

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технічний факультет
Кафедра приладобудування

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
Завідувач кафедри
доц. Чичура І.І.

“ ” 2024р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему:

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ
МУФЕЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОПЕЧІ**

Виконав:

Мозер Віктор Антонович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник:

доц. Цигика В.В.

(вчене звання, ПБ, посада)

(підпис)

Ужгород 2024

Ужгородський національний університет

Інженерно-технічний факультет

Кафедра приладобудування

Освітньо-кваліфікаційний рівень «МАГІСТР»

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ст. викл. Ігор ЧИЧУРА.

“ ” _____ 2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

студенту Мозеру Віктору Антоновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема КБР «Система автоматичного регулювання температури муфельної електропечі»

Керівник роботи Цигика В.В. канд. фіз.-мат. наук, доцент каф. ПБ

(вчене звання, ПБ, науковий ступінь)

2. Затверджені Розпорядженням по ІТФ від “ ” _____ 2024 року № _____.

2. Строк подання студентом роботи “ 6 ” грудня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи:

Виконати наступні завдання: розглянути різновидності систем автоматичного керування, типові схеми терморегуляторів, режими регулювання температури, термоелектричні датчики температури, розробити схему електричну структурну та принципову мікроконтролерного регулятора температури муфельної електропечі з потужність нагрівача - 1 кВт, максимальною температурою нагріву до 1000 0 С. Максимальна відносна похибка вимірювання температури $\pm 5\%$, живлення приладу від мережі напругою 220 В $\pm 10\%$, частотою 50 ± 1 Гц.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, огляд науково-технічної літератури по темі КБР, розробка схеми електричної структурної та схеми електричної принципової терморегулятора, висновки, перелік посилань, додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): схема електрична структурна регулятора температури, схема електрична принципова.

6. Дата видачі завдання " 10 " вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

/п	Назва етапів виконання КБР	Строк виконання етапів проекту	Примітка
	Огляд літератури	до 1/10/24	
	Розробка схеми електричної структурної	до 05/10/24	
	Вибір елементної бази	до 25/10/24	
	Розробка схеми електричної принципової	до 10/11/24	
	Робота над програмним забезпеченням	до 25/11/24	
	Оформлення креслень	до 30/11/24	
	Оформлення текстової частини	до 10/12/24	

Студент _____ Віктор МОЗЕР
(підпис) Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Керівник КБР _____ Володимир ЦИГИКА
(підпис) Ім'я ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 75 с., 3 табл., 23 рис., 17 джерел.

АВТОМАТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ, РЕГУЛЯТОР ТЕМПЕРАТУРИ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.

Об'єкт дослідження – системи автоматичного регулювання температури муфельної електропечі.

Мета роботи - розробка системи регулятора температури муфельної електропечі з потужністю нагрівача 1 кВт і максимальною температурою нагріву до 1000 °С з похибкою вимірювання не більше $\pm 5\%$, що живиться від мережі з напругою $220 \text{ В} \pm 10\%$, частотою $50 \pm 1 \text{ Гц}$.

У даній магістерській роботі розглянуто різновиди систем автоматичного керування температурою, типові схеми терморегуляторів, режими регулювання температури, а також принцип роботи термоелектричних датчиків. Визначено критерії вибору датчиків та їх підключення для забезпечення надійної роботи системи.

Розроблено електричну структурну та принципову схеми мікроконтролерного регулятора температури. В якості датчика використано термопару типу К, що забезпечує точність вимірювання температури в заданому діапазоні. Управління системою реалізовано на основі мікроконтролера Attiny13A. Блок-схема алгоритму роботи системи, програмний код та вимоги до елементної бази описані. Також розглянуто питання електроживлення системи, включно з проектуванням стабілізованого джерела живлення.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis: 75 p., 3 table, 23 fig., 17 sources.

AUTOMATIC CONTROL, TEMPERATURE REGULATOR, MICROCONTROLLER, SOFTWARE.

The object of the study is the automatic temperature control system of a muffle electric furnace.

The purpose of the work is to develop a temperature control system for a muffle electric furnace with a heater power of 1 kW and a maximum heating temperature of up to 1000 °C with a measurement error of no more than $\pm 5\%$, powered by a network with a voltage of $220\text{ V} \pm 10\%$, a frequency of $50 \pm 1\text{ Hz}$.

This master's thesis considers the types of automatic temperature control systems, typical temperature regulator circuits, temperature control modes, and the principle of operation of thermoelectric sensors. The criteria for selecting sensors and their connection to ensure reliable system operation are determined.

The electrical structural and schematic diagram of a microcontroller temperature controller has been developed. A type K thermocouple has been used as a sensor, which ensures the accuracy of temperature measurement in a given range. The system control is implemented based on the Attiny13A microcontroller. The block diagram of the system operation algorithm, the program code and the requirements for the element base are described. The issue of the system power supply, including the design of a stabilized power supply, is also considered.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	(7)
1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ АНАЛОГІВ ДЛЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	(10)
1.1 Пристрої стабілізації напруги	(10)
1.2 Прецезійний аналоговий терморегулятор.....	(14)
1.3 Термоелектричні датчики температури.....	(19)
1.4 Типові схемні рішення регуляторів температури	(23)
2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	(26)
2.1. Методика розробки програми для мікроконтролера ATtiny13.....	(26)
2.2. Налаштування програмного забезпечення.....	(33)
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ TEMПЕРАТУРИ МУФЕЛЬНОЇ ПЕЧІ.....	35)
3.1 Структурна схема терморегулятора.....	(35)
3.2 Вибір елементної бази.....	(39)
3.3 Розробка схеми електричної принципової.....	(55)
3.4 Схема блока живлення.....	(57)
3.5 Відомості про програмне забезпечення.....	(64)
ВИСНОВКИ.....	(70)
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	(73)
ДОДАТКИ.....	(75)
Додаток А	
Додаток Б	
Додаток В	

Додаток Г					МР.АКІТ.19050031. 01.000 ПЗ			
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата				
розробив		Мозер В.А..						
Перевірів		Цигика В.В						
Н. Контр.								
Ватв.								
					Літера			Аркуш
					у			4
								40
					УжНУ, ІТФ 2 курс гр. АКІТ			

*Система автоматичного
регулювання температури
муфельної електропечі*

ВСТУП

Однією з поширених задач, що стоять перед людиною вже протягом багатьох років, як і раніше залишається контроль і регулювання температури. Саме від точності підтримки цього параметра часто залежить якість виконання багатьох технологічних процесів, зокрема в муфельних електропечах.

Муфельні електропечі застосовують в багатьох сферах науки, техніки, промисловості. Зокрема, муфельні печі використовують в лабораторних умовах для синтезу і відпалу зразків для аналізу та дослідження різних матеріалів, в промисловості - для випалювання кераміки, синтезу скла, термообробки металів та інших матеріалів, які потребують високих температур.

На даний момент промисловістю випускається велика кількість терморегуляторів різних типів. Проте більшість продукції орієнтовано на задоволення побутових потреб споживачів, наприклад, утримання заданої температури в житлових приміщеннях. У той же час досить важко знайти на ринку промислові термостабілізатори, які би задовільняли всім параметрам, необхідним для проведення деяких специфічних досліджень в різних галузях науки і техніки.

Метою роботи є розробка структурної та принципової електричної схеми мікроконтролерного регулятора температури для муфельної печі з нагрівачем потужністю 1 кВт. Для досягнення мети поставлено такі завдання:

Аналіз систем автоматичного керування, їх класифікація та особливості застосування у терморегуляторах.

Розгляд типових схем і режимів регулювання температури.

Дослідження роботи термоелектричних датчиків температури, їх конструктивних і функціональних характеристик.

					МР.ЛБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						7
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Розробка принципової схеми регулятора з урахуванням заданих технічних умов.

У ході роботи застосовуються теоретичні та експериментальні методи. Теоретична частина включає огляд і аналіз літератури, моделювання систем регулювання в спеціалізованому програмному забезпеченні.

Таким чином, дана робота має на меті внесок у розвиток автоматизованих систем регулювання температури для промислового обладнання, забезпечуючи баланс між технологічною точністю, енергозбереженням та зручністю використання.

Для розробки системи регулювання температури муфельної печі необхідно врахувати низку технічних і функціональних вимог, які забезпечують її відповідність реальним умовам експлуатації:

Потужність нагрівача. Система має коректно функціонувати з нагрівачем потужністю 1 кВт, забезпечуючи рівномірний розподіл тепла у робочій камері муфельної печі.

Діапазон температури. Максимальна температура нагріву до 1000 °C вимагає використання надійних і термостійких елементів, таких як термоелектричні датчики та відповідні регулюючі компоненти.

Точність вимірювання. Забезпечення максимальної відносної похибки вимірювання температури на рівні $\pm 5\%$ є критичним параметром, який впливає на якість технологічних процесів.

Живлення. Пристрій має працювати від стандартної мережі змінного струму з напругою 220 В $\pm 10\%$ та частотою 50 ± 1 Гц, що вимагає врахування можливих флуктуацій напруги.

Інтерфейс користувача. Для зручності експлуатації необхідно забезпечити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс з можливістю налаштування режимів роботи, зчитування поточної температури та відображення сигналів аварійного стану.

Сучасні мікроконтролери дозволяють інтегрувати в одному пристрої кілька функцій: вимірювання, регулювання, захист, відображення інформації

					МП.ПБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						8
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

тощо. У рамках даної роботи передбачається використання мікроконтролера, який буде забезпечувати:

Отримання даних від термоелектричного датчика температури термопар типу К.

Реалізацію алгоритму регулювання температури за методом пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) керування, що забезпечує точне підтримання встановленої температури.

Керування силовими елементами, такими як твердотільні реле або тиристори, для регулювання напруги, що подається на нагрівач.

Забезпечення безпечної роботи через захисні механізми, які активуються при перегріві, короткому замиканні або перевищенні напруги живлення.

Очікувані результати роботи

В результаті виконання роботи очікується розробка схеми, яка забезпечить, надійне підтримання температури у діапазоні від кімнатної до 1000 °C із заданою похибкою, високу стабільність системи при змінах навантаження та зовнішніх умов. Ефективне використання енергії нагріву завдяки оптимізації алгоритмів регулювання та зручність інтеграції системи в існуючі технологічні процеси.

Таким чином, робота поєднує у собі теоретичний аналіз, проектування електронних схем і програмну реалізацію алгоритмів керування, що дозволяє забезпечити комплексний підхід до вирішення поставленого завдання.

					МП.ЛБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						9
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

1 Огляд і аналіз аналогів для системи автоматичного регулювання температури

1.1 Пристрої стабілізації температури

В даний час існує декілька рішень, що дозволяють регулювати температуру. Найпоширеніші недорогі терморегулятори, представлені сьогодні на ринку, реалізують принцип релейного регулювання, при якому нагрівник відключається при заданій температурі і знов включається при опусканні температури нижче за яку або межі. Основним недоліком даного способу є неможливість точної підтримки температури, її «плавання» - що часто не задовольняє поставленим вимогам. Однак, якщо не потрібна велика точність, можна підібрати напругу на нагрівнику, при якому для заданої температури тепло, що подається, компенсуватиметься тепловіддачею. Для інерційних печей і при використанні стабілізатора напруги при цьому досягається точність $\pm 15^\circ$. Автоматичне регулювання засноване на принципі зворотного зв'язку, тобто дії вимірювального приладу на об'єкт регулювання. Якщо температура вище заданої, прилад відключає нагрівник, якщо нижче - включає, або, відповідно, збільшує (зменшує) подачу енергії на нагрівник. Регулювання температури будь-яким приладом зводиться до зміни струму в колі нагрівника.[12]

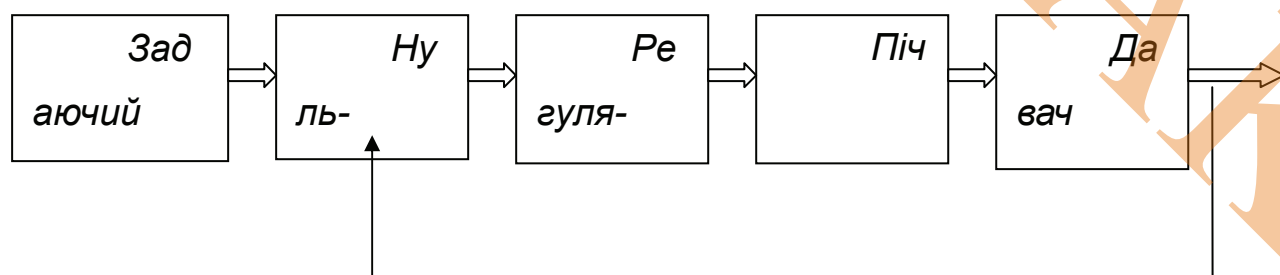


Рисунок 1.1 – Найзагальніша принципова схема автоматичного регулювання [12].

На рис. 1.1 показана принципова схема автоматичного регулятора температури. Задаючий пристрій служить для вироблення сигналу, відповідного необхідній температурі. Елемент порівняння (нуль-орган) виробляє порівняння сигналів, відповідних заданому і вимірюваному значенню температури, і визначає їх різницю. Регулюючий пристрій видозмінює різницевий сигнал, підсилює його і перетворює так, щоб змінити подачу енергії на нагрівальну піч в певній залежності (за законом регулювання), забезпечуючи при цьому необхідне значення температури з допустимою погрішністю протягом часу досліду.[13]

У позиційних регуляторах сигнал регулюючого приладу виробляє включення або виключення нагрівального кола. При зниженні температури в системі нижче заданого рівня реле приладу замикаються, включаючи струм в управляючій обмотці магнітного пускача (потужного реле), через контакти якого тече силовий струм в обмотку печі. В даний час такі реле використовують виключно для блокування. Частіше замість магнітного пускача ставлять просту електронну схему, в якій регулювання струму здійснюється керованим тиристором шляхом безконтактного переривання і включення струму в обмотці печі, що підвищує надійність схеми. Реле може не просто вмикати або вимикати струм в силовому колі, але перемикає (поперемінно включати) різні обмотки автотрансформатора, що подають на піч різні напруги. Завдяки цьому досягається плавніше регулювання температури.[13]

Найбільш часто в промислових терморегуляторах застосовується датчик температури у вигляді термопари.

Звичайно в експериментальних установках використовують дві термопари: регулюючу і вимірювальну. Перша здійснює зворотний зв'язок

печі з регулятором. Її датчик (спай) поміщають якомога ближче до нагрівника, щоб зробити систему менш інерційною. Сигнал регулюючої термопари використовують для підтримки температури досліду постійним. Для вимірювання ж істинної температури в робочому об'ємі служать контрольно-вимірювальні термопари, робочі спаї яких знаходяться або безпосередньо в робочому об'ємі, або поблизу від нього, де температура відрізняється трохи і на відому величину. Контрольні термопари підключають до вимірювального приладу, що має такий же або вищий клас точності, ніж прилад - регулятор.[12]

На стрічці досить чутливого самописця запис температури реактора установки з позиційним регулятором має синусоїдальну, пилкоподібну форму. Точність регулювання температури в цьому випадку можна досягти $\pm 5^\circ$.

На відміну від описаної вище схеми "ввімкнено - вимкнено" сучасні регулятори безперервної дії, початок яким поклав випуск високоточних регуляторів температури (ВРТ), не чекають, поки температура "підє" від заданої достатньо далеко (більше порогу чутливості приладу), а постійно підбирають силу струму відповідно розузгодженню (різниці сигналу термопари і заданого), так що досягши заданої температури величина струму в ланцюзі має величину, що забезпечує подачу потужності, рівної тепловідводу. Регулювання сили струму здійснюється по пропорційно-інтегрально-диференціальному (ПІД) закону блоком тиристорів-напівпровідникових діодів, які можуть міняти силу струму, що проходить через них, залежно від частоти прикладеної до них управляючої напруги. Відповідно ПІД-регулятор містить підсилювач, інтегратор і диференціатор. Знайшовши на своєму вході розузгодження, підсилювач в перший момент швидко, але строго дозовано змінює подачу енергії на піч, компенсуючи значну частину розузгодження. Потім в роботу вступає інтегратор, який поволі наближає температуру до заданого значення. Диференціатор, реагуючий на швидкість зміни розузгодження, форсує роботу приладу, коли

					МР.ЛБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						12
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

температура починає швидко відхилятися від необхідної величини. Подібний регулятор забезпечує точність підтримки температури в печі не гірше $\pm 1^\circ$. [12]

Слабке місце ВРТ - електромеханічний перетворювач постійного сигналу термопари (віброперетворювач). Він часто забруднюється, контакти зтираються і т.д. Існують безконтактні схеми електронного перетворення.

ПІД-регулятори можуть підтримувати температуру самих різних по своїх теплових властивостях об'єктів шляхом простої маніпуляції трьома потенціометрами, що змінюють питому вагу П-, І- і Д-складових в законі регулювання. Для печей дуже малої інерційності (наприклад, в твердофазних установках) швидке реагування регулятора на скачки температури забезпечується переважанням диференціальної складової. Навпаки, в автоклавних і інших печах з великою теплоізоляцією інерційність велика. Для них окрім оперативного реагування на скачки температури необхідно згладити теплові імпульси в тривалий проміжок часу, у зв'язку з чим зростає інтегральна складова. [12]

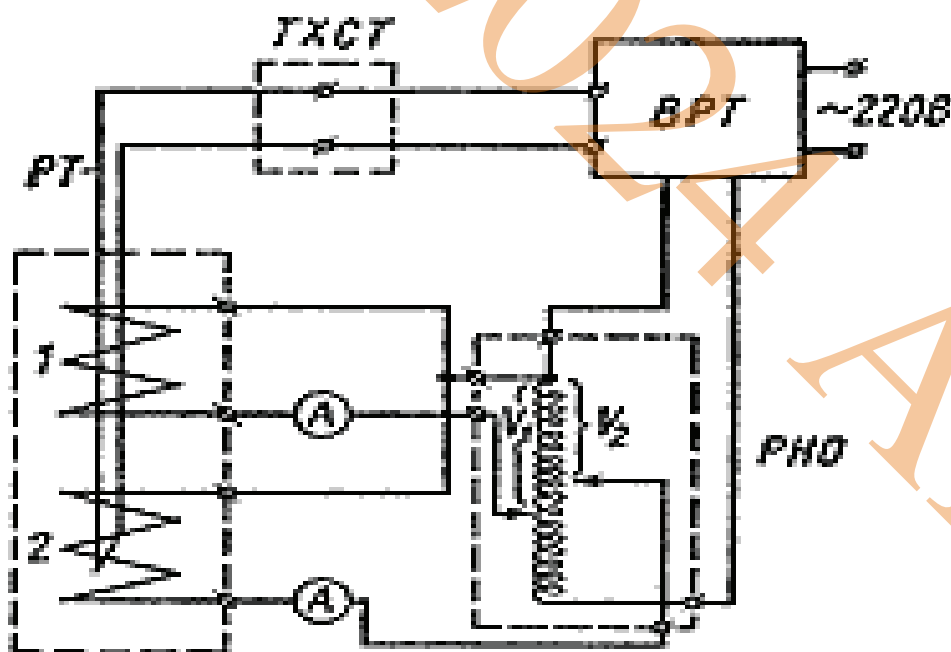


Рисунок 1.2 – Схема регулювання печі з двохсекційним нагрівником, здійснювана одним приладом ВРТ [12].

Два нагрівника однієї печі можна регулювати одним приладом ВРТ, використовуючи як дільник потужності автотрансформатор (рис.1.2). Положенням движків автотрансформатора підбирається співвідношення напруг на обмотках, забезпечуюче відсутність або заданий градієнт температури в робочому просторі. Схема добра ще тим, що можна встановити граничну максимальну напругу на обмотках печі. Навіть при повністю відкритому тиристорі піч у принципі не може бути перегріта вище за деяку температуру, чим досягається своєрідне "блокування".[12]

Окрім задач на підтримку певної температури перед дослідником виникають задачі зміни температури за певною програмою, і тоді справа за програмним регулятором. Останнім часом є тенденція до заміни безлічі регулюючих приладів одним комп'ютером, здатним регулювати і міняти температури по певній схемі одночасно в 50 - 100 нагрівниках. До речі, для великих лабораторій це вигідно чисто економічно, оскільки вартість комп'ютера на 100 нагрівників лише в 2 - 3 рази більше, ніж вартість одного комплекту ВРТ. Крім того, відпадає необхідність у великому числі самописців: ЕОМ може запам'ятовувати температури і відповідати на питання про температуру за певний проміжок часу і т.д.[12]

1.2 Прецезійний аналоговий терморегулятор

Прецезійний аналоговий терморегулятор виконаний у вигляді декількох конструктивно оформлених блоків. Це підвищує ремонтпридатність і дозволяє ефективніше компонувати виріб, до складу якого він входить. Блок-схема терморегулятора представлена на рис. 1.2.[12]

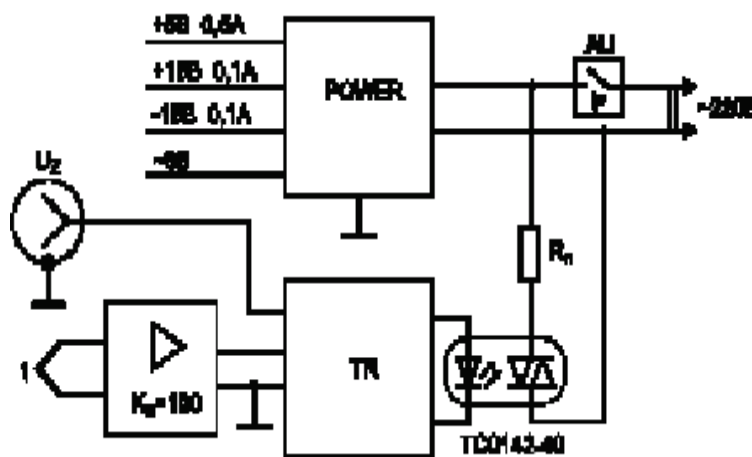


Рисунок 1.3 – Блок-схема терморегулятора [12].

Він складається з вимірювальної термопар (або системи термопар), попереднього підсилювача, власне терморегулятора, блоку живлення і силової частини. Силова частина містить автомат на відповідний середній струм (40, 25, 16, 10 А), власне навантаження (систему нагрівників, піч і т. д.) і регулюючий оптосимістор TCO142-40. Оптосимістор може бути замінений на два оптотиристора (наприклад, TO2-40), тиристори яких включені зустрічно-паралельно, а світлодіоди послідовно. [12]

Блок живлення терморегулятора Power виконаний по класичній трансформаторній схемі на мікросхемах стабілізаторів 7805, 7815 і 7915. Струми навантаження не перевищують 300 мА для джерела +5 В і 100 мА для джерел ± 15 В. Блок живлення обов'язково повинен бути підключений до тієї ж фази мережі 220 В, що і навантаження, оскільки одна з обмоток трансформатора (~ 6 В) використовується терморегулятором для визначення моменту переходу мережевої напруги через нуль. Попередній підсилювач представлений в двох варіантах виконання (рис. 1.4 і 1.5) залежно від використовуваної схеми включення термопар. Він розташовується в безпосередній близькості від термопар для виключення можливих високочастотних наведень на входні ланцюги. Коефіцієнт посилення попереднього підсилювача приблизно рівний 100, що забезпечує на його виході лінійний сигнал 1мВ/°С позитивної полярності в діапазоні 25..1000°С.[13]

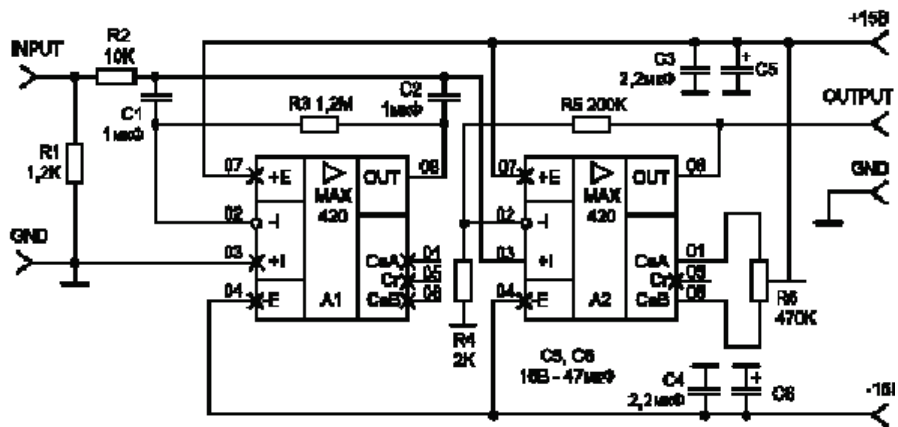


Рисунок 1.4 – Попередній неінвертуючий підсилювач [12].

Терморегулятор розрахований на роботу з високотемпературними термопарами, що мають лінійну ділянку характеристики в діапазоні 25... 1000°C, при цьому крутизна характеристики може складати 10,6... 12 мкВ/°C.

У терморегуляторі можливі дві схеми включення термопар. Перша схема включення зводиться до послідовного включення двох однакових термопар. Плюсний дріт верхньої термопари підключається на вхід попереднього підсилювача (рис.1.4), мінусовий дріт нижньої термопари — на загальний дріт терморегулятора. Верхня термопара є вимірювальною, і її спай розташовується в зоні контролю температури. Спай нижньої термопари розташовується в судині з льодом, що таїть (його температура, відповідно, стабілізується). Друга схема включення використовує одну термопару, позитивний дріт якої підключається до загального дроту терморегулятора, а негативний — до входу попереднього підсилювача (рис.1.5). Перша схема включення, безумовно, є дорожчою і складнішою у виготовленні і експлуатації, але вона володіє вищою точністю і надійністю.[13]

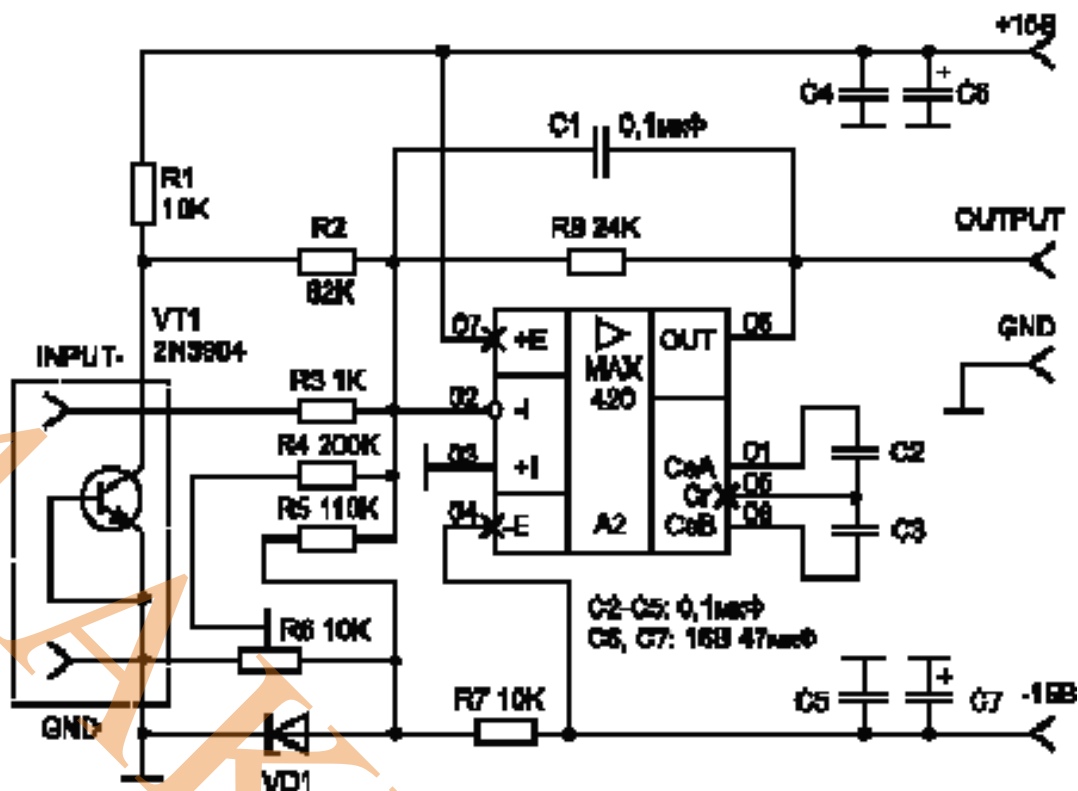


Рисунок 1.5 – Попередній інвертуючий підсилювач [12].

Як вже наголошувалося вище, залежно від використовуваної схеми включення термопар або необхідної точності і надійності, можуть використовуватися два варіанти схем попередніх підсилювачів. На рис. 2.4 представлена схема попереднього неінвертуючого підсилювача для випадку використання двох послідовно включених термопар. На рис. 1.5 представлена схема інвертуючого попереднього підсилювача з апаратною корекцією температури холодного спаю для випадку використання одиночної термопары.[12]

Неінвертуючий попередній підсилювач (рис. 1.4) містить два операційні підсилювачі A1 і A2. У схемі попереднього підсилювача використаний один з кращих операційних підсилювачів (ОП) фірми Maxim — MAX420 [1]. Основними його перевагами є: малий температурний дрейф, що становить в середньому 0,02 мкВ/°C; малі вхідні струми порядку 0,03 мкА; низький рівень низькочастотних шумів складає 0,3 мкВ (у діапазоні від постійного

струму до 1 Гц) і високий власний коефіцієнт посилення — більше 10^8 . На першому ОП А1 виконаний активний фільтр нижніх частот (ФНЧ).[12]

Фільтр працює таким чином: напруга перешкоди проходить через резистор R2 в точку виходу фільтру. Через конденсатор C1 воно потрапляє на інвертуючий вхід ОП, посилюється на ньому і через конденсатор C2 знову потрапляє в ту ж точку виходу, де компенсує вхідну напругу перешкоди. Резистор R3 стабілізує роботу ОП по постійному струму. Перевагою схеми є велика еквівалентна місткість конденсатора фільтру C2, яка збільшується приблизно в $K+1$ раз (де K — власний коефіцієнт посилення ОП). У нашому випадку, при вказаних в схемі номіналах, ФНЧ пригнічує напругу перешкоди, починаючи з 5-6 Гц.[12]

Введення ФНЧ в схему попереднього підсилювача необхідне з наступних причин. По-перше, система термопар має достатньо велику довжину дротів, що досягає 1 м, на яких наводяться перешкоди різного походження, у тому числі і від працюючого оптосимістора. По-друге, вимірювальну термопару, що працює при високих температурах, часто для ізоляції вставляють в керамічну трубку з двома паралельними отворами. При цьому дроти термопари розташовані паралельно на відстані приблизно 20-30 см, утворюючи, таким чином, антену. На ОП А2 зібраний підсилювач з коефіцієнтом підсилення близько 100 (встановлюється підбором опору R5). Резистор R6 служить для коректування нуля попереднього підсилювача. Як наголошувалося вище, попередній підсилювач настраюється так, щоб на його виході лінійний сигнал позитивної полярності складав 1 мВ/°С в діапазоні 25...1000°С. Також слід зазначити, що попередній підсилювач бажано ретельно екранувати, а по можливості і термостабілізувати.[12]

Інвертуючий попередній підсилювач з електронною корекцією температури контактів термопари зображений на рис. 1.5. Він описаний в документації на ОП MAX420 [13]. Оскільки спільно з цим попереднім підсилювачем використовується тільки одна термопара, довжина дротів її

вважається малою i , отже, активний ФНЧ не використовується. Для ефективної роботи схеми контакти підключення термопари і корпус транзистора VT1 повинні мати однакову температуру. Слід звернути увагу на те, що термopapa підключається до цього підсилювача негативним дротом до входу, а позитивним — до загального дроту. Резистором R8 підбирається необхідний коефіцієнт посилення. Резистором R6 виробляється корекція передавальної характеристики підсилювача (за допомогою еталонного термометра).[12]

Вихід попереднього підсилювача з'єднується з входом датчика температури терморегулятора за допомогою виті пари завдовжки не більш 1,2 м. Якщо терморегулятор входить до складу мікроконтролерної системи, і в системі є аналого-цифровий перетворювач, то цей же вихід може бути сполучений з входом нормуючого підсилювача АЦП для безпосереднього вимірювання температури в зоні регулювання.[12]

Технічні характеристики терморегулятора показано в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Технічні характеристики терморегулятора

Параметр	Значени
Опір нагрівача, Ом	6
Діапазон регулювання, °C	25...1100
Точність утримання, °C	±1
Час нагріву до 800°C, хв	16
Найбільша маса регульованого об'єкта, кг	80

1.3. Термоелектричні датчики температури

Існує багато різних типів датчиків температури, які використовуються для вимірювання температурних значень в різних температурних діапазонах. Ось кілька поширених типів датчиків температури.[4]

Термістори є резистивними датчиками температури, що змінюють свій опір в залежності від температури. Зазвичай використовуються два типи термісторів: NTC (Negative Temperature Coefficient - коефіцієнт від'ємної температурної залежності) та PTC (Positive Temperature Coefficient - коефіцієнт позитивної температурної залежності). NTC термістори зменшують свій опір зі збільшенням температури, тоді як PTC термістори збільшують свій опір зі збільшенням температури. Термістори зазвичай мають вузький діапазон вимірювання, але їх вигода полягає в простоті використання і доступності [4].

Терморезистор є іншим резистивним датчиком температури, який використовує зміну опору для вимірювання температури. RTD мають високу точність і стабільність, але вони зазвичай дорожчі ніж термістори. В діапазоні від 0°C до 650°C терморезистори з платини використовують як еталонні датчики вимірювань, похибка градуйованої характеристики платинових термоперетворювачів не перевищує 0,001°C [4].

Залежність опору платинових терморезисторів від температури можна визначити формулами:

$$R_t = R_0(1 + A t + B t^2) \text{ при } 0 < t < 650^\circ\text{C},$$

$$R_t = R_0[1 + A t + B t^2 + C t^3 (t - 100)] \text{ при } -200^\circ\text{C} < t < 0^\circ\text{C},$$

Платинові терморезистори володіють високою стабільністю і великою відтворюваністю характеристик. Недоліками є велика ціна та не лінійність перетворення [4].

Термопара. Термопара є одним з найбільш поширених типів датчиків температури. Вона складається з двох різних металевих провідників, з'єднаних в одній точці. Працює на принципі термоелектричного ефекту (ефект Зеебека). А саме, генерує мілівольтний сигнал, залежний від різниці температур між гарячим і холодним спаями. Термопари добре працюють в широкому діапазоні температур і мають високу точність [4].

Таблиця 1 2 – Стандартизовані термопари

					МР.ПБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						20
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Тип	Розмір	Діапазон ° С
J (залізо і константан)	8	-57 до 760
	14	-57 до 593
	20	-57 до 482
K (хромель і алюмель)	24	-57 до 371
	8	-57 до 1260
	14	-57 до 1093
	20	-57 до 982
N (ніхросил і нісил)	24	57 до 870
	8	-57 до 1260
	14	-57 до 1093
	20	-57 до 982
	24	-57 до 870

Схеми підключення термопар зображені на рис. 1.6. У першому варіанті підключення (а) хоч точки і знаходяться за однакової температури, але з'єднані різнорідними провідниками, що в результаті може викликати некомпенсовану термо-ЕРС, що у свою чергу впливає на кінцевий результат вимірювань. При точних вимірюваннях у лабораторних умовах прилад підключається в розрив одного термоелектрода (електрода 4 на рис.1.6). Температуру вільного кінця термопар («опорного») при цьому підтримують постійною. Таке підключення компенсує непотрібну термо-ЕРС, що виникає у точках під'єднання термоелектрода з приладом. Підключення термопар таким способом називається диференціальним [4].

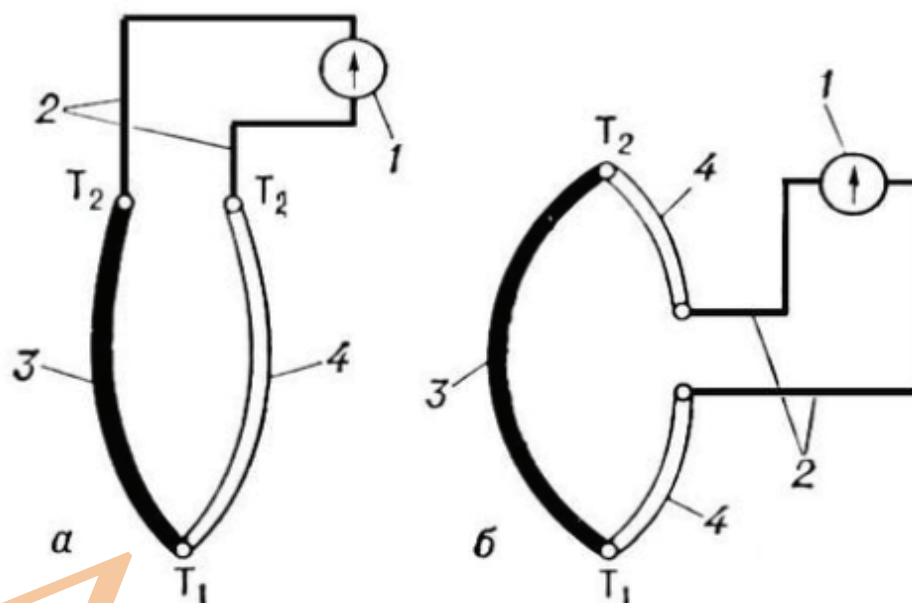


Рисунок 1.6 — Способи підключення термопар [4].

Для розрахунку сумарної термо-ЕРС в ланцюзі диференціальної термопарі необхідно знати температуру одного з спаїв. Для цього можна застосовувати термостат з льодом для підтримки температури в 0°C . (рис.1.7). В сучасних терморегуляторах вплив зміни температури холодного спаю на вимірювання компенсують, наприклад, за допомогою терморезистора [4] .

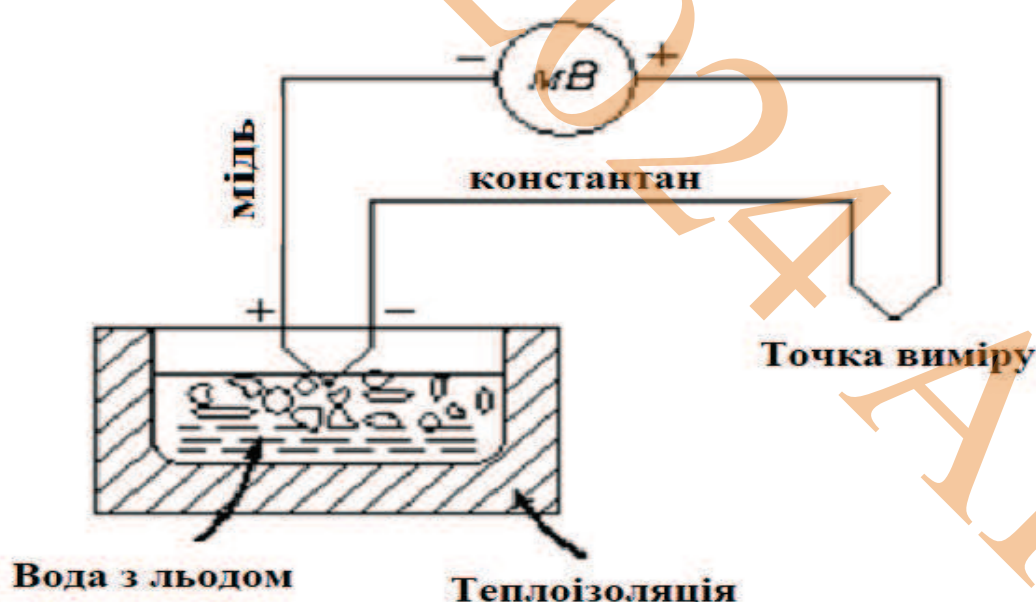


Рисунок 1.7 — Схема застосування диференційної мідь-константанової термопарі із термостатуванням холодного спаю [4].

Варіант конструктивного виконання термопари та вигляд її «гарячого», тобто, робочого спаю наведено на рис 1.8 а) та б), відповідно.



Рисунок 1.8 — а) варіант конструктивного виконання термопари б) типовий вигляд робочого спаю.

Слід зауважити, що в багатьох випадках застосовують також безконтактні методи вимірювання температури за допомогою пірометрів, інфрачервоних датчиків. Наприклад, інфрачервоні датчики вимірюють теплове випромінювання тіл або поверхонь для визначення їх температури [4].

1.4 Типові схемні рішення регуляторів температури

Промисловість випускає значну номенклатуру регуляторів температури з широким спектром функціональних можливостей щодо реалізації законів регулювання, підбору коректуючих коефіцієнтів, що дає можливість прецизійного регулювання температури об'єкта. Як правило, це складні універсальні пристрої, які розробляються колективом інженерів відповідних конструкторських бюро. Поряд з тим, є багато розробок більш вузького застосування, які пропонуються в технічній літературі окремими авторами. В минулі роки вони виконувалися на базі дискретних елементів, пізніше – на аналогових і цифрових мікросхемах. В даний час розробляються, як правило, мікроконтролерні терморегулятори, що, з одного боку, дає можливість

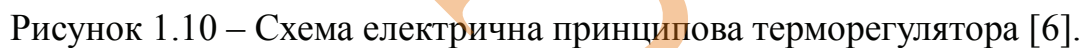
Універсальний термостат на мікроконтролері PIC16F628 запропоновано в роботі [5], схема електрична принципова даного пристрою наведена на рис. 1.8. Даний регулятор розроблено для температурного діапазону від -25°C до $+75^{\circ}\text{C}$ з кроком $0,25^{\circ}\text{C}$. В пристрої передбачена можливість регулювання температурного гістерезису комутації виконавчого елемента даної системи автоматичного управління. Надто малий гістерезис призводить до дуже стабільної температури, але має суттєвий недолік: система нагрівання або охолодження вмикається і вимикається з високою частотою, що зазвичай призводить до додаткового зношування компресора (охолодження). Гістерезис можна регулювати від $0,1^{\circ}\text{C}$ (дуже стабільна температура) до 10°C (практично ніякого контролю) з кроком $0,1^{\circ}\text{C}$ [5].

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

Основний компонент у цій схемі – мікроконтролер PIC16F628. Як датчик температури вибраний DS1820. Джерелом тактових імпульсів для мікроконтролера є керамічний резонатор на 4 МГц із вбудованими конденсаторами. Управління охолодженням та нагріванням здійснюється шляхом програмування мікроконтролера. Очевидно, що при охолодженні система повинна включатися, коли температура надто висока, а при нагріванні необхідно вживати відповідних заходів, коли температура може стати надто низькою[5].

Порядок налаштування термостата за допомогою 3-х кнопок наступний. Утримуємо кнопку « Mode », доки не з'явиться напис « set temperature », після чого можна покроково встановити бажану температуру за допомогою кнопок + та - . Повторним натисканням кнопки " Mode " можна встановити бажаний гістерезис за допомогою кнопок + та - . Гістерезис 1°C означає, що при заданому значенні температури 20°C і нагріванні вихід стає активним, коли температура падає нижче 19°C ($20 - 1$) і відключитися, коли температура досягає 21°C ($20 + 1$)[5].

Двопозиційний принцип регулювання температури застосовано також в терморегуляторі [6]. В даній розробці застосовано мікроконтролер PIC16F676, характеристики якогонайбільш оптимально підходять для створення вимірювальних пристроїв та пристроїв автоматики [6]. Для генерації тактової частоти застосовано кварцовий резонатор 20 МГц. Індикація температури реалізована в динамічному режимі на трирозрядному світлодіодному індикаторі із спільним катодом, управління сегментами якого здійснено через мікросхему зсуваючого регістра 74НС164.



Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Методика розробки програми для мікроконтролера ATtiny13

При створенні програмного забезпечення вирішено використовувати мову програмування «асемблер» замість «си», оскільки потрібно максимально ефективно використати обсяг програмної пам'яті в 1К [14]. Перша група операцій програми виробляє установку вершини стека. Стек використовує пам'ять SRAM мікроконтролера. Встановлюємо покажчик стека на кінець цієї пам'яті (пам'ять має 64 байта). Системна змінна RAMEND завжди містить адресу останньої клітинки пам'яті. Тобто в нашому випадку $RAMEND = 64$ [14] `ldi R24, RAMEND`; Установка покажчика стека `out SPL, R24`; $SP = RAMEND$ Наступна група операцій встановлює режим роботи порту PORTB. Режими кожної лінії порту встановлюються так, як показано на рис.2.1.

DDRB	Logical	Направл	Выв	Название	Функция
PB0	1	Выход	5	PB0/OC0A	PWM Вых (цифр)
PB1	1	Выход	6	PB1	LED Вых (цифр)
PB2	0	Вход	7	PB2/ADC1	ADC Вход (Аналог)
PB3	0	Вход	2	PB3	Switch Вход (Цифр)

Рисунок 2.1 – Ініціалізація Аналого-цифрового перетворювача [14]

Наступна група команд виконує ініціалізацію вбудованого АЦП мікроконтролера ATtiny13. Для того, щоб контролер зміг використати свій вбудований АЦП необхідно слідувати наступним вимогам.

Вибрати коефіцієнт попереднього розподілу та активувати АЦП, попередній дільник використовується для розподілу тактової частоти. Тактова частота використовується в схемі послідовних наближень АЦП для перетворення аналогового сигналу [14].

Щоб отримати максимальний дозвіл потрібно вибирати частоту в межах від 50 кГц до 200 кГц. У даній конструкції використовується розподіл на 64, тому тактова частота складатиме приблизно 150 кГц (9600000 Гц / 64).

Завдяки тому, що не використовується автозапуск перетворення (ADATE) і переривання від АЦП (ADIF і ADIE), то можна встановити ці біти таким чином щоб, встановити коефіцієнт ділення 64 (ADPS2, ADPS1 і ADPS0) і включити АЦП (ADEN). Запис значення в регістр стану АЦП проводиться таким чином:

```
ldi R16,0b10000110
```

```
out ADCSRA, R16; Включити АЦП, з коефіцієнтом пред ділення 64
```

Вибрати джерело запуску процесу перетворення АЦП

Використовується автономний режим запуску, значить, вбудований АЦП буде сам періодично запускати процес перетворення, як тільки програма дозволить виконувати цей процес. [14]

Таким чином, записавши в усі три біта управління режимами запуску АЦП (ADTS2, ADTS1 і ADTS0) рівень логічного нуля, переводиться АЦП в автономний режим роботи:

```
ldi R16,0b00000000
```

```
out ADCSRB, R16; Автономний режим роботи
```

Для вибору каналу АЦП повинні вказати, який з каналів АЦП будемо використовувати, вибравши значення бітів управління мультиплексором АЦП (MUX1 і MUX0) в регістрі управління мультиплексором (ADMUX).

Вибераємо значення внутрішньої опорної напруги, що дорівнює 1,1 вольт, записавши у відповідний біт (REFS0) значення логічної "1".

Коли вбудований АЦП закінчить процес перетворення, результат вимірювання запишеться в пару регістрів ADCH і ADCL. Однак в цьому проекті використовується 8-розрядне значення.

Тому вибираємо режим зсуву вліво результату вимірювання. Для цього встановлюємо біт ADLAR в регістрі ADMUX в одиницю і будемо зчитувати результат тільки з реєстру ADCH.

ldi R16,0b01100001

out ADMUX, R16; Reference 1.1 Volt, Left Adjust, Channel: PB2

Відключення функції цифрового входу для аналогового каналу. Кожен розряд порту введення-виведення в звичайному режимі працює як вхід для цифрового сигналу [23].

Якщо даний вихід мікросхеми використовуємо як вхід АЦП, то рекомендується відключити функцію цифрового входу. Це дозволяє зменшити струм споживання і збільшити точність перетворення.

Записавши в біт ADC1D значення логічної "1", відключаємо функцію цифрового входу для лінії порту PB2:

ldi R16,0b00000100; Відключення цифрового входу для PB2

out DIDR0, R16

Ініціалізація режиму широтно-імпульсної модуляції

Мікроконтролер ATtiny13 має два незалежні канали ШІМ. Вихід каналу, який використовуємо в цьому проекті, називається OC0A (виходить на PB0). А інший канал називається OC0B (виходить на PB1).

Для включення вбудованого ШІМ мікроконтролера ATtiny13 використовуємо наступні кроки.

Вибір режиму генерації сигналу

Мікроконтролер ATtiny13 підтримує режиму ШІМ. Перший з них називається "Fast PWM" (швидкий ШІМ). Він забезпечує найвищу частоту вихідного сигналу. Другий режим називається "Phase correct PWM" (ШІМ з коректною фазою).[14]

Цей режим забезпечує симетричну зміну, як переднього, так і заднього фронтів вихідного сигналу. Цей режим працює на більш низьких частотах у порівнянні з "Fast PWM". В рамках цього проекту будемо використовувати "Fast PWM"

Встановивши COM0A1 = 1 і COM0A0 = 0, вибираємо режим скидання OC0A при збігу, і установки OC0A при досягненні кінця. Це означає, що в

той момент, коли значення рахункового регістра TCNT0 таймера виявиться рівним значенню регістра OCR0A, вихід OC0A (PB0) буде скинутий в "0".[14]

Коли ж таймер дорахував до свого максимального значення (TCNT0 = 255), на виході OC0A встановиться логічна "1". Змінюючи значення OC0A, можна змінювати ширину вихідного імпульсу. Режим "Fast PWM" можна вибрати, встановивши в регістрі TCCR0B біт WGM2 = 0, а в регістрі TCCR0A біти WGM1 = 1 і WGM2 = 1.[14]

```
ldi R16,0b10000011
```

out TCCR0A, R16; Установка режиму Fast PWM, Скидання OC0A

Вибір тактової частоти на вході таймера [14]

Серце вбудованого ШІМ - 8-розрядний таймер / лічильник. Для формування вихідного сигналу існує спеціальна схема порівняння. вона безперервно порівнює значення рахункового регістра таймера TCNT0 зі значенням регістра OCR0A і використовує результат порівняння для формування вихідного сигналу.

Для того щоб вся ця схема запрацювала, ми повинні подати на вхід таймера тактовий сигнал. Як тактового сигналу вибирається один з виходів зі спеціального вбудованого дільника тактової частоти. Для вибору одного з цих сигналів служить спеціальний регістр TCCR0B. [14]

ВУ цьому проекті використовуються сигнал з виходу дільника з коефіцієнтом ділення 256. Лістинг програми наведено нижче.

Program: t13pwm.asm ;

Description: Tiny13 Fast PWM and ADC Fan Controller ;

Last Updated: 10.05.20 ;

Author: RWB

IDE / Compiler: Atmel AVR Studio 4.14 ;

Programmer: AvrOspII v5.47 from Mike Henning ;

AVRJazz Tiny2313 Board

include "tn13def.inc" ;

Тактова частота мікросхеми Tiny13 за замовчуванням

					МР.ЛБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						30
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

```

equ F_CPU = 9600000
cseg ;
Починаємо з нульової адреси пам'яті програм
org 0
main: ldi R24, RAMEND; Установка показника стека
out SPL, R24; SP = RAMEND ;
Ініціалізація портів введення виведення
ldi R16,0b00000011; Виставляємо PB0 = вихід, PB1 = вихід, PB2 = вхід,
PB3 = вхід, PB4 = вихід
out DDRB, R16; DDRB = 0x03 ;
ініціалізація АЦП
ldi R16,0b10000110
out ADCSRA, R16; Включаємо АЦП, з коефіцієнтом ділення 64
ldi R16,0b00000000
out ADCSRB, R16; Автономний режим роботи
ldi R16,0b01100001
out ADMUX, R16; Внутрішнє джерело опорної напруги 1.1 В, режим
зсуву результату вліво, канал: PB2 (ADC1)
ldi R16,0b00000100;Вимикаємо функцію цифрового входу для PB2
out DIDR0, R16 ;
Ініціалізація ШІМ (PWM)
ldi R16,0b10000011
out TCCR0A, R16; Режим Fast PWM, скидання OC0A
ldi R16,0b00000100
out TCCR0B, R16; Використовуємо коефіцієнт Ділен  $f_{clk} / 256$ 
Ініціалізація прапора кнопки і регістра PORTB
ldi R17,0; Ініціалізація прапора кнопки
out PORTB, R17
lb_00: sbic PINB, PB3; перевіряємо умову (PB3 == 0)
rjmp lb_20; якщо немає, переходимо до lb_20

```

```

ldi R19,5; використовуємо підпрограму затримки
rcall delay_func
sbic PINB, PB3; якщо (PB3 == 0), читаємо знову
rjmp lb_20; інакше переходимо до lb_20
cpi R17,1; Обробка натискання кнопки
brne lb_10; якщо (R17! = 1) переходимо до lb_10
ldi R17,0; інакше R17 = 0
ldi R16,0; Вимикаємо генератор ШИМ
out TCCR0A, R16; TCCR0A = 0
out TCCR0B, R16; TCCR0B = 0
cbi PORTB, PB0; вимикаємо мотор
cbi PORTB, PB1; вимикаємо світлодіод
rjmp lb_20
lb_10: ldi R17,1; R17 = 1
ldi R16,0b10000011
out TCCR0A, R16; Режим Fast PWM, скидання OCR0A
ldi R16,0b00000100
out TCCR0B, R16; Використовуємо дільник fclk / 256
sbi PORTB, PB1; включаємо світлодіод
lb_20: cpi R17,1; якщо (R17! = 1)
brne lb_40; переходимо до lb_50;
sbi ADCSRA, ADSC; Старт АЦП перетворення
lb_30: sbic ADCSRA, ADSC; для (ADCSRA & (1 << ADSC))
rjmp lb_30
in R16, ADCH; Читаємо результат без урахування 2-х останніх біт з
ADCL
out OCR0A, R16; OCR0A = R16
cbi PORTB, PB1; вимикаємо світлодіод
mov R19, R16
rcall delay_func; Викликаємо функцію затримки (тривалість в R19)

```

sbi PORTB, PB1; включаємо світлодіод

lb_40: mov R19, R16

rcall delay_func; Викликаємо функцію затримки (тривалість в R19)

rjmp lb_00

Проста функція затримки

delay_func:

delay0: ldi R20,25; R20 = 25

delay1: ldi R21,255; R21 = 255

delay2: dec R21; Зменшуємо R21 на одиницю

brne delay2; якщо (R20! = 0) переходимо до мітці delay2

dec R20; Зменшуємо R20 на одиницю

brne delay1; якщо (R20! = 0) переходимо до мітці delay1

dec R19; Зменшуємо R19 на одиницю

brne delay0; якщо (R19! = 0) переходимо до мітці delay0

ret; Вихід їх підпрограми

exit [14]

2.2. Налаштування програмного забезпечення

Після компіляції та налаштування повинні отримати такий результат що зображено на рис. 2.2.

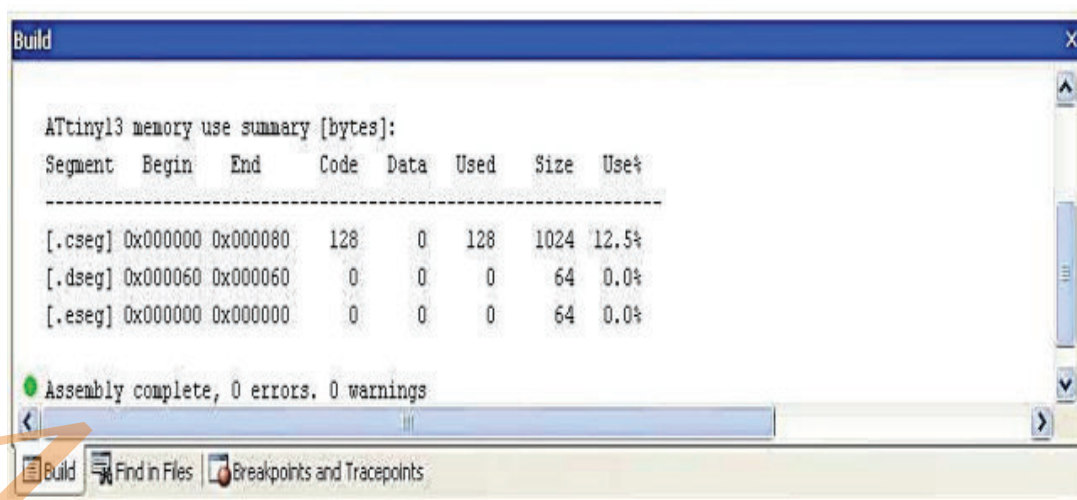


Рисунок – 2.2. Результат налагодження мікроконтролера в програмному середовищі Build [14]

Власне кодом зайнято близько 128 байт із загального (1024 байт) обсягу програмної пам'яті. Цей дуже хороший результат, так як залишається ще місце на удосконалення програми на майбутнє.

Як видно з рис.2.2 1К програмної пам'яті мікроконтролера ATtiny13 цілком достатньо для нескладного пристрою використовує ШІМ і АЦП. Тепер можна зашивати код в мікроконтролер.

Але перш ніж зробити це необхідно перевірити мікросхему ATtiny13 чи правильно встановлені біти захисту та інші FUSE перемикачі [14]

Для правильної роботи описуваного пристрою в програмі OvrOspII біти FUSE перемикачів повинні бути встановлені таким чином як зображено на рис.2.3.[14]

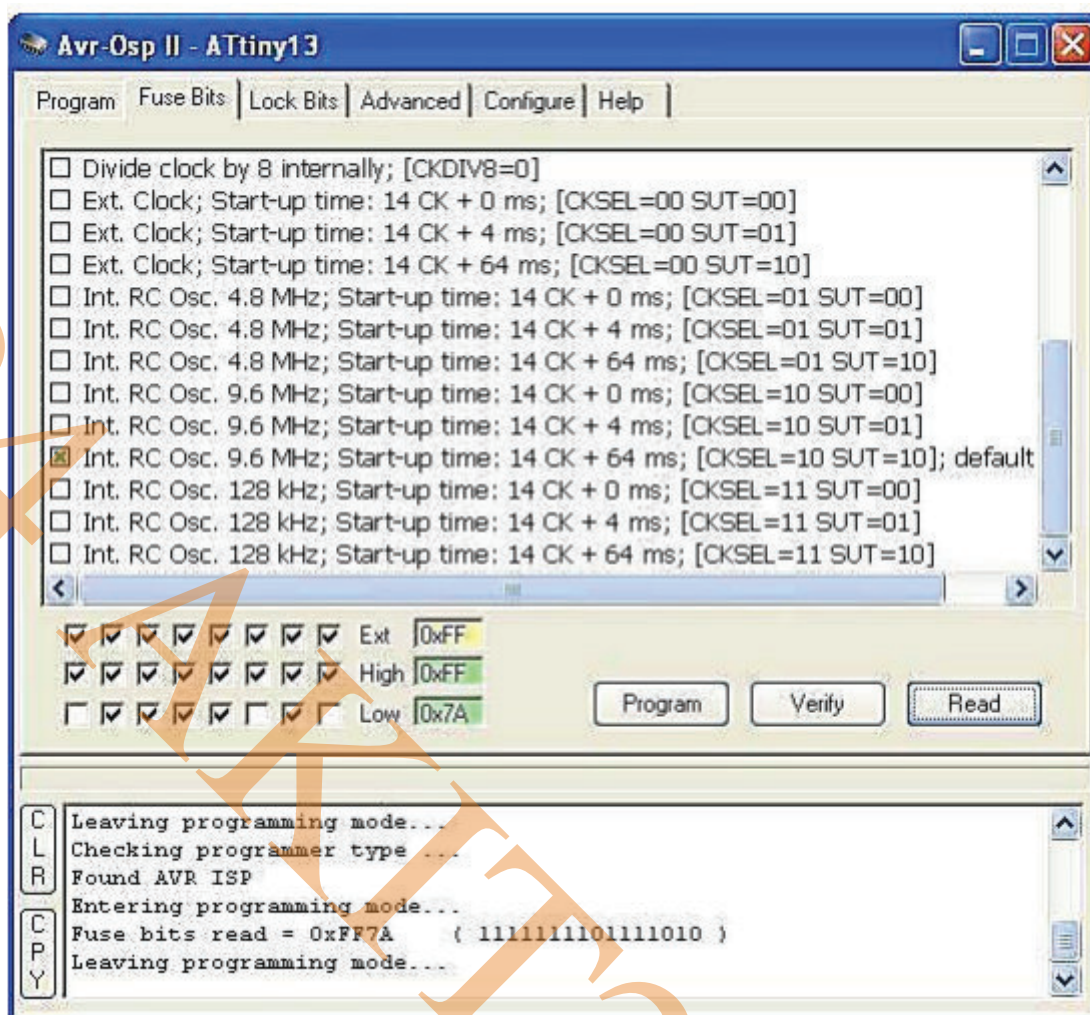


Рисунок – 2.3. Програмне середовище OvrOspII де встановлені біти FUSE перемикачів [14]

3. Розробка системи автоматичного регулювання температури муфельної печі

3.1 Схема електрична структурна терморегулятора

В даній роботі застосовано принцип системи автоматичного управління за відхиленням від заданого значення, який базується на порівнянні вихідного сигналу із заданим вхідним сигналом. Схему електричну структурну регулятора температури муфельної печі, яка реалізує замкнену САУ із зворотнім зв'язком, наведено на рис 2.1.

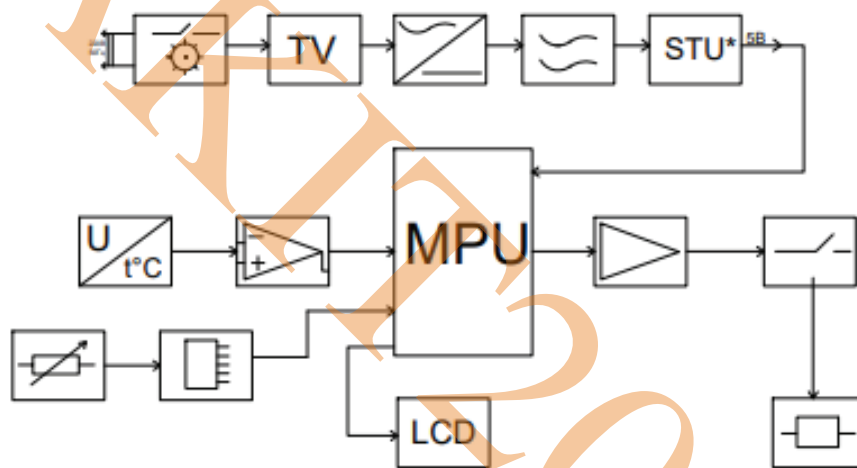


Рисунок 3.1 — Схема електрична структурна терморегулятора.

Перелік складових елементів схеми:

1. Енкодер KY-040 Rotary Encoder
2. Вузол індикації та комутації блоку живлення
3. Цифрово-аналоговий перетворювач (ЦАП) MCP4725
4. Силовий трансформатор
5. Мікроконтролер
5. Містковий випрямляч
6. LED індикатор 16x2

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

7. Згладжувальний фільтр
8. Підсилювач
9. Датчик температури
10. Інтегральний стабілізатор напруги +5В
11. Реле
11. Муфельна піч
14. Операційний підсилювач для термопари OPA277 (Texas Instruments)

Розглянемо призначення вищеназваних функціональних вузлів.

Блок живлення відповідає за забезпечення всієї системи стабільною електроенергією. Він отримує змінну напругу від мережі (220 В) і передає її на трансформатор для подальшого зниження напруги.

Трансформатор знижує вхідну напругу до рівня, придатного для живлення електронних компонентів. Це є необхідним етапом для безпечної роботи системи.

Містковий випрямляч, виконаний на основі діодів, перетворює змінний струм на постійний. Цей компонент формує основу для подальшої фільтрації сигналу.

Після випрямлення напруги виникають пульсації. Для їх усунення використовується згладжувальний фільтр, зазвичай у вигляді конденсаторів, які вирівнюють рівень напруги.

Стабілізатор напруги забезпечує постійний рівень вихідної напруги, незалежно від коливань у вхідній напрузі чи споживання потужності компонентами. Це забезпечує стабільну роботу системи.

Мікроконтролер є "мозком" системи. Він обробляє вхідні дані, які надходять від датчика температури, та керує іншими компонентами, такими як реле та LCD-дисплей. Крім того, він приймає сигнали від енкодера, що дозволяє користувачеві задавати параметри системи, наприклад бажану температуру.

МСР4725 виконує функцію цифро-аналогового перетворення. Він отримує цифровий сигнал від мікроконтролера, перетворює його на

аналоговий і передає далі в ланцюг. Це особливо важливо для точного керування іншими аналоговими компонентами системи.

Операційний підсилювач приймає сигнал від ЦАП і підсилює його для керування реле. Він забезпечує стабільність і точність роботи виконавчих компонентів системи.

Реле відповідає за вмикання і вимикання нагрівального елемента муфельної печі. Воно отримує сигнали від операційного підсилювача і реалізує фізичне замикання або розмикання електричного кола.

Муфельна піч це основний виконавчий елемент системи. Вона нагрівається для досягнення заданої температури, яку контролює мікроконтролер.

Датчик температури вимірює реальну температуру в муфельній печі і передає дані до мікроконтролера. На основі цих даних здійснюється зворотній зв'язок, щоб система могла реагувати на відхилення від заданої температури.

LCD дисплей використовується для виводу інформації про стан системи. Він показує поточну температуру, задану температуру та інші дані, які можуть бути корисними для користувача.

Енкодер дозволяє користувачеві вручну вводити параметри, такі як бажана температура. Він передає сигнали до мікроконтролера, який інтерпретує ці дані і налаштовує роботу системи відповідно до заданих параметрів.

Система підключається до електромережі 220 В. Напруга через трансформатор знижується до необхідного рівня для роботи електронних компонентів 5 В. Далі змінна напруга проходить через мостовий випрямляч, який перетворює її в постійну. Після цього фільтр згладжує пульсації напруги, а стабілізатор напруги забезпечує її постійний рівень. Це необхідно, щоб забезпечити стабільну роботу мікроконтролера, датчиків та інших компонентів. Задаємо параметри системи (наприклад, бажану температуру) за допомогою енкодера KY-040. Цей енкодер передає імпульсні сигнали

мікроконтролеру. Поворот енкодера дозволяє регулювати температуру, а натисканням кнопки енкодера можна, наприклад, підтвердити вибір або перейти до іншого параметра.

Мікроконтролер є центром управління. Він обробляє:

1. Вхідні дані від енкодера (задана температура).
2. Дані від датчика температури, який вимірює реальну температуру в печі.

На основі цих даних мікроконтролер обчислює відхилення між заданою температурою та поточною. Якщо реальна температура нижча за задану, мікроконтролер посилає сигнал на подальші компоненти, щоб включити нагрівання. Мікроконтролер передає цифровий сигнал на ЦАП (МСР4725), який перетворює його в аналоговий. Це потрібно, оскільки багато виконавчих елементів (наприклад, операційний підсилювач) працюють з аналоговими сигналами.

Аналоговий сигнал від ЦАП передається на операційний підсилювач ОРА277, який підсилює його до рівня, достатнього для активації реле. Цей підсилювач забезпечує стабільність і точність роботи системи. Підсилений сигнал від операційного підсилювача подається на реле, яке виконує функцію фізичного вмикання та вимикання електричного кола нагрівача муфельної печі. Якщо температура нижча за задану, реле замикає ланцюг, і нагрівач вмикається. Якщо температура досягла потрібного рівня, реле розмикає ланцюг, і нагрівач вимикається.

Муфельна піч отримує живлення через реле і нагрівається до необхідної температури. Цей процес повторюється циклічно для підтримання постійного рівня температури. Датчик температури постійно вимірює поточну температуру в муфельній печі. Ці дані передаються на мікроконтролер, який порівнює їх із заданою температурою. Якщо виникає відхилення, система автоматично коригує режим роботи (вмикає чи вимикає нагрів).

На LCD дисплеї відображається поточна інформація реальна температура в печі, задана температура, Стан системи (наприклад, нагрів активний/вимкнений). Це дозволяє користувачеві контролювати процес у реальному часі. Система отримує живлення і ініціалізується. Задаємо необхідну температуру через енкодер.

Мікроконтролер обробляє введені дані та вимірювання датчика температури.

Через ЦАП і підсилювач передається сигнал на реле, яке керує нагрівом.

Датчик температури здійснює постійний контроль, передаючи інформацію про реальну температуру до мікроконтролера.

Система автоматично підтримує температуру, вмикаючи і вимикаючи нагрівальний елемент у міру необхідності.

На дисплеї відображається вся необхідна інформація для моніторингу стану системи.

Ця система працює циклічно і постійно реагує на зміни температури, забезпечуючи точне та стабільне регулювання нагріву в муфельній печі.

3.2 Вибір елементної бази

Нижче наведено обґрунтування вибору основних компонентів системи автоматичного регулювання температури муфельної печі.

3.2.1 Електромагнітне реле [7].

Реле SRD-05VDC-SL-C – це електромеханічний компонент, який виконує функцію комутації електричних кіл за допомогою електромагнітного принципу. У вашій магістерській роботі воно є важливою частиною системи автоматичного регулювання температури муфельної печі. Його основна функція полягає в тому, щоб забезпечувати вмикання та вимикання нагрівача потужністю 1 кВт відповідно до сигналів, що надходять від мікроконтролера, в залежності від встановленої і поточної температури. Нижче наведено характеристики даного реле а також його загальний вигляд (рис 2.2).

Номінальна робоча напруга котушки: 5В (мін. 3.75 В, макс. 6.5 В)

					МР.ПБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						40
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Номінальний робочий струм котушки: 71 мА
 Опір котушки: 70 Ом
 Споживана потужність: 0,36 Вт
 Максимальний комутований струм: 10А
 Максимальна комутована змінна напруга: 250 В
 Робоча температура: -25°C..+70°C
 Тип: SRD-5VDC-SL-C
 Струм живлення обмотки: постійний
 Класифікація реле з початкового стану: моностабільне
 Поляризація: нейтральна
 Кількість обмоток: 1
 Напруга відпускання: 0.5 В
 Контактний набір: 1 замикання/розмикання
 Час спрацьовування: 10мс
 Час відпускання: 5мс
 Маса: 5г

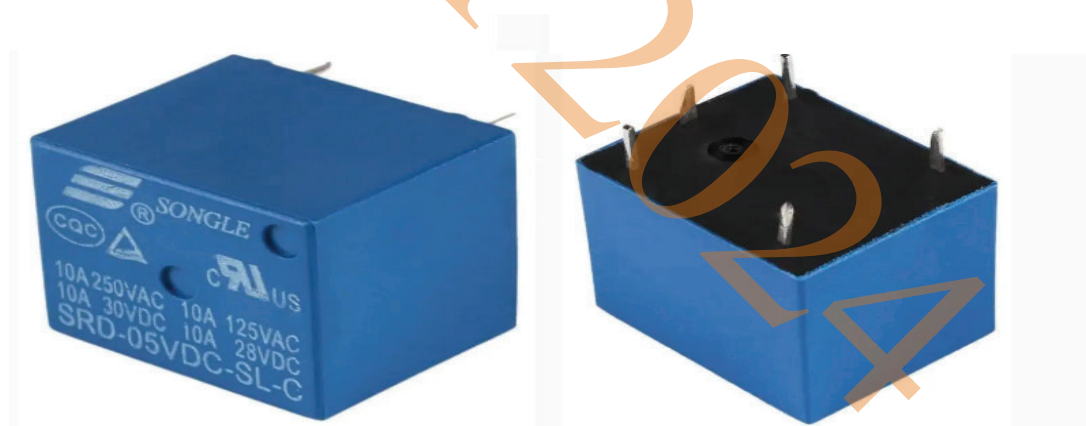


Рисунок 3.2 — Електромеханічне реле

Реле працює як ключ, який керується низьковольтним сигналом від мікроконтролера. У системі мікроконтролер ATTINY13A аналізує дані від датчика температури (термопари типу К) і порівнює їх із заданою температурою. Коли температура нижче заданого рівня, мікроконтролер подає сигнал на базу транзистора, який активує котушку реле. Це призводить

до замикання контактів реле, що з'єднують ланцюг нагрівача з джерелом живлення. Коли температура досягає потрібного значення, реле розмикається, відключаючи нагрівач.

У системі реле забезпечує високу надійність роботи за рахунок своєї здатності комутувати значні струми – до 10 А при напрузі до 250 В. Це дозволяє підтримувати ефективну роботу нагрівача, навіть якщо потужність змінюється через інерційність муфельної печі. Завдяки цьому реле сприяє підтриманню точної температури в межах похибки, яка відповідає технічному завданню. Ще одна важлива роль реле полягає у забезпеченні електричної ізоляції між високовольтною і низьковольтною частинами системи. Контроль з боку мікроконтролера відбувається через низьковольтний ланцюг, що дозволяє уникнути ризиків пошкодження чутливих компонентів електроніки. Таким чином, реле виступає як захисний бар'єр між елементами системи.

У контексті вашої роботи, реле SRD-05VDC-SL-C не тільки є ключовим компонентом для безпечного і точного керування нагрівачем, але й дозволяє інтегрувати цю функцію в мікроконтролерну систему з мінімальними витратами та високою енергоефективністю.

3.2.2 LCD дисплей та модуль ІІС I2C SPI

LCD-дисплей із модулем I2C є важливим компонентом у вашій системі автоматичного регулювання температури муфельної печі, оскільки він слугує засобом візуалізації поточних параметрів та стану системи. Розглянемо детальніше, як він працює і яку роль виконує у роботі.

LCD-дисплей дозволяє виводити текстову інформацію у реальному часі. Під час роботи це можуть бути поточна температура, задані параметри або повідомлення про стан системи (наприклад, аварійні сигнали). Модуль I2C, інтегрований у дисплей, значно спрощує його підключення: замість 6-8 проводів, як для стандартного дисплея, використовується лише 4 (SDA, SCL,

живлення та заземлення). Це дозволяє зберігати вільні порти мікроконтролера для інших компонентів

Переваги I2C-дисплея мінімізація використання пінів: У вашій системі потрібно зекономити порти мікроконтролера, адже вони також використовуються для підключення термопари, реле та інших елементів. Завдяки бібліотеці LiquidCrystal_I2C, розробленій для Arduino, легко програмувати виведення тексту на дисплей. Наприклад, функція `lcd.print()` дозволяє вивести текст на екран у кілька рядків коду, за допомогою регулювання яскравості можна налаштувати підсвітку дисплея для кращого зчитування інформації в різних умовах.

LCD дисплей (Рис.2.3), з можливістю підключення до Arduino. Має два рядки, в кожному по 16 символів.

Характеристики LCD дисплея.

Розміри 80мм x 36 мм;

Температура роботи від 0°C до 50°C;

Блакитна підсвітка;

Білий колір символів;

Розмір символів 4,35 x 2,95мм;

Формат дисплею 16 x 2;

Видима область 64,5 x 13,8мм;

Напруга живлення 5В.

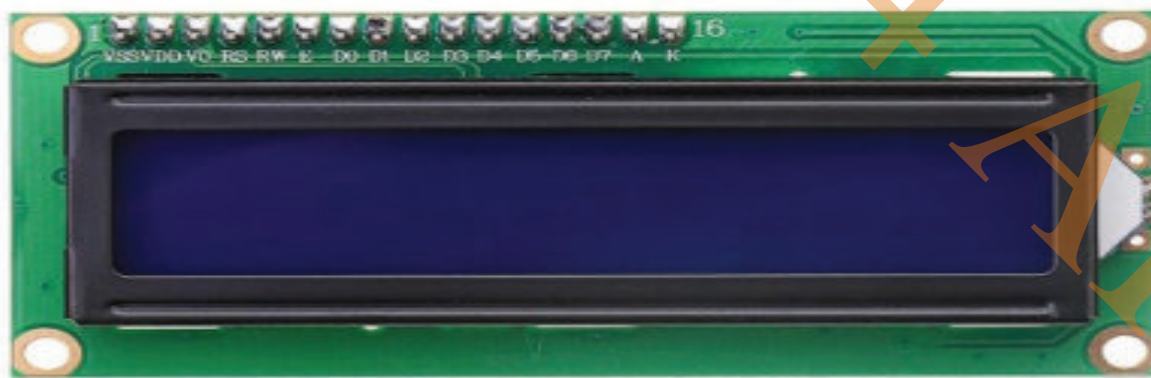


Рисунок 3.3 — LCD дисплей

I2C інтерфейсний модуль (Рис.2.4) на мікросхемі PCF8574T розширює кількість портів введення або виводу для контролерів Arduino, мікроконтролерів STM8 і STM32 і мінікомп'ютерів Raspberry Pi і Orange Pi. Можна використовувати як інтерфейсну плату для підключення LCD 1602 і 2004, а також як самостійний пристрій. Щоб регулювати контрастність зображення встановлений змінний резистор. Для нормальної роботи дисплея потрібно відрегулювати його контрастність. При використанні інтерфейсного модулю як розширювача портів введення або виводу слід враховувати те, що вихід P3 має інверсний вихід з відкритим колектором.

Характеристики інтерфейсного модуля I2C.

- Мікросхема інтерфейсу: PCF8574AT
- Інтерфейс: I2C;
- Діапазон адрес I2C:
- PCF8574T - 0x20-0x27;
- PCF8574AT - 0x38-0x3f.
- Кількість можливих підключень однотипних модулів: 8;
- Напруга живлення: 5 В;
- Розмір: 5.2см x 1.8см x 1.4см;

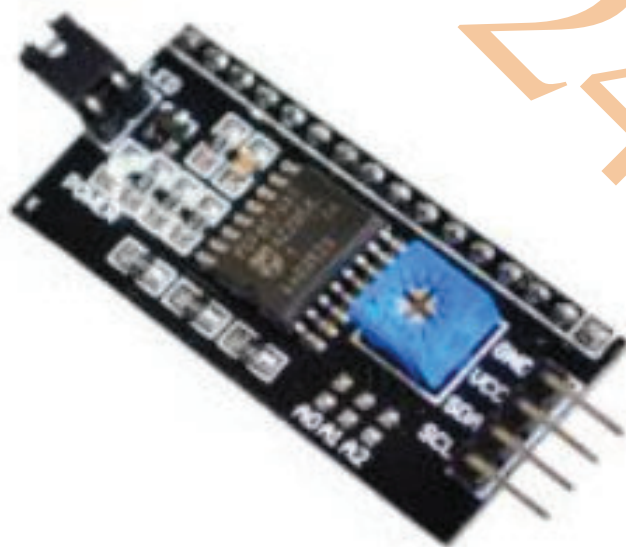


Рисунок 3.4 — модуль для LCD дисплея.

У цій роботі системі автоматичного регулювання температури дисплей:
Виводить поточну температуру: Інформація від термопари обробляється мікроконтролером і відображається на екрані.

Інформує про параметри: Користувач може бачити задану температуру, налаштування режимів роботи тощо.

Діагностика системи: Виведення повідомлень про несправності (перевищення температури, помилки датчиків) дозволяє оперативно реагувати на проблеми.

З'єднання SDA і SCL з'єднуються з відповідними піном мікроконтролера (наприклад, A4 і A5 на Arduino), VCC і GND забезпечують живлення. Після підключення завантажується бібліотека LiquidCrystal_I2C, яка містить функції для управління дисплеєм. За допомогою функцій lcd.setCursor(x, y) і lcd.print("Текст") виводиться інформація в потрібному місці екрана.

У ході експериментів у магістерській роботі дисплей допоможе контролювати і підтверджувати правильну роботу регулятора температури. Він стане зручним інтерфейсом для користувача, зменшуючи необхідність додаткового обладнання для моніторингу системи.

3.2.3 Операційний підсилювач MCP601 [8].

MCP601 є одним з популярних операційних підсилювачів виробництва Microchip Technology. Ця мікросхема використовується для підсилення сигналів в електронних схемах і має широкий спектр застосувань.

MCP601 використовує передову технологію CMOS від Microchip, яка забезпечує низький струм зміщення. MCP601 працює в режимі однополярного живлення, споживаючи при цьому менше 325 мкА.

MCP601 доступний у стандартних 8-вивідних корпусах PDIP, SOIC. Цей підсилювач ідеально підходить для керування промисловими процесами, малопотужними пристроями, що працюють від акумуляторів.

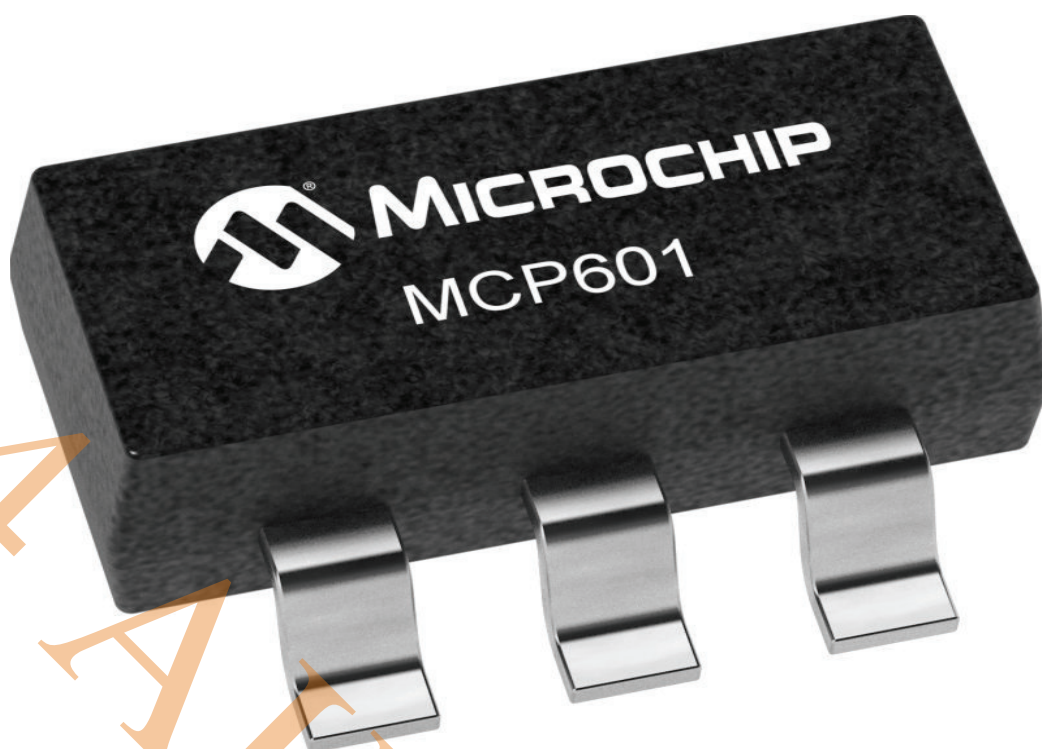


Рисунок 3.5 — Операційний підсилювач MCP601

Низький вхідний струм зсуву: 1 пА (тип.)

Низький струм спокою: 230 мкА

Низька вхідна напруга зміщення: 2 мВ (макс.)

Пристрій підтримує вихідний діапазон напруги Rail-to-Rail, тобто його вихідний сигнал може наближатися до напруги живлення. Це дозволяє максимально використовувати весь доступний діапазон, що важливо для точності вимірювань. MCP601 також характеризується високим вхідним імпедансом, що зменшує струмові втрати на вході, і низьким рівнем шуму, що забезпечує якість сигналу навіть у складних умовах роботи.

Цей операційний підсилювач є трикаскадним. Вхідний каскад забезпечує диференціальне підсилення сигналу і високу точність, мінімізуючи шум. Середній каскад відповідає за основне підсилення напруги, а вихідний каскад забезпечує малий вихідний опір та можливість роботи з великими навантаженнями. MCP601 стабільно працює в діапазоні частот до 1 МГц при

коефіцієнті підсилення 1, а швидкість наростання сигналу складає 0.3 В/мкс, що робить його придатним для систем із середньою динамікою сигналів.

Підсилювач часто використовується у вимірювальних системах для підсилення слабких сигналів з датчиків, таких як термопари або терморезистори. Rail-to-Rail вихід дозволяє отримати точні результати без викривлень. MCP601 також застосовується в активних фільтрах, портативній електроніці та блоках обробки сигналів. Його малий розмір та низька вартість дозволяють інтегрувати його у компактні системи без значного збільшення собівартості.

MCP601 відзначається високою стабільністю параметрів навіть за умов змін температури або напруги живлення, що робить його надійним компонентом для використання в точних аналогових схемах. Зокрема, цей підсилювач ідеально підходить для енергоефективних пристроїв, які вимагають високої точності вимірювання та обробки сигналів.

Приклад використання у схемі вимірювання температури з термопарою MCP601 використовується для підсилення низьковольтного сигналу термопари перед його передачею до аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера. Rail-to-Rail вихід дозволяє отримувати точні результати без обмеження діапазону напруги.

3.3.4 Мікроконтролер ATTINY13A [9, 10].

ATtiny13 - низько споживаючий 8 бітний КМОП мікроконтролер з AVR RISC архітектурою. Виконуючи команди за один цикл, ATtiny13 досягає продуктивності 1 MIPS при частоті задаючого генератора 1 МГц, що дозволяє розробнику оптимізувати відношення споживання до продуктивності.

AVR ядро об'єднує систему команд і 32 робочих регістра загального призначення. Всі 32 регістра безпосередньо пов'язані з арифметико-логічним пристроєм (АЛУ), що дозволяє одержати доступ до двох незалежних регістрів при виконанні однієї команди. У результаті ця архітектура дозволяє

забезпечити в десятки разів більшу продуктивність, ніж стандартна CISC архітектура.

ATtiny13 має наступні характеристики: 1 КБ системно програмованої Flash пам'яті програми, 64 байтну EEPROM пам'ять даних, 64 1-байтове SRAM (статична ОЗП), 6 ліній введення - виведення загального застосування, 32 робочих регістри загального призначення, 8 бітний таймер/лічильник зі схемою порівняння, внутрішні і зовнішні джерела переривання, 4 каналний 10 бітний АЦП, програмований сторожовий таймер з вбудованим генератором і три програмно ініціалізуємих режими зниженого споживання. У режимі Idle зупиняється ядро, але ОЗУ, таймер/лічильник, АЦП, аналоговий компаратор і система переривань продовжують функціонувати. У режимі Power-down регістри зберігають своє значення, але генератор зупиняється, блокуючи всі функції приладу до наступного переривання або апаратного скидання. У режимі ADC Noise Reduction зупиняється обчислювальне ядро і всі модулі введення-виведення за винятком АЦП, що дозволяє мінімізувати шуми при виконанні перетворення.

ATtiny13 підтримується різними програмними засобами та інтегрованими засобами розробки, такими як компілятори C, макроасемблери, програмні відладчик/симулятори, внутрисхемні емулятори і ознайомлювальні набори

Ось деякі основні функції та характеристики мікроконтролера ATtiny13A:

а) Архітектура: 8-бітний AVR. Швидкість ЦП: Він працює на максимальній тактовій частоті 20 МГц.

б) Програмна пам'ять: має 1 КБ (1024 байт) флеш-пам'яті програм для зберігання програм користувача.

в) Пам'ять даних: має 64 байти SRAM (статична пам'ять з довільним доступом) для зберігання даних під час виконання програми.

г) EEPROM: має 64 байти EEPROM (електрично стирається програмована постійна пам'ять) для зберігання енергонезалежних даних.

					МП.ПБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						48
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

д) Контакти вводу/виводу: він має 12 контактів вводу/виводу, які можна використовувати як для цифрового введення/виведення, так і для функцій аналогового введення.

є) Таймери/лічильники: він має 8-бітний таймер/лічильник із можливістю ШІМ (широтно-імпульсної модуляції).

ж) АЦП: містить 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач із чотирма каналами.

з) Зв'язок: він не має вбудованої апаратної підтримки для протоколів зв'язку, таких як UART, SPI або I2C.

и) Робоча напруга: може працювати в діапазоні напруг від 1,8 В до 5,5 В

ATtiny13A часто використовується в програмах з низьким енергоспоживанням, де його невеликий розмір і низьке енергоспоживання роблять його придатним для різноманітних вбудованих систем і проектів.

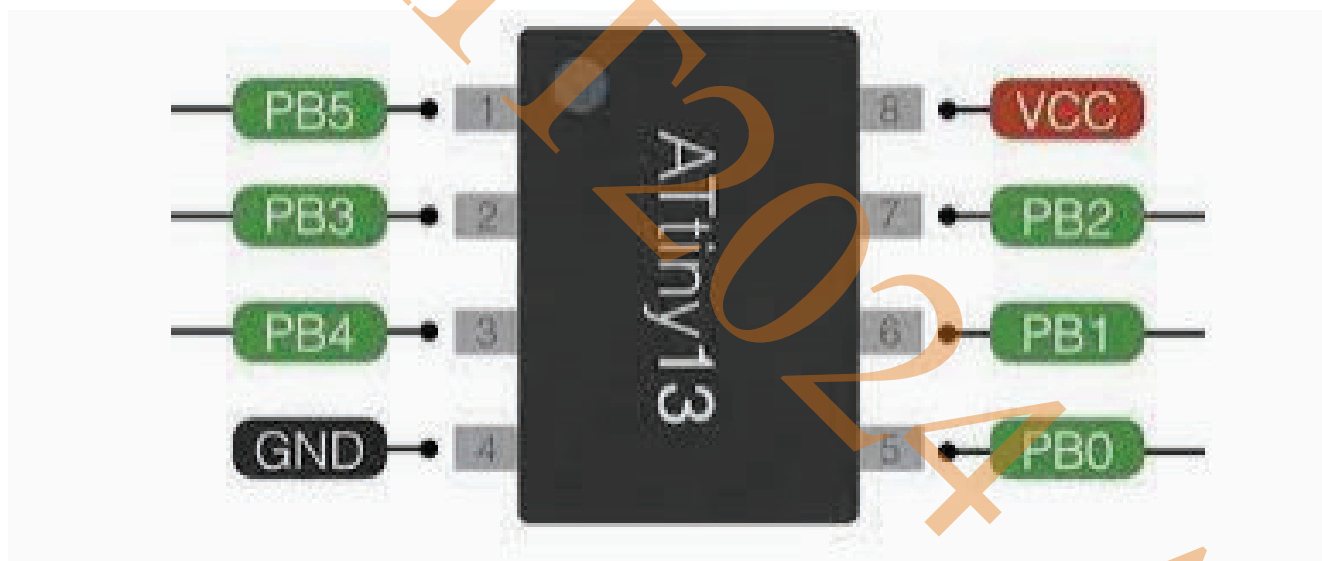


Рисунок 3.6 — Мікроконтролер Atyni13A

Управління периферійними пристроями: ATtiny13A може використовуватися для керування різними периферійними пристроями, такими як світлодіоди, дисплеї, кнопки, реле, двигуни та інші актуатори. Він може бути програмований для виконання конкретних функцій та реагування на зовнішні сигнали.

Вимірювання та контроль сигналів: Мікроконтролер може виконувати функції вимірювання та контролю аналогових та цифрових сигналів. Наприклад, він може використовуватися для вимірювання температури, освітленості, напруги або виконання інших типів сенсорних завдань.

3.2.5 Термопара К-типу (ТХА - хромель-алюмель) [11].

Застосування термопари для визначення температур в муфельних печах досить старий і надійний метод. По суті, термопара являє собою два дроти, що складаються зі спеціальних сплавів, які між собою зварені.

В процесі безпосередньої експлуатації при температурних вимірах на кінці термопари виробляється електричний струм, і чим вище термічна складова в печі, тим більше мілівольт на виході. За допомогою спеціального пристрою мілівольти можна виміряти і перевести їх в температурний еквівалент.

Термопара типу К (ТХА) рис 2.8 є однією з найпоширеніших типів термопар. Вона складається з двох провідників - хромель (NiCr) та алюмель (NiAl). Робоча напруга термопари типу К залежить від різниці температур між холодним і гарячим спаями. Залежність термоелектрорушійної сили від температури для різних типів термопар наведено на рис 3.7.

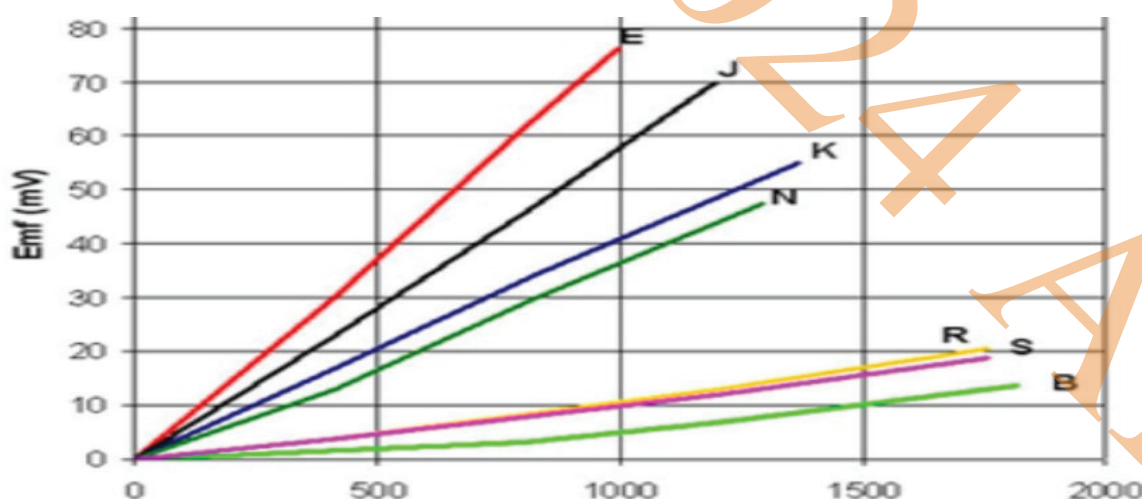


Рисунок 3.7 – Залежність термо-е.р.с. від температури для різних типів термопар

Точність: залежить від конкретної реалізації термопари та умов вимірювання, але зазвичай відносна похибка не більше $\pm 0,75\%$ (залежно від температури).

Застосування: Використовується в широкому спектрі промислових застосувань для вимірювання температури, зокрема в нафтогазовій промисловості, хімічному виробництві, металургії, печах, котлах тощо.

Переваги: Добре витримує високі температури, має досить високу точність, широкий діапазон вимірювання.

Ізоляція. Внутрішня ізоляція: склотканина. Зовнішнє екранування: металевий екран. Діаметр 6 мм, довжина ~0.5 м.



Рисунок 3.8 — Термопара типу К (ТХА)

3.2.6 Цифрово-аналоговий перетворювач (ЦАП) МСР4725

МСР4725 — це малопотужний, високоточний, одноканальний, 12-розрядний цифрово-аналоговий перетворювач (ЦАП) з буферизованою напругою з енергонезалежною пам'яттю (EEPROM). Його вбудований прецизійний вихідний підсилювач дозволяє досягти аналогового вихідного розмаху між рейками.

					МР.ЛБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						51
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Вхід ЦАП і конфігураційні дані можуть бути запрограмовані в енергонезалежну пам'ять (EEPROM) користувачем за допомогою команди інтерфейсу I² C. Функція енергонезалежної пам'яті дозволяє пристрою ЦАП зберігати вхідний код ЦАП під час вимкнення живлення, а вихід ЦАП стає доступним одразу після ввімкнення. Ця функція дуже корисна, коли пристрій ЦАП використовується як допоміжний пристрій для інших пристроїв у мережі.

Пристрій містить схему Power-On-Reset (POR) для забезпечення надійного ввімкнення живлення та вбудований зарядний насос для напруги програмування EEPROM. Опорний сигнал ЦАП керується безпосередньо від V_{DD} . У режимі вимкнення живлення вихідний підсилювач можна налаштувати для представлення вихідного навантаження з низьким, середнім або високим опором.

MCP4725 має зовнішній штифт адреси A0. Цей контакт A0 можна прив'язати до V_{DD} або V_{SS} плати користувача.

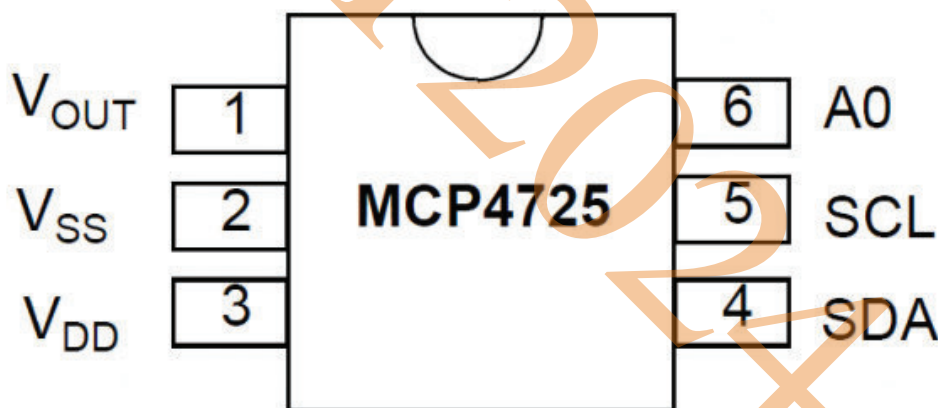


Рисунок 3.9 — Схематичне зображення MCP4725

1. Сумісність із 5 В, цей ЦАП працює у діапазоні напруги живлення 2.7 В–5.5 В, що ідеально відповідає вашій схемі.
2. Інтерфейс I²C, простий у підключенні до мікроконтролера ATtiny13A, навіть із обмеженою кількістю пінів.

3. Розрядність 12 біт, це дозволяє задавати вихідну напругу з високою точністю, що важливо для точного регулювання температури.
4. Вбудоване джерело опорної напруги, забезпечує стабільну напругу для генерації вихідного сигналу.
5. Доступність і простота, MCP4725 широко доступний і легко інтегрується у схему.

Схема підключення:

- **VCC:** До +5 В.
- **GND:** До загального проводу.
- **SCL і SDA:** Підключаються до пінів ATtiny13A для роботи через I2C.
- **VOUT:** Вихідна напруга, яка йде на операційний підсилювач або безпосередньо на схему.

3.2.7 Операційний підсилювач для терморпарі OPA277 (Texas Instruments)

Серія точних операційних підсилювачів OPAx277 замінює галузевий стандарт OP-177. Пристрої OPAx277 пропонують покращений рівень шуму, більш широке коливання вихідної напруги та вдвічі швидше з удвічі меншим струмом спокою. Особливості включають в себе наднизьку напругу зміщення та дрейф, низький струм зміщення, високе відхилення синфазного сигналу та високе відхилення джерела живлення.

У проекті OPA277 використовується для підсилення сигналу з терморпарі (наприклад, К-типу). Терморпара виробляє дуже малу напругу (в мілівольтах), яка потребує підсилення перед подальшою обробкою мікроконтролером. OPA277 забезпечує підсилення сигналу з мінімальною похибкою, що дозволяє точно вимірювати температуру. Завдяки низькому рівню шуму і стабільності, підсилювач гарантує, що результуючий сигнал буде чітким і відповідатиме реальній температурі без спотворень. Цей компонент показується на рис 2.1, також забезпечує стабільну роботу системи навіть при зміні температури довкілля або коливаннях напруги живлення.

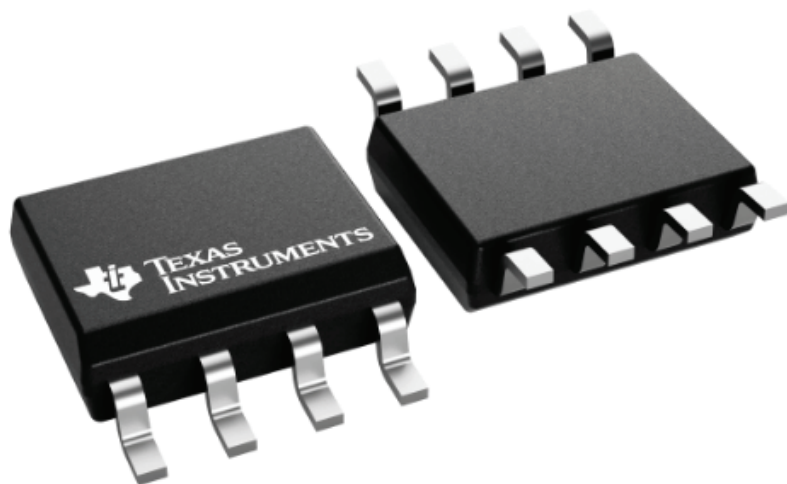


Рисунок 3.10 — Зовнішній вигляд OPA277

Низький зсув напруги (Input Offset Voltage) максимальний зсув становить лише 10 мкВ, що робить його надзвичайно точним. Цей параметр є ключовим у вимірювальних системах, оскільки мінімізує похибки при роботі з дуже малими сигналами. Низький температурний дрейф (Offset Drift): Зсув напруги змінюється лише на 0,1 мкВ/°C, що забезпечує стабільну роботу підсилювача навіть у широкому діапазоні температур. Широкий діапазон напруги живлення OPA277 працює як від симетричного джерела живлення (± 2 В до ± 18 В), так і від однополярного джерела (4 В до 36 В).

Високий коефіцієнт придушення синфазного сигналу (CMRR) перевищує 140 дБ, що означає, що він ефективно блокує небажані синфазні сигнали. Мала споживана потужність типове споживання струму становить лише 1 мА, що є важливим для енергоефективних систем. Широкий діапазон робочих температур працює від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$, що робить його придатним для використання в складних умовах. Низький рівень шуму спектральна щільність шуму становить 8 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ (при 1 кГц), що важливо для високоточних вимірювальних систем.

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

3.2.8 Енкодер KY-040 Rotary Encoder

Модуль механічного валкодера. Служить для ручного керування приладами, застосовується у широкому спектрі електронної апаратури. Управління відбувається за допомогою обертання оператором рукоятки валкодера, що знаходиться на штоку. На відміну від змінних резисторів, у яких кут повороту рукоятки близько трьох чвертей кола тут виконується повний оборот. Принципова відмінність: можливість обертання повними оборотами необмежену кількість разів – безперервний поворотний кодер. Це дозволяє виконувати точне налаштування регульованого параметра. Під штоком ротора валкодера розташована кнопка. Для замикання контактів кнопки натискають на ручку. Наявність у валкодера кнопки спрощує передню панель приладу, де він використовується. Модуль датчика обертання (валкодер) працює лише у складі цифрових схем, наприклад із застосуванням мікроконтролера.

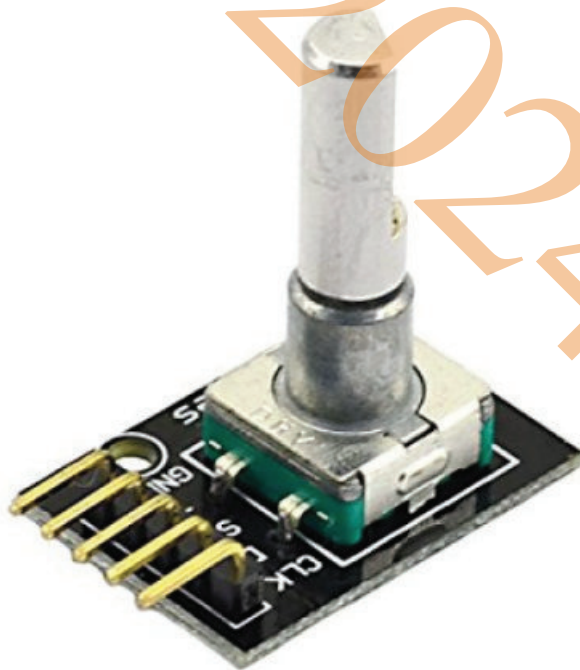


Рисунок- 3.11 — Енкодер KY-040 Rotary Encoder

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

Характеристики:

Гранична напруга на контактах 5В

Граничний струм через контакти 10 мА

Формат вихідного сигналу: квадратурний код 2 біт

На один оборот 24 імпульси

Температура : Експлуатації -30 ... 70 ° С; зберігання -40 ... 85 ° С

Ресурс оборотів не менше 30 000

Ресурс натискання кнопки не менше 20 000

3.3 Розробка схеми електричної принципової

Схема електрична принципова розроблена згідно вище наведеної структурної схеми терморегулятора і вибраної елементної бази. Дану схему наведено на рис. 2.9.

Мікроконтролер АТТІNY13а (DD1) порівнює аналоговий сигнал задатчика температури із сигналом зворотного зв'язку, який представляє собою підсилену термоелектрорушійну силу термопары типу К. Коефіцієнт підсилення по напрузі неінвертуючого операційного підсилювача МКР601 (DA1) $k_u \approx R_4/R_1$.

Сигнал задатчика температури формується подільником напруги, для реалізації якого застосовано потенціометр R_2 . Якщо сигнал кола датчика температури нижче вихідної напруги подільника R_2 , мікроконтролер формує управляючий сигнал, який поступає на базу транзисторного ключа, виконаного на VT1 і вмикає реле в колі нагрівача муфельної електропечі R_7 .

Мікроконтролер АТТІNY13а використовується не тільки для управління всією системою контролю температури, але й здійснює комунікацію з модулем ІІС І2С SPI і таким чином передає дані на LCD дисплей, який використовується для відображення інформації про температуру електропечі в режимі реального часу. Модуль, через який мікроконтролер передає дані на дисплей, представляє собою послідовний

Блок живлення включає інтегральний стабілізатор DA1, для зменшення пульсації напруги +5 В на виході стабілізатора застосовано конденсатор фільтра C_3 .

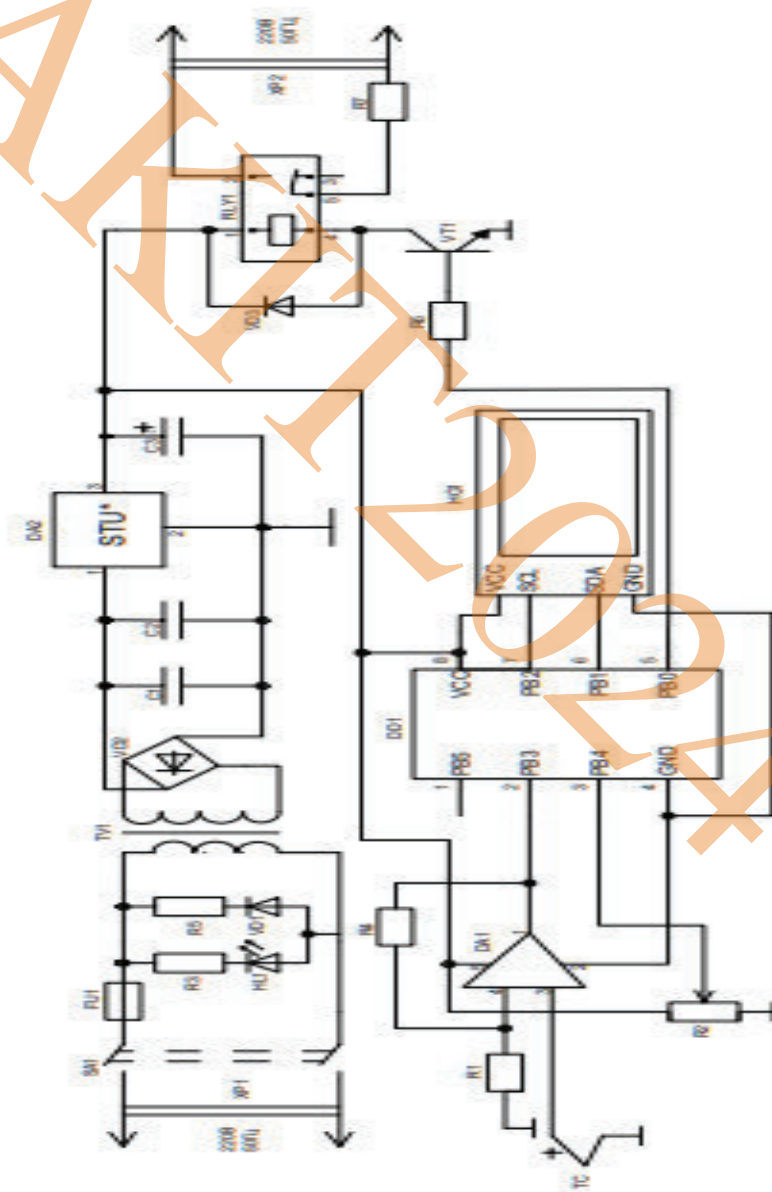


Рисунок 3.12 — Схема електрична принципова

3.4 Розрахунок блоку живлення

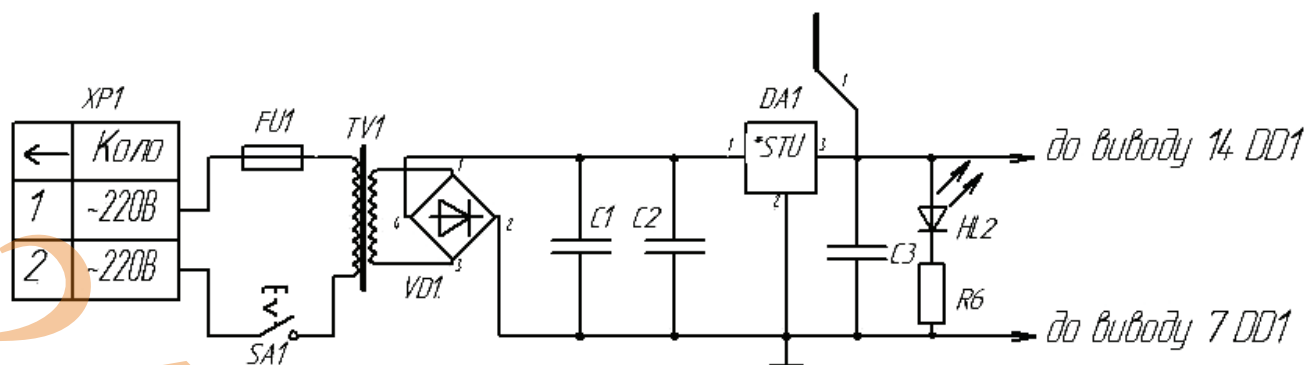


Рисунок 3.13.1 — Схема блока живлення

DA1 – інтегральний стабілізатор напруги призначається з умови, що напруга на його виході дорівнює заданій (тобто $(5 \pm 0,1)\text{В}$). Призначаємо КР142ЕН5 (мінімальний спад напруги на стабілізаторі - $2,5\text{В}$)

Номінальний струм споживання I_0 складає:

$$I_0 = I_{\text{IIBI}} + I_{\text{IH}} \quad (2.1)$$

де $I_{\text{ПВП}}$ — максимальний струм споживання сенсором та первинним перетворювачем;

I_{IND} — струм споживання схемами світлової індикації (максимальна кількість одночасно ввімкнених світло діодів – 1);

I_1 — струм споживання DA1, DD1 та транзисторів VT1 – VT5.

$$I_0 = I_{\text{ПВП}} + I_{\text{ИНД}} + I_1 = 0,110 + 0,012 + 0,050 = 0,17 \text{ A} \quad (2.2)$$

Розрахунок проводимо для двох напівперіодної місткової схеми випрямляча. Розрахунок елементів випрямляча та силового трансформатора проведемо на основі методики та табличних даних .

Вихідні дані для розрахунку:

- номінальна випрямлена напруга $U_0=+5V$;
- вихідна потужність $P_0 = U_0 \cdot I_0 = 12 \cdot 0,17 = 2,04 \text{ В} \cdot \text{А}$;
- номінальна напруга мережі змінного струму $U_1 = 220V$;

- частота мережі $f_m = (50 \pm 1) \text{ Гц}$;
- відносні зміни напруги мережі змінного струму $a_{\max} = +0,1$ та $a_{\min} = -0,15$;
- коефіцієнт пульсації $K_n = 0,1\%$.

Визначимо орієнтовані значення допоміжних параметрів B, D і F.

Нехай $B = 1$, $D = 2,15$, $F = 7$.

Тоді амплітуда зворотної напруги на вентилі становитиме:

$$U_{bt} = 1.5 * U_d = 1.5 * 5 = 7.5B \quad (2.3)$$

Середнє та амплітудне значення струму через вентиль відповідно:

$$I_a = \frac{I_d}{2} = \frac{0.17}{2} = 0.085A \quad (2.4)$$

$$I_{am} = I_d * 0.5 * F = 0.17 * 0.5 * 7 = 0.595A \quad (2.5)$$

Габаритну потужність трансформатора визначимо як:

$$S_T = U_d * I_d * 0.707 * B * D = 5 * 0.17 * 0.707 * 1 * 2.15 = 1.29VA \quad (2.6)$$

За визначеними значеннями габаритної потужності знаходимо індукції B_m для сталі марки Э360, забезпечуючи виконання умови $S_T > 1,29 \text{ ВА}$:

$B_m = 0,7 \text{ Тл}$ для $S_T = 5 \text{ ВА}$.

Виберемо тип вентилів з довідника [3]. При цьому треба забезпечити виконання умов:

$$U_{зв \max} > U_{вт}; \quad (2.7)$$

$$I_{a \max} > I_a; \quad (2.8)$$

$$I_{am \max} = \pi * I_{am} > I_a. \quad (2.9)$$

У якості вентилів вибираємо діод ний мостик DB154G, що має такі характеристики:

					МР.ЛБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						59
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

$$U_{зв\ max} = 280\ В > 7,5\ В;$$

$$I_{a\ max} = 1.5\ А > 0.085\ А;$$

$$I_{ам\ max} = 4.71\ А > 0,595\ А;$$

$$U_{пр} = 1.1\ В;$$

де $U_{пр}$ – це спад напруги на діоді в прямому напрямі. Знаходимо опір діода у провідному стані:

$$r_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{a\ max}} = \frac{1.1}{4.71} = 0.23\ Ом \quad (2.10)$$

Знайдемо величину активного опору обмоток трансформатора:

$$r_T = \frac{k_r * U_d}{I_d * f_m * B_m} * \sqrt[4]{\frac{S * f_m * B_m}{U_d * I_d}}; \quad (2.11)$$

де k_r – коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення – для мостової схеми він дор. 3,5;

B_m – амплітуда магнітної індукції у магнітопроводі трансформатора;

S - число стержнів трансформатора, на яких розміщено обмотки, з Ш – подібними пластинами магнітопроводу $S = 1$.

$$r_T = \frac{3.5 * 5}{0.17 * 50 * 0.7} * \sqrt[4]{\frac{1 * 50 * 0.7}{5 * 0.17}} = 7.45\ Ом; \quad (2.12)$$

Знаходимо індуктивність розсіювання обмоток трансформатора:

$$L_S = k_L * S * \frac{U_d}{I_d * f_m * B_m} * \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{S * f_m * B_m}{U_d * I_d}}}; \quad (2.13)$$

де k_L – коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення, для мостової схеми він дор. $5 * 10^{-3}$.

$$L_S = 5 * 10^{-3} * 1 * \frac{5}{0.17 * 50 * 0.7} * \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{1 * 50 * 0.7}{5 * 0.17}}} = 1.66 * 10^{-3}\ Гн; \quad (2.14)$$

Визначаємо кут Φ , що характеризує співвідношення між індуктивним та активним опорами випрямляча:

$$\varphi = \arctg \frac{2 * \pi * f_m * L_s}{r}; \quad (2.15)$$

У загальному випадку:

$$r = r_T + n_q * r_{np} \quad (2.16)$$

де r – активний опір випрямляча;

n_q – кількість послідовно увімкнених і одночасно працюючих вентилів, для мостової схеми $n_q=2$.

$$r = 7.45 + 2 * 0.23 = 7.91 \text{ Ом}$$

$$\varphi = \arctg \frac{2 * 3.14 * 50 * 1.66 * 10^{-3}}{7.91} = 3.51^\circ$$

Знаходимо величину основного розрахункового коефіцієнта:

$$A_o = \frac{I_d * r}{m * U_d} = \frac{0.17 * 7.91}{2 * 5} = 0.13 \quad (2.17)$$

де m – число фаз випрямляча (для мостової схеми $m=2$).

За знайденими значеннями знаходимо допоміжні коефіцієнти:

$$B = 1.25; D = 2; F = 6; H = 15 * 10^{-3}.$$

Знаючи величини коефіцієнтів можна знайти уточнені параметри трансформатора і вентиля, за якими перевіримо правильність їх вибору.

Діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора становить:

$$U_2 = B * U_d = 1.25 * 5 = 6.25 \text{ В} \quad (2.18)$$

Діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора:

$$I_2 = 0.707 * D * I_d = 0.707 * 2 * 0.17 = 0.24 \text{ А} \quad (2.19)$$

Повна потужність вторинної обмотки трансформатора:

$$S_2 = U_2 * I_2 = 6.25 * 0.24 = 1.5 \text{ Вт} \quad (2.20)$$

Діюче значення струму первинної обмотки трансформатора:

$$I_1 = I_2 * n \quad (2.21)$$

де $n = \frac{U_2}{U_1}$ - коефіцієнт трансформації трансформатора ($U_2 = U_m$).

$$n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{6.25}{220} = 0.03$$

$$I_1 = 0.24 * 0.07 = 0.02 \text{ A}$$

Повна потужність первинної обмотки трансформатора:

$$S_1 = 0.707 * B * D * I_d * U_d = U_1 * I_1 \quad (2.22)$$

$$S_1 = 220 * 0.02 = 4.4 \text{ Вт}$$

Уточнимо повну (габаритну) потужність трансформатора:

$$S_T = \frac{S_1 * S_2}{2} = \frac{4.4 * 1.5}{2} = 3.3 \text{ Вт} < 5 \text{ В} \quad (2.23)$$

Уточнимо значення параметрів діода:

$$U_{Bt} = 1.41 * B * U_d = 1.41 * 0.7 * 5 = 4.95 \text{ В} < 280 \text{ В} \quad (2.24)$$

$$I_a = \frac{I_d}{2} = 0.085 \text{ A} < 1.5 \text{ A} \quad (2.25)$$

$$I_{am} = I_d * 0.5 * F = 0.17 * 0.5 * 6 = 0.51 \text{ A} < 4.71 \text{ A}$$

Отже тип діода вибраний правильно.

Для даного випадку обрано трансформатор ТВ-3Ш ИП4.730.015 ТУ.

Знаходимо величину ємності конденсатора фільтра:

$$C = \frac{100 * H}{r * K_m * f_m} \quad (2.26)$$

Так як в схемі блока живлення, після ємнісного фільтра, знаходиться стабілізатор напруги, який має коефіцієнт подавлення пульсації 72 дБ. Коефіцієнт подавлення пульсації в 72 дБ відповідає відношенню вихідної напруги до вхідної, на стабілізаторі, рівне 3200 разів.

Виходячи з цього розраховану величину ємності зменшуємо в 3200 разів. Одержуємо $C \approx 1141 \text{ мкФ}$. Для впевненості в тому, що пульсації будуть не більшими за задане значення призначаємо величину ємнісного фільтра рівну 1000 мкФ.

Для каналу $\pm 5 \text{ В}$ було підібрано стабілізатор позитивної напруги μA7805C . Стабілізатор позитивної напруги μA7805C виготовляється по пленарно-епітаксійної технології, запатентованої фірмою Feirchild. Дані стабілізатори є комплементарними до популярних стабілізаторів від'ємної напруги серії μA79^{**} , і розраховані на ті ж номінальні значення вихідної напруги від 5 до 24 В.

2.5 Вибір мікроконтролера

Вибір мікроконтролера є важливим етапом розробки приладу для регулювання температури муфельної печі. Одним зі значущих аспектів при виборі мікроконтролера є його функціональні можливості, які повинні задовольняти потреби розробленого приладу.

У даній магістерській роботі для реалізації приладу був вибраний мікроконтролер Attiny 13 A. ATtiny13A є дуже економічним рішенням, що робить його ідеальним для проєктів з обмеженим бюджетом. Завдяки своїй невисокій ціні та простоті, він підходить для розробок, де потрібна мінімальна кількість функцій.

Мікроконтролер показаний на малюнку 2.2.

ATtiny13A – це 8-бітний мікроконтролер із серії AVR, який розроблений для використання у простих і компактних проєктах. Його вибір може бути обґрунтований наступними глобальними характеристиками:

Пам'ять:

- Флеш-пам'ять: 1 кБ (для зберігання програми)
- SRAM: 64 байти (оперативна пам'ять)
- EEPROM: 64 байти (для зберігання даних)

Тактова частота:

					МР.ЛБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						63
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

- Максимальна: 20 МГц (зовнішній осцилятор)
- До 9,6 МГц (внутрішній осцилятор)
- Напруга живлення: від 1,8 В до 5,5 В

Енергоспоживання:

- Споживання у режимі активності (1 МГц, 1,8 В): ~0,2 мА
- Споживання у режимі сну: до 0,1 мкА (залежно від режиму)

Периферійні пристрої:

- Один 8-бітний таймер/лічильник з режимами порівняння
- АЦП (аналогово-цифровий перетворювач): 4-канальний, розрядність 10

біт

- Генератор PWM

Інтерфейси:

- Підтримка SPI (Serial Peripheral Interface)

Особливості:

- Внутрішній RC-генератор
- Різні режими сну (Power-down, Idle)
- Система захисту від зниженої напруги (BOD – Brown-out Detection)

Корпус:

- SOIC, PDIP та інші варіанти корпусу
- Робочий температурний діапазон: від -40°C до +85°C

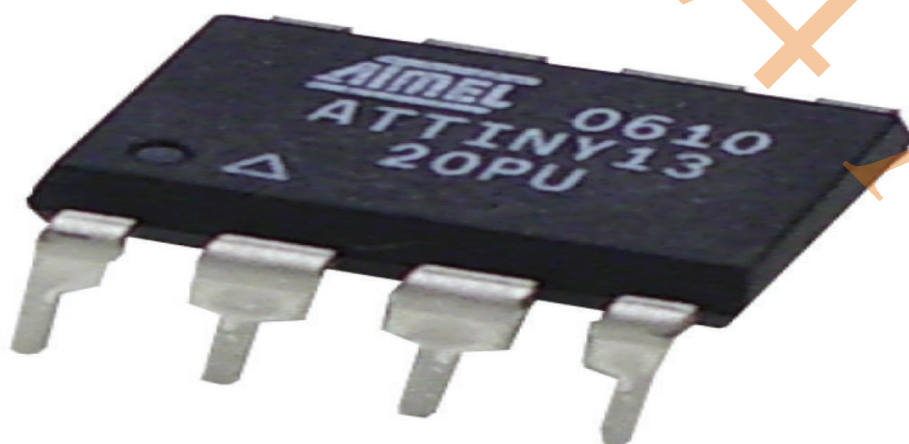


Рисунок 2.4 — Attiny 13 A

2.5 Відомості про програмне забезпечення

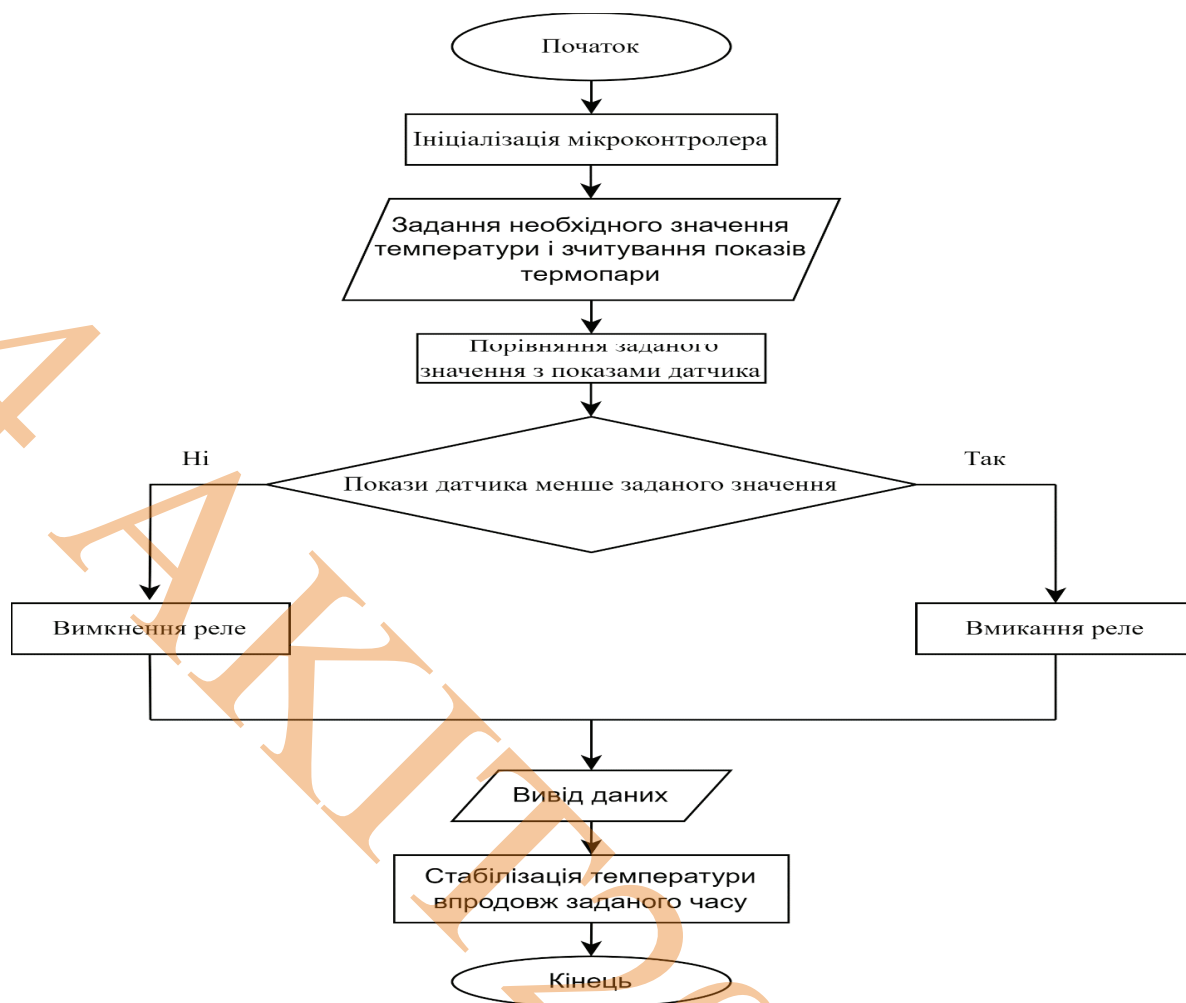


Рисунок 2.10 — Блок-схема алгоритму роботи програмного додатку.

Ця програма відповідає за управління температурою муфельної печі з використанням мікроконтролера ATtiny13A, цифрово-аналогового перетворювача (MCP4725), операційного підсилювача, термопар типу К (хромель-алюмель), та інших компонентів, перерахованих у структурі. Розглянемо детально її функціональність.

Ініціалізація системи. Програма починає виконання з ініціалізації апаратних модулів.

Спочатку мікроконтролер налаштовує периферійні модулі, включаючи АЦП (аналого-цифровий перетворювач) для отримання даних від термопар,

UART для зв'язку з LCD-дисплеєм, а також енкодер KY-040 для прийому команд користувача. На цьому етапі перевіряється стан системи живлення.

Зчитування даних з термопари. Мікроконтролер отримує сигнал із термопари через операційний підсилювач OPA277, який збільшує напругу сигналу до рівня, що може бути оброблений. Сигнал далі перетворюється на цифровий код мікроконтролером для обчислення температури. Це дозволяє програмі точно визначити поточну температуру в муфельній печі.

Введення заданої температури. За допомогою енкодера KY-040 користувач задає бажану температуру, яка передається на мікроконтролер. Ця температура зберігається у внутрішній пам'яті мікроконтролера та відображається на LCD-дисплеї.

Порівняння температури. Мікроконтролер постійно порівнює поточну температуру, отриману від термопари, із заданою. Якщо температура в печі нижча за встановлену, мікроконтролер видає сигнал на цифрово-аналоговий перетворювач (MCP4725) для подачі сигналу керування до реле.

Управління реле. Реле SRD-05VD-SL-C виконує функцію комутації нагрівального елемента печі. Якщо температура нижча за потрібну, реле замикає коло, включаючи нагрівальний елемент. Коли температура досягає заданого рівня, реле вимикає нагрівальний елемент.

Виведення даних. На LCD-дисплей виводяться поточна температура, задана температура та статус системи (наприклад, нагрів активний або стабілізація). Це дозволяє оператору отримувати зворотній зв'язок у реальному часі.

Стабілізація температури. Коли температура досягає заданого значення, система переходить у режим стабілізації. Реле працює циклічно, підтримуючи температуру в межах невеликого діапазону. Такий підхід дозволяє зменшити споживання енергії та запобігти перегріву.

Завершення роботи. Після завершення роботи система переходить у сплячий режим, у якому енергоспоживання мінімізується. Це корисно для безпечного завершення нагрівального процесу.

Ця програма забезпечує точний і надійний контроль температури, зручний інтерфейс для користувача та захист системи від перевантаження чи перегріву. Вона легко адаптується до різних застосунків, де потрібне автоматизоване регулювання температури.

Зчитує значення з термопари через ЦАП. Використовує енкодер для встановлення бажаної температури. Порівнює фактичну температуру із заданою. Увімкне або вимкне реле залежно від відхилення від заданої температури. Виводить поточну температуру та задане значення на LCD-дисплей.

Програма написана для платформи Arduino, що дозволяє працювати з мікроконтролером Attiny13A через середовище Arduino IDE. Нижче подано код із поясненнями, який використовує бібліотеки для термопари, енкодера та LCD-дисплея.

```
#include <Wire.h>           // Бібліотека для роботи з I2C

#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Бібліотека для LCD-дисплея

#include <Adafruit_MAX6675.h> // Бібліотека для роботи з
термопарою типу K

#include <Encoder.h>         // Бібліотека для роботи з енкодером

// --- Піни підключення ---

#define RELAY_PIN 8          // Пін для керування реле

#define ENC_PIN_A 2          // Пін А енкодера

#define ENC_PIN_B 3          // Пін В енкодера

#define ENC_BUTTON_PIN 4     // Кнопка енкодера

// --- Термопара ---

#define MAX6675_SCK 5        // Пін SCK для термопари

#define MAX6675_CS 6         // Пін CS для термопари
```

```

#define MAX6675_SO 7

// Пін SO для термопари

// --- Об'єкти ---

Adafruit_MAX6675 thermocouple(MAX6675_SCK, MAX6675_CS,
MAX6675_SO); // Ініціалізація термопари

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Ініціалізація
LCD-дисплея

Encoder myEnc(ENC_PIN_A, ENC_PIN_B); //
Ініціалізація енкодера

// --- Глобальні змінні ---

float targetTemperature = 200.0; // Бажана температура (за
замовчуванням 200°C)

float currentTemperature = 0.0; // Поточна температура

long lastEncoderValue = 0; // Значення енкодера

void setup() {

pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT); // Налаштування реле на вихід

digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Початковий стан реле -
вимкнено

lcd.begin(); // Ініціалізація LCD

lcd.backlight(); // Увімкнення підсвічування

lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print("Temp Control"); // Вивід привітання

delay(2000);

lcd.clear();

}

void loop() {

```

```

// Зчитування температури з термопари
currentTemperature = thermocouple.readCelsius();

// Зчитування значення енкодера
long encoderValue = myEnc.read();
if (encoderValue != lastEncoderValue) {
    targetTemperature = encoderValue; // Оновлення бажаної температури
    lastEncoderValue = encoderValue;
}

// Вивід інформації на LCD
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Target: ");
lcd.print(targetTemperature);
lcd.print("C ");

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Current: ");
lcd.print(currentTemperature);
lcd.print("C ");

// Порівняння температури та керування реле
if (currentTemperature < targetTemperature) {
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Увімкнення нагрівача
} else {
    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Вимкнення нагрівача

    delay(500); // Затримка для стабільної роботи
}

```

У цій програмі реалізовано систему контролю температури з використанням мікроконтролера та різних периферійних пристроїв. Для спрощення розробки було використано кілька готових бібліотек: Adafruit_MAX6675 для роботи з термопарою, LiquidCrystal_I2C для управління LCD-дисплеєм, а також Encoder для інтеграції енкодера. На початковому етапі виконано ініціалізацію всіх компонентів і піни, що використовуються для підключення термопари, реле, енкодера та кнопки.

Основна функціональність починається з вимірювання температури за допомогою термопари типу К. Поточна температура постійно зчитується в реальному часі і відображається на дисплеї для зручності користувача. За допомогою енкодера користувач має можливість задавати бажану температуру, причому кожна зміна цього параметра миттєво оновлюється на LCD-дисплеї. Це забезпечує зручний спосіб управління системою.

Керування нагріванням реалізовано через реле. Коли поточна температура нижча за задану, реле активує нагрівальний елемент. Як тільки температура перевищує бажане значення, реле вимикає нагрівач, що дозволяє підтримувати температуру на необхідному рівні.

Для відображення інформації використовується LCD-дисплей, який одночасно показує поточну та задану температуру. Це забезпечує зручний моніторинг роботи системи і дозволяє швидко перевірити її стан. Використання бібліотек, таких як Adafruit_MAX6675 і LiquidCrystal_I2C, значно спрощує програму, роблячи її більш надійною та зручною для налагодження. Крім того, ці бібліотеки забезпечують точність вимірювань та стабільність роботи компонентів, що є важливим для забезпечення ефективності та безпеки системи.

ВИСНОВКИ

В ході виконання даної магістерської роботи було виконано наступні завдання .

В магістерській роботі виконано комплексне дослідження систем автоматичного регулювання температури та розроблено мікроконтролерний регулятор температури для муфельної електропечі. Проведений аналіз, обґрунтування вибору елементів та розробка схем дозволили досягти поставлених цілей і реалізувати систему з необхідними технічними характеристиками.

Аналіз різновидностей систем автоматичного керування:

У роботі розглянуто релейні, пропорційно-інтегрально-диференційні (ПІД) регулятори та програмовані системи. Встановлено, що релейні регулятори мають обмежену точність і не підходять для технологічних процесів, які потребують високої стабільності. ПІД-регулятори забезпечують високу точність і стабільність, але потребують налаштування параметрів. Програмовані регулятори, які базуються на мікроконтролерах, забезпечують максимальну гнучкість і адаптацію до складних режимів роботи, що зробило їх оптимальним вибором для даної розробки.

Проведено аналіз типових схем терморегуляторів та режимів їх роботи. Особливу увагу приділено ПІД-регуляторам, які дозволяють реалізувати ефективне управління температурою навіть у випадку динамічних змін навколишніх умов. Розглянуто режими регулювання за відхиленням, швидкістю та прискоренням зміни температури, які враховуються у сучасних регуляторах. У роботі проведено аналіз термоелектричних датчиків, таких як термопари типу К, які забезпечують високу точність та стабільність у широкому діапазоні температур. Обґрунтовано вибір термопари як основного

датчика для вимірювання температури, а також розглянуто методи компенсації холодного спаю для мінімізації похибки вимірювання.

Розробка електричних схем регулятора:

Розроблено структурну та принципову електричні схеми мікроконтролерного регулятора. Основою системи став мікроконтролер, який виконує збір даних з датчика температури, обробку сигналу та керування нагрівачем. Схема забезпечує високу точність регулювання температури (похибка не перевищує $\pm 5\%$) при максимальній температурі нагріву до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ і потужності нагрівача 1 кВт .

Енергоефективність та стабільність роботи системи:

Система живиться від стандартної мережі змінного струму ($220\text{ В} \pm 10\%$, $50 \pm 1\text{ Гц}$) і включає стабілізований блок живлення для забезпечення безперебійної роботи мікроконтролера та інших компонентів. Енергоспоживання оптимізовано завдяки використанню ефективних методів регулювання потужності нагрівача.

Практичне значення результатів:

Розроблений регулятор може бути використаний у промислових і лабораторних умовах для забезпечення точного температурного контролю в муфельних електропечах. Система відповідає сучасним вимогам точності, стабільності та енергоефективності, що робить її конкурентоспроможною у відповідному сегменті. Подальша робота може бути спрямована на інтеграцію системи до Інтернету речей (IoT) для дистанційного моніторингу та керування процесами. Також перспективним є впровадження алгоритмів машинного навчання для адаптації параметрів регулятора до змінних умов експлуатації.

Таким чином, виконана магістерська робота вирішує актуальні задачі автоматизації температурних процесів, демонструючи практичну значущість отриманих результатів.

					МР.ЛБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						73
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Опорний конспект лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» / Укл.: Николайчук Я.М., Возна Н.Я.– Тернопіль: Гал-друк, 2015. – 59 с. с. (9-12, 22-26, 34-37).
2. Дослідження двопозиційного регулювання температури електропечі. Методичні вказівки. / Укл.: Єрощенко С. А., Шаройко Н.А. та ін. Харків, Українська державна академія залізничного транспорту, 2014, 23 с.
3. Цигика В. В. Регулятор температури для реалізації лінійного нагріву. / В. В. Цигика // Actual scientific research in the modern world // International science journal. — Pereiaslav, 2023. — Issue 4(96). Part 1. — p.183-185.
4. Метрологія та вимірювальна техніка. Підручник. / За ред. проф. Є. С. Поліщука. – Львів: видавництво Львівської політехніки, 2012. - 544 с.
5. Універсальний термостат на мікроконтролері PIC16F676 [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://kopterinfo.ru/regulyator-temperature-na-kontrollere-skema>.
6. Терморегулятор на мікроконтролері PIC16F628 [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://mcucpu.ru/index.php/project2/automatic/133-termoregulyator-na-mikrokontrollere-pic16f676>
7. Реле. [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://freebuy.in.ua/ua/p442502984-rele-srd-5vdc.html>.
8. Операційний підсилювач. [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://imrad.com.ua/ua/mcp601-i-p-6>
9. ATTYNI13A. [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://static.chipdip.ru/lib/138/DOC012138501.pdf>.
10. Мікроконтролер ATtiny програмується в середовищі Ардуїно [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://habr.com/ru/articles/234477/>
11. Термопара [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://geekmatic.in.ua/termopara-kupit-k-type-50mm-2m>

					МР.ПБ.19050031. 01.000 ПЗ	Арк
						74
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

12. Методика та приклади техніко-економічного обґрунтування засобів автоматизації у дипломних проектах. Лобунець В.І., Олійник Л.У., Пеліхов Е.Ф., - Харків: Вища школа. Вид-во при Харк. ун-ті, 1984.-128 с.
13. ОРА277 [Електронний вид]. <https://www.ti.com/product/ORA277#description>
14. Мікроконтролерні системи керування електроприводами постійного струму Д.О Глухих СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ. 2020 ст.15-21.
15. МРС4725. [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://freebuy.in.ua/ua/p442502984-rele-srd-5vdc.html>.
16. Модуль датчика обертання енкодер КУ-040 (Rotary encoder module) (Encoder КУ-040) – https://diyshop.com.ua/ua/modul-datchika-vrascheniya-enkoder-ky-040-rotary-encoder-module?srsltid=AfmBOoplOuUo1nNxmpfvZFEj8W2p_bcFVT0CwWqz9f0Yh5WcbcK_NPKL
17. Термопара [Електронний ресурс]. – режим доступу: https://geekmatic.in.ua/termopara_kupit_k_type_50mm_2m