки пищевых продуктов. Термопары могут использоваться в медицинских

приборах для измерения температуры тела, контроля температуры в инкубаторах, холодильниках для хранения препаратов, в аэрокосмической промышленности для контроля температуры в ракетах, спутниках, самолетах и других аэрокосмических системах. Термопары имеют широкий спектр применения и продолжают быть востребованными благодаря своим преимуществам в измерении температуры в различных условиях и средах.

Термометры расширения — это тип термометров, которые измеряют температуру на основе изменения длины или объема вещества с изменением температуры. Они основаны на принципе расширения вещества при нагревании и сжатии при охлаждении.

Существуют различные типы термометров расширения, включая:

1. **Стеклянный термометр** (рисунок 3). Он состоит из тонкой стеклянной трубки, в которой находится ртуть или спирт. При изменении температуры ртуть или спирт расширяется или сжимается, что приводит к изменению уровня вещества в трубке. Это изменение уровня используется для определения температуры. Их диапазон измерений может варьироваться, но обычно они позволяют измерять температуру в диапазоне от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$



Рисунок 3 – Стеклянные термометры

2. **Дилатометрические термометры** используются для измерения температуры путем измерения теплового расширения материала, при нагреве большинства материалов их размеры увеличиваются. Дилатометрические термометры

имеют металлический стержень или провод, который расширяется или сжимается в зависимости от изменений температуры. Детектор, как правило, представлен dilatометром, который включает резистор или электрическую проволоку, изготовленные из материала с высоким температурным коэффициентом расширения. Диапазон измерения температур составляет от -30 до +1000 °С.

3. Биметаллический термометр (рисунок 4). Этот тип термометра состоит из двух слоев разных металлов (например, железа и латуни), которые сварены вместе. При изменении температуры каждый металл расширяется по-разному, что приводит к искривлению биметаллической полоски. Это искривление используется для измерения температуры. Диапазон измерения температур составляет от -40 до +450 °С.

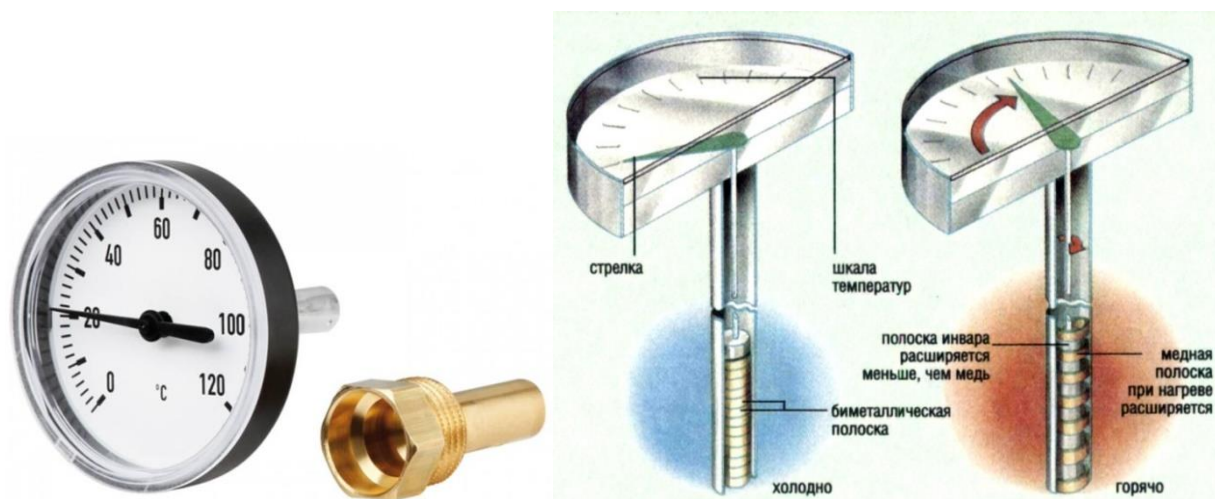


Рисунок 4 – а) Внешний вид и б) принцип действия биметаллического термометра

4. Термометр с расширением газа. В этом типе термометра использование заключается в измерении изменения объема газа в закрытом пространстве при изменении температуры. При нагревании газ расширяется, вызывая изменение давления в пространстве. Изменение давления измеряется и используется для определения температуры. На рисунке 5 показан принцип действия газового термометра.

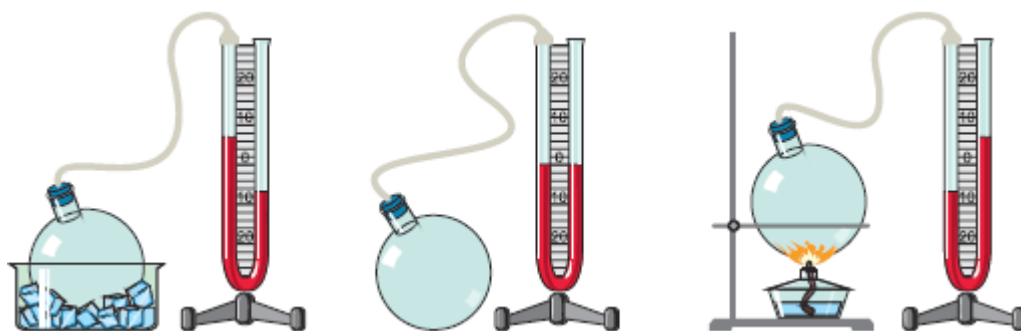


Рисунок 5 – Принцип действия газового термометра

Термометры расширения широко применяются в различных отраслях, включая медицину, пищевую промышленность, промышленные процессы, научные исследования и домашнее использование. Они отличаются высокой точностью, простотой использования и долговечностью. Однако, они могут иметь ограниченный диапазон измерения и требуют времени для установления равновесия с окружающей средой перед получением точного показания температуры. Они рассчитаны на измерения температур в диапазоне от -190 до $+500$ °С.

Манометрический термометр — это тип термометра, который измеряет температуру на основе изменения давления газа или жидкости с изменением температуры (рисунок 6). Принцип работы манометрического термометра основан на законе Гей-Люссака, который устанавливает, что объем газа, содержащегося в закрытом сосуде, температурно зависимый.



Рисунок 6 – Манометрический термометр

Манометрический термометр состоит из закрытого сосуда, содержащего газовую среду, и манометра, который измеряет давление в данной среде. При изменении температуры, объем газа увеличивается или уменьшается, что приводит к соответствующему изменению давления, отображаемого на манометре. Зная зависимость между давлением и температурой, можно определить температуру по показаниям манометра. Диапазон измерения температур составляет от -60 до +600 °С.

В зависимости от применяемого рабочего вещества различают следующие манометрические термометры:

- газовые (азот);
- конденсационные (метилхлорид, спирт, диэтиловый эфир);
- жидкостные (метилксилол, силиконовые жидкости, металлы с низкой точкой плавления);
- ртутные со специальными наполнителями.

Манометрические термометры широко применяются в различных областях, включая отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха, промышленные процессы, медицину и научные исследования. К преимуществам таких термометров можно отнести высокую точность измерений и возможность использования в широких диапазонах температур. Однако, они могут быть более сложными в использовании и требуют регулярной поверки и калибровки для обеспечения точности измерений.

Терморезистивные датчики – это тип датчиков, которые используются для измерения температуры (рисунок 7). Они основаны на изменении электрического сопротивления материала в зависимости от температуры. Самым распространенным терморезистивным датчиком является платиновый платинорезистивный термометр (Pt100), который состоит из проводника из платины сопротивлением 100 ом при нулевой температуре. Сопротивление проводника изменяется в зависимости от изменения температуры, и поэтому можно использовать этот датчик для измерения температуры. Диапазон

температур, измеряемых терморезистором, лежит в пределах от -50 до $+600$ С

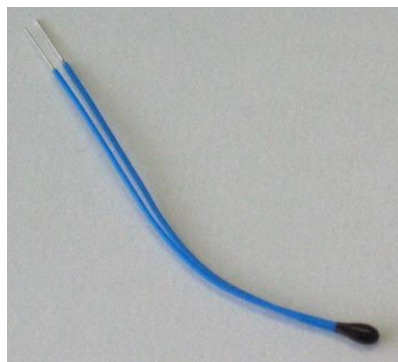


Рисунок 7 – Терморезистор

Терморезистивные датчики имеют ряд преимуществ, включая высокую точность измерений, широкий диапазон рабочих температур, стабильность и долгий срок службы. Они широко используются в различных областях, включая промышленность, автомобильную промышленность, медицину и климатические системы. Однако, у терморезистивных датчиков также есть некоторые ограничения. Они требуют подключения специального усилительного оборудования для измерения изменений сопротивления, а также могут быть более дорогими по сравнению с другими типами датчиков.

Термометр сопротивления — это тип термометра, который измеряет температуру на основе изменения электрического сопротивления материала с изменением температуры (рисунок 8). Диапазон измерений от -200 °С до $+750$ °С



Рисунок 8 – Термометр сопротивления

Термометр сопротивления обычно состоит из следующих основных компонентов:

1. Термочувствительный элемент (термосопротивление, терморезистор или термистор) — это основная часть термометра сопротивления. Он состоит из проводящего материала с известным температурным коэффициентом сопротивления, обычно платины (Pt100 или Pt1000) или никеля (Ni100 или Ni1000). Значение сопротивления проводника изменяется с изменением температуры, и это изменение используется для определения температуры.
2. Сопротивление термочувствительного элемента измеряется с помощью проводников, которые обычно изготавливаются из меди, серебра или других проводящих материалов. Они соединяются с термочувствительным элементом и передают сигнал сопротивления обратно к измерительному устройству.
3. Термочувствительный элемент и проводники обычно окружены защитной оболочкой для защиты от внешних факторов, таких как механические повреждения, влага и коррозия.
4. Концы проводников обычно имеют разъемы для удобного подключения к измерительному или управляющему устройству.

Термометры сопротивления обеспечивают высокую точность измерения температуры, особенно при использовании платиновых сопротивлений, которые имеют стабильные температурные коэффициенты. Измеряют температуру в широком диапазоне, от очень низких до очень высоких температур. Материалы, используемые в термометрах сопротивления, такие как платина, обладают высокой стойкостью к окружающей среде, химическим веществам и износу. Термометры сопротивления обеспечивают линейную зависимость между изменением сопротивления и температурой, что облегчает их калибровку и использование.

Термометры сопротивления широко используются в промышленности, включая производство и контроль качества в различных отраслях, таких как нефтяная и газовая промышленность, пищевая промышленность,

фармацевтика, научные исследования и другие. Они также используются в бытовых приборах, таких как духовки, плиты и обогреватели.

Пирометры - это приборы для измерения температуры поверхности, работающие на основе измерения инфракрасных излучений, испускаемых объектом (рисунок 9). Он работает на основе детектирования инфракрасного излучения, испускаемого объектом. Существует несколько видов пирометров, в том числе оптические, инфракрасные и лазерные пирометры. Оптические пирометры используются для измерения температуры тающего металла, инфракрасные пирометры - для измерения температуры объектов с более низкой термической энергией. Лазерные пирометры позволяют измерять температуру объектов на больших расстояниях, но их точность зависит от расстояния до объекта. Пирометры являются важным инструментом для контроля температуры в различных промышленных и лабораторных условиях, а также при работе с горячими поверхностями в различных областях. Диапазон измерений от -50 до $+1500^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 9 – Пирометр

Тепловизор – это прибор, используемый для измерения инфракрасного излучения тел и отображения его в видимом спектре, что позволяет визуализировать тепловую картину объектов и окружающей среды (рисунок 10).



Рисунок 10 – Тепловизор

Тепловизоры работают на основе принципа теплового излучения всех объектов. Все предметы излучают энергию в виде инфракрасного излучения, которое невидимо для человеческого глаза. Температура объектов влияет на интенсивность и спектральный состав этого излучения. Тепловизоры обнаруживают и фиксируют инфракрасное излучение, а затем преобразуют его в видимую картину на экране. Тепловизор определяет температуру до + 550 °С с точностью ± 2 °С.

Тепловизоры широко используются в различных областях, включая медицину, энергетику, безопасность, поисково-спасательные операции, а также в промышленности, строительстве и военных целях. Они позволяют обнаруживать и анализировать тепловые аномалии, определять их причины, контролировать тепловые процессы и выявлять скрытые дефекты и утечки тепла. Тепловизоры также находят применение в наблюдении животного и растительного мира, а также при охоте и рыбалке.

Волоконный датчик температуры - это тип датчика, который использует волоконно-оптическую технологию для измерения тепловых параметров (рисунок 11). Он состоит из оптоволокна, в которое внедрены материалы с изменяющимся показателем преломления при изменении температуры.

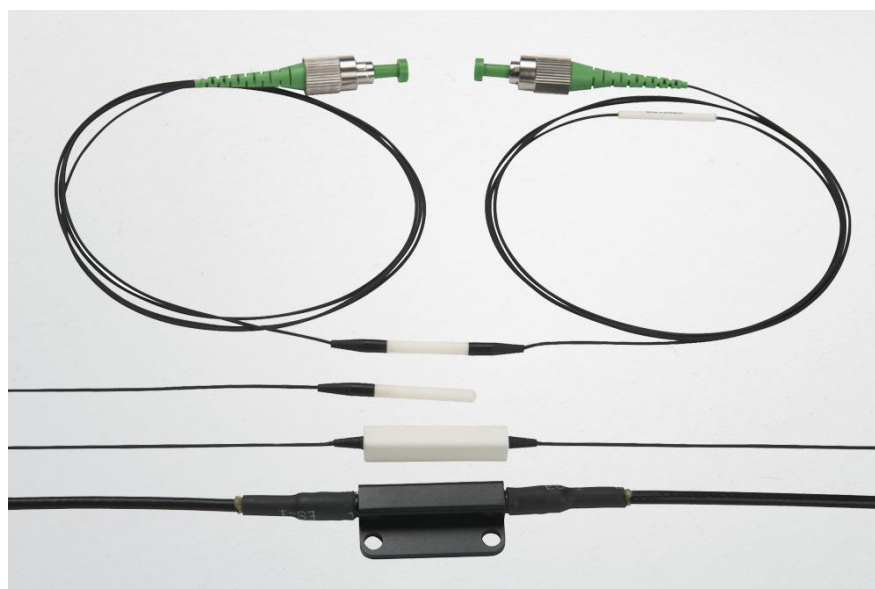


Рисунок 11 – Волоконный датчик температуры

Принцип работы волоконного датчика температуры основан на измерении изменения светового сигнала, который передается по оптоволокну. При изменении температуры происходит изменение показателя преломления волоконного материала, что влияет на световой сигнал. Эти изменения могут быть измерены и интерпретированы для определения температуры. Диапазон измерений до +650 °С.

Преимущества волоконных датчиков температуры включают их высокую точность, широкий диапазон измерения, стабильность и надежность. Они также могут быть использованы для измерения температуры в экстремальных условиях, таких как высокие температуры или химически агрессивные среды.

Волоконные датчики температуры находят применение в различных областях, включая промышленность, энергетику, медицину и науку. Они могут быть использованы для мониторинга температуры внутри машин и оборудования, контроля температуры процессов, диагностики и мониторинга тепловых систем, а также для исследований и экспериментов.

Акустический датчик температуры - это устройство, которое используется для определения температуры через измерение акустических

параметров, таких как скорость звука или его частота. Например, для газов зависимость скорости ультразвука от температуры выражается формулой (10):

$$C = \alpha\sqrt{T}, \quad (10)$$

где α – коэффициент, зависящий от давления, плотности, молекулярной массы газа.

Пример акустического датчика температуры приведен на рисунке 12.

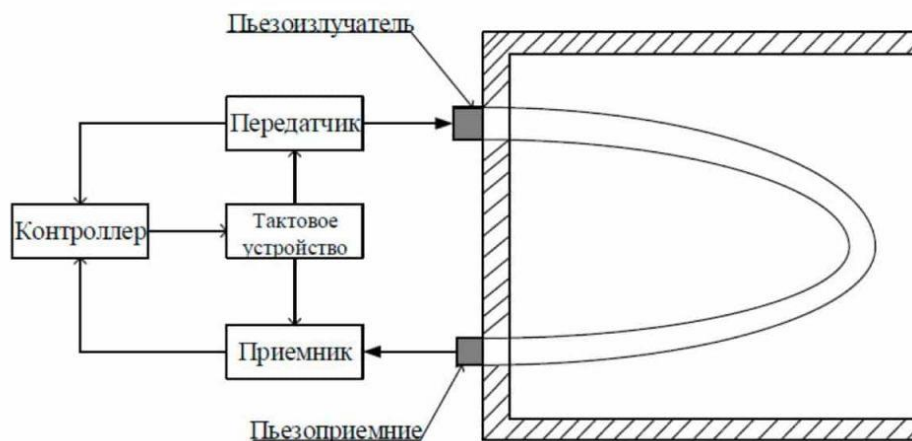


Рисунок 12 – Акустический датчик температуры

Такие датчики обычно состоят из ультразвукового источника, приемника и микроконтроллера для обработки сигналов. Источник создает ультразвуковой сигнал, который распространяется через среду, а приемник регистрирует его изменения. Так как скорость звука зависит от температуры среды, изменения в звуковом сигнале позволяют определить температуру.

Преимущества акустических датчиков температуры включают точность измерений, возможность работы в широком диапазоне температур, а также возможность измерять температуру без контакта со средой. Они могут применяться в различных отраслях, таких как промышленность, наука, медицина и т.д. Однако, следует отметить, что акустические датчики температуры могут быть более дорогими и сложными в установке и

использовании по сравнению с другими типами датчиков температуры, такими как термисторы или термопары.

Пьезоэлектрические датчики температуры – это прибор для бесконтактного измерения температуры тел, принцип действия которого основан при помощи кварцевого пьезорезонатора (рисунок 13). Эти датчики измеряют температуру на основе изменения пьезоэлектрических свойств материалов под воздействием температуры. Изменение температуры вызывает изменение электрических свойств материала, что можно измерить и интерпретировать как температуру.



Рисунок 13 – Пьезоэлектрические датчики температуры

В пьезоэлектрических датчиках температуры всегда очень сложно организовать хорошую тепловую связь кристалла с объектом измерения, поэтому они обладают худшим быстродействием по сравнению с термисторами и термоэлектрическими детекторами.

Полупроводниковые датчики предназначены для измерения температуры от -55° до 150°C . В этот диапазон попадает огромное количество задач, как в бытовых, так и в промышленных приложениях. Благодаря широким характеристикам, простоте применения и низкой стоимости полупроводниковые датчики температуры оказываются очень привлекательными для применения в микропроцессорных устройствах измерения и автоматики.

Физический принцип работы полупроводникового термометра основан на зависимости от температуры падения напряжения на р-п переходе, смещённом в прямом направлении. Данная зависимость близка к линейной, что позволяет создавать датчики, не требующие сложных схем коррекции. В качестве чувствительных элементов на практике используются диоды, либо транзисторы, включенные по схеме диода (рисунок 14). Для проведения измерений, необходимо протекание стабильного тока через чувствительный элемент. Выходным сигналом является падение напряжения на датчике.

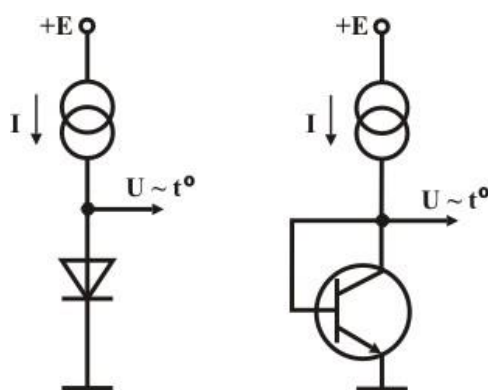


Рисунок 14 – Полупроводниковые датчики температуры

Схемы, использующие одиночный р-п переход, отличаются низкой точностью и большим разбросом параметров, связанных с особенностями изготовления и работы полупроводниковых приборов. Промышленность выпускает множество типов специализированных датчиков, имеющих в своей основе вышеописанный принцип, но дополнительно оснащенных цепями, устраняющими негативные особенности и значительно расширяющими функционал приборов.

Полупроводниковые датчики подразделяют на следующие виды:

- аналоговые. Простые аналоговые полупроводниковые датчики практически в чистом виде реализуют идею измерения температуры, с помощью определения падения напряжения на р-п переходе. Для устранения всех отрицательных явлений, связанных с работой такого перехода, используется специальная схема, содержащая в своем составе два чувствительных элемента (транзистора) с различными характеристиками.

Выходной сигнал формируется как разность падений напряжения на каждом чувствительном элементе. При вычитании значительно сокращаются негативные моменты. Дальнейшее повышение точности измерения осуществляется калибровкой датчика с помощью внешних цепей (рисунок 15).

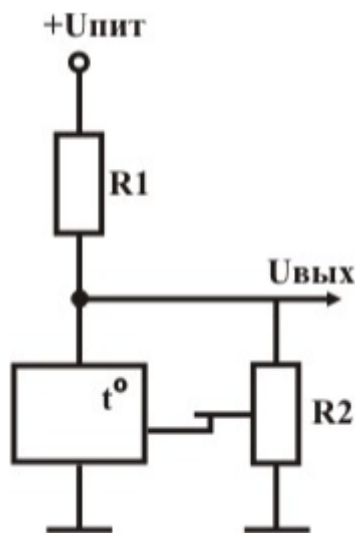


Рисунок 15 – Типовая схема включения полупроводникового термометра с коррекцией

Основной характеристикой датчика является точность измерений. Для полупроводниковых моделей она колеблется от ± 1 °С до ± 3.5 °С. Самые точные модели редко обеспечивают точность лучше, чем ± 0.5 °С. При этом данный параметр сильно зависит от температуры. В суженном диапазоне от -25 до 100 °С точность в полтора раза выше, чем в полном диапазоне измерений -40 °С до +125 °С. Большинство аналоговых датчиков температуры, иначе называемых интегральными датчиками, содержит три вывода и включается по схеме диода. Третий вывод обычно используется для целей калибровки. Выходной сигнал датчика представляет собой напряжение, пропорциональное температуре. Величина изменения напряжения различна и составляет 10 мВ/градус. Для точного определения значения температуры необходимо знать падение напряжения при каком-либо ее фиксированном значении. Обычно в качестве такового используется значение начала диапазона измерений либо 0°С.

- с цифровым выходом. Технология изготовления полупроводниковых термометров позволяет размещать их на кристаллах интегральных микросхем. Температурные датчики встречаются в составе микропроцессоров и микроконтроллеров, служебных мониторов микропроцессорных систем, а также в других измерительных устройствах, например датчиках влажности. Возможен и противоположный вариант - добавления различных элементов к датчикам. Примером подобных изделий могут служить датчики температуры с цифровым выходом. В отличие от аналоговых вариантов, эти устройства содержат встроенный АЦП и формирователь сигналов какого-либо стандартного интерфейса. Наибольшую популярность получили интерфейсы SPI, I2C и 1-Wire. Использование термометров с цифровым выходом значительно упрощает схемотехнику измерительного устройства, при незначительном увеличении стоимости относительно аналоговых вариантов. Использование стандартных интерфейсов интегрирует датчики в различные системы управления или подключать несколько датчиков на одну шину.

Вычисление температуры в робототехнике необходимо по нескольким причинам:

- Безопасность: Роботы могут работать в различных окружающих условиях, включая высокие или низкие температуры. Вычисление температуры позволяет роботам адаптироваться к окружающей среде и принимать меры для предотвращения перегрева или замерзания.

- Оптимизация работы: Вычисление температуры позволяет оптимизировать работу роботов. Некоторые компоненты роботов, такие как двигатели или электронные устройства, могут работать наилучшим образом при определенной температуре. Анализ и контроль температуры может помочь улучшить эффективность работы роботов.

- Продолжительность работы: Вычисление температуры позволяет определить, сколько времени робот может работать без перегрева или других

проблем, связанных с температурой. Это помогает планировать задачи и управлять энергопотреблением роботов.

- **Обнаружение неисправностей:** Измерение температуры может помочь обнаружить потенциальные неисправности или поломки в компонентах робота. Например, высокая температура может указывать на проблемы с охлаждением или перегрузкой системы.

При выборе датчика температуры следует учитывать несколько критериев:

1. Датчик температуры должен работать в требуемом диапазоне температур, который соответствует задаче, для которой он будет использоваться, например, для холодильника, для котла, для теплового заварщика и т.д.

2. Требуемая точность измерения температуры зависит от конкретного применения. Например, для промышленных процессов может потребоваться высокая точность, в то время как для домашнего использования ниже точность может быть достаточна.

3. Существует много типов датчиков температуры, таких как термопары, RTD (сопротивление температуры), термисторы, инфракрасные датчики, которые измеряют температуру разными способами. Выбор датчика будет зависеть от того, какой способ измерения наиболее подходит для конкретной задачи.

4. Датчик температуры должен быть достаточно маленьким и компактным, чтобы его можно было легко установить в нужном месте.

5. Стоимость датчика температуры также является важным критерием при его выборе. Однако стоит отметить, что чем выше точность и диапазон измерения, тем выше цена датчика.

6. При выборе датчика температуры важно учитывать материал корпуса, особенно если он будет использоваться в агрессивных средах. Датчик должен быть изготовлен из материала, который не будет подвержен коррозии или портиться от химических воздействий или воды.

Описание лабораторного стенда

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.

В лабораторной работе измерять температуру будем с помощью полупроводникового, термоэлектрического и резистивного датчиков температуры.

1. **Модуль MAX31855 для подключения термопары К-Типе к микроконтроллеру по шине SPI, внешний вид которого показан на рисунке 16.**

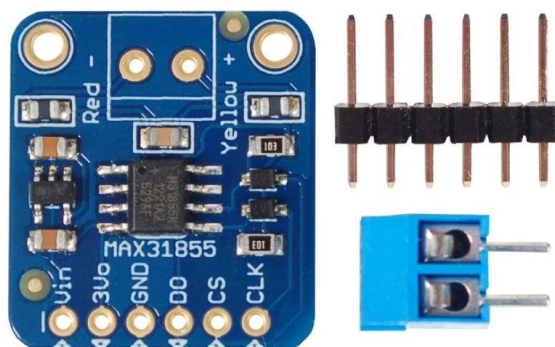


Рисунок 16 – Модуль MAX31855

Основными особенностями MAX31855 являются:

- **Высокая точность:** Датчик температуры MAX31855 обеспечивает высокую точность с измерительным разрешением в 0,25 °C и диапазоном измерения от -270 до +1372 °C.
- **Компенсация холодного перехода:** MAX31855 имеет встроенную

функциональность компенсации холодного перехода, что позволяет получить точные данные даже при наличии изменений температуры самого датчика.

- Интерфейс SPI: Для обмена данными датчик использует интерфейс последовательного периферийного интерфейса (SPI). Этот интерфейс позволяет передавать данные с высокой скоростью и обеспечивает простое и гибкое взаимодействие с микроконтроллером или другими устройствами.

- Дополнительные функции: MAX31855 также предоставляет дополнительную информацию о статусе и ошибке, включая флаги различных состояний, таких как ошибки связи, обрыв термопары и перегрузка термопары.

Принципиальная схема MAX31855 включает в себя следующие основные компоненты и показана на рисунке 17:

1. Термопара: MAX31855 может измерять температуру с помощью нескольких типов термопар, таких как тип К, тип J и т. д. Термопара соединена с соответствующими входами датчика.

2. Усилитель термо-ЭДС: Входной сигнал от термопары проходит через усилитель термо-ЭДС, который преобразует термо-эдс с термопары в более высокий уровень напряжения для дальнейшей обработки датчиком.

3. АЦП: MAX31855 имеет встроенный 14-битный АЦП, который преобразует аналоговый сигнал от усилителя в цифровую форму. Все необходимые цифровые преобразования и вычисления для получения исходного значения температуры происходят внутри датчика.

4. Цифровой интерфейс: MAX31855 поддерживает коммуникацию с внешними устройствами через SPI или 3-х проводной шиной.

5. Микроконтроллер/микропроцессор: Для использования MAX31855 необходим микроконтроллер или микропроцессор, который может обрабатывать полученные цифровые данные и выполнять дополнительные вычисления или действия на основе измеренной температуры.

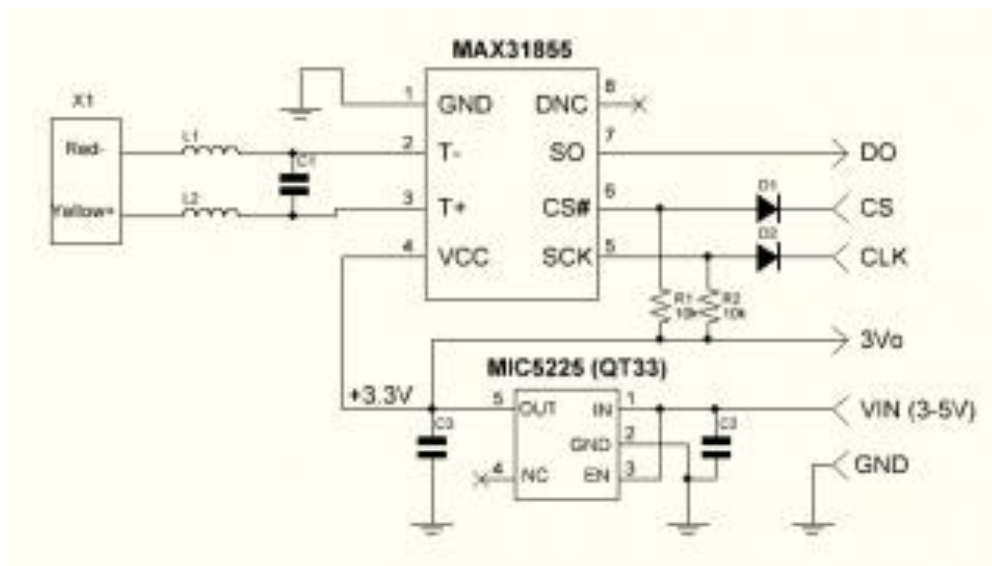


Рисунок 17 – Принципиальная схема MAX31855

Модуль MAX31855 подключаем к микроконтроллеру по шине SPI, для этого контакт CLK на модуле подключаем к контакту SCK (52) на Arduino Mega. Контакт DO на модуле подключаем к контакту MISO (50), а контакт CS на модуле подключаем к контакту S S (53) на Arduino Mega. Землю и питание соединяем с «GND» и «5 V» Arduino. Схема подключения MAX31855 приведена на рисунке 18.

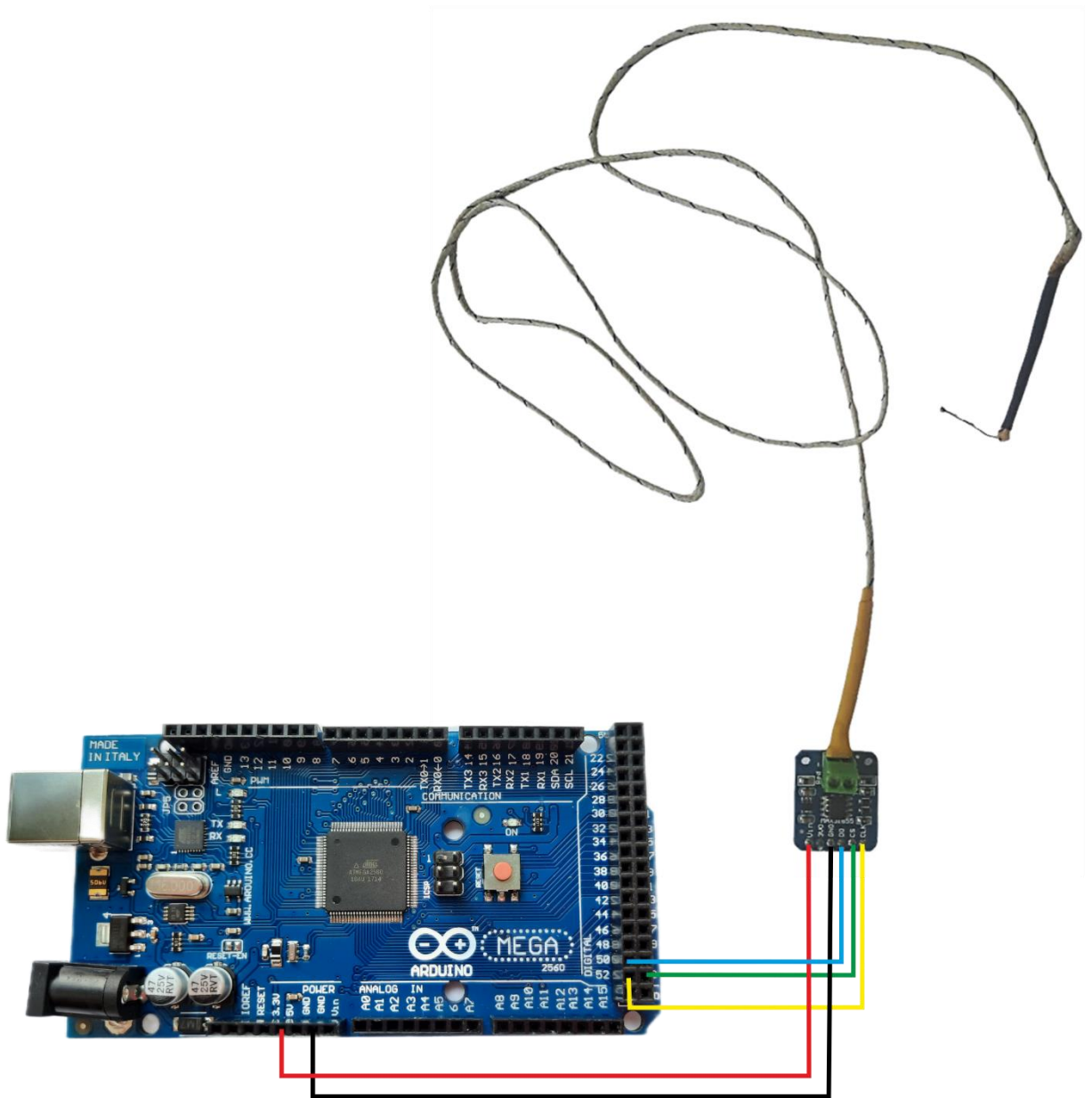


Рисунок 18 – Схема подключения модуля MAX31855 с термопарой к Arduino Mega

Программа для подключения модуля MAX31855 с термопарой к Arduino Mega приведен ниже:

```

1  #include <SPI.h>
2  #include "Adafruit_MAX31855.h"
3  // пины соединенные с АЦП MAX
4  #define DO 50
5  #define CS 53
6  #define CLK 52
7
8  // Инициализируем термодатчик
9  Adafruit_MAX31855 TD(CLK,CS,DO);
10 void setup() {
11   Serial.begin(9600);
12 }
13 void loop() {
14   Serial.print("Celsius = ");
15   Serial.println(TD.readCelsius());
16   Serial.print(";   Farentgeit = ");
17   Serial.println(TD.readFahrenheit());
18   delay(500);
19 }

```

Полупроводниковый датчик температуры DS18B20

DS18B20 — это цифровой температурный датчик на основе протокола однопроводной шины (One-Wire), внешний вид которого показан на рисунке 19. Он обеспечивает высокую точность измерения температуры и простоту в использовании.



Рисунок 19 – Датчик температуры DS18B20

Основные особенности и характеристики DS18B20 включают:

1. DS18B20 использует протокол однопроводной шины, который позволяет подключать несколько датчиков к одному входу микроконтроллера. Это упрощает процесс подключения и управления датчиком.

2. DS18B20 обеспечивает высокую точность измерения температуры с разрешением 0,0625 °C. Он может измерять температуру в диапазоне от -55 до +125 °C.

3. Датчик работает от напряжения питания в диапазоне от 3 В до 5,5 В.

4. В режиме измерения ток составляет около 1,5 мА, в режиме ожидания - менее 1 мкА.

4. Датчик DS18B20 имеет встроенную память и уникальный идентификатор, что упрощает процесс идентификации и работы с ним.

5. Датчик имеет программируемое разрешение измерений, которое может быть установлено в 9, 10, 11 или 12 бит. Чем выше разрешение, тем более точные измерения, но время преобразования выше.

5. DS18B20 потребляет очень мало энергии в режиме ожидания или сна, что делает его идеальным для областей, где потребление энергии критично.

6. Датчик может быть подключен напрямую к микроконтроллеру и его можно размещать на достаточно больших расстояниях (до нескольких метров) благодаря протоколу однопроводной шины.

Датчик температуры DS18B20 подключаем к микроконтроллеру по шине One-Wire, для этого контакт OUT соединяем с цифровым контактом (2-й контакт) Arduino. Землю и питание соединяем с «GND» и «5V» Arduino. Схема подключения датчика температуры DS18B20 приведена на рисунке 20.

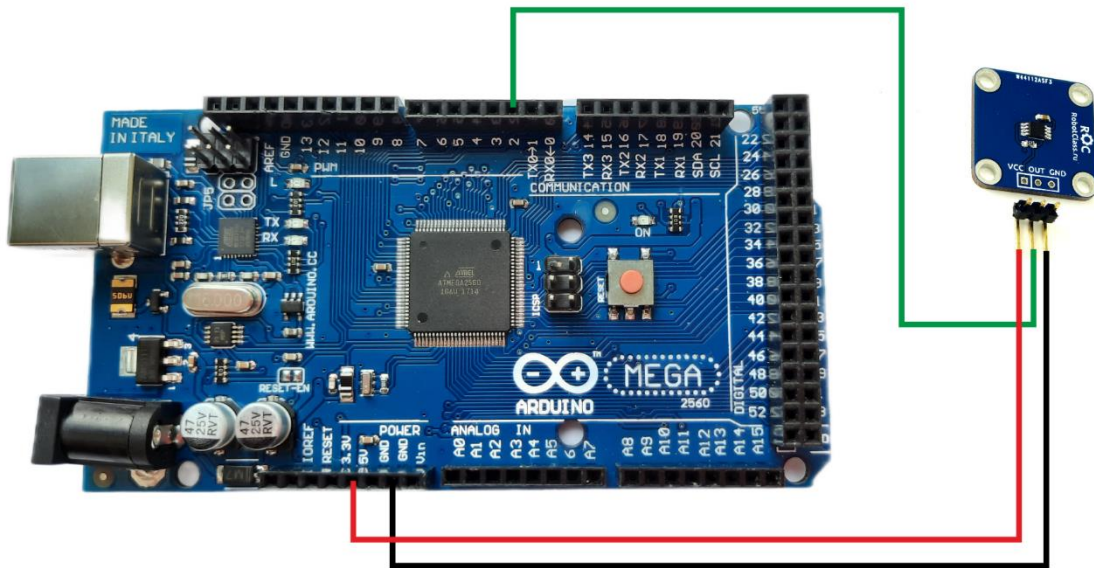


Рисунок 20 – Схема подключения датчика температуры DS18B20 к Arduino Mega

Программа для получения данных с датчика DS18B20:

```

1  #include <OneWire.h>
2  OneWire ds(2);
3
4  void setup() {
5  |   Serial.begin(9600);
6  | }
7
8  void loop() {
9  |   byte i;
10 |   byte data[12];
11 |   byte addr[8];
12 |   float celsius;
13
14 |   // поиск адреса датчика
15 |   if ( !ds.search(addr) ) {
16 |       |   ds.reset_search();
17 |       |   delay(250);
18 |       |   return;
19 |   }
20
21 |   ds.reset();
22 |   ds.select(addr);
23 |   ds.write(0x44, 1); // команда на измерение температуры
24
25 |   delay(1000);
26

```

```

27     ds.reset();
28     ds.select(addr);
29     ds.write(0xBE); // команда на начало чтения измеренной температуры
30
31     // считываем показания температуры из внутренней памяти датчика
32     for ( i = 0; i < 9; i++) {
33         data[i] = ds.read();
34     }
35
36     int16_t raw = (data[1] << 8) | data[0];
37     // датчик может быть настроен на разную точность, выясняем её
38     byte cfg = (data[4] & 0x60);
39     if (cfg == 0x00) raw = raw & ~7; // точность 9-разрядов, 93,75 мс
40     else if (cfg == 0x20) raw = raw & ~3; // точность 10-разрядов, 187,5 мс
41     else if (cfg == 0x40) raw = raw & ~1; // точность 11-разрядов, 375 мс
42
43     // преобразование показаний датчика в градусы Цельсия
44     celsius = (float)raw / 16.0;
45     Serial.print("t=");
46     Serial.println(celsius);
47 }

```

2. Резистивный датчик температуры RT100

RT100 — это тип платинового сопротивления с температурной зависимостью, который широко используется в промышленности для измерения температуры (рисунок 21).



Рисунок 21 – Резистивный датчик температуры RT100

Основных технических характеристик RT100:

1. RT100 имеет диапазон измерений от -200°C до $+600^{\circ}\text{C}$.
2. RT100 может иметь различные классы точности, которые определяют его способность обеспечивать точные измерения. Наиболее распространенные классы точности для RT100 включают классы А, В и С. Класс А обычно

обеспечивает точность $\pm (0.15^{\circ}\text{C} + 0.002 |t|)$, где t - измеряемая температура. Класс В имеет точность $\pm (0.3^{\circ}\text{C} + 0.005 |t|)$, а класс С - $\pm (0.6^{\circ}\text{C} + 0.01 |t|)$. Точность может варьироваться в зависимости от спецификаций конкретной РТ100.

3. РТ100 имеет сопротивление 100 Ом при 0°C . Сопротивление РТ100 меняется с изменением температуры в соответствии с характеристикой платинового сопротивления.

4. РТ100 имеет положительный температурный коэффициент, что означает, что его сопротивление увеличивается с увеличением температуры.

Схема подключения датчика температуры РТ100 представляет собой простейший резистивный делитель на двух резисторах одинакового номинала (рисунок 22). R_1 — это термистор номиналом 10 кОм подключенный к «GND», R_2 — обычный резистор с номиналом 10 кОм подключенный к «5V». Со средней точки включения R_1 и R_2 снимаются показания на аналоговый вход А0 Arduino. Так как сопротивление термистора достаточно высокое (около 10 кОм), сопротивление проводников практически не повлияет на результаты измерений.

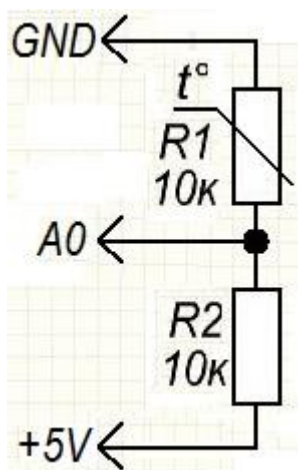


Рисунок 22 – Резистивный делитель для подключения датчика температуры РТ100 к Arduino

Схема подключения датчика температуры DS18B20 приведена на рисунке 23.

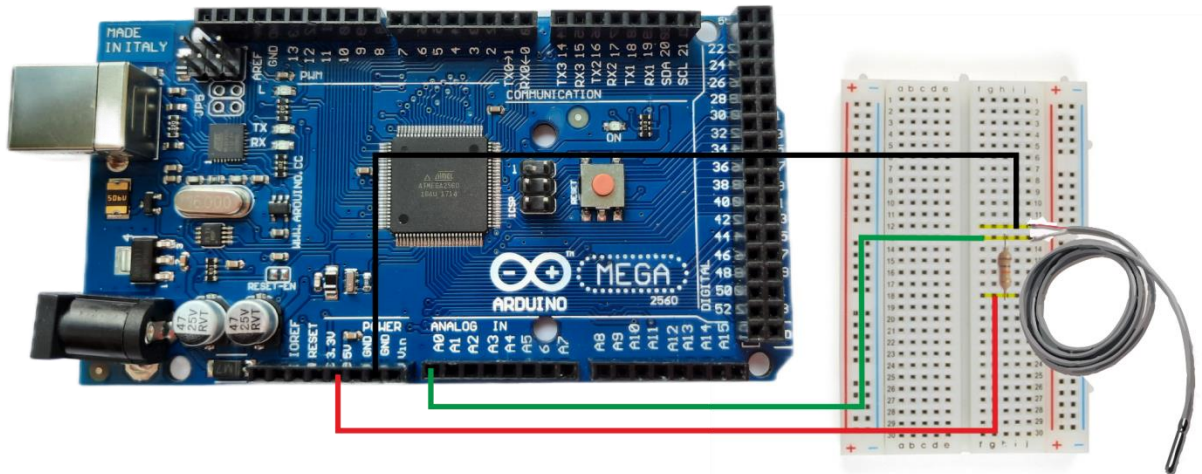


Рисунок 23 – Схема подключения датчика температуры PT100 к Arduino Mega

Методика считывания аналогового напряжения

Для определения температуры, необходимо измерить сопротивление. Так как в Arduino нет встроенного измерителя сопротивления, но есть возможность считывать напряжение с помощью аналогово-цифрового конвертера. Для этого в схеме есть резистор $R_2=10$ кОм.

Напряжение U_0 на выводе A0, которое мы будем передавать Arduino, будет равно:

$$U_0 = R_t / (R_t + R_2) \cdot U_{cc}, \quad (11)$$

где U_{cc} - напряжение источника питания (3,3 В или 5 В),

R_t — сопротивление термистора.

При измерении напряжения (U_i) с использованием АЦП на Arduino, мы получим числовое значение:

$$D_u = U_i \cdot 1023 / U_{cc}, \quad (12)$$

подставив формулу (11) в (12) получим :

$$D_u = R_t / (R_t + R_2) \cdot U_{cc} \cdot 1023 / U_{cc}, \quad (13)$$

сократив U_{cc} получаем:

$$D_u = R_t / (R_t + R_2) \cdot 1023. \quad (14)$$

Данная формула показывает, что полученное значение не зависит от напряжения питания.

Из формулы (14) выразим R_t :

$$R_t = R_2 / (1023/D_u - 1). \quad (15)$$

Программа для получения данных с резистивного датчика температуры PT100:

```
1 // значение «другого» резистора
2 #define SERIESRESISTOR 10000
3
4 // к контакту A0 подключается термистор
5 #define THERMISTORPIN A0
6
7 void setup(void) {
8   Serial.begin(9600);
9 }
10
11 void loop(void) {
12   float reading;
13   reading = analogRead(THERMISTORPIN);
14   Serial.print("Analog reading ");
15   Serial.println(reading);
16
17 // преобразуем полученные значения в сопротивление
18   reading = (1023 / reading) - 1;
19   reading = SERIESRESISTOR / reading;
20   Serial.print("Thermistor resistance ");
21   Serial.println(reading);
22   delay(1000);
23 }
```

После подключения полупроводникового, термоэлектрического и резистивного датчиков температуры, их необходимо запрограммировать, для этого выполните следующие действия:

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

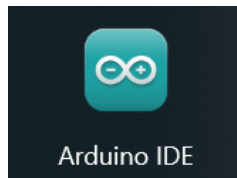


Рисунок 24 – Пиктограмма программы Arduino IDE

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

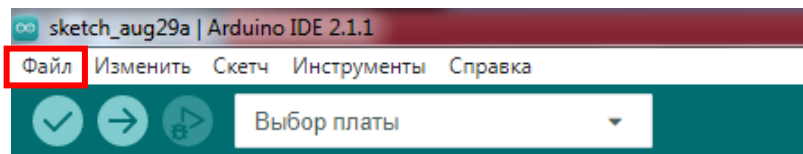


Рисунок 25 – Вкладка «Файл» программы Arduino IDE

4. Откроется окно с основной структурой вашей программы.

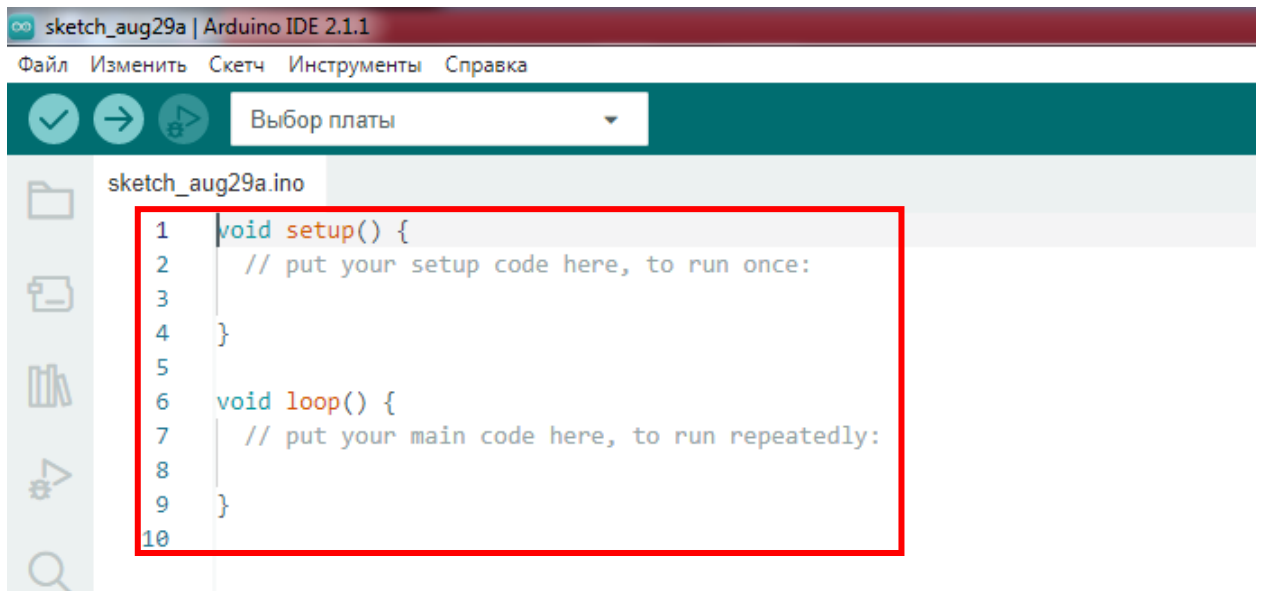


Рисунок 26 – Окно редактора Arduino IDE

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.

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

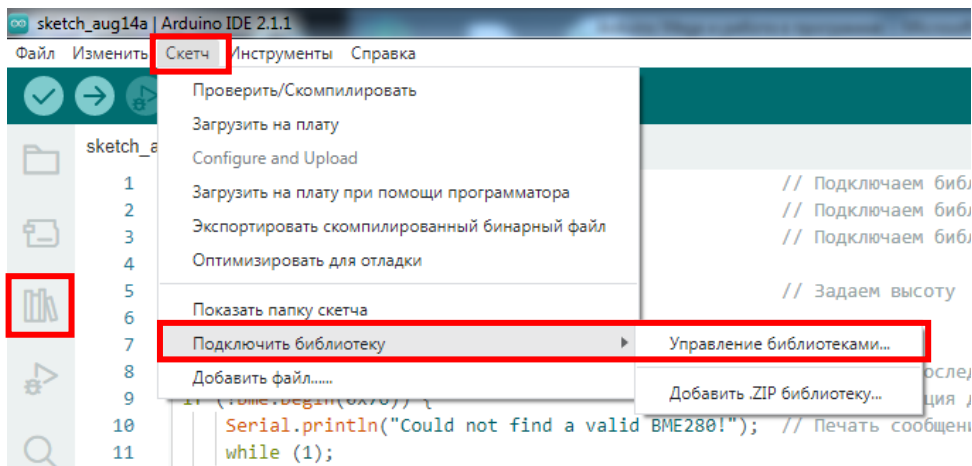


Рисунок 27 – Вкладка «Скетч» для выбора встроенных библиотек Arduino

В открывшемся меню найдите библиотеку и нажмите «Установка»

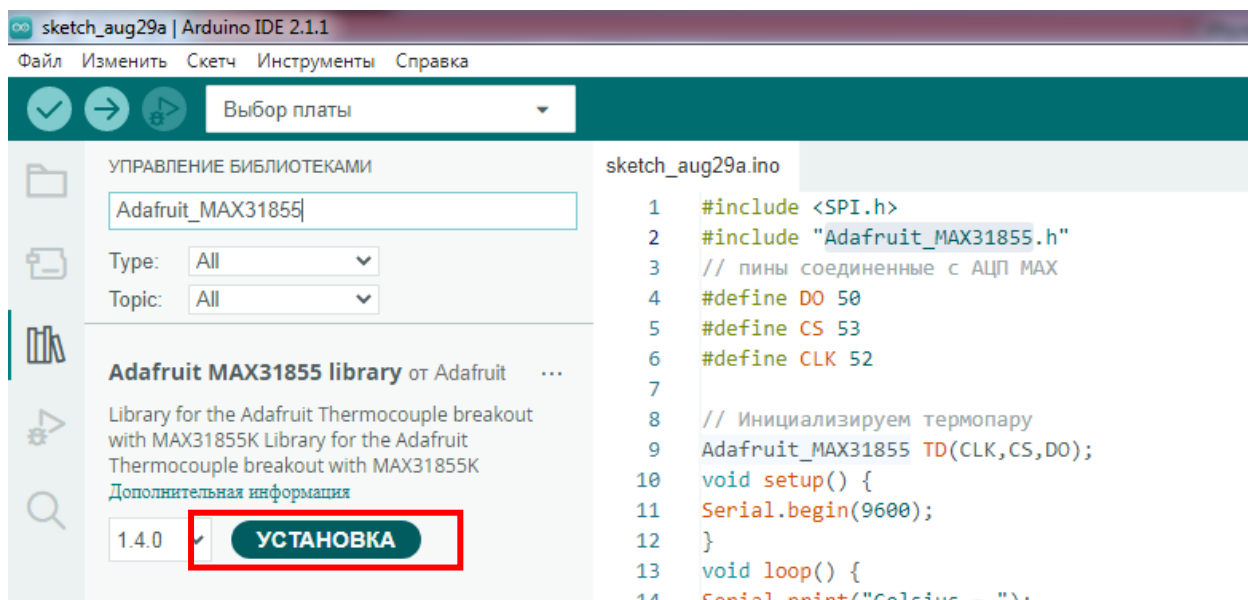


Рисунок 28 – Вкладка «Скетч» для выбора встроенных библиотек Arduino

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

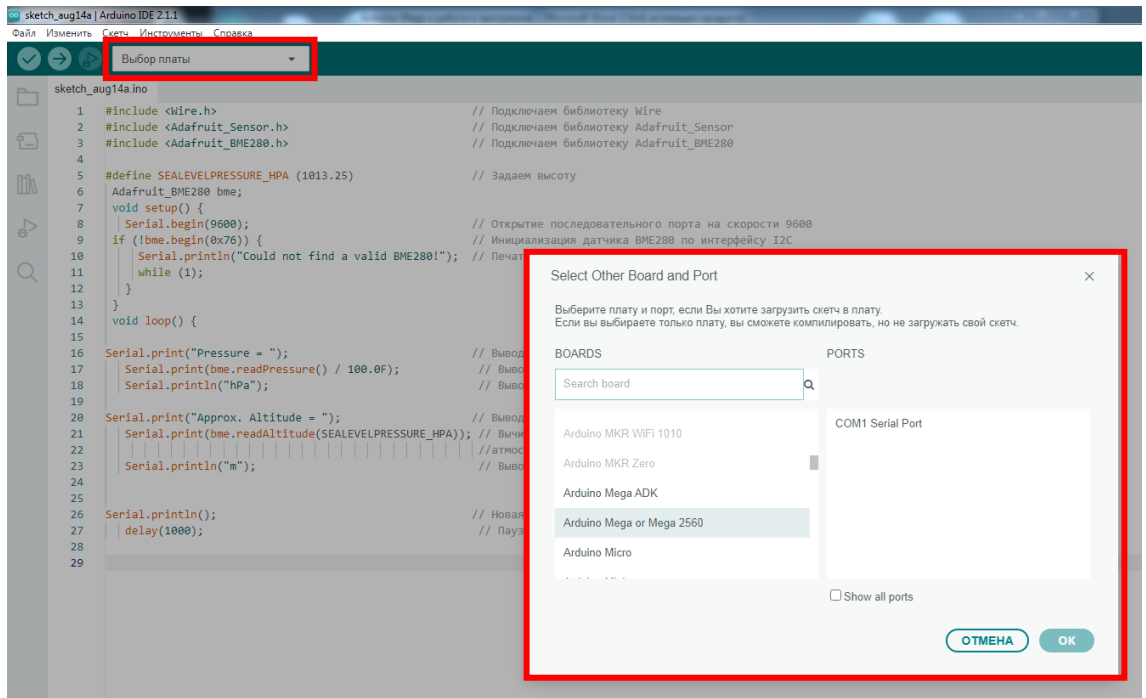


Рисунок 29 – Окно для выбора платы и порта

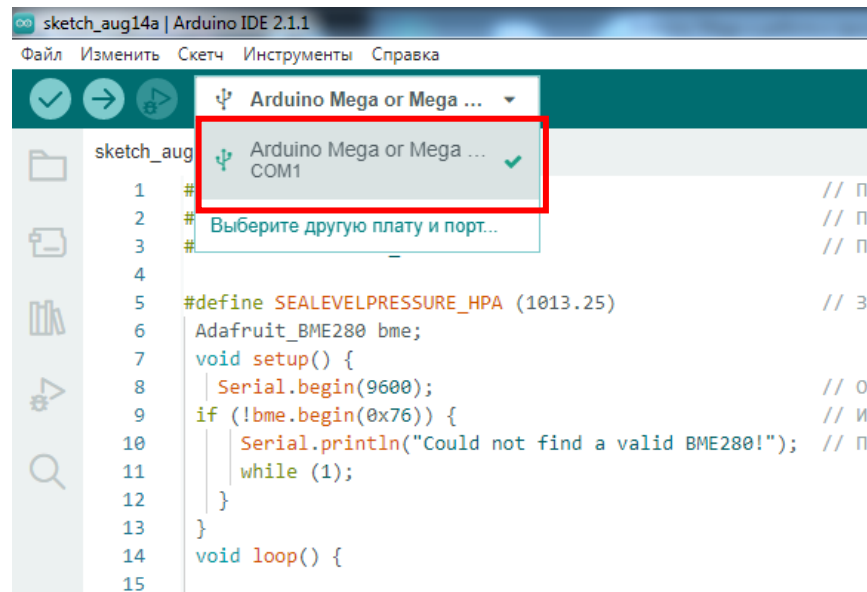


Рисунок 30 – Отображение выбранной платы и порта на верхней панели Arduino IDE

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

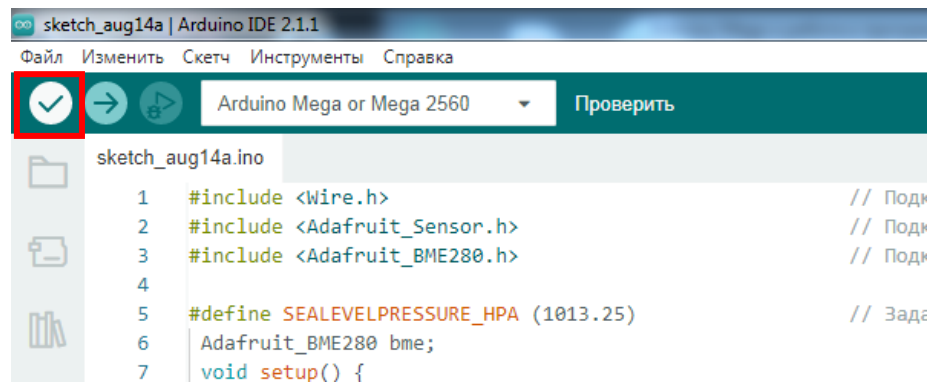


Рисунок 31 – Кнопка «Проверить» программы Arduino IDE

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

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

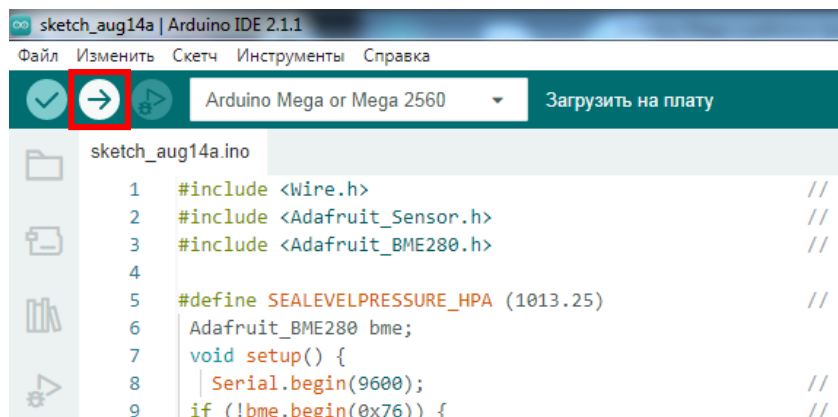


Рисунок 32 – Кнопка «Загрузить» программы Arduino IDE

Плата будет перезагружена и начнет выполнять Вашу программу.

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

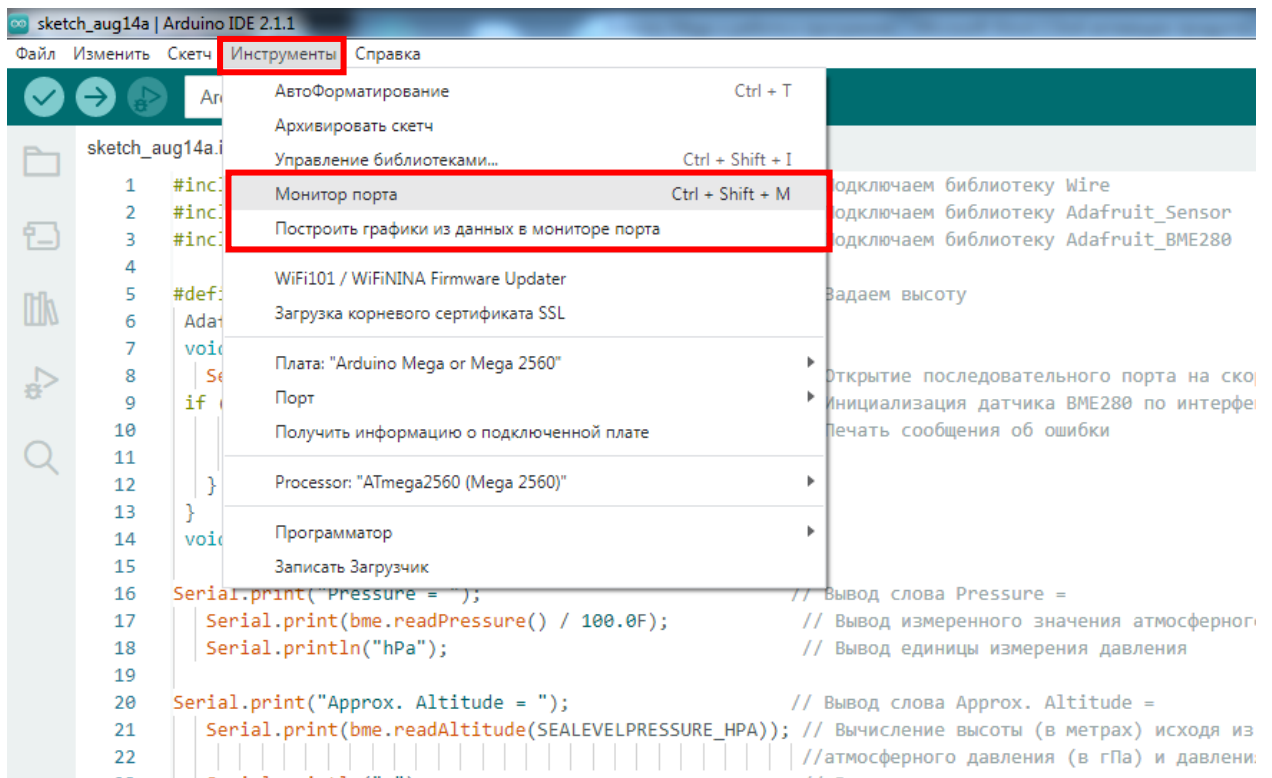


Рисунок 33 – Вкладка «Инструменты» для выбора просмотра полученных данных

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

Задание

1. Подключить Arduino к персональному компьютеру.
2. Написать код для вывода температуры.
3. Открыть монитор порта программы Arduino IDE.
4. Снять характеристику термопары хромель-алюмель, кромель-копель от 20 до 400 .
5. Снять характеристику полупроводникового датчика температуры в диапазоне от 20 до 100
6. Снять характеристику резистивного датчика температуры в диапазоне от 20 до 400
7. Повторить п.4,5,6 3 раза.
8. Провести статистическую обработку полученных результатов.

9. Вычислить погрешность измерений.
10. Построить график зависимости выходной величины от температуры для п. 4,5,6.
11. Для пунктов 4,5,6 установить температуру 90 и записать показания. Затем последовательно увеличивая температуру на 1 градус, определить значение температуры, при которой произошло изменение выходного сигнала датчиков.
12. По полученным данным рассчитать разрешающую способность.

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. Перечислите температурные шкалы.
2. Для чего была разработана Международная практическая температурная шкала?
3. Что такое реперные точки? Как они определялись в температурных шкалах?
4. Приведите формулы преобразования температуры из других температурных шкал в градусы Цельсия.
5. Где применяются датчики температуры?
6. Перечислите наиболее распространенные типы датчиков температуры.
7. На каком эффекте основан принцип работы термопары?
8. Для чего в робототехнике необходимо измерять и контролировать температуру?

9. Какие критерии необходимо учитывать при выборе датчика температуры?

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 (16) выборочное среднее значение \bar{x} как наилучшую оценку $x_{\text{наил}}$ истинного значения X :

$$x_{\text{наил}} = \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N}{N} \quad (16)$$

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 (17):

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

где \bar{x} - выборочное среднее значение.

4) Рассчитав стандартное отклонение σ_x по формуле (17) можно вычислить стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ с помощью выражения (18):

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad (18)$$

5) Используя рассчитанное стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{x}}$ из выражения (18) рассчитывается абсолютная погрешность (если $\alpha = 95\%$ то коэффициент Стьюдента равно 1,97 при 120 измерений) по формуле (19):

$$\Delta x = t_{\alpha} \cdot \sigma_{\bar{x}} \quad (19)$$

где t_{α} - коэффициент Стьюдента.

6) Зная абсолютную погрешность из выражения (19) рассчитывается относительная погрешность с помощью выражения (20):

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}} \% \quad (20)$$

Определение разрешающей способности датчика температуры

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

Разрешающая способность датчика температуры определяется по формуле 21:

$$T_a = \frac{T_{max}}{(2^n - 1)}, \quad (21)$$

где T_a - разрешающая способность датчика, T_{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 температуры

Чувствительность датчика температуры - это отношение изменения выходного сигнала датчика к изменению температуры.

Чувствительность датчика температуры определяется по формуле 22:

$$S = \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1}, \quad (22)$$

где S - чувствительность датчика, V_2 и V_1 - выходные значения датчика при двух различных температурах T_2 и T_1 соответственно.

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