

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра
**СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ ТА ТЕМПЕРАТУРИ
В МІКРОЕЛЕКТРОНІЦІ**

Магістрант гр. ЕП.мдн – 81к

О.О. Улізько

Науковий керівник,
канд. фіз.-мат. наук, доцент

Н.М. Опанасюк

Завідувач кафедри ЕЗПФ
д-р фіз.-мат. наук, професор

І. Ю. Проценко

Суми - 2019

РЕФЕРАТ

Метою роботи є порівняльний аналіз датчиків тиску та температури різних типів, а також розробка автоматизованого програмного комплексу для вимірювання температури.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи магістра є конструктивно технологічні характеристики та принцип роботи датчиків тиску та температури різних типів .

У першому розділі роботи розглядаються питання щодо конструктивно-технологічних особливостей та фізичних принцип роботи датчиків температури та приведена їх класифікація.

У другому розділі роботи розглянуті різновиди датчиків тиску та показано, що для вимірювання тиску використовуються сенсори ємнісного, п'єзорезистивного (тензометричного), магнітопружного, індуктивного, п'єзоелектричного, піроелектричного та акустоелектронних типів.

Третій розділ присвячено розробці автоматизованого програмного комплексу для вимірювання температури з використанням мікроконтролера Arduino та цифрового термодатчика DS18B20.

Робота викладена на 36 сторінках, у тому числі включає 13 рисунків, 2 таблиці, список цитованої літератури із 17 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ; ТЕРМОПАРА; ДАЧИК ТИСКУ; ЦИФРОВИЙ ТЕРМОДАЧИК; ПІРОМЕТР

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЇ ...	6
1.1. Датчики температури.....	6
1.2. Термоелектричні датчики (термопара).....	7
1.3. Терморезистивні датчики.....	8
1.4. Напівпровідникові датчики	13
1.5. Пірометри	16
РОЗДІЛ 2. ДАЧКИ ТИСКУ. РІЗНОВИДИ ДАТЧИКІВ ТИСКУ	19
2.1. Класифікація і характеристики датчиків тиску.....	19
2.2. П'єзоелектричні дачки тиску	22
2.3. П'єзоелектричний резонансний товстоплівковий сенсор тиску.....	24
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	27
3.1 Мікроконтролер Arduino.....	27
3.2 Цифрової термодатчик DS18B20.....	28
3.3 Підключення DS18B20 до Arduino.Програмований код.....	31
ВИСНОВКИ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

ВСТУП

Стрімкий розвиток в мікроелектроніці та обчислювальної техніки дозволив здійснювати широку автоматизацію різних процесів у виробництві, сфері наукових досліджень і у повсякденному житті. Застосування датчиків не обмежується лише автоматизованими системами, оскільки вони можуть виконувати також функції елементів вимірювальних систем[1].

Щоб запобігти катастрофам, викликані руйнуванням конструкції через високі температур, необхідні датчики, здатні вимірювати високі температури в суворих умовах, наприклад, для високотемпературного контролю термостійких плиток космічного човна, високотемпературних випробувань обертових підшипників в авіаційний двигун, а також кваліфікаційні випробування дискових гальм, динаміка реактивного двигуна і високошвидкісні обертання валуна 4 контролю й регулювання температури в різних процесах широко використовуються найрізноманітніші датчики температури. Для забезпечення якості харчових продуктів необхідно контролювати температурні цикли обробки.

Особливо важлива роль електричних вимірювань неелектричних величин, які завдяки ряду переваг над неелектричними вимірюваннями стали основними. А перевага електричних вимірювань полягає в універсальності, тобто, в можливості вимірювань не тільки електричних величин, але й неелектричних, попередньо перетворених на електричні; дистанційності, можливості вимірювань швидкозмінних величин, можливості забезпечення високої чутливості та потрібної точності, можливості комп'ютеризації вимірювань, тому актуальним залишається питання вимірювання тиску та температури в електроніці.

Мета роботи полягає в проведенні порівняльного аналізу датчиків тиску, температури в мікроелектроніці та розробці програмного комплексу для вимірювання температури.

РОЗДІЛ 1. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЇ

1.1. Датчики температури

Температура - це статистично сформована термодинамічна величина, що визначається рівнем внутрішньої енергії тіла [3]. Носіями внутрішньої енергії є атоми та молекули тіла, кінетична енергія руху яких визначає температуру. В процесі співудару молекул відбувається обмін їх імпульсів і вирівнювання розподілу енергій між ними, тобто встановлюється рівноважний стан, при якому всі форми кінетичної енергії молекул і атомів тіла характеризуються одним значенням температури. Таку рівноважну температуру називають термодинамічною

Практично в будь якій сучасній апаратурі є датчики температури. Це пристрій, який дозволяє виміряти температуру об'єкта або речовини, використовуючи при цьому різні властивості і характеристики вимірюваних тіл або середовища. Не дивлячись на те, що всі термодатчики покликані вимірювати температуру, різні типи датчиків роблять це абсолютно по-різному. Розберемо принцип роботи і характеристики основних видів термодатчиків.

Датчики температури - датчики для фіксації (вимірювання) температури. Використовуються для контролю теплових режимів роботи котлоагрегатів, сушильних установок, деяких вузлів тертя машин та в комп'ютерних системах[1].

Датчики розрізняються: термоелектричні (термопара), терморезистивні, напівпровідникові, пірометри.

Основою дії температурних датчиків в автоматизованому управлінні є зміна температури в електричний сигнал. Це обумовлює переваги електричних вимірювань: результати легко передавати по мережі, швидкість передачі може бути досить високою. Величини можуть перетворюватися одна в одну і назад. Цифровий код створює підвищену точність виміру, швидкість і чутливість.

1.2. Термоелектричні датчики (термопара)

Термопара - пристрій, що складається з двох провідників з різнорідних металів чи сплавів зі спаєним контактом на одному з кінців[2]. На рисунку 1.1 показані різні типи термопар, пропонує фірмою Omega Engineering [2]. На рисунку 1.2 а зображено термопару з відкритим (незахищеним) контактом, виступаючим за межі захисної оболонки. Така термопара з відкритим контактом використовується для виміру температур некорозійних газів (у статичному стані чи в потоці), коли потрібно забезпечити дуже малу постійну часу.

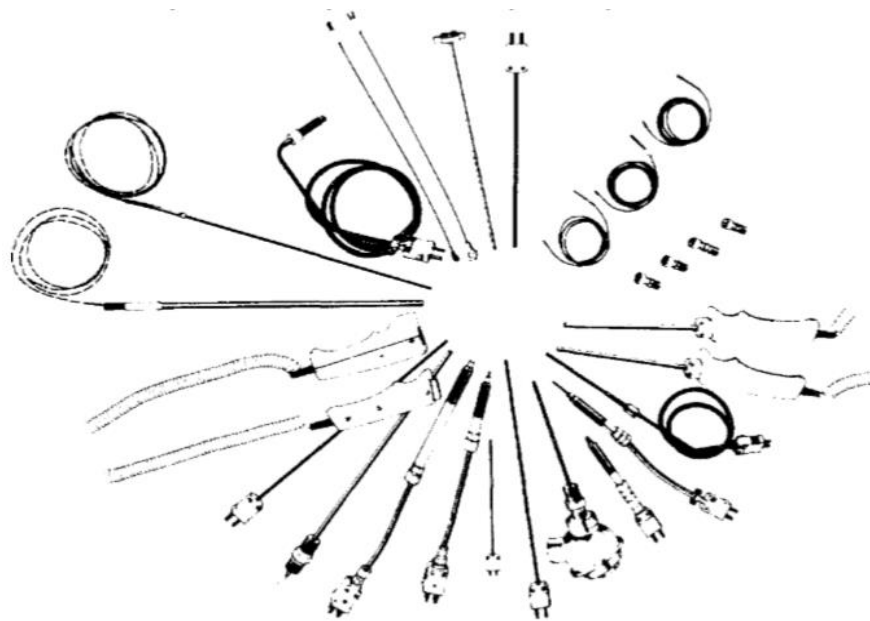


Рисунок 1.1 - Типи термопар, пропонує фірмою Omega Engineering USA. Із роботи [1]

На рисунку 1.2 б показана незаземлена термопара, ізолювана від захисної оболонки порошком з Mg. Така незаземлена термопара придатна для проведення вимірів у корозійному середовищі. І, нарешті, на рисунку 1.2 в показана термопара з заземленим контактом, призначена для виміру

температури корозійних газів і рідин (у статичному стані й у потоці), а також для тих випадків, де використовуються високі тиски.

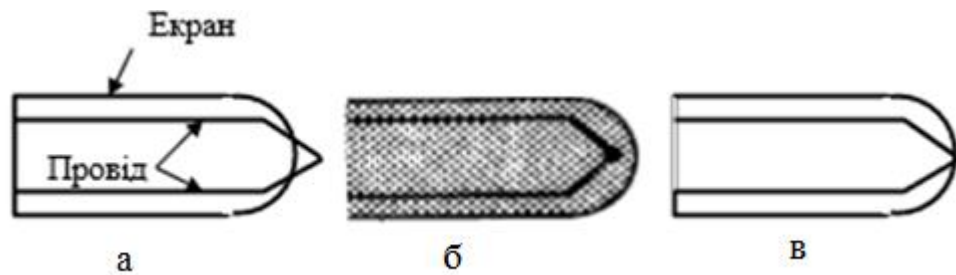


Рисунок 1.2 - Типи термопар: а) з відкритим контактом; б) з незаземленим контактом; в) із заземленим контактом. Адаптовано із роботи [1]

1.3. Терморезистивні датчики.

Терморезистори - це резистивні елементи, виготовлені з провідникового чи напівпровідникового матеріалу з великим додатним чи від'ємним температурним коефіцієнтом опору [2]. Дія терморезисторів базується на залежності їх опору від температури, яка описується формулою (1.1)

$$R_T = R_\infty e^{B/T} \quad (1.1)$$

де T - температура в K ; R_T - опір терморезистора при температурі T ; R_∞ - граничне значення опору R_T при $T \rightarrow \infty$; B - константа, залежна від матеріалу терморезистора.

На рисунку 1.3 зображені кілька прикладів зовнішнього виконання терморезистивних датчиків. Хамфрі Деві ще в 1821 році помітив, що електричний опір різних металів залежить від температури. Вільям Сіменс в 1871 році розробив перший платиновий резистивний термометр. А в 1887 році Хью Каллендар опублікував статтю, в тій він описав способи практичного застосування платинових термометрів. Перевагами терморезистивних датчиків є висока чутливість, простота створення інтерфейсних схем і довготривала

стабільність. Такі датчики можна розділити на дві підгрупи: РДТ (резистивні датчики температури) і термістори (терморезистори). Терморезистор виготовляються з матеріалів з високим температурним коефіцієнтом опору (ТКО), який зазвичай на порядки вище, ніж ТКО металів і металевих сплавів.

Опір для напівпровідників без домішок є негативним тому температура паде і оскільки температури стає все більше число електронів при підвищенні переходить в зону провідності, відповідно збільшується і концентрація дірок.



Рисунок 1.3 - Приклади зовнішнього виконання терморезистивних датчиків. Із роботи [2]

Температурна залежність металевих сплавів опору, газів, легованих напівпровідників і електролітів має більш складний характер.

Вимірювальні кола з терморезистивними перетворювачами температури. Найбільш розповсюджені вимірювання температури в діапазоні -260 до 1100 С для повсякденного використання є саме платинові терморезистивні перетворювачі температури (так звані термометри опору ТО). Вони мають високі точність і часову стабільність. Саме недоліком платинових ТО це нелінійність функції перетворення, яка особливо відчутна в низьких температурах а саме від -260 до 0°C і в цих діапазонах суттєво падає їх чутливість. Стабільність ТО впливає випаровування платини при високих температурах (понад 1000°C) - збільшується шунтуючий вплив провідності ізолюючих елементів перетворювача. Саме чинники і обмежують застосування

платинових ТО. Клас точності ТО з міді, нікелю та інших металів і сплавів мають значно меншу часову стабільність. Мідні ТО мають перевагу функцій лінійного перетворення. Діапазон перетворюваних температур мідних термометрів становить правда лише $-200.. +200$ °С. При вимірюванні низьких і середніх температур використовують ТО з високим номінальним опором (100 або 500 Ом), а при вимірюванні високих температур - низькоомні ТО з номінальним опором 10 та 1 Ом, виготовлені з порівняно товстого дроту, що забезпечує кращу часову стабільність і зменшення впливу шунтуючого ефекту. Точність вимірювання температури суттєво впливає під'єднання ТО у вимірювальне коло за допомогою з'єднувальних проводів з опором R_d . Різні схеми та способи підключення ТО дають змогу зменшити вплив. На вторинному приладі опір з'єднувальних проводів повинен бути підігнаний до значення, при якому градується В паспорті або на шкалі приладу вказується значення цих (градувальних) опорів. До приладів існують схеми підключення ТО дво-, три- та чотирипровідні. В одну з гілок вимірювання вмикаються кола при двопровідній схемі опорів ТО. Особливе важливе значення має підганяння опору з'єднувальних провідників. Підганяння не включає зміни опору лінії, що викликана зміною температури довкілля.

Мостове або компенсаційне коло вмикають термоперетворювачі з трьома і чотирма виводами. Для зменшення похибок, що з'явилися через невідповідність опору з'єднувальних провідників їх градуальному значенню

При вимірюванні температури із застосуванням терморезистивних перетворювачів, також потрібно враховувати можливість появи додаткових похибок, які виникають від нагрівання їх вимірювальним струмом.

Значення вимірювального струму повинно бути таким, щоб викликана ними зміна опору R_0 не перевищувала 0,1 % щоб похибки були нехтовно малими. [3].

Нікель хімічно стійкий матеріал навіть при високих температурах, але має складну залежність опору від температури і невисоку її відтворюваність [8]. Мідь широко застосовується у перетворювачах температури в діапазоні -

40...+180°C. Температурний коефіцієнт опору міді $\beta_R=1/234,7 \text{ K}^{-1}$, залежність електричного опору від температури - лінійна. До недоліків мідних перетворювачів температури належить висока окислюваність міді при нагріванні, тому терморезистори з міді застосовуються у вказаному порівняно вузькому діапазоні температур у середовищах з низькою вологістю і за відсутності агресивних газів [8].

Також для чутливих елементів термоперетворювачів температури використовуються вольфрам та інші чисті метали (таблиця 1.1) [3].

Мають обмежене застосування. такі тугоплавкі метали – як вольфрам, молібден, тантал і ніобій.- Робить чутливий елемент з цих матеріалів крихким і тому чутливим до механічних вібрацій Вплив рекристалізації і росту зерен в результаті дії температури [8].

Сплави, що мають вищий питомий електричний опір, ніж чисті метали, не знайшли застосування як матеріали чутливих елементів термоперетворювачів через порівняно низький ТКО, значення якого значною мірою залежить від кількісного та якісного складу домішок.

Конструкції чутливих елементів терморезистивних перетворювачів температури залежно від меж вимірюваних температур, умов експлуатації тощо, дуже різноманітні [3]. На рисунку 1.4 а наведена конструкція платиного терморезистивного перетворювача температури, що не має спеціальної захисної арматури. Чутливий елемент 1 виконаний із стрічкової платини, обвитої на трубчастий ізоляційний каркас 2 із спеціального скла.

Для захисту від механічних пошкоджень чутливий елемент покритий зовнішньою ізоляцією 3. Перетворювач призначений для вимірювань відносно невисоких температур, оскільки при високих температурах значно погіршуються ізоляційні властивості скла, а теплове розширення склоізоляції при її нагріванні приводить до небажаних механічних напружень в матеріалі чутливого елемента. [5].

На рисунку 1.4 б чутливий елемент платиного терморезистивного перетворювача температури має вигляд спіралі 1, розміщений в канавках дво-

або чотириканального керамічного каркасу 2, ущільненої порошкоподібним оксидом алюмінію 3. Оксид алюмінію є добрим електричним ізолятором, має велику теплостійкість і добру теплопровідність, а також інгібіторні властивості. Платинова спіраль до каркаса кріпиться за допомогою глазури на основі оксиду алюмінію та кремнію.

Таблиця 1.1 - Деякі фізичні властивості матеріалів терморезистивних перетворювачів (при 20° С). Із роботи [3]

Матеріал	$\text{TKO} \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Питомий опір, Ом·мм ² /м	Температура плавлення, °С
Платина	3,91	0,105	1773
Мідь	4,28	0,017	1083
Нікель	6,3...6,6	0,068	1455
Вольфрам	4,82	0,055	3410
Молібден	4,57	0,052	2630
Реній	3,11	0,211	3170
Родій	4,57	0,047	1960
Графіт	0,02	46,0	3870
Платинородій	1,21	0,160	1900

Ця конструкція чутливого елемента характеризується гарною герметичністю, малою забруднюваністю, забезпечує незначні механічні напруження в матеріалі чутливого елемента, і високу захищеність платинової спіралі, що дає змогу використовувати термоперетворювач без захисної арматури [5].

На рисунку 1.4 в чутливий елемент мідного перетворювача опору - безкаркасна обивка 1 з мідного ізолюваного дроту, зверху покрита фторопластиковою плівкою 3. Для забезпечення необхідної механічної міцності обивка поміщається в тонкостінну металеву гільзу 2, засипається керамічним порошком 4 і герметизується. [5].

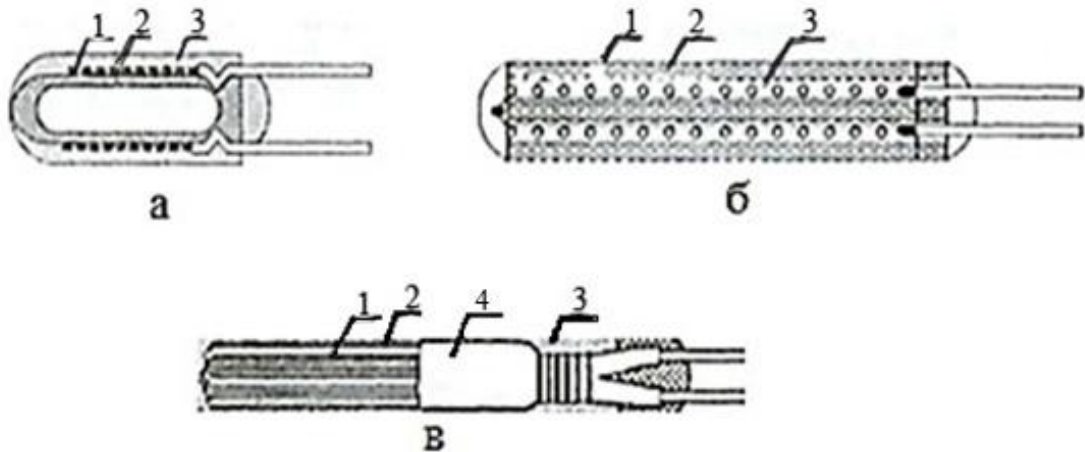


Рисунок 1.4 - Конструкції чутливих елементів терморезистивних перетворювачів: а - конструкція платинового терморезистивного перетворювача температури; б - чутливий елемент платинового терморезистивного перетворювача температури; в - чутливий елемент мідного перетворювача опору. Із роботи [5].

На рисунку 1.4 в чутливий елемент мідного перетворювача опору – безкаркасна обивка 1 з мідного ізолюваного дроту, зверху покрита фторопластиковою плівкою 3. Для забезпечення необхідної механічної міцності обивка поміщається в тонкостінну металеву гільзу 2, засипається керамічним порошком 4 і герметизується. [5].

1.4. Напівпровідникові датчики

Температури впливає на електрофізичні параметри напівпровідників в основному вони проявляються в зміні концентрації носіїв заряду, що приводить до відповідної зміни електричної провідності [4]. На цьому принципі працюють напівпровідникові терморезистори. В якості напівпровідникових датчиків температури також використовуються діоди і транзистори, дезміна

концентрації носіїв заряду призводить до зміни струму, протікає через напівпровідниковий прилад.

Діоди та *p-n*-переходи транзисторів знаходять широке застосування як і термоперетворювачі. Такі перетворювачі часто називають термодіодами, транзисторними термодіодами чи термотранзисторами.

Вольт-амперна характеристика діода описується виразом (1.2)

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1.2)$$

де I_0 - струм насичення; q - заряд електрона; U - зовнішня напруга; T - абсолютна температура; k - стала Больцмана.

Залежно від схеми вмикання діода, інформативним параметром температури може бути струм насичення I_0 (при зворотному вмиканні) або падіння напруги U (при прямому зміщенні).

При вмиканні діода в зворотному напрямку *p-n*-переходу струм через нього досягне насичення вже при напрузі кілька десятих вольта і в подальшому дорівнюватиме струму насичення I_0 незалежно від величини прикладеної до діода напруги. Струм насичення I_0 складається з потоку електронів з *p*-області в *n*-область і потоку дірок у протилежному напрямку. Його величина визначається концентрацією неосновних носіїв та їх швидкостями рекомбінації в обох областях. Для більшості діодів струм лежить у межах 10^{-12} - 10^{-2} А залежно від типу і конструкції діода.

Розглянемо діоди з відносно великими значеннями струму насичення, зокрема, германієві, чи інші діоди на вузькозонних напівпровідниках. При цьому обмежимося ділянкою вольт-амперної характеристики в межах значень зворотної напруги від 1 В до величини, допустимої для даного типу діода. На цій ділянці зворотна вольт-амперна характеристика є прямою, паралельною до осі напруг і відстає від неї на величину струму насичення. Але це стосується тільки ідеального діода. Реальна вольт-амперна характеристика діода,

ввімкненого в зворотному напрямку, утворює з віссю напруг деякий кут. Отже, кажучи про величину зворотного струму I_0 , необхідно вказувати величину падіння напруги на діоді, при якому відбувалося його вимірювання.

Як нелінійний резистор, діод, увімкнений у зворотному напрямку, можна характеризувати статичним R і диференційним r_d опором. Нехтуючи кривизною реальних вольт-амперних характеристик діода на робочій ділянці, будемо вважати, що при $T_0 = const$ диференційний опір однаковий у всіх точках даної характеристики, тобто

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1.3)$$

Оскільки статичний опір залежить від величини прикладеної до діода напруги, будемо умовно розглядати величину статичного опору діода при падінні напруги на ньому в 1 В. Цей опір називають початковим статичним опором R (як величину, що відповідає робочій ділянці зворотної вольт-амперної характеристики). Чисельно початковий статичний опір є величиною, оберненою до струму насичення: $R \sim 1/I_0$.

Таким чином, реальна вольт-амперна характеристика діода, ввімкненого в зворотному напрямку, при визначеній температурі середовища може бути задана двома параметрами: початковим статичним опором R або струмом насичення I_0 і диференційним опором r_d .



Рисунок 1.5 - Датчик температури LM75A. Із роботи [4]

Як приклад зображено на рисунку 1.5 напівпровідниковий датчик температури LM75A, що випускається фірмою NXP Semiconductors. Діапазон вимірювань цього датчика від -55 до +150°.

1.5. Пірометри

Пірометр - прилад для безконтактного вимірювання температури непрозорих тіл за їхнім випроміненням в оптичному діапазоні спектра. Принцип дії полягає у вимірюванні значення амплітуди електромагнітного випромінювання тіла. Тепловий промінь, попадає на поверхню вимірювання, відбивається та попадає на первинний перетворювач, на виході котрого формується електричний сигнал прямопропорційний температурі [5].

Основу структури пірометра становить детектор інфрачервоного випромінювання. Дані перетворюються за допомогою вбудованої електронної системи і відображаються на дисплеї. Типовий пірометр за формою нагадує пістолет з невеликим дисплеєм. Компактна панель управління, наведення лазером і висока точність при близькому взаємодії з об'єктом пояснюють затребуваність інструменту серед працівників інженерних і технічних сфер. Основними робочими елементами пірометра вважають лінзу, приймач, а також дисплей, на який виводиться результат вимірювання. Принцип дії пірометра наступний: від досліджуваного об'єкта виходить інфрачервоне випромінювання і за допомогою лінзи воно фокусується і відправляється в приймач (термобатарей, напівпровідник, термопара). Якщо використовується термопара, в момент нагрівання приймача змінюється напруга. Опір - в разі використання напівпровідників[15]. Ці зміни перетворюються в показання температури. Для того, щоб провести відбір проб, потрібно просто навести пірометр на об'єкт, привести його в дію і відзначити отриманий результат. Використовуючи спеціальну кнопку, ви можете регулювати формат вимірювання температури - за шкалою Цельсія або Фаренгейта.

ІЧ-фотоприймачі можна поділити на два класи: теплові та фотонні. В теплових приймачах ІЧ випромінювання, яке поглинається, викликає нагрівання чутливого елемента, що в свою чергу викликає зміну певних характеристик детектора. В фотонних приймачах поглинуте ІЧ випромінювання призводить до переходів між енергетичними станами кристалу. Теплові приймачі характеризуються рівномірною чутливістю у досить широкому діапазоні ІЧ-спектру, однак мають невелику чутливість та швидкодію. Для фотонних приймачів характерним є селективність по спектру, однак високий рівень чутливості в цьому діапазоні та швидкодія [5].



Рис 1.6 - Пірометр. Із роботи [5]

Принцип дії ІЧ-фотоприймачів базується на основі основних законів поглинання та випромінювання твердих тіл, сформульованих для так званого абсолютно чорного тіла. Абсолютно чорне тіло (АЧТ) – це тіло, що поглинає все падаюче на нього електромагнітне випромінювання. Оптична роздільна здатність, або показник візування - це співвідношення діаметра світлової плями та відстані до вимірювального об'єкту.

Діапазон вимірювання температури залежить від довжини хвилі. Пірометри, які вимірюють високі температури працюють на коротких хвилях.

Це пояснюється тим, що з ростом температури спектр випромінювання зміщується в бік коротких частот.

Найпоширеними оптичними пірометрами є прилади, в яких інтенсивність випромінювання тіла порівнюється з яскравістю нитки пірометричної лампи-еталона.

РОЗДІЛ 2. ДАЧИКИ ТИСКУ. РІЗНОВИДИ ДАЧИКІВ ТИСКУ

2.1. Класифікація і характеристики датчиків тиску

Тиск обов'язковим параметром систем контролю як керування оператором так автоматизованих процесів. Вимірювання тиску обов'язкова умова для робототехніки в якості приводу або побічно як заміник прямого контакту.

Всі ці пристрої вимагають створення приладового обладнання, в якості основа - датчик тиску: (тиск ситемного повітря, газу, пару, масла, та інше).

Широкий спектр потреб привів до великої різномпнітності застосування таких дачиків. Ця різноманітність пов'язана з тим, що поняття «тиск» охоплює велику область значень, починаючи від глибокого вакууму і до над високих тисків. Тиск можна висловлювати в абсолютних або в відносних величинах, різницю двох довільних велич. Також вимірювання тиску може становитися до різних середовищ і рідин, або хімічні чи фізичні.

Тиск - фізична величина, що чисельно дорівнює силі F , що діє на одиницю площі поверхні S перпендикулярно цієї поверхні. В даній точці тиск визначається як відношення нормальної складової сили, що діє на малий елемент поверхні, до його площі. Тиск - фізична величина, що чисельно дорівнює силі F , що діє на одиницю площі поверхні S перпендикулярно цієї поверхні. В даній точці тиск визначається як відношення нормальної складової сили, що діє на малий елемент поверхні, до його площі:

$$p = \frac{dF_n}{dS} \quad (2.1)$$

Середній тиск по всій поверхні є ставлення нормальної складової сили, що діє на дану поверхню, до її площі:

$$p_{\text{ср}} = \frac{F_n}{S} \quad (2.2)$$

Тиск характеризує стан суцільного середовища і є діагональною компонентою тензора напружень. У найпростішому випадку ізотропної рівноважної нерухомою середовища не залежить від орієнтації. До сенсорів механічних величин можна віднести сенсори сили, тиску, прискорення (акселерометри), переміщення тощо[4].

Для вимірювання механічних величин використовуються сенсори ємнісного, п'єзорезистивного(тензометричного), магнітопружного, індуктивного, п'єзоелектричного, піроелектричного та акустоелектронних типів.

За конструктивними-технологічними ознаками мікроелектронні сенсори механічних величин поділяються на напівпровідникові, тонкоплівкові та товстоплівкові, за типом конструкції - на об'ємні та плоскі.

Принцип дії ємнісних сенсорів ґрунтується на зміні ємності чутливого елемента (ЧЕ) - діафрагми внаслідок дії сили, тиску або прискорення. Такі сенсори характеризуються високою точністю, надійністю та простотою виготовлення[4].

У більшості випадків ємнісні сенсори включаються в мостову схему. На виході сенсора у вигляді сигналу електричної напруги виходить перетворена за допомогою підсилювача і модулятора несучої частоти величина неузгодженості моста, викликана зміною реактивного опору ємності сенсора. Цей спосіб обробки сигналів вимагає дорогої електроніки та елементів узгодження мостової схеми, ускладнюється можливість інтегрування. При великих значеннях несучої частоти можлива нестабільність ємнісної мостової схеми.

Іншим методом узгодження ємнісного сенсора з зовнішньою схемою є метод резонансної частоти. При цьому ємнісний сенсор входить до складу коливального контуру, а рівень вихідного сигналу визначається величиною резонансної частоти та періодом синусоїдальних коливань. Цей метод має перевагу перед методом несучої частоти, але має і недолік, пов'язаний з нелінійним співвідношенням резонансної частоти та ємності сенсора.

Забезпечити лінійність характеристик можна за допомогою диференційних конденсаторів.

Ємнісні сенсори статичних деформацій включають у себе схеми перемінного струму, вони живляться від джерела постійного струму. Джерела поляризації з великими напругами (більше 100 В) використовуються для досягнення високої чутливості в ємнісних сенсорах і вибираються відносно малі значення сумарної ємності. Великим їх недоліком є велика чутливість до струмів витокую. Тому найбільше застосування мають сенсори з електричною схемою претворенб на виході ємності в частоту.

Принцип дії тензометричних сенсорів оснований на використанні п'єзорезистивного ефекту. Тому на цьому ефекту розроблено цілий клас перспективних і сучасних сенсорів тиску для застосування в різних галузях адже вони відрізняються надійністю і простотою схем і конструкцій

Основним недоліки – високі вимоги до чистоти вхідних матеріалів складність технічної обробки залежність від температури і велика вартість. .

Магнітопружний сенсор тиску принцип роботи базується на використанні перемінної магнітної проникності і змінної залишкової намагніченості [4], їх будова має замкнуте магнітне коло та внаслідок дії тиску змінює свою магнітну проникність. Перевагою цих сенсорів - високий механічний опір, малий прогин мембрани під дією навантаженням та у поєднанні з низьким електричним опором [4].

Індуктивні сенсори зі змінним повітряним зазором мають низький вихідний електричний опір, але їхня механічна міцність на кілька порядків нижча, ніж у магнітопружних. Вимірювальним колом може служити будь-яка мостова схема, їх зручно використовувати в диференційній схемі вони біль громіздкі і мають обмежений діапазон частот та низьку [6]. Їхня перевага є висока надійність в сурових умовах зовнішніх впливів та великий термін зберігання .

В сенсорах п'єзоелектричного типу застосовують кварц, сегнетову сіль, дигідрофосфат амонію, сульфат літію, титанат барію тощо, а також

п'єзоелектричні композиційні матеріали, відомі як електрети: полівінілденфторид, полівінілхлорид тощо. Основними типами деформації, що використовуються в сенсорах - деформація по товщині і довжині та об'ємна деформація. П'єзоелектричні сенсори чутливі до зовнішніх впливів, тому їх ЧЕ повинні бути захищені від вібрації та ударів[4]. Сенсори на основі плівок полівінілденфториду та полівінілхлориду, незважаючи на незначний об'єм та малу товщину, не знайшли широкого застосування, оскільки крім високої віброчутливості їм значною мірою притаманний піроелектричний ефект. При цьому важко відрізнити вихідні сигнали сенсора від зміни амплітуди коливання чи тиску від періодичних змін індукованої температури газу (повітря).

Принцип роботи піроелектричного сенсора оснований на реєстрації періодичних змін температури газу, зумовлених адіабатичним характером процесу поширення тиску. Піроелектричний матеріал являє собою напівкристалічну орієнтовану плівку, яка в складі сенсора з чутливою площею 1-4 мм² забезпечує інтегральну чутливість не менше 120В/Вт на 1 мм² та ємність не менше 40 пФ на 1 м. Тонкоплівкові піроелектричні сенсоривиконуються на підкладці з поліамідної плівки, як ЧЕ використовується тетраамінодіфеніл. Основним методом при виготовленні таких сенсорів є метод термічного випаровування у вакуумі.

2.2 П'єзоелектричні датчики тиску

П'єзоелектричний датчик це прилад що перетворює механічні зусилля в електричний сигнал. Дія дачика заснована на використанні п'єзоелектричного ефекту. Один з варіантів конструкції п'єзоелектричного датчика тиску зображений на рисунку 2.1. Під дією тиску на зовнішній і внутрішній сторонах пари пластин дачика виникають електричні заряди, причому сумарна електрорушійна сила (між виводом і корпусом) змінюється пропорційно тиску. П'єзоелектричний датчик доцільно застосовувати при вимірі бистрозмінюючого тиску; якщо тиск міняється повільно, то зростає похибка перетворення із-за

«стікання» електричного заряду з пластин на корпус[12]. Включенням додаткового конденсатора паралельно п'єзоелектричного датчика, можна зменшити погрішність виміру, проте при цьому зменшується напруга на виводах датчика. Найчастіше в п'єзоелектричних приладах використовуються компаунди, які мають структуру мінералу перовскиту ($CaTiO_3$). В діелектричному (параелектричному) стані перовскити мають кубічну структуру, в фероелектричному стані ($T < T_c$, де T_c - температура Кюрі) - тетрагональну (подібно до $BaTiO_3$ і $PbTiO_3$) або ромбоєдричну (подібно до $PbZrO_3$ при температурах більше $220^\circ C$) структуру.

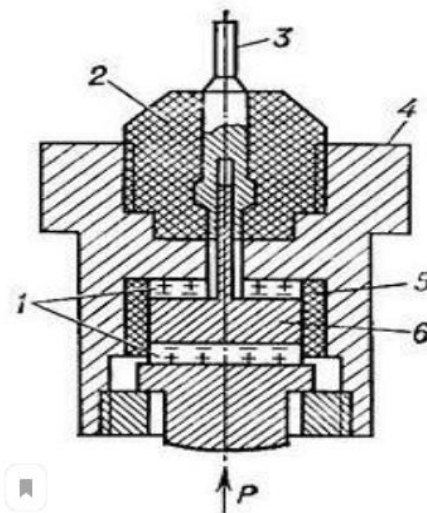


Рисунок 2.1 - П'єзоелектричний датчик: P - вимірюваний тиск; 1 - п'єзопластини; 2 - гайка з діелектрика; 3 - електричний вивід; 4 - корпус (служить другим виводом); 5 - ізолятор; 6 - металевий електрод. Адаптовано із роботи [11]

Довгий час найвідомішим компаундом перовскиту був уже згадуваний титанат барію ($BaTiO_3$), який ще й зараз широко використовують у конденсаторах. Однак, на сьогодні замість титанату барію в п'єзоелектричних приладах застосовуються *PZT*-композиції [3], тобто тверді розчини титанату свинцю і титанату цирконію, які характеризуються чудовими електромеханічними коефіцієнтами зв'язку, вищою температурою Кюрі, що

забезпечує функціонування приладів при вищих робочих температурах і дозволяє застосування вищих температур в технологічному процесі їх виготовлення. *PZT*-матеріали легко поляризуються, забезпечують широкий діапазон діелектричних сталей, легко синтезуються у вигляді різноманітних твердих розчинів з необхідними властивостями.

В таблиці. 2.1 наведені характеристики п'єзоелектричних товстоплівкових шарів (поляризаційне поле $2 \cdot 10^{-6}$ В/м при 150° С, 30 хв), на рисунку 2.3 - характеристики п'єзоелектричного прямого ефекту в товстоплівкових шарах на основі *PZT*-матеріалів.

Таблиця 2.1 - Характеристики п'єзоелектричних товстоплівкових шарів. Із роботи [11]

Стала п'єзоелектричного розряду, Кл/Н	580×10^{12}
Стала п'єзоелектричної напруги, Вм/Н	63×10^3
Відносна діелектрична проникність	1050
Електромеханічний коефіцієнт зв'язку	0,60
Модуль Юнга, ГПа	10-15
Товщина, мкм	60

2.3 П'єзоелектричний резонансний товстоплівковий сенсор тиску.

В акселерометрі підкладка з окису алюмінію не відіграє активної ролі, але вона забезпечує необхідну механічну цілісність п'єзоелектричних плівок і є добрим ізолюючим елементом для досягнення високого імпедансу.

Однак, підкладка з окису алюмінію у вигляді закріпленої круглої мембрани є основним елементом резонансного сенсора тиску, визначаючи своїми пружними і тепловими властивостями вихідну характеристику приладу.

Резонансний тонкоплівковий сенсор включає два типи структур п'єзоелектричних шарів: пару кільцеподібних елементів, призначених для

створення напруження в мембрані з окису алюмінію (і активації коливання мембрани) завдяки зворотному п'єзоелектричному ефекту; центральний конденсатор з *PZT*-матеріалу, призначений для детектування індукованих деформаційних коливань через прямий п'єзоелектричний ефект [9].

На рисунку 2.2 наведена функціональна схема резонансного сенсора тиску, що містить керований напругою генератор та фазовий компаратор. Вихід генератора створює початкове збудження (активізацію) сигналу $S_{2Г}$, для елементів збудження (активуючих шарів). Фазовий компаратор порівнює сигнали $S_{1Г}$ і $S_{2Г}$ (де $S_{1Г}$ - сигнал, що генерується центральним п'єзоелектричним шаром в результаті детектування деформації мембрани). Цей зсув фаз становить $\pi/2$ в резонансних умовах. Зміна резонансної частоти, викликана зміною тиску, впливає на співвідношення фаз, однак це в свою чергу компенсується методом синхронізації фаз. Синхронізація забезпечується з допомогою інтегральної схеми (наприклад, МЛ 565), яка формує прямокутний вихідний сигнал, сумісний з ТТЛ-логікою [3].

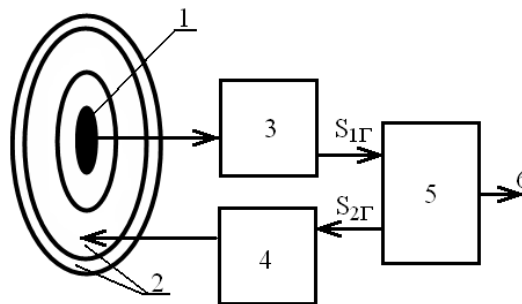


Рисунок 2.2 - Функціональна схема резонансного сенсора тиску:

1 – п'єзодетектор; 2 - елементи, які викликають коливання (п'єзоактюатори); 3 - вхідний підсилювач; 4 - керуючий підсилювач; 5- система фазової синхронізації; 6- частотний вихід. Із роботи [3]

Функція перетворення резонансного сенсора тиску з лінійною ділянкою в діапазоні від 0 до $6 \cdot 10^4$ Па, після якої спостерігається значне падіння чутливості. Коефіцієнт чутливості спадає від $2 \cdot 10^{-3}$ /Па (в інтервалі 20...70 кПа) до $9,3 \cdot 10^{-4}$ /Па (в інтервалі 80...120 кПа) [3]

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

3.1 Мікроконтролер Arduino

Arduino - платформа електроніки з відкритим кодом, заснована на простому у використанні апаратному та програмному забезпеченні. Дошки Arduino здатні читати входи - світло на датчик, палець на кнопку або повідомлення у Twitter - і перетворювати його на вихід - активація двигуна, включення світлодіода, публікація чогось в Інтернеті. Ви можете сказати вашій раді, що робити, надіславши набір мікроконтролерів на дощі. Для цього ви використовуєте мову програмування Arduino (заснована на проводці) та програмне забезпечення Arduino (IDE) на основі обробки[13].

Існує кілька версій платформ Arduino. Остання версія Leonardo базується на мікроконтролері ATmega32u4. Uno, як і попередня версія Duemilanove побудовані на мікроконтролері Atmel ATmega328. На рисунку 3.1 зображено Arduino Uno. Більш ранні версії платформи Diecimila і перша робоча Duemilanoves були розроблені на основі Atmel ATmega168, більш ранні версії використовували ATmega8. Arduino Mega2560, в свою чергу, побудована на мікроконтролері ATmega2560.

Arduino дає змогу вийти за рамки віртуального світу в фізичний і взаємодіяти з різними пристроями. Пристрої на базі Arduino можуть отримувати інформацію про навколишнє середовище за допомогою різних датчиків, а також можуть керувати різними пристроями які розробив користувач.

В нас час Arduino стала основою для багатьох проектів наприклад настільні часи або система крапельного полива для рослин.

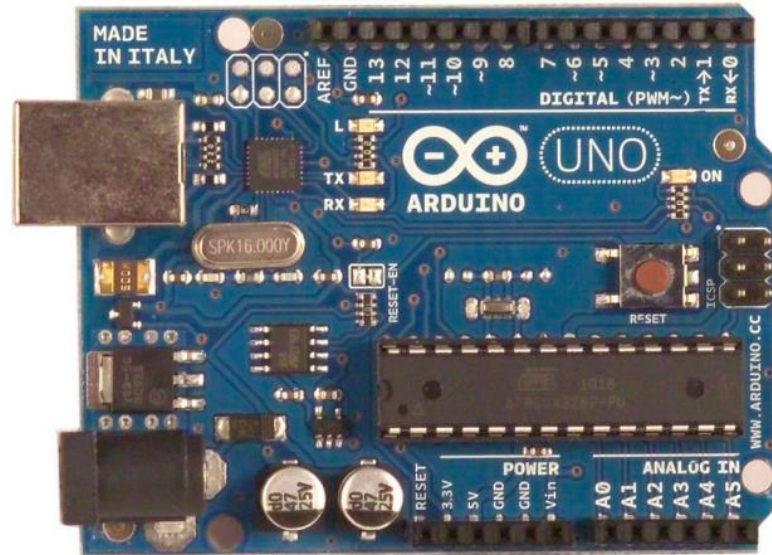


Рисунок 3.1 - Arduino Uno. Із роботи [14]

3.2 Цифровой термодатчик DS18B20

DS18B20 це цифровий вимірювач температури, забезпечує вимір температури в $^{\circ}\text{C}$ з 9 ... 12-розрядних дозволом, і має сигнальну функцію з незалежними програмованими користувачем верхнім і нижнім межами тригера. DS18B20 підключається до шини 1-Wire, яка за визначенням вимагає тільки однієї лінії даних (і землі) для зв'язку з центральним мікропроцесором. Діапазон вимірюваної температури - від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$ з точністю $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ в інтервалі від -10°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Крім того, DS18B20 може отримувати живлення безпосередньо від лінії даних ("паразитне живлення"), усуваючи потребу в зовнішньому джерелі живлення [12]. На рисунку 3.2 зображено DS18B20. Кожен DS18B20 має унікальний 64-розрядний серійний номер, який дозволяє безліч DS18B20 працювати на одній однопроводній шині. Таким чином, одним мікропроцесором можна управляти багатьма DS18B20, розподіленими на великій площі. DS18B20 можуть бути корисними в системах екологічного контролю, включаючи HVAC, системах контролю температури всередині будівель, обладнанні або машин, і системах контролю.



Рисунок 3.2 – Термомодатчик DS18B20. Із роботи [12]

На рисунку 3.3 зображена блок-схема DS18B20. У 64- розрядному ROM записаний унікальний серійний номер пристрою. В оперативній пам'яті міститься 2х -байтний температурний реєстр, в якому зберігається цифровий результат температури датчика. Крім того, через оперативні пам'яті забезпечується доступ до верхнього і нижньому 1-байтним тригерним сигнальним реєстрів (TH і TL), і 1-байтних реєстру конфігурації. Реєстр конфігурації дозволяє користувачеві встановлювати роздільну здатність перетворення температури - 9, 10, 11, або 12 біт. Реєстри TH, TL і конфігурації енергонезалежні (EEPROM), тому, коли пристрій вимкнений, дані в них зберігаються. DS18B20 використовує шинний протокол 1-Wire від Dallas для зв'язку на шині з використанням одного сигналу управління. На лінії управління потрібно слабкий підтягаючий резистор, так як всі пристрої зв'язані з шиною через порт з відкритим стоком або з 3 станами (вивід DQ DS18B20) [12]. У цій шинній системі, мікропроцесор (майстер-пристрій) ідентифікує і адресує пристрою на шині, використовуючи унікальний 64-розрядний код кожного пристрою. Оскільки кожен пристрій має унікальний код, кількість пристроїв, до яких можна звернутися на одній шині, фактично необмежено. Протокол шини 1-Wire, з докладним поясненням команд і "тимчасових інтервалів", описаний в розділі Магістральну систему 1-WIRE цього документа. Інша особливість DS18B20 - здатність працювати без

зовнішнього живлення. Живлення при цьому подається через 1-Wire-підтягаючий резистор і виводом DQ, коли на шині високий рівень. Високий рівень сигналу також заряджає внутрішній конденсатор (C_{PP}), який віддає запасені енергію пристрою, коли на шині низький рівень. Цей метод живлення від шини 1 Wire згадується як "паразитне живлення". В якості альтернативи, до висновку VDD може бути підключений зовнішнє джерело живлення.

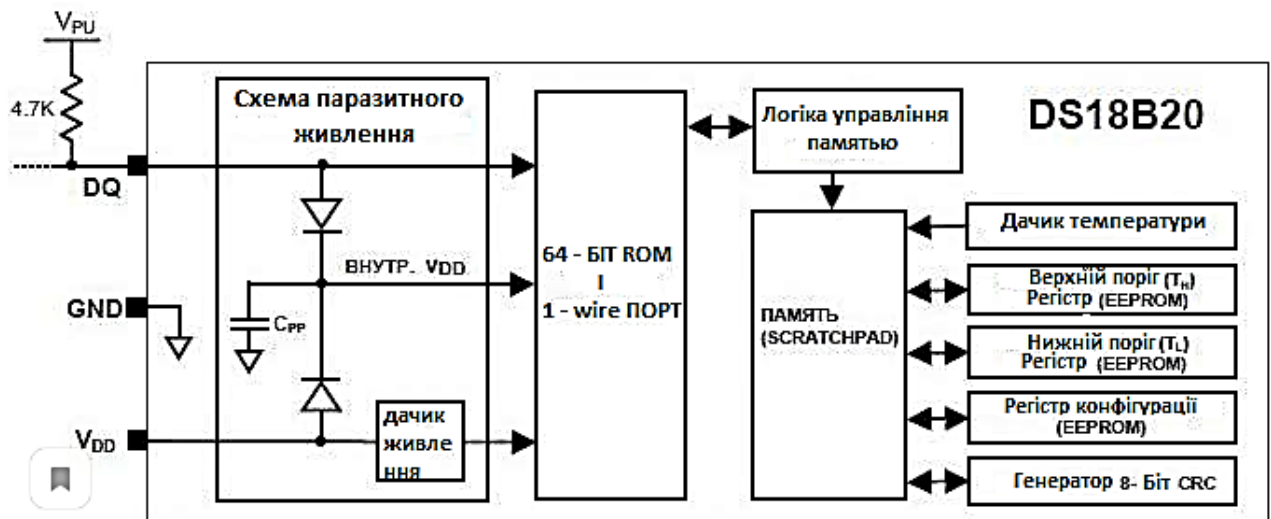


Рисунок 3.3 – Блок-схема DS18B20. Адаптовано із [12]

Функціональна основа DS18B20-датчик з цифровим виведенням значення температури. Роздільна здатність температурного датчика задається користувачем: 9, 10, 11, або 12 біт, з прирощенням в 0.5°C , 0.25°C , 0.125°C , і 0.0625°C , відповідно. Задана за замовчуванням роздільна здатність при включенні живлення – 12 біт. При включенні живлення DS18B20 знаходиться в неактивному стані з низьким енергоспоживанням; щоб ініціалізувати вимірювання температури і аналого-цифрове перетворення, майстер повинен послати команду Convert T [12]. Після перетворення, результат вимірювання зберігається в 2х –байтному температурному регістрі в оперативній пам'яті, і DS18B20 повертається в неактивне стан. Якщо DS18B20 підключено до зовнішнього джерела живлення, після команди Convert T майстер може видати

"часовий інтервал зчитування". DS18B20 дають відповідь, передаючи 0, якщо відбувається перетворення температури і 1, якщо перетворення завершено[12]. Якщо DS18B20 підключений з паразитним живленням, ця методика повідомлення не може використовуватися, так як шина повинна бути підтягнута до живлення сильною підтяжкою протягом усього часу перетворення. Вихідні дані температури в DS18B20 калібровані в °C; для перекладу в градуси Фаренгейта, потрібно використовувати перекладну таблицю або підпрограму перетворення. Результат перетворення зберігається як 16-розрядне знакове число в 2х –байтному температурному регістрі. Знакові біти (S) вказують позитивна температура або негативна: для позитивних значень $S = 0$, для негативних – $S = 1$. Якщо DS18B20 налаштований для 12-розрядного дозволу, всі біти в температурному регістрі будуть значущі. При 11-розрядному дозволі біт 0 не визначений. При 10-розрядному дозволі не визначено біти 1 та 0, а при 9-розрядній роздільній здатності не визначено біт 2, 1 та 0. В таблиці 2 дано приклади відповідності вихідних даних вимірній температурі для 12-розрядного дозвіл.

3.3 Підключення DS18B20 до Arduino. Програмований код

Для підключення термодатчика DS18B20 до мікро контролера Arduino потрібно підключити контакти до роємів на платі рисунок 3.4. Також потрібно занати розіпновку контакті на самому DS18B20 вони зображенні на рисунку 3.5.

Щоби побачити данні с термодачика в схему підключенно OLED дисплей він зображений на рисунку 3.4. Також для коректної роботи дачика потрібен резистор номіналом 4.7 КоМ.

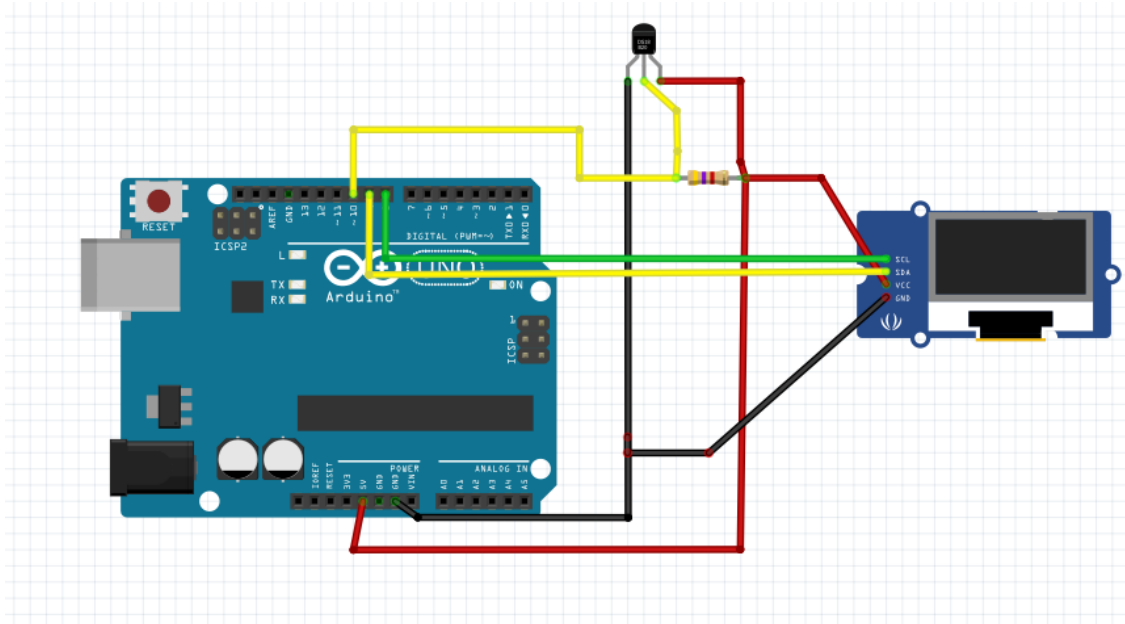


Рисунок 3.4 – Підключення DS18B20 до плати Arduino

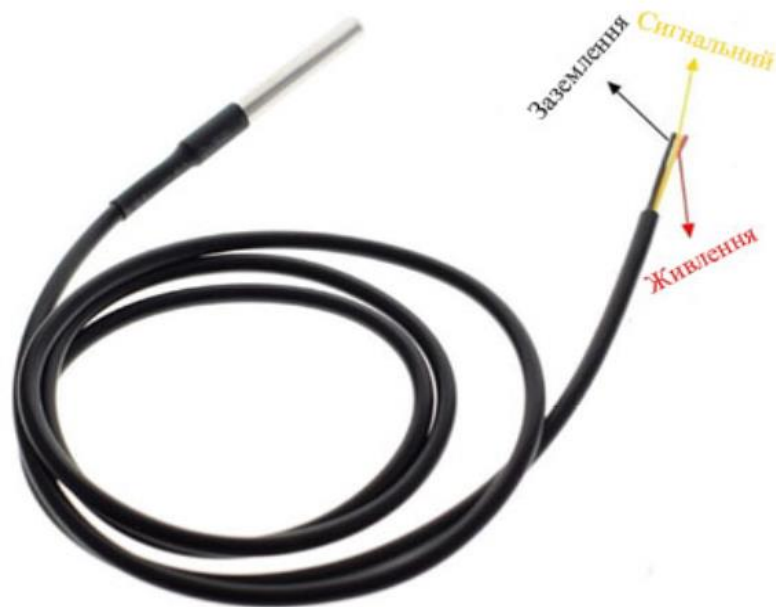


Рисунок 3.5 – Розпіновка контактів термодачика DS18B20

Для конкретної роботи датчика потрібно записати програмований код що виконує роботу термодатчика.

Першою дією для виконання програми з датчиком та дисплеєм є підключення бібліотек за допомогою директиви препроцесора `#include`. Частина коду для виконання цієї операції наступна:

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define ONE_WIRE_BUS 10 // номер піна до якого підключений DS18B20
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
```

У результаті підключення бібліотек нами був розширений базовий функціонал програми для роботи з енергонезалежною пам'яттю та встановлення сигнального контакту DS18B20.

Потім іде блок для підключення OLED дисплею для виведення інформації.

```
#include <OLED_I2C.h>
OLED myOLED(8, 9, 8); // 8pin - SDA , 9pin - SCL
extern uint8_t RusFont[]; // Російський шрифт
extern uint8_t MegaNumbers[]; // Підключення великих шрифтів
extern uint8_t SmallFont[]; // Базовий шрифт без підтримки російських символів.
```

Наступним за порядком виконання дією є блок `«void setup() {}»` , код якого виконується один раз при ініціалізації програми. У ньому реалізована операція зчитування збереженого в енергонезалежній пам'яті мікроконтролера.

Кода даної операції має вигляд:

```
void setup()
{
  sensors.begin();
  myOLED.begin();
}
```

Останньою дією є цикл який виконується постійно. До нього входять наступні операції:

```
void loop()
{
  sensors.requestTemperatures();

  myOLED.clrScr(); // Очищує екран
  myOLED.setFont(RusFont); // Встановлює російський шрифт
  myOLED.print("Ntvgthfnehf", CENTER, 0); // Виводить надпис
  "Температура"
  myOLED.setFont(SmallFont);
  myOLED.setFont(MegaNumbers);
  myOLED.print(String(sensors.getTempCByIndex(0) , 1), CENTER, 9); //
  Відображення температури
  myOLED.update();

  delay(100);
}
```

Підсумовуючи вищезначене, можна зробити висновок, що розроблений атоматизований програмний комплекс з використанням мікроконтролера Arduino та термодачика DS18B20 для вимірювання температури може бути використаний при дослідженнях в лабораторних умовах.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуті питання щодо конструктивно-технологічних особливостей та фізичних принцип роботи датчиків температури та тиску та показано, що датчики температури – це пристрої для вимірювання температури об'єкта або речовини на основі визначення властивостей і характеристик вимірювальних тіл та контролю теплових режимів роботи промислових приладів і електронних систем. Датчики температури класифікуються на термоелектричні, терморезистивні, напівпровідникові та пірометри.

2. Вимірювальні кола з терморезистивними перетворювачами температури розповсюджені для промислового вимірювання температури в діапазоні -260 до 1100 °C та мають високі точність і часову стабільність. При вимірюванні низьких і середніх температур використовують термодатчики на основі матеріалів з високим номінальним опором (від 100 або 500 Ом), що забезпечує високу часову стабільність і зменшення шунтуючого ефекту.

3. Показано, що для вимірювання тиску та інших механічних величин використовуються сенсори ємнісного, п'єзорезистивного(тензометричного), магнітопружного, індуктивного, п'єзоелектричного, піроелектричного та акустоелектронних типів. Принцип дії ємнісних сенсорів ґрунтується на зміні ємності чутливого елемента) - діафрагми внаслідок дії сили, тиску або прискорення. Такі сенсори характеризуються високою точністю, надійністю та простотою виготовлення.

4. Для узгодження ємнісного сенсора з зовнішньою схемою використовуються мостові схеми та метод резонансної частоти, при цьому ємнісний сенсор входить до складу коливального контуру, а рівень вихідного сигналу визначається величиною резонансної частоти та періодом синусоїдальних коливань.

5. Розроблено автоматизований програмний комплекс для вимірювання температури з використанням мікроконтролера Arduino та термодачика DS18B20.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/17269/5/Metody_i_zasoby_s_prjazhennja_tetemperaturn_sensoriv_u_mikroprocesornyh_vymirjuvalnyh_kompleksah.pdf [Електронний ресурс]. – Дата доступу : 06.11.2019.
2. Паламар М.І., Пастернак Ю.В., Стрембіцький М.О. Методи і засоби спряження температурних сенсорів у мікропроцесорних вимірювальних комплексах. Конспект лекцій для студентів спеціальностей 8.05100306 – «Інформаційні технології в приладобудуванні» та 8.05100302 – «Прилади і системи точної механіки». – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – 73 с
3. <https://www.mdpi.com/1424-8220/8/12/7982/htm/> [Електронний ресурс]. – Дата доступу : 08.11.2019.
4. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково-навчальне видання. В 3 т / За редакцією З.Ю. Готри.– Львів: Ліга-Прес, 2003.– Т.2.– 595 с.
5. <https://pue8.ru/vybor-elektrooborudovaniya/804-datchiki-izmereniya-temperatury-tipu-printsip-raboty.html> [Електронний ресурс]. – Дата доступу : 07.11.2019.
6. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Пірометр> [Електронний ресурс]. – Дата доступу : 06.11.2019.
7. Проценко І. Ю. Датчики неелектричних величин : навчальний посібник. / І. Ю. Проценко, Н. І. Шумакова. - Суми : Сумський державний університет, 2003.- 71с.
8. Готра З.Ю. Технологія електронної техніки / З.Ю. Готра . – Львів: Львівська політехніка, 2010. – 888 с.
9. Sensor and microelectronic elements based on nanoscale granular systems (review) / S.A.Nepijko, D. Kutnyakhov, L.V. Odnodvoretz, S.I. Protsenko, G.J. Schonhense // J. Nanopart. Res. – 2011. – V.12 (13). – P.6263 – 6281.
10. Танюхин А.Н. Интегральные датчики и сенсоры давления // Датчики и системы.– 2001.– № 1.– С. 67-69
11. Метрологія та вимірювальна техніка/ За ред. проф. Є.С. Поліщука.–

Львів: Бескид Біт, 2003.– 538 с.

12. https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%94%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA_%D1%82%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%83 [Електронний ресурс]. – Дата доступу : 17.11.2019.

13. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/2812.pdf/> [Електронний ресурс]. – Дата доступу : 10.12.2019.

14. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction/> [Електронний ресурс]. – Дата доступу : 11.12.2019.

15. <http://arduino.ru/Hardware> [Електронний ресурс]. – Дата доступу : 11.12.2019

16. <https://odinelectric.ru/knowledgebase/dlja-chego-nuzhen-pirometr>. [Електронний ресурс]. – Дата доступу : 11.12.2019

17. Блум Джереми. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства: Пер. с англ. — СПб.: БХВ-Петербург, 2017. — 336 с.