

ДВНЗ УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інженерно-технічний факультет  
Кафедра приладобудування

Завідувач кафедри

Чичура І.І.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи  
освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»

на тему:

**Блок керування багатofункціонального регулятора температури**

Виконав:

студент V курсу, групи АКІТз

Пилипа В.В.

(прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Керівник:

ст. викл. Чичура І.І.

(вчене звання, ПБ, посада)

(підпис)

Ужгород - 2024

## ЗМІСТ

Вступ .....	6
1. Аналіз літератури та аналогів об'єкта проектування .....	7
1.1 Контроль температури .....	7
1.1.1 Терморегулятор .....	7
1.1.2 Температурний контроль .....	8
1.1.3 Приклад конфігурації контролю температури .....	9
1.1.4 Принцип дії регулятора температури .....	10
1.1.5 Характеристика об'єкта контролю .....	11
1.1.6 Методи контролю .....	11
1.2 Датчики температури, що використовуються при побудові терморегуляторів .....	17
1.3 Основні відомості про ВОДТ .....	27
2. Оптичні розрахунки до волоконно-оптичного датчика .....	29
2.1 Розрахунок світлової енергії, що попадає на площадку приймача випромінювання та коефіцієнт втрат в робочому та опорному каналі .....	32
2.2 Розрахунок струму фотодіода.....	35
3 Розробка електронного блоку терморегулятора волоконно-оптичного .....	39
3.1 Опис структурної схеми терморегулятора .....	39
3.2 Опис електричної принципової схеми терморегулятора волоконно-оптичного .....	41
4 Алгоритм роботи та програмування контролера .....	44
Висновки .....	47
Перелік джерел посилань .....	48
Додатки.....	49

<b>КРБ.АКІТ.19050035.01.000 ПЗ</b>				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
Розроби		Пилип В.В.		
Перевір.		Чичура І.І.		
Н/контр		Тютюнников С		
Затверд		Чичура І.І.		
Блок керування багатофункціонального регулятора температури				
<b>Пояснювальна записка</b>				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		v	5	47
УжНУ, ІТФ, Курс 5, група АКІТз				

## ВСТУП

Температура є одним з найбільш поширених параметрів вимірювання та контролю у різних сценаріях, пов'язаних з господарською діяльністю, фермерством, виробничими процесами у промисловості, науці, медицині та багатьох інших сферах діяльності людства.

На даний час забезпечувати контроль температури можливо багатьма різними способами, що у свою чергу впливатимуть на точність, швидкодію, діапазон контролю, чутливість та багато інших параметрів. Тому вибір способу контролю температури є ключовим моментом, що у подальшому значно полегшить етапи проектування майбутнього пристрою.

Одним з перспективних у наш час та доволі гнучких, у різних сценаріях застосування, є оптичний спосіб контролю температури. Серед оптичних методів контролю широкого поширення, у певних складних умовах, набули волоконно-оптичні методи контролю. Що у свою чергу володіють певними, доволі цінними перевагам у спеціальних та складних умовах використання. Так наприклад датчики температури побудовані на основі волоконно-оптичних технологій є добре захищеними від різноманітних завад, можуть розміщуватися на значній відстані від основного блоку обробки та керування пристроєм та ін.

Особливе місце серед значної кількості ВОД займають волоконно-оптичні датчики температури (ВОДТ) з амплітудною модуляцією оптичного сигналу, завдяки простоті їх конструкції, надійності та непоганим технічним характеристикам.

У даній бакалаврській роботі розглядаються питання по проектуванню сучасного багатофункціонального блоку керування температури основі волоконно-оптичного датчика температури амплітудного типу. Висока ступінь завадо захищеності, чутливість та вибухобезпечність даного типу термометрів, дозволяє ефективно застосовувати їх в різних умовах.

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛОГІВ ОБ'ЄКТА ПРОЕКТУВАННЯ

## 1.1 Контроль температури

Сучасні досягнення науки та техніки дозволяють розробити як спеціалізовані засоби контролю та керування температурою так і універсальні пристрої, що можуть бути легко пере налаштовані для використання з різними типами датчиків та первинних вимірювальних перетворювачів. Побудова таких пристроїв на основі сучасних мікроконтролерних та мікропроцесорних систем, дозволяє побудувати універсальний пристрій та забезпечити можливість налаштування системи регулювання використовуючи також і різні алгоритми та способи регулювання температури. Тому доцільно спочатку розглянути способи та методи забезпечення регулювання температури, на основі яких може працювати терморегулятор. А потім звернути увагу на датчик та первинний вимірювальний перетворювач, що може використовуватися у такому пристрої для забезпечення його роботи у різних умовах.

### 1.1.1 Терморегулятор

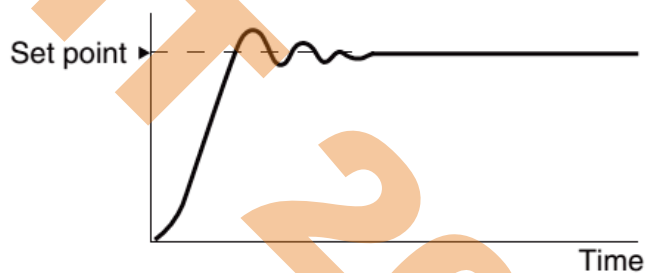
Контролер температури – це пристрій, який використовується для керування обігрівачем або іншим обладнанням шляхом порівняння сигналу датчика з заданим значенням та виконання обчислень відповідно до відхилення між цими значеннями. Пристрої, які можуть обробляти сигнали датчиків, інші ніж для температури, наприклад, вологість, тиск і швидкість потоку, називаються контролерами. Електронні контролери конкретно називаються - цифровими контролерами.

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

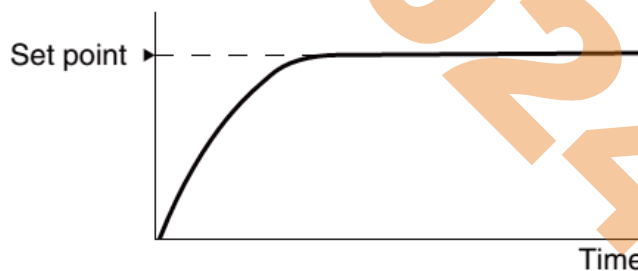
## 1.1.2 Температурний контроль

Контролери температури, контролюють температуру таким чином, щоб значення процесу було таким самим, як задане значення, але реакція буде відрізнятися через характеристики контрольованого об'єкту і способу керування регулятором температури. Як правило, відповідь показана на рисунку 1.1 (2), де задана точка досягається якомога швидше без перевищення, що необхідно у контролері температури. Бувають і випадки як показано на рисунку 1.1 (1), де реакція термодатчика швидко підвищує температуру, навіть якщо вона перевищує її необхідний рівень, і показаний на рисунку 1.1 (3), де відповідь повільно підвищує температуру.

- (1) Response where the process value settles on the set point while repeatedly overshooting and undershooting



- (2) Proper response



- (3) Response where the process value slowly reaches the set point

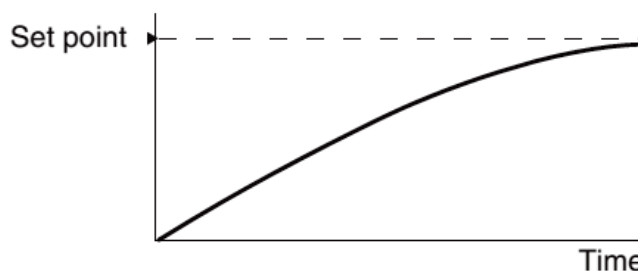


Рисунок 1.1 Керування температурою терморегулятором [1].

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.1.3 Приклад конфігурації контролю температури

У наступному прикладі описано основну конфігурацію для контролю температури.

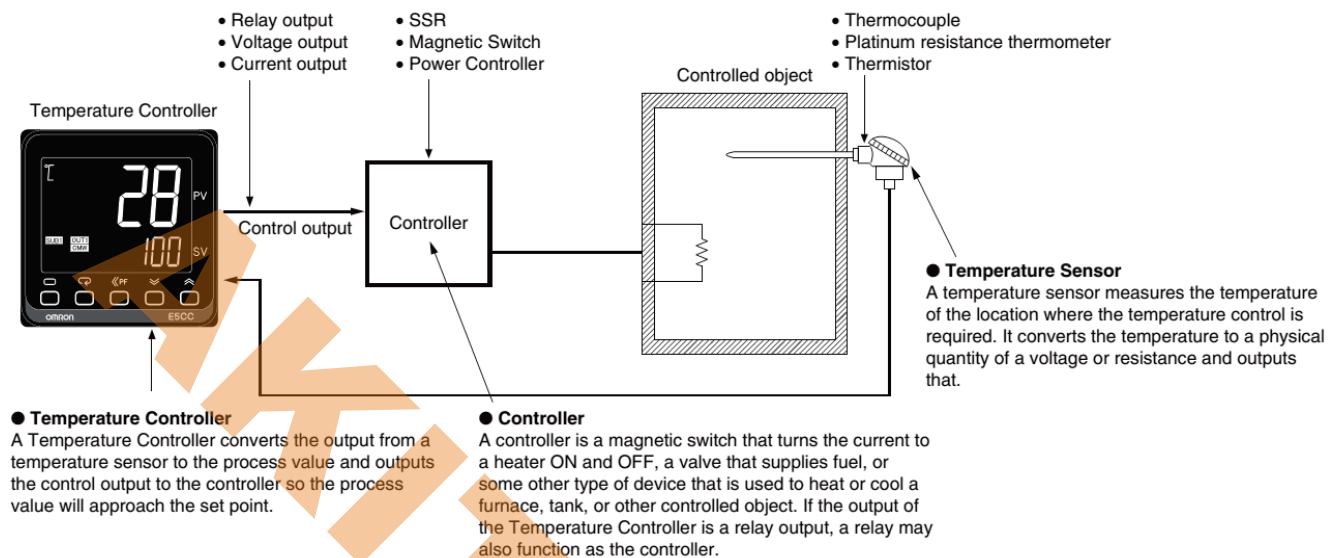


Рисунок 1.2 Типова схема контролю температури [1].

- **Контролер температури:** Контролер температури перетворює вихідний сигнал із датчика температури до значення процесу та подає на контрольний вихід до контролера, тому в процесі контрольоване значення наблизиться до встановленого значення.

- **Контролер**

Контролер - це магнітний перемикач, який перетворює струм на увімкнення та вимкнення обігрівача, клапана, що подає паливо, або інший тип пристрою, який використовується для обігріву або охолодження печі, резервуару або іншого контрольованого об'єкту. Якщо вихід з Контролера температури є релейним виходом, реле може також функціонувати як контролер.

- **Датчик температури**

Датчик температури вимірює температуру місця, де знаходиться та регулює температуру як необхідно. Він перетворює температуру в відповідні значення напруги або опору та передає на відповідний керуючий елемент.

### 1.1.4 Принцип дії регулятора температури

На наступному малюнку показано приклад системи керування зі зворотним зв'язком, яка використовується для контролю температури.

Основні частини системи контролю зі зворотним зв'язком вбудовані в регулятор температури. Можна побудувати систему контролю зі зворотним зв'язком а температуру можна контролювати шляхом поєднання контролера температури з контролером і датчиком температури, що підходить для об'єкта контролю.

#### Configuration of a Feedback Control System

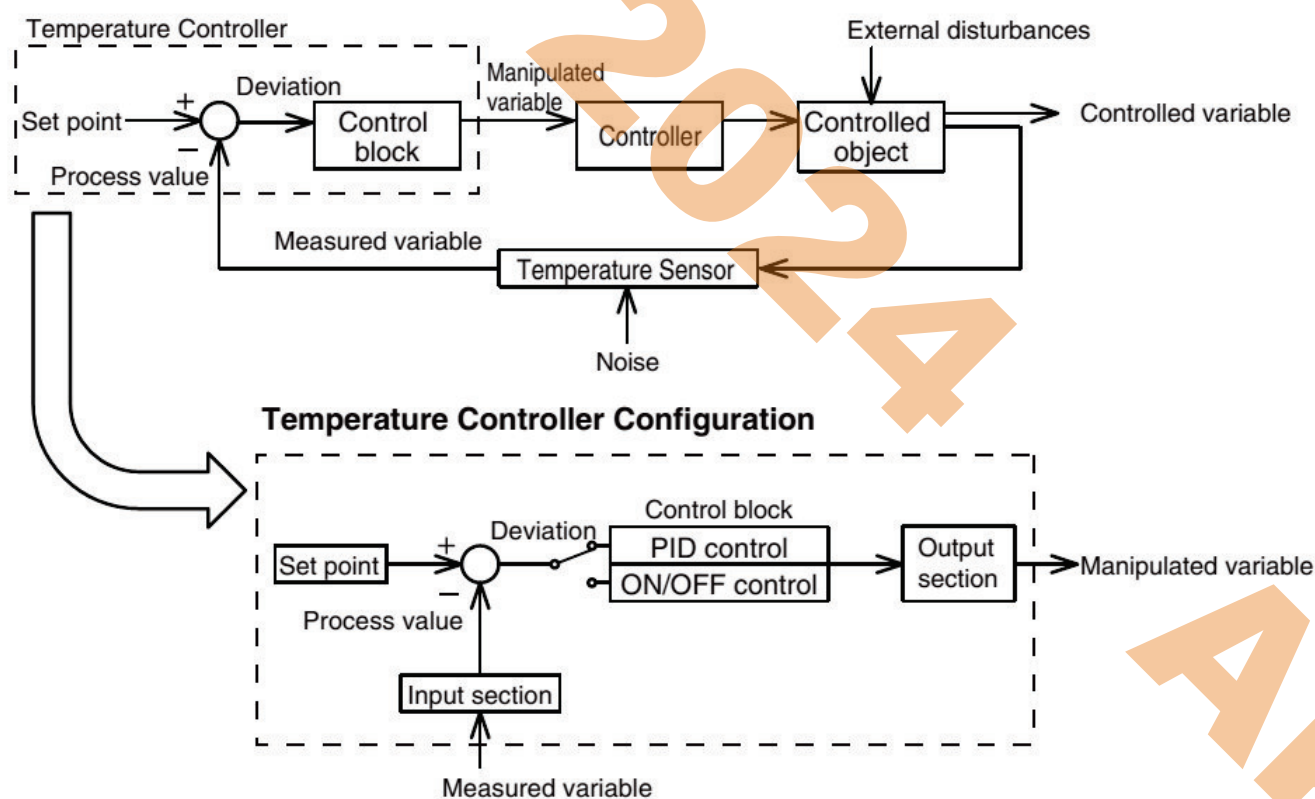


Рисунок 1.3 Конфігурація системи управління зі зворотним зв'язком [1].

## 1.1.5 Характеристика об'єкта контролю

Перш ніж вибрати регулятор температури або датчик температури, необхідно зрозуміти теплові характеристики контролюваного об'єкта для належного контролю температури.

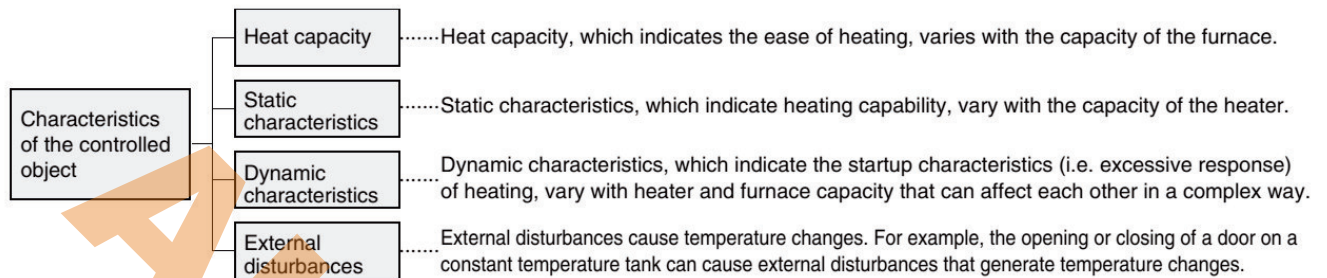


Рисунок 1.4 Характеристика об'єкта контролю температури [1].

## 1.1.6 Методи контролю

### а) Метод вмикання/вимикання

Як показано на графіку нижче, якщо значення процесу нижче ніж задане значення, вихід увімкнеться, а живлення почне подаватись до нагрівача. Якщо значення процесу вище ніж задане значення, вихід буде вимкнено, а живлення подане обігрівачу буде вимкнено. Цей метод управління, при якому вихід вмикається та вимикається залежно від встановленого значення, щоб зберегти постійну температуру називається керуючою дією ON/OFF. За допомогою цієї дії температура контролюється за допомогою двох значення (тобто 0% і 100% заданого значення). Тому операцію також називають двопозиційним керуванням.

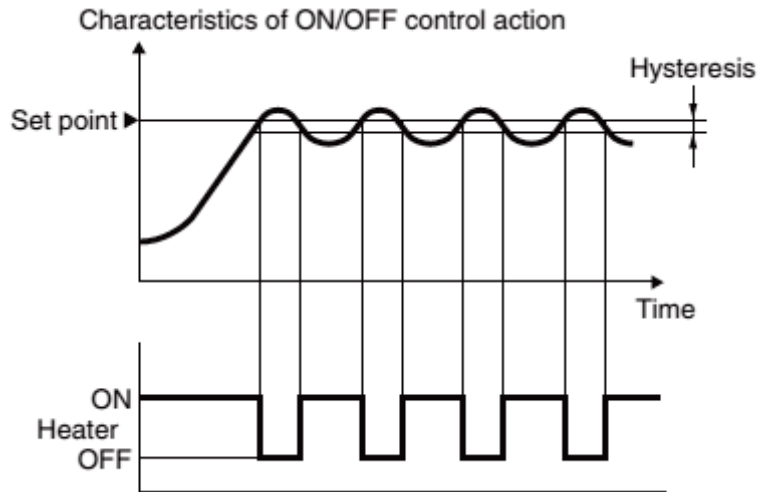


Рисунок 1.5 Контроль температури методом вмикання/вимикання нагрівача [1].

### б) P Action (дія пропорційного керування)

P Action (або пропорційна керуюча дія) використовується для виведення а керовану змінну (керуюча вихідна змінна), тобто пропорційно відхиленню, щоб зменшити відхилення між значенням процесу та заданим значенням. Пропорційна зона встановлюється з центруванням на задану точку, і визначається виходом з такими правилами.

- Змінна, що керує, пропорційна відхиленню по виходу, коли значення процесу знаходиться в межах пропорційної зони.
- 100% керована змінна виводиться під коли значення нижче за зону пропорційності.
- 0% керована змінна виводиться під коли значення вище, ніж зона пропорційності.

Тут можливе більш плавне керування, ніж дія керування УВІМК./ВИМК тому що вихід поступово змінюється поблизу заданого значення відповідно до відхилення. Однак якщо температура є керованою лише пропорційною дією, вона стабілізується на температурі, яка відрізняється від заданої точки (зміщення).

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

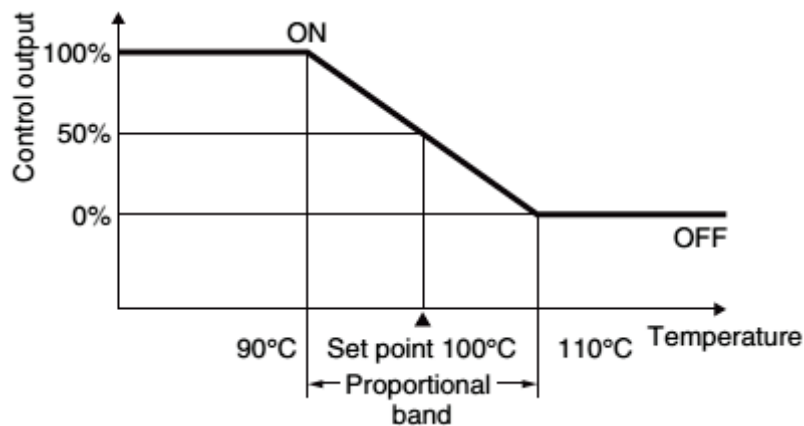


Рисунок 1.6 Контроль температури методом P Action [1].

в) I Action (інтегральна керуюча дія)

I дія (або інтегральна дія) збільшує або зменшує керовану змінну відповідно до розміру та тривалості відхилення.

Температура стабілізується при температурі, вимкнення із встановленої точка (зміщення) лише з пропорційною дією, але відхилення з плином часу буде зменшено, і технологічне значення буде таким самим, як і задане значення шляхом комбінування пропорційної та інтегральної дії.

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

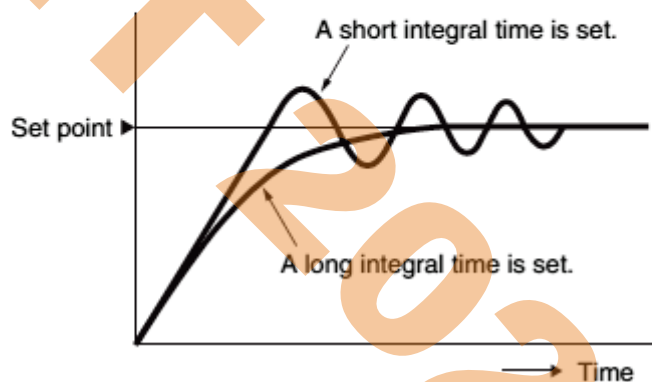
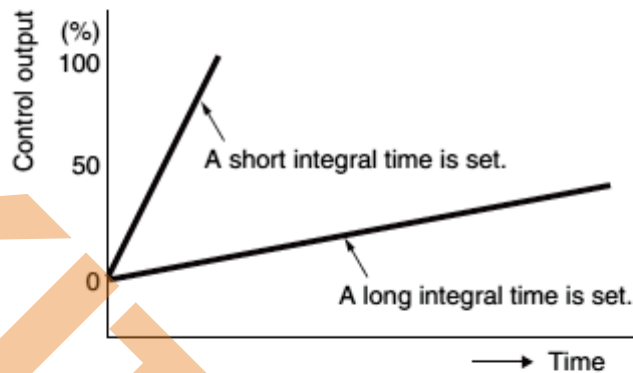
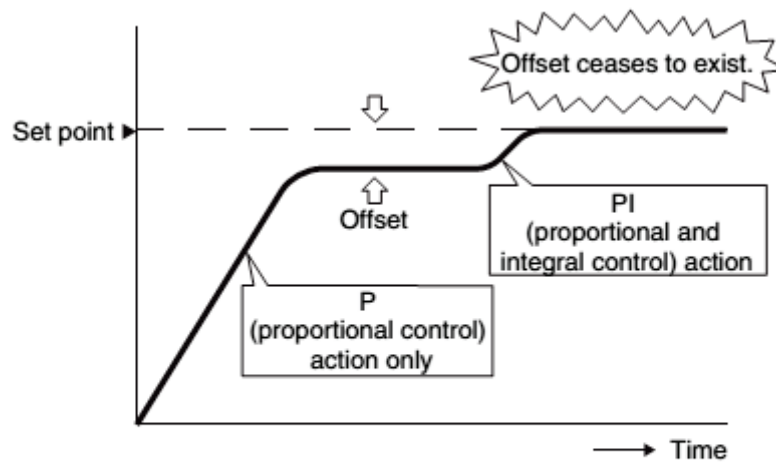


Рисунок 1.7 Контроль температури методом I Action [1].

#### г) D Action (дія керування похідною)

Дія D (або похідна дія) надає керовану змінну у відповідь на різкі зміни значення процесу керування, внаслідок таких факторів, як зовнішні перешкоди, так що контроль буде швидко повертатися до вихідного стану. Пропорційна і інтегральна дії які корегують результати контролю, та реакція на різкі зміни відбувається із запізненням. Похідна дія компенсує цей недолік і забезпечує великий діапазон регулювань для швидких зовнішніх збурень.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ

Арк.  
14

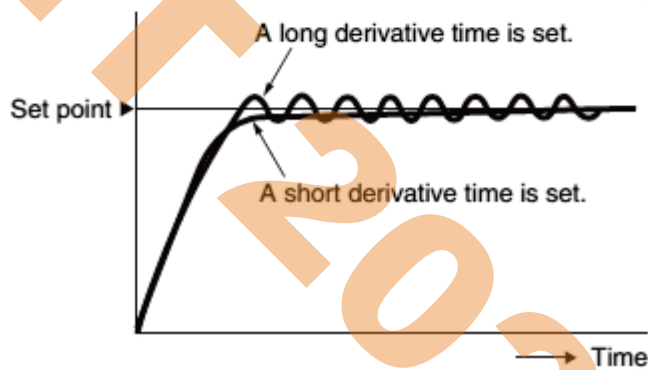
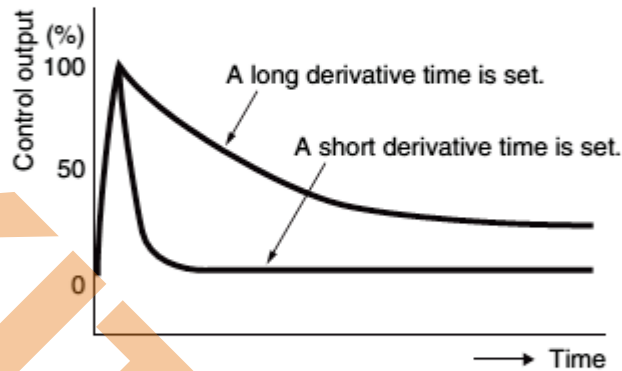
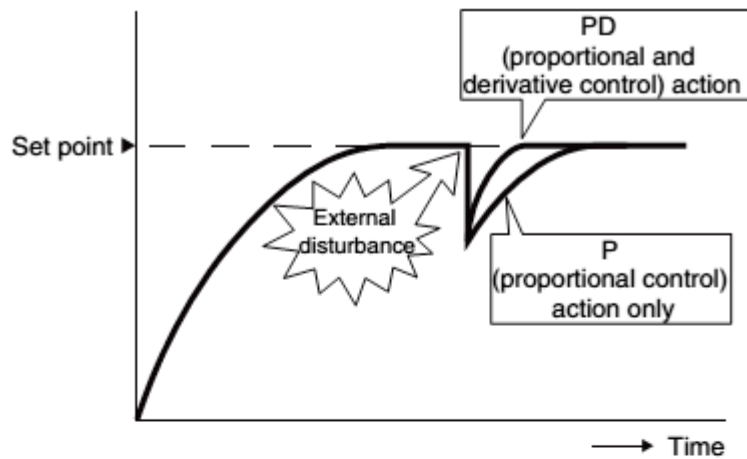


Рисунок 1.8 Контроль температури методом D Action [1].

#### д) ПД-контроль

ПД-регулювання є комбінацією пропорційного, інтегрального та похідної керуючої дії. Температура контролюється плавно за допомогою пропорційного керування без відслідковування, автоматичне регулювання зсуву здійснюється інтегральною керуючою дією, і забезпечується швидка реакція на зовнішні перешкоди, що можливо за допомогою похідної керуючої дії.

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

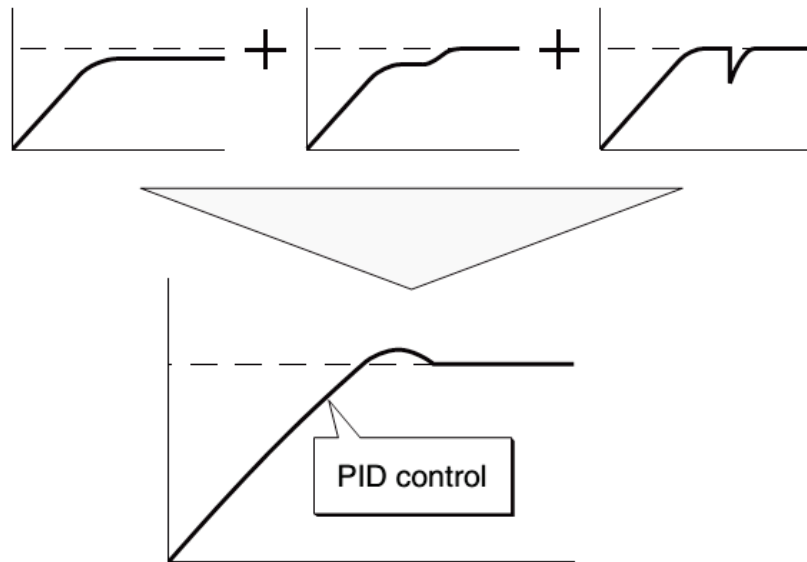


Рисунок 1.9 Контроль температури методом ПІД-контроль [1].

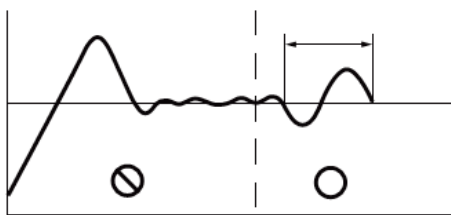
е) подвійний ПІД-контроль

Звичайне ПІД-регулювання використовує для керування один блок керування реакцією регулятора температури на задану точку та до зовнішніх перешкод. Тому відповідний набір точок буде коливатися внаслідок перевищення, якщо значення має значення на реагування на зовнішні перешкоди за допомогою Р та І параметрів то їх встановлюють на малі значення, а параметр D встановлюють на велике значення в блоці керування. З іншого боку, контролер температури не зможе реагувати на зовнішні сигнали збурення швидко, якщо реагувати на них потрібно за заданим значенням (тобто параметри Р і І встановлені на великі значення). Це унеможливілює задоволення обох типів відповіді у цьому випадку.

Два елемента ПІД-контролю забезпечують хорошу реакцію на обидва задані значення та зовнішні перешкоди.

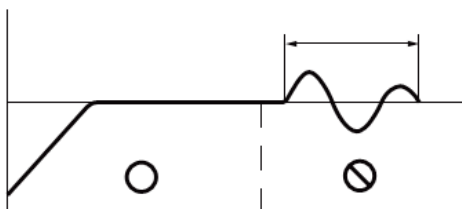
### PID Control

(1)



Response to the set point will be slow if response to the external disturbance is improved.

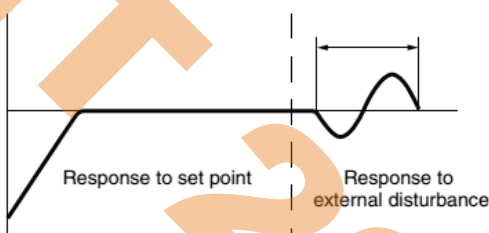
(2)



Response to the external disturbance will be slow if response to the set point is improved.

### Two PID Control

(3)



Controls both the set point and the external disturbance response.

Рисунок 1.9 Контроль температури методом подвійного ПІД-контроль [1].

## 1.2 Датчики температури, що використовуються при побудові терморегуляторів

Датчики температури вимірюють кількість теплової енергії або навіть холоду, що генерується об'єктом або системою, дозволяючи нам «відчувати» або виявляти будь-яку фізичну зміну цієї температури, створюючи аналоговий або цифровий вихід.

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Існує багато різних типів датчиків температури, і всі вони мають різні характеристики залежно від їх фактичного застосування. Датчик температури складається з двох основних фізичних типів:

Типи контактних датчиків температури – ці типи датчиків температури повинні перебувати у фізичному контакті з об'єктом, який контролюється, і використовувати теплову провідність для моніторингу змін температури. Їх можна використовувати для виявлення твердих речовин, рідин або газів у широкому діапазоні температур.

Типи безконтактних датчиків температури – ці типи датчиків температури використовують конвекцію та випромінювання для моніторингу змін температури. Їх можна використовувати для виявлення рідин і газів, які випромінюють теплову енергію, коли тепло піднімається, а холод осідає на дно в конвекційних потоках, або виявляти енергію випромінювання, що передається від об'єкта у вигляді інфрачервоного випромінювання.

Два основних типи контактних або навіть безконтактних датчиків температури також можна розділити на наступні три групи датчиків: електромеханічні, резистивні та електронні. ПРО ці типи ми згадаємо нижче.

### **Термостат як датчик температури**

Термостат — це електромеханічний температурний датчик або перемикач контактного типу, який в основному складається з двох різних металів, таких як нікель, мідь, вольфрам або алюміній тощо, які з'єднані разом, утворюючи біметалеву стрічку. Різні швидкості лінійного розширення двох різнорідних металів викликають механічне згинання, коли стрічка піддається нагріванню.

Біметалічну смугу можна використовувати як електричний вимикач або як механічний спосіб керування електричним вимикачем у термостатах і широко використовується для керування нагрівальними елементами гарячої води в котлах, печах, резервуарах для зберігання гарячої води, а також у транспортних засобах (системи охолодження радіаторів).

### **Біметалічний термостат**

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

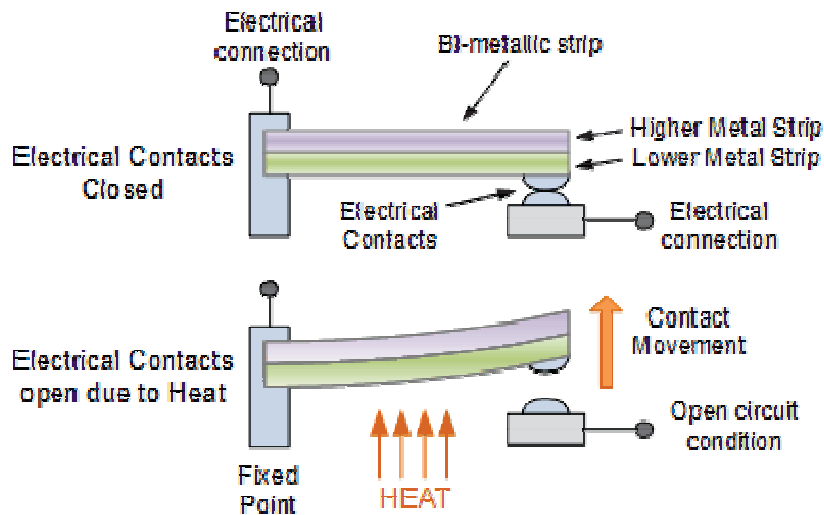


Рисунок 1.10 Конструкція біметалевого термостата [2].

Термостат складається з двох термічно різних металів, склеєних один до одного. Коли холодно, контакти замкнуті і струм проходить через термостат. Коли він нагрівається, один метал розширюється більше, ніж інший, і скріплена біметалева стрічка згинається вгору (або вниз), розмикаючи контакти, та запобігаючи протіканню струму.



Рисунок 1.11 Зовнішній вигляд термостата [2].

Існує два основних типи біметалевих стрічок, що базуються головним чином на їхньому русі під впливом температурних змін. Існують типи «миттєвої дії», які створюють миттєву дію типу «ВКЛ/ВИМК» або «ВИМК/ВКЛ» на електричні контакти при встановленій температурній точці, і повільніші типи «повзучої дії», які поступово змінюють своє положення у міру зміни температури.

Термостати миттєвого типу зазвичай використовуються в наших будинках для контролю заданої температури печей, прасок, резервуарів для гарячої води, а також їх можна знайти на стінах для керування системою опалення будинку.

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Типи криперів зазвичай складаються з біметалічної котушки або спіралі, яка повільно розкручується або згортається зі зміною температури. Як правило, біметалічні смужки повзучого типу є більш чутливими до змін температури, ніж стандартні типи з фіксацією ON/OFF, оскільки смужка довша та тонша, що робить їх ідеальними для використання в датчиках температури, циферблатах тощо.

Незважаючи на те, що вони дуже дешеві та доступні в широкому робочому діапазоні, одним з головних недоліків стандартних термостатів миттєвого типу, які використовуються як датчики температури, є те, що вони мають великий діапазон гістерезису від моменту розмикання електричних контактів до моменту, коли вони знову закриваються. Наприклад, він може бути встановлений на 20°C, але може відкриватися лише при 22°C або закриватися знову до 18°C.

Тому діапазон коливань температури може бути досить високим. Комерційно доступні біметалічні термостати для домашнього використання мають гвинти регулювання температури, які дозволяють попередньо встановити більш точне бажане задане значення температури та рівень гістерезису.

### **Термістор як датчик температури**

Термістор — це інший тип датчика температури, назва якого є поєднанням слів THERM-ally чутливий res-ISTOR. Термістор - це особливий тип резистора, який змінює свій фізичний опір під впливом змін температури.



Рисунок 1.12 Зовнішній вигляд термістора [2].

Більшість типів термісторів мають негативний температурний коефіцієнт опору (NTC), тобто значення їх опору ЗНИЖУЄТЬСЯ зі збільшенням

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури, і, звичайно, є деякі, які мають позитивний температурний коефіцієнт (РТС), оскільки їх значення опору зростає зі збільшенням температури.

Термістори виготовлені з напівпровідникового матеріалу керамічного типу з використанням технології оксидів металів, таких як марганець, кобальт і нікель тощо. Напівпровідниковий матеріал, як правило, формується у вигляді невеликих пресованих дисків або кульок, які герметично запаяні, щоб забезпечити відносно швидку реакцію на будь-які зміни температури .

Термістори оцінюються за значенням активного опору при кімнатній температурі (зазвичай при 25 °С), постійною часу (час, необхідний для реакції на зміну температури) і номінальною потужністю щодо струму, що через них протікає. Як і резистори, термістори доступні зі значеннями опору при кімнатній температурі від 10 МОм до лише кількох Ом, але для сенсорних цілей зазвичай використовуються ті типи зі значеннями в кілоомах.

Термістори є пасивними резистивними пристроями, що означає, що нам потрібно пропустити через них струм, щоб отримати вимірну вихідну напругу. Тоді термістори, як правило, з'єднуються послідовно з відповідним резистором зміщення, щоб утворити ланцюг дільника потенціалу, а вибір резистора дає вихідну напругу в певній попередньо визначеній температурній точці або значенні, наприклад:

### Приклад датчика температури №1

Наступний термістор має значення опору 10 кОм при 25°C і значення опору 100Ω при 100°C. Обчисліть падіння напруги на термісторі і, отже, його вихідну напругу ( $V_{out}$ ) для обох температур при послідовному підключенні резистора 1 кОм до джерела живлення 12 В.

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

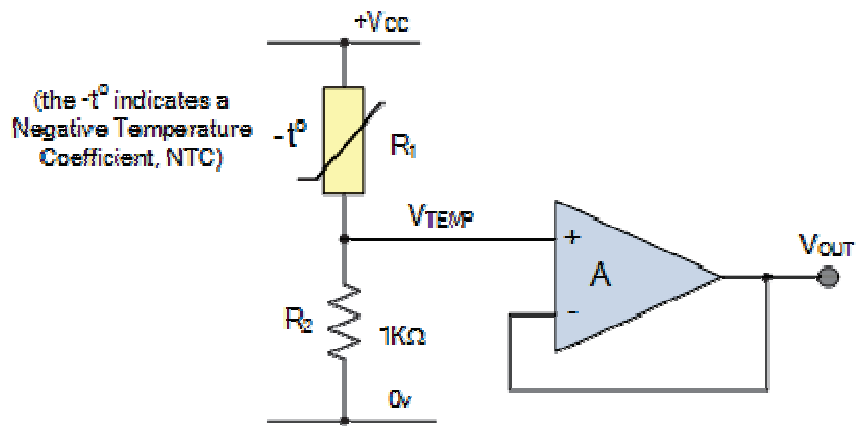


Рисунок 1.13 Схема підсилювача сигналу терморезистора [2].

При температурі 25°C:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V = \frac{1000}{10000 + 1000} \times 12V = 1.09V$$

При температурі 100°C:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V = \frac{1000}{100 + 1000} \times 12V = 10.9V$$

Змінюючи постійне значення резистора  $R_2$  (у нашому прикладі 1 кОм) на потенціометр або попередньо налаштоване, вихідна напруга може бути отримана при заданій заданій температурі, наприклад, вихід 5 В при 60 °С, а шляхом зміни потенціометра можна отримати певний рівень вихідної напруги. можна отримати в більш широкому діапазоні температур.

Однак слід зазначити, що термістори є нелінійними пристроями, і їхні стандартні значення опору при кімнатній температурі відрізняються для різних термісторів, що в основному пов'язано з напівпровідниковими матеріалами, з яких вони виготовлені. Термістор має експоненціальну зміну з температурою і, отже, має константу бета-температури ( $\beta$ ), яку можна використовувати для розрахунку його опору для будь-якої температури.

Однак, якщо використовується з послідовним резистором, наприклад у мережі дільника напруги або типу моста Уїтстона, струм, отриманий у відповідь на напругу, прикладену до мережі дільника/мосту, лінійно залежить від

температури. Тоді вихідна напруга на резисторі стає лінійною залежно від температури.

### Резистивні датчики температури (RTD)

Іншим типом датчика електричного опору температури є детектор температури опору або RTD. RTD — це прецизійні датчики температури, виготовлені з високочистих провідних металів, таких як платина, мідь або нікель, намотані на котушку, електричний опір яких змінюється залежно від температури, подібно до опору термістора. Також доступні тонкоплівкові RTD. Ці пристрої мають тонку плівку платинової пасти, нанесену на білу керамічну підкладку.



Рисунок 1.14 Резистивний термодатчик (RTD) [2].

Резистивні датчики температури мають додатні температурні коефіцієнти (PTC), але, на відміну від термісторів, їх вихід надзвичайно лінійний, що забезпечує дуже точні вимірювання температури.

Однак вони мають дуже низьку температурну чутливість, тобто зміна температури викликає лише дуже незначну зміну вихідного сигналу, наприклад, 1 Ом/оС.

Більш поширені типи RTD виготовляються з платини та називаються платиновими термометрами опору або PRT, причому найбільш поширеним з них є датчик Pt100, який має стандартне значення опору 100 Ом при 0°C. Недоліком є те, що Platinum коштує дорого, і одним із головних недоліків цього типу пристроїв є його вартість.

Як і термістор, RTD є пасивними резистивними пристроями, і, пропускаючи постійний струм через датчик температури, можна отримати вихідну напругу, яка лінійно зростає з температурою. Типовий RTD має базовий опір приблизно 100 Ом при 0оС, який збільшується приблизно до 140 Ом при 100°C з діапазоном робочих температур від -200 до +600°C.

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки RTD є резистивним пристроєм, ми повинні пропускати через них струм і контролювати результуючу напругу. Однак будь-яка зміна опору через самонагрівання резистивних проводів під час протікання через них струму,  $I^2R$  (закон Ома), викликає помилку в показаннях. Щоб уникнути цього, RTD зазвичай підключають до мережі моста Уїтстона, яка має додаткові сполучні дроти для компенсації випередження та/або підключення до джерела постійного струму.

### Термопара як датчик температури:

Термопара є найбільш часто використовуваним типом з усіх типів датчиків температури. Термопари користуються популярністю завдяки своїй простоті, легкості у використанні та швидкості реагування на зміни температури, в основному через їх невеликий розмір. Термопари також мають найширший температурний діапазон серед усіх датчиків температури від нижче  $-200^{\circ}\text{C}$  до значно вище  $2000^{\circ}\text{C}$ .

Термопари — це термоелектричні датчики, які в основному складаються з двох з'єднань різнорідних металів, таких як мідь і константан, зварених або стиснутих разом. Один спай підтримується при постійній температурі, що називається еталонним (холодним), а інший — вимірювальним (гарячим). Коли два з'єднання мають різні температури, на з'єднанні виникає напруга, яка використовується для вимірювання датчика температури, як показано нижче.

### Конструкція термопари

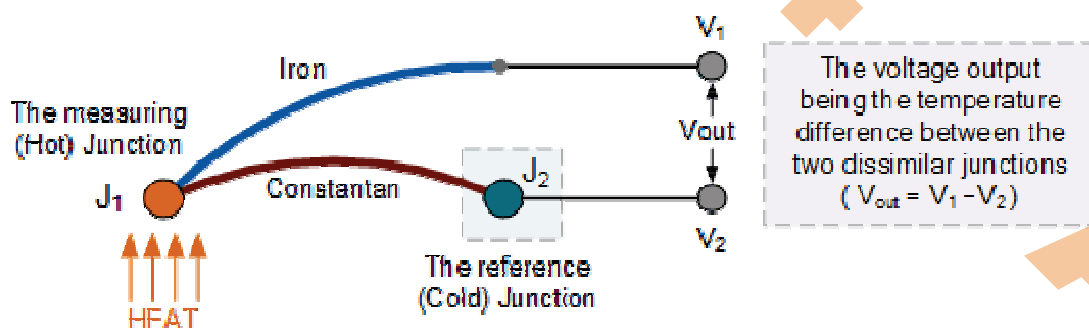


Рисунок 1.15 Принцип роботи термопари [2].

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ

Арк.

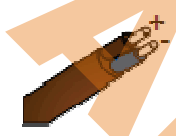
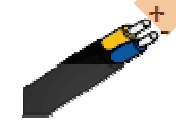
24

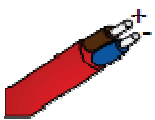
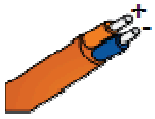
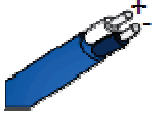

Принцип роботи термопари дуже простий і базовий. При злитті разом з'єднання двох різнорідних металів, таких як мідь і константан, створює «термоелектричний» ефект, який дає постійну різницю потенціалів лише в кілька мілівольт (мВ) між ними. Різниця напруг між двома з'єднаннями називається «ефектом Зеебека», оскільки температурний градієнт генерується вздовж провідних проводів, створюючи ЕРС. Тоді вихідна напруга від термопари є функцією зміни температури.

Якщо обидва з'єднання мають однакову температуру, різниця потенціалів на двох з'єднаннях дорівнює нулю, іншими словами, вихідна напруга відсутня, оскільки  $V_1 = V_2$ . Однак, коли з'єднання з'єднані в ланцюг і обидва мають різні температури, вихідна напруга буде виявлена відносно різниці температур між двома з'єднаннями,  $V_1 - V_2$ . Ця різниця в напрузі зростатиме з температурою, доки не буде досягнуто пікового рівня напруги на з'єднаннях, і це визначається характеристиками двох різнорідних металів, що використовуються.

Термопари можуть виготовлятися з різних матеріалів, що дозволяє вимірювати екстремальні температури від  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+2000^{\circ}\text{C}$ . Завдяки такому великому вибору матеріалів і діапазону температур було розроблено міжнародно визнані стандарти разом із кольоровими кодами термопар, щоб користувач міг вибрати правильний датчик термопари для конкретного застосування. Британський колірний код для стандартних термопар наведено нижче.

Таблиця 1.1 Кольорові коди термопар

Thermocouple Sensor Colour Codes <i>Extension and Compensating Leads</i>			
Code Type	Conductors (+/-)	Sensitivity	British BS 1843:1952
E	Nickel Chromium / Constantan	$-200$ to $900^{\circ}\text{C}$	
J	Iron / Constantan	$0$ to $750^{\circ}\text{C}$	

K	Nickel Chromium / Nickel Aluminium	-200 to 1250°C	
N	Nicrosil / Nisil	0 to 1250°C	
T	Copper / Constantan	-200 to 350°C	
U	Copper / Copper Nickel Compensating for "S" and "R"	0 to 1450°C	

Три найпоширеніші матеріали для термопар, які використовуються вище для загального вимірювання температури: залізо-константан (тип J), мідь-константан (тип T) і нікель-хром (тип K). Вихідна напруга від термопари дуже мала, лише кілька мілівольт (мВ) для зміни різниці температур на 10°C, і через цю малу вихідну напругу, як правило, потрібна певна форма підсилення.

Підсилення сигналу термопари

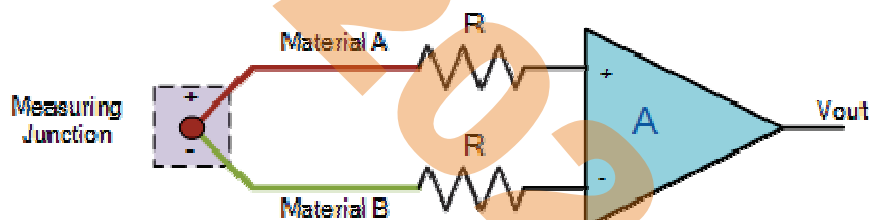


Рисунок 1.16 Підсилення сигналу від термопари [2].

Необхідно ретельно вибирати тип підсилювача, дискретний або у формі операційного підсилювача, оскільки необхідна хороша стабільність дрейфу, щоб запобігти повторному калібруванню термопари через часті проміжки часу. Це робить тип підсилювача чоппера та інструментального підсилювача кращим для більшості програм вимірювання температури.

Інші типи датчиків температури, не згадані тут, включають напівпровідникові датчики, датчики інфрачервоного випромінювання та датчики

теплого випромінювання, термометри медичного типу, індикатори та чорнило або барвники, що змінюють колір.

### 1.3 Основні відомості про ВОДТ

За принципом дії всі волоконно-оптичні датчики фізичних величин поділяються на чотири класи у відповідності з тим, який із параметрів оптичної хвилі використовується для отримання інформації про вимірювальний фізичний вплив:

- амплітуда електричного поля  $E_m$ ,
- фаза  $\varphi$ ,
- стан або напрям поляризації електричного вектора  $p$ ,
- частота  $\omega$ .

Найпоширенішими ВОД температури в цей час є датчики амплітудного типу, у яких модуляція прохідного (або відбитого) світла при зміні температури здійснюється за рахунок залежності поглинання або відбиття середовища (кристали, спеціальні волокна й т.д.). При створенні таких ВОД найчастіше використовується ефект зрушення краю зони власного поглинання в напівпровідниках від температури. В якості чутливого напівпровідникового елемента можуть бути використані кристали GaAs, Si, Ge та ін., край поглинання яких знаходиться в ближній інфрачервоній частині спектру. При конструюванні системи ВОДТ останні потребують оптичного узгодження: спектр випромінювання світлодіода, область поглинання чутливого елемента і спектральна чутливість приймача випромінювання повинні знаходитись в одній спектральній області. Оскільки оптичні характеристики оптопар (світлодіод, фотодіод) практично задані, то для оптимізації оптичної узгодженості схеми залишається змінювати параметри чутливого елемента. У кристалічних напівпровідниках вони також незмінні.

ВОДТ поділяють на дві групи прохідного та відбиваючого типу.

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

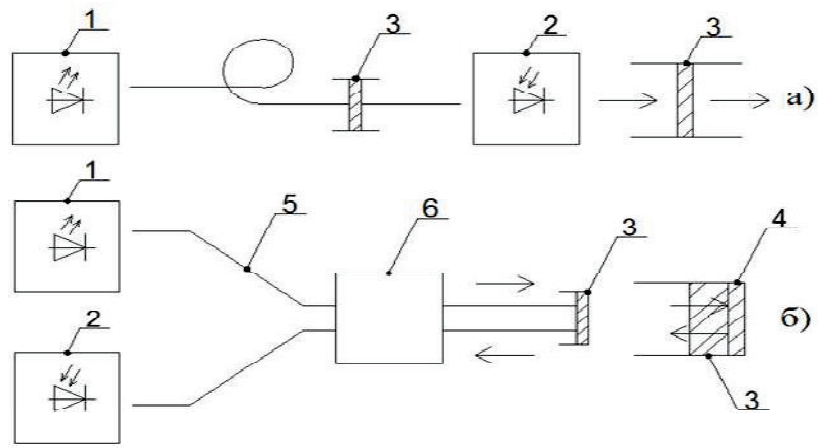


Рисунок. 1.5. Схеми ВОДТ прохідного (а) і відбиваючого (б) типів:

1 – світлодіод; 2 – фотодіод; 3 – чутливий елемент з напівпровідника;  
 4 – дзеркальна металева плівка (золото); 5 – оптичне волокно; 6 – волоконно-оптичний розгалужувач.

## 2 ОПТИЧНІ РОЗРАХУНКИ ДО ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА

В основу роботи приладу покладена залежність зміни прозорості ХСН залежно від його температури, тобто інтенсивність світла, що проходить по робочому каналу через чутливий елемент буде прямо залежати від температури. Таким чином за величиною вхідного сигналу здійснюється вимірювання температури. На Рисунку. 2.1 приведена структура оптичної системи приладу на основі якої побудовано і проведено даний розрахунок.

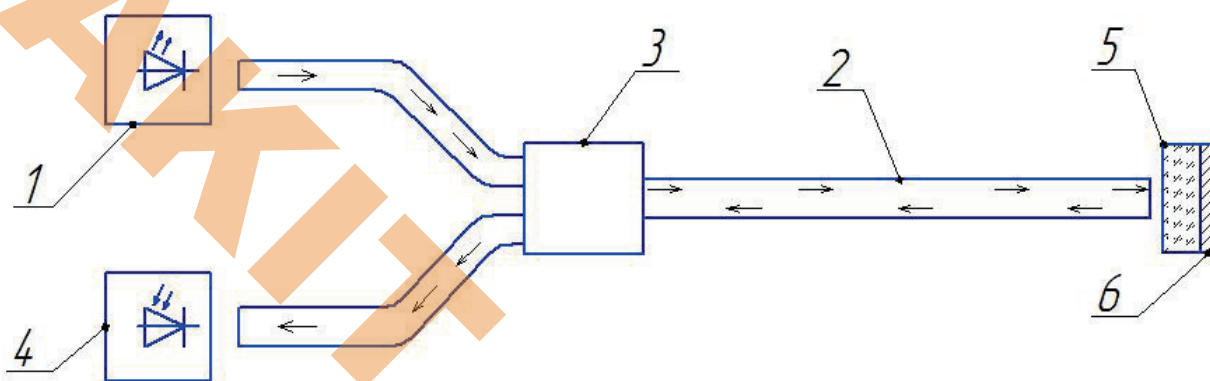


Рисунок. 2.1. Схема оптичної частини ВОДТ

- 1 – джерело випромінювання;
- 2 – волокно;
- 3 – волоконно-оптичний розгалужувач;
- 4 – фотодіод;
- 5 – чутливий елемент виготовлений з ХСН;
- 6 – дзеркальна металева плівка (алюміній).

Для зручності подальших розрахунків наведемо основні необхідні технічні характеристики елементів оптичної системи: оптичного волокна, СД, ФД.

Оптичне волокно:

- матеріал волокна – кварц, легований бромом;

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- показник заломлення  $n = 1,553$  на довжині хвилі  $\lambda = 0,85$  мкм;
- діаметр серцевини  $d_c = 0,1$  мм;
- втрати у волокні 1 км – 2,7...3,0 дБ;
- стійкість до температурних дій в межах від  $-60$  °С до  $+170(180)$  °С.

Характеристики джерела випромінювання [1]:

- назва – M808D50-3--1230;
- робоча довжина хвилі  $\lambda = 0,808$  мкм;
- максимум спектрального розподілу на довжині хвилі  $\lambda = 0,803...0,813$  мкм;
- потужність випромінювання при  $I_{пр} = 100$  мА, не менше 50 мВт;
- оптимальний робочий струм 100 мА;
- вхідний опір  $R = 4,0$  Ом;
- діаметр вихідного світлового пучка 0,25 мм;
- діапазон робочих температур  $T = -40...+85$  °С.

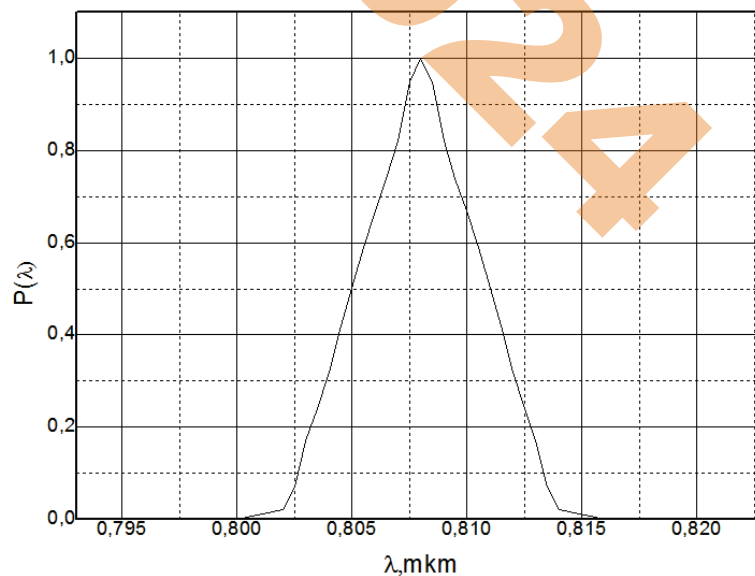


Рисунок. 2.2. Відносна спектральна характеристика випромінювання джерела [1]

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Характеристика приймача випромінювання при  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2]:

- назва – ОРФ432 ;
- пік чутливості на довжині хвилі  $\lambda - 0,85\text{ мкм}$ ;
- струмова інтегральна чутливість  $S_{\text{ін}} \geq 0,55\text{ А/Вт}$ ;
- номінальна робоча напруга –  $U_p = 4\text{ В}$ ;
- постійна часу при включенні або виключенні не більше  $0,005\text{ мкс}$ ;
- розмір чутливого елемента –  $1,4 \times 1,4\text{ мм}$ ;
- плоский кут зору  $2 \cdot \beta$  не менше  $36^{\circ}$ .

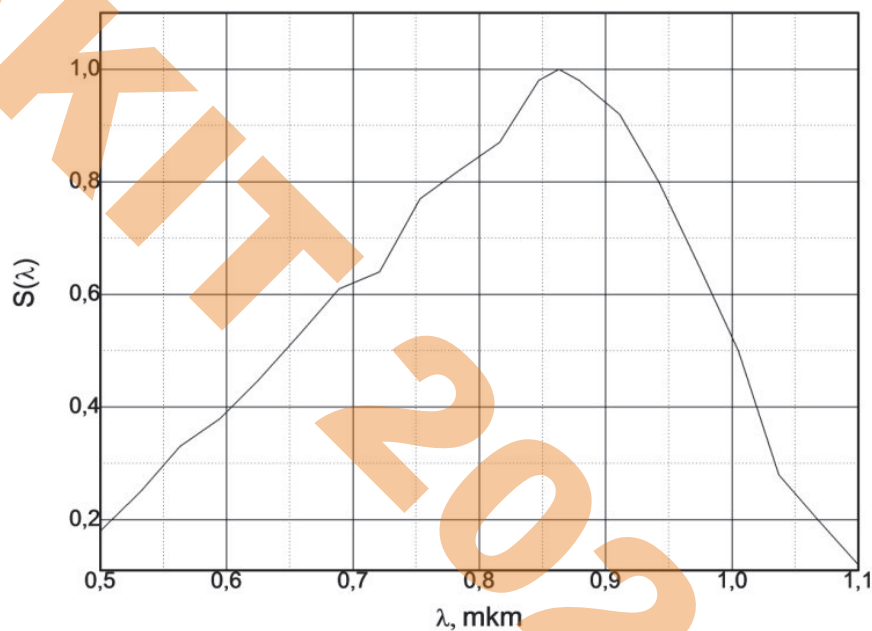


Рисунок. 2.3. Відносна спектральна характеристика поглинання фотодіода [2]

В якості матеріалу чутливого елемента для розрахунку обрано ХСН зі складом  $\text{As}_{45}\text{Se}_{55}$ , товщиною  $d = 0,6\text{ мм}$ . На Рисунку 2.4 наведено експериментально вимірний спектр пропускання при ряді температур

$T_1=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_4=90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_5=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_6=130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_7=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_8=170\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

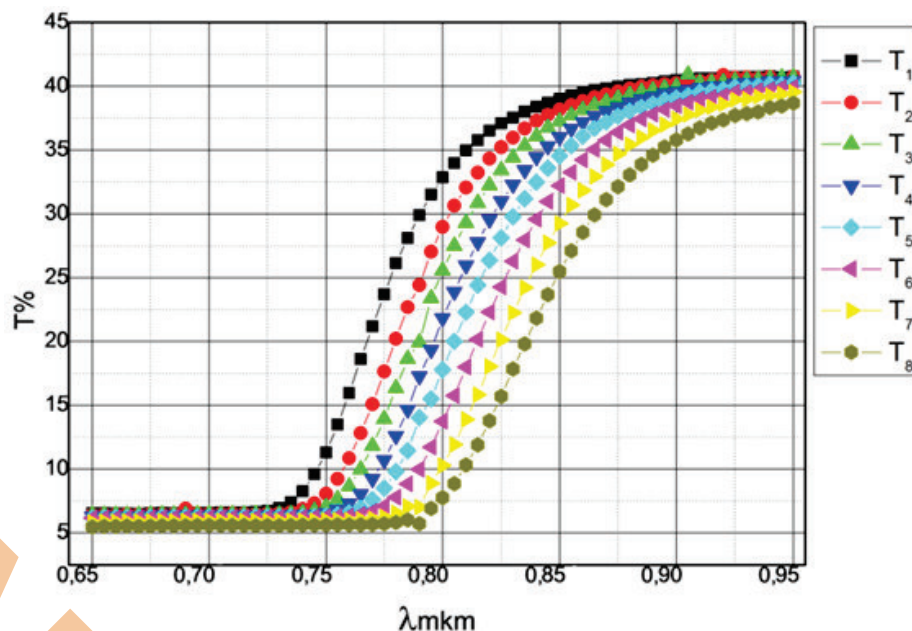


Рисунок. 2.4. Спектр пропускання ХСН на різних довжинах хвилі при різних температурах

## 2.1 Розрахунок світлової енергії, що попадає на площадку приймача випромінювання та коефіцієнт втрат в робочому та опорному каналі

В нашому випадку джерело випромінювання повинно працювати в постійному режимі. Потужність випромінювання світлодіода при  $I_{пр}=50\text{мА}$ , не менше  $P = 40\text{мкВт}$ .

Діаметр серцевини оптичного волокна  $=0,1\text{мм}$ , знайдемо площу поперечного перерізу серцевини оптичного волокна:

$$S_B = \pi d^2/4 \quad (2.1)$$

$$S_B = 3,14 \cdot 0,25^2/4 = 0,049 \text{ мм}^2$$

Діаметр площини випромінювання світлодіоду –  $d=0,25 \text{ мм}$ . Визначимо площу випромінюючої ділянки:

$$S_{вд} = 3,14 \cdot 0,1^2/4 = 0,049 \text{ мм}^2$$

За даними значеннями визначимо потужність випромінювання, що буде надходити і волокно, виходячи для цього формулу:

$$P_{вх.} = P \cdot (S_B / S_{вд}) \quad (2.2)$$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

$$P_{\text{вх.}} = 20 \cdot (0,00785/0,049) = 6,4 \text{ мкВт}$$

Для визначення світлової енергії, що попадає на площадку фотодіода, для початку треба розрахувати втрати у волоконно-оптичному тракті. Для цього введемо  $\tau$  = коефіцієнт пропускання. При нормальному падінні променя на границю двох ізотропних середовищ пропускання визначається за формулою:

$$\tau = 1 - \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.3)$$

де  $n_1, n_2$  – показники заломлення суміжних середовищ.

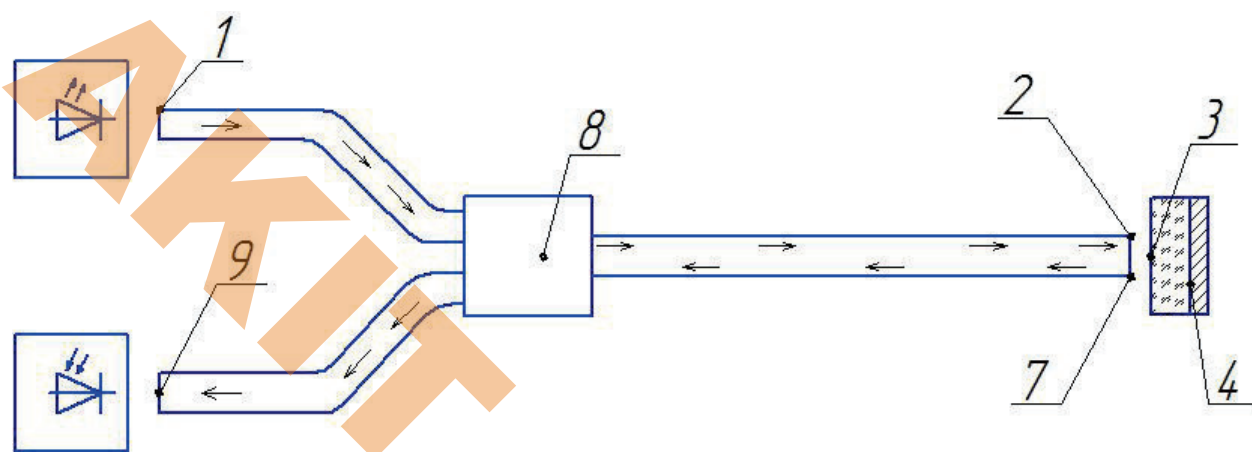


Рисунок. 2.5. Шлях проходження оптичного випромінювання

В нашому випадку оптична система містить наступні суміжні середовища: повітря, ХСН, кварц.

Показники заломлення даних середовищ:

- повітря:  $n = 1$ ;
- кварц:  $n = 1,55$ ;
- ХСН:  $n = 2,8$ .

Розрахуємо втрати випромінювання в оптичному тракті. Першим переходом випромінювання є повітря-кварц, який повторюється двічі в зоні 1 і 7, тому даний коефіцієнт при загальному розрахунку до множимо на 2. Тоді  $\tau_1$ :

$$\tau_1 = 1 - \left( \frac{1,0-1,55}{1,0+1,55} \right)^2 = 0,954$$

На виході із волокна маємо два суміжні середовища кварц-повітря (точка 2):

$$\tau_2 = 1 - \left( \frac{1,55-1,0}{1,55+1,0} \right)^2 = 0,954$$

Наступне оптичне середовище повітря-ХСН:

$$\tau_3 = 1 - \left( \frac{1,0-2,8}{1,0+2,8} \right)^2 = 0,775$$

Наступним суміжним середовищем є ХСН-повітря:

$$\tau_4 = 1 - \left( \frac{2,8-1,0}{2,8+1,0} \right)^2 = 0,775$$

Попередні дві зони повторюються тому їх коефіцієнти при загальному розрахунку до множимо на 2.

В точці 8 промінь ділиться на два, це обумовлено технологією сполучення оптичних волокон та законом повного внутрішнього відбивання в оптичних матеріалах, маємо:

$$\tau_7 = 0,5$$

Далі промінь попадає на фотодіод, проходить суміжне середовище кварц-повітря:

$$\tau_8 = 1 - \left( \frac{1,55-1,0}{1,55+1,0} \right)^2 = 0,954$$

Загальний коефіцієнт пропускання визначаємо як добуток всіх коефіцієнтів на перехідних середовищах:

$$\tau_{\text{заг}} = (\tau_1)^2 \cdot \tau_2 \cdot (\tau_3)^2 \cdot (\tau_4)^2 \cdot \tau_8 \cdot \tau_9 = (0,954)^2 \cdot 0,954 \cdot (0,775)^2 \cdot (0,775)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,954 = 0,157$$

Визначимо потужність потоку випромінювання, що падає на площадку фотодіода:

$$P_{\text{вих.}} = P_{\text{вх.}} \cdot \tau_{\text{заг.}} = 6,4 \cdot 0,157 = 1,005 \text{ мкВт}$$

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.2 Розрахунок струму фотодіода

Фотодіод перетворює потік оптичного випромінювання в електричний сигнал. Розрахуємо величину струму на виході фотодіода за наступною методикою.

Вхідна формула для розрахунку струму фотодіода:

$$I_{\text{фд.}} = \tau_0 \cdot S^a(\lambda) \cdot P^a(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \quad (2.4)$$

Де  $S^a(\lambda)$  – спектральний розподіл чутливості фотодіода в абсолютних одиницях [А/Вт];

$P^a(\lambda)$  – спектральна залежність випромінювальної здатності світло діода а.о. [Вт];

$\tau(\lambda)$  – пропускання чутливого елемента датчика в.о.;

$\tau_0$  – пропускання волоконно-оптичного тракту, вважаємо, що ця величина стала для даного датчика.

Даний вираз для діапазону від  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$  набуває вигляду:

$$I_{\text{фд.}} = \tau_0 \cdot S^a(\lambda) \cdot P^a(\lambda) \cdot \tau(\lambda)$$
$$I_{\text{фд.}} = \tau_0 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) \cdot P^B(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda \quad (2.6)$$

Залежності  $S^a(\lambda)$ ,  $P^a(\lambda)$ , в літературі не приводяться, частіше в довідниках по н/п приладах приводяться залежності [3]:

$$S^B(\lambda) = \frac{S^a(\lambda)}{S_m^a(\lambda_m)} \quad (2.7)$$

та

$$P^B(\lambda) = \frac{P^a(\lambda)}{P_m^a(\lambda_m)} \quad (2.8)$$

$S_m^a(\lambda_m)$ ,  $P_m^a(\lambda_m)$  – максимальні значення чутливості  $S$ , і випромінювальної здатності  $P$ , фотодіода і світлодіода на довжині хвилі  $\lambda_m$ .

Для знаходження струму фотодіода  $I_{\text{ф}}$  з (2.4) необхідно знайти  $S^a(\lambda)$  і  $P^a(\lambda)$ . Знайдемо їх з (2.5) і (2.6), одержимо:

$$S^a(\lambda) = S^B(\lambda) \cdot S_m^a(\lambda_m) \quad (2.9)$$

$$P^a(\lambda) = P^B(\lambda) \cdot P_m^a(\lambda_m) \quad (2.10)$$

У вираз (6) підставимо вирази (9) і (10) та отримаємо:

					КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{\text{фд.}} = \tau_o \cdot S_m^a(\lambda_m) \cdot P_m^a(\lambda_m) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^a(\lambda) \cdot P_\lambda^a(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda \quad (2.11)$$

У виразах (2.7) і (2.8) величини  $S_m(\lambda)$ ,  $P_m(\lambda)$  також в довідниках не наводиться. В літературі наводять  $S_{\text{інт}}$ ,  $P_{\text{інт}}$  – інтегральні залежності чутливості фотодіода і випромінювальної здатності світлодіода, які представляють собою інтегральні величини в заданому діапазоні довжин хвиль.

У нашому випадку  $S_{\text{інт}}^a$ ,  $P_{\text{інт}}^a$  – матимуть вигляд:

$$S_{\text{інт}}^a = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_3} S^a(\lambda) \cdot M(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty S^b(\lambda) \cdot M(\lambda) d\lambda} = S_m^a(\lambda_m) = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_3} S^b(\lambda) \cdot M(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty M(\lambda) d\lambda} \quad (2.12)$$

звідки

$$S_m^a(\lambda_m) = \frac{S_{\text{інт}}^a}{K_{\text{ачт}}} \quad (13)$$

де  $K_{\text{ачт}} = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_3} S^b(\lambda) \cdot M(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty M(\lambda) d\lambda}$  – коефіцієнт виокремлення абсолютно

чорного тіла;

$$P_{\text{інт}} = P_\lambda^a(\lambda_m) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^b(\lambda) d\lambda \quad (2.14)$$

тоді

$$P_\lambda^a(\lambda_m) = \frac{P_{\text{інт}}^a}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^b(\lambda) d\lambda} \quad (2.15)$$

Після підстановки проміжкових виразів загальна формула набуває вигляду:

$$I_{\text{фд.}} = \tau_o \frac{S_{\text{інт}}^a \cdot P_{\text{інт}}^a}{K_{\text{ачт}}} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^b(\lambda) \cdot P_\lambda^b(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^b(\lambda) d\lambda} \quad (2.16)$$

Позначимо вираз

$$k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^b(\lambda) \cdot P_\lambda^b(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^b(\lambda) d\lambda} \quad (2.17)$$

З урахуванням (2.17), (2.16) запишемо як:

$$I_{\text{фд.}} = \tau_o \cdot S_{\text{інт}}^a \cdot P_{\text{інт}}^a \cdot k \quad (2.18)$$

де  $S_{\text{інт}}^a$  – струмова інтегральна чутливість фотодіода. В нашому випадку для фотодіода (OPF432) складає:

					<b>КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ</b>	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{\text{ін}} = 0,55 \text{ А/Вт};$$

$P_{\text{інт}}^a$  – інтегральна випромінювальна здатність лазера світлодіода. В нашому випадку для фотодіода (М808D50-3--1230) складає:

$$P_{\text{ін}} = 50 \text{ мВт};$$

$\tau_0$  – пропускання волоконно-оптичного тракту. В нашому випадку складає:

$$\tau_0 = 0,157.$$

Інтеграли у формулі знаходимо як площі обмежені кривими  $P(\lambda)$ ,  $S(\lambda)$ , і  $\tau(\lambda)$  (Рисунок. 2.2 – 2.3).

З формули (2.17) коефіцієнт  $k$  буде змінюватися за рахунок зміни спектру пропускання скла  $As_{45}Se_{55}$  при  $T_i$ , де  $i$  змінюється від 1 до 8. Тоді  $k_1$  відповідає  $T_1$ ,  $k_2 - T_2$  і т. д.

Тоді вираз (18) можна записати як:

$$I_{\text{фд}} = \frac{\tau_0 \cdot S_{\text{інт}}^a \cdot P_{\text{інт}}^a \cdot k_i}{k_{\text{ачт}}}, \text{ при } T_i \quad (2.19)$$

Знайдемо всі значення  $k_i$ , для кожного  $T_i$ :

$$k_1 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) \cdot P_{\lambda}^B(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^B(\lambda) d\lambda} = 0,019$$

$$k_2 = 0,017; \quad k_3 = 0,016; \quad k_4 = 0,014; \quad k_5 = 0,012; \quad k_6 = 0,0094; \quad k_7 = 0,0072; \\ k_8 = 0,0054.$$

Знайдемо значення  $k_{\text{ачт}}$  з урахуванням робочої температури та довжині хвилі:

$$k_{\text{ачт}} = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_3} S^B(\lambda) \cdot M(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} M(\lambda) d\lambda} = \frac{0,323}{0,493} = 0,655$$

За формулою (19) знайдемо струм фотодіода  $I_{\text{фд}1}, I_{\text{фд}2} \dots I_{\text{фд}8}$ :

$$I_{\text{фд}1} = \tau_0 \cdot S_{\text{інт}}^a \cdot P_{\text{інт}}^a \cdot k_i / k_{\text{ачт}} = 0,157 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 0,55 \cdot 0,019 / 0,655 = \\ = 9,606 \cdot 10^{-3} \text{ А}, \quad I_{\text{фд}2} = 8,595 \cdot 10^{-3} \text{ А}, \quad I_{\text{фд}3} = 8,089 \cdot 10^{-3} \text{ А}, \\ I_{\text{фд}4} = 7,078 \cdot 10^{-3} \text{ А}, \quad I_{\text{фд}5} = 6,067 \cdot 10^{-3} \text{ А}, \quad I_{\text{фд}6} = 4,752 \cdot 10^{-3} \text{ А}, \\ I_{\text{фд}7} = 3,640 \cdot 10^{-3} \text{ А}, \quad I_{\text{фд}8} = 2,730 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

					<b>КРБ.ПБ.19050035.01.000 ПЗ</b>	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

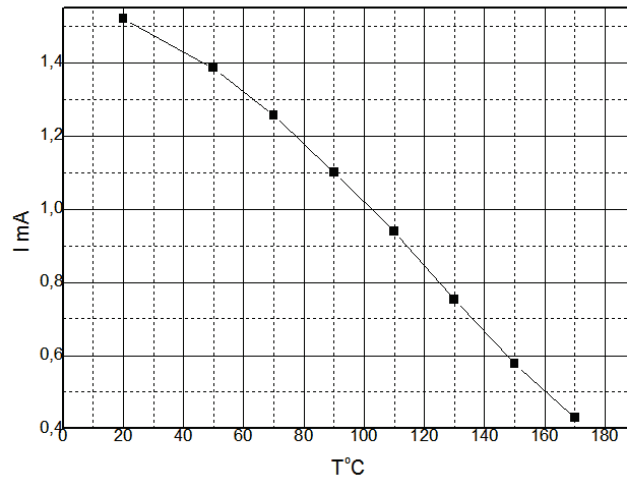


Рисунок. 2.6. Залежність зміни струму фотодіода від зміни температури чутливого елемента ХСН датчика температури.

Перерахуємо напругу на виході фотодіода при навантаженні  $R_n = 1 \text{ кОм}$  за формулою:

$$U_{\text{фд}} = I_{\text{фд}} \cdot R_n$$

$$U_{\text{фд}1} = I_{\text{фд}1} \cdot R_n = 9,606 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 = 9,60 \text{ В}; \quad U_{\text{фд}2} = 8,60 \text{ В}; \quad U_{\text{фд}3} = 8,09 \text{ В};$$

$$U_{\text{фд}4} = 7,08 \text{ В}; \quad U_{\text{фд}5} = 6,07 \text{ В}; \quad U_{\text{фд}6} = 4,75 \text{ В}; \quad U_{\text{фд}7} = 3,64 \text{ В}; \quad U_{\text{фд}8} = 2,73 \text{ В}.$$

### 3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО БЛОКУ ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО

#### 3.1 Опис структурної схеми терморегулятора

Відповідно до приведеної у розділі 2 на Рисунок. 2.1 схеми оптичної частини ВОДТ, що працює за принципом відбивання оптичного випромінювання від дзеркальної металевої плівки, була розроблена структурна комбінована схема, що приведена на Рисунок. 3.1.

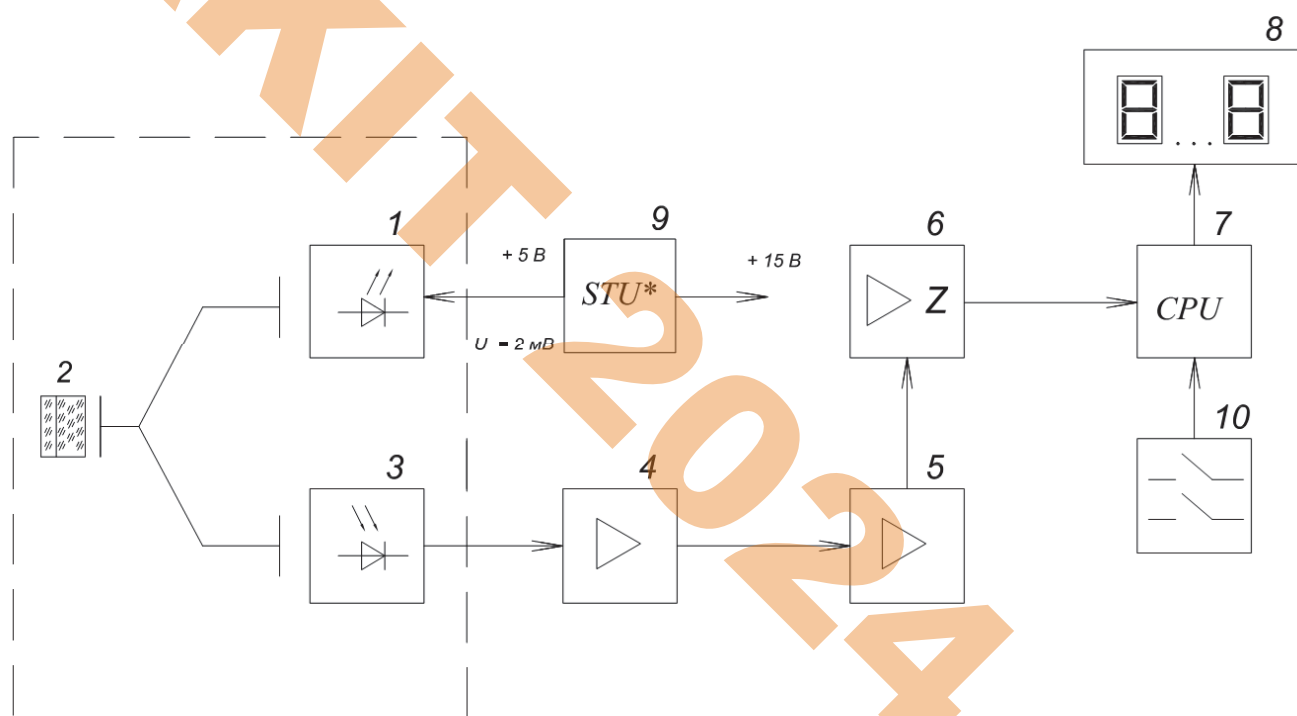


Рисунок.3.1 Структурна схема терморегулятора волоконно-оптичного

1 - Світлодіод; 2 – чутливий елемент; 3 - фотодіод; 4,5- підсилювач;  
6 – узгоджувачий підсилювач; 7 - мікроконтролер; 8 - числовий індикатор; 9 –  
стабілізатор напруги живлення; 10 – кнопки керування.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ

Арк.  
39

Живлення випромінювача ВОД – ІЧ-випромінювальний діод IF-D91 – здійснюється шляхом застосування додаткового фільтра живлення на схемі блоку вимірального постійною напругою.

Живлення випромінювача 1 здійснюється від стабілізатора 9. Випромінювання заводиться у волоконно-оптичний тракт та проходить ерез чутливий елемент 2.

Потік ІЧ-випромінювання після проходження волоконно-оптичного каналу приймається фотодіодами 3 (IF-E91D), який включений у виміральному фотодіодному (зворотне включення ФД) режимі. Попередній підсилювач 7 виконує підсилення фотосигналу  $U_{\phi}$  до необхідного рівня ( $\sim 1,5 - 2$  В). Схемотехнічно попередній підсилювач реалізований за класичною схемою неінвертуючого підсилювача на ОП.

Реєстрація в розробленому приладі здійснюється наступним чином:

інформація з вихідного каналу підсилення подається на мікроконтроллер, який працює в режимі вимірювання напруги з вбудованим перетворювачем значень напруги в температуру.

На основі цієї схеми нами розроблена схема волоконно-оптичного датчика температури, яка приведена на Рисунок..

Живлення джерел випромінювання (1) здійснюється по схемі аналогічній до приведенного аналога.

Вихідні сигнали приймача випромінювання (3) підсилюються за допомогою підсилювача попереднього (4). Далі сигнал подається на вхід диференціального підсилювача (5), який забезпечує проміжкове підсилення сигналу. Залежно від типу аналогово-цифрового перетворювача сигнал підсилюється за допомогою кінцевого підсилювача (6), перетворюється в цифровий сигнал (7) і відображається на індикаторі (8).

Вихідний сигнали приймача випромінювання пропорційні чутливості  $S$  та світловому потоку  $\Phi$  [3-5]:

$$U'_1 = S_U \Phi_1 \quad (3.1)$$

					КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.2 Опис електричної принципової схеми терморегулятора волоконно-оптичного

Схема електрична принципова приведена на рисунку 3.2.

Враховуючи те, що номінальний режим роботи джерел випромінювання (АЛ135А) використаних нами є близьким до номінального режиму АЛ102А використаних в [3] тому ця частина схеми електричної принципової використана без змін.

На відміну від вище приведеного аналога підсилювачі попередні реалізовано на мікросхемі К544УД4. Ця мікросхема містить два операційні підсилювачі з високим вхідним опором, з малими вхідними струмами (типове значення 0,01 нА), з низьким нормованим рівнем НЧ-шумів. Параметри К544УД4 є практично ідентичні параметрам К544УД1[6,7]. Підсилювач попередній зібрано по схемі неінвертуючого підсилювача [6,7]. Прийmemo, що коефіцієнт підсилення каскаду попереднього підсилення рівний 100, а величина опору в колі зворотного зв'язку 100 кОм. Тоді з загального відомого співвідношення слідує, що величина опорів R14 та R15  $\approx 1$  кОм. Додаткове регулювання коефіцієнта підсилення забезпечується підстроювальними резисторами R16 та R17, які увімкнено послідовно у відповідні кола. За допомогою цих опорів при рівності температур сенсорів обох сигналів вихідний сигнал диференціального підсилювача має бути рівним нулю. Конденсатори в колах зворотного зв'язку (С6, С7) забезпечують 100% від'ємний зворотний зв'язок по постійному струму.

Диференціальний підсилювач зібрано на мікросхемі КМ544УД1. Для розрахунку його параметрів прийmemo, що мінімальна величина вихідної напруги, яка пропорційна мінімальній реєстрованій різниці температур 0,5 градуси, рівна 0,001 В. Ця схема підсилювача різницевого по суті є схемою найпростішого диференціального підсилювача, оскільки особливих вимог стосовно рівності

					КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вхідних опорів не висувається. Для такої схеми вихідна напруга визначається за формулою [8]:

$$U_{вих} = U_2 \frac{R_{21}}{R_{21} + R_{19}} \cdot \left( 1 + \frac{R_{20}}{R_{18}} \right) - U_1 \cdot \frac{R_{20}}{R_{18}} \quad (3.2)$$

Тоді, якщо прийняти, що відношення

$$\frac{R_{19}}{R_{21}} = \frac{R_{18}}{R_{20}},$$

то вихідна напруга буде змінюватись пропорційно різниці вхідних сигналів:

$$U_{вих} = (U_2 - U_1) \cdot \frac{R_{20}}{R_{18}}. \quad (3.3)$$

Прийнявши, що напрузі 0,050 В відповідає зміна температури в 0,5 град. знаходимо, що відношення опорів резисторів є рівним 10. Тоді  $R_{20}=R_{21}=10$  кОм, а  $R_{18}=R_{19}=1$  кОм.

Кінцевий каскад підсилення реалізований на інвертуючому підсилювачі і, практично, забезпечує узгодження з АЦП. Приймаємо, що вихідна максимальна напруга при максимальній різниці температур 2,000 В. Тоді коефіцієнт підсилення рівний 4. Звідси, прийнявши  $R_{23}=20$  кОм, знаходимо, що  $R_{22}=5$  кОм. Однак ці номінали можуть бути уточнені при виборі конкретного АЦП. Резистор  $R_{24}$  вводиться в схему для компенсації похибок зумовлених різницею вхідних струмів і він є рівним опору паралельно з'єднаних резисторів  $R_{23}$  та  $R_{22}$ , тобто він є рівним 4 кОм. Тоді приймаємо з ряду E24  $R_{24}=3,9$  кОм.

					КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

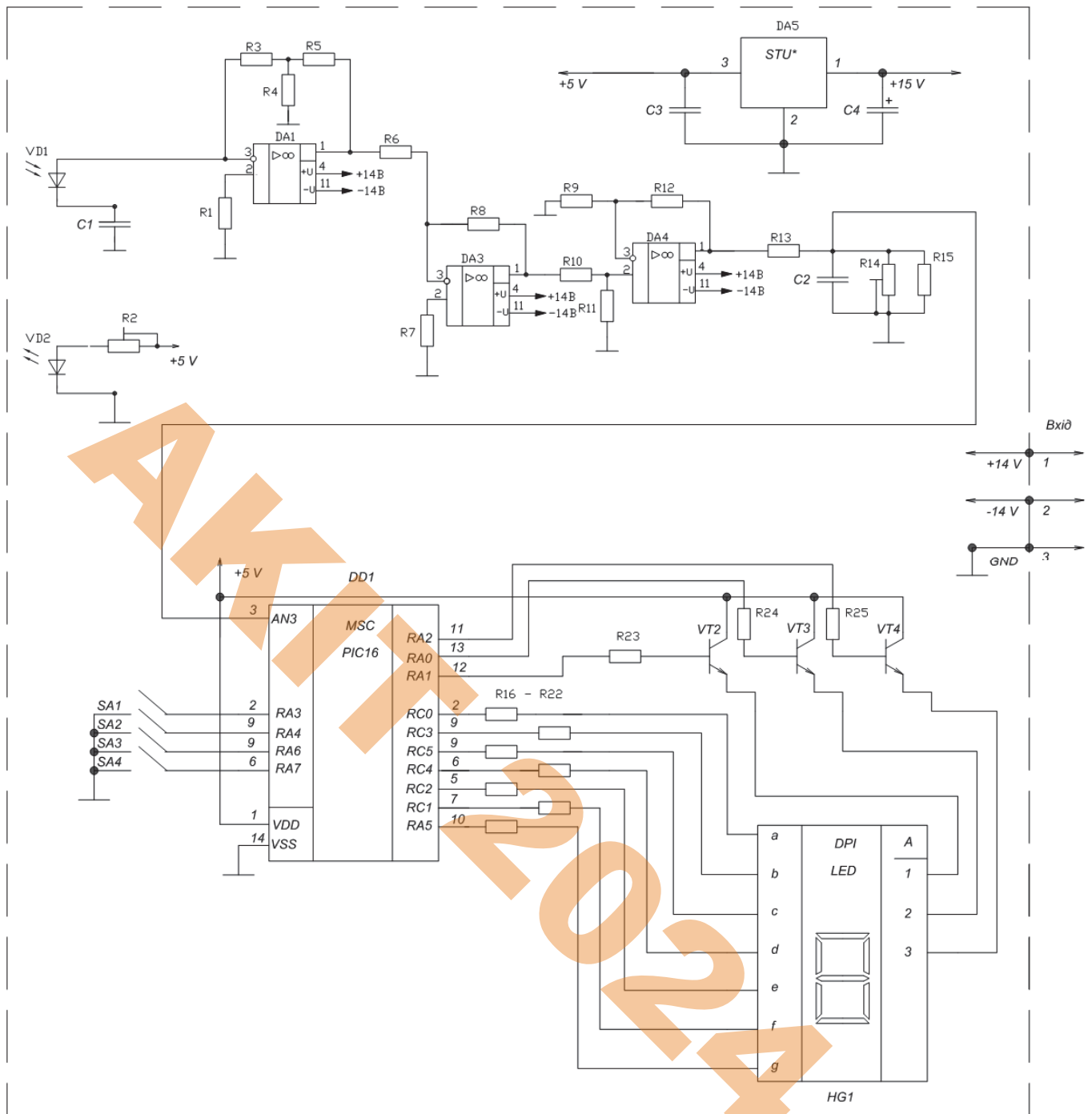


Рисунок. 3.2 Електрична принципова схема терморегулятора волоконно-оптичного

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ

#### 4 Алгоритм роботи та програмування контролера

Керування температурою є однією з найбільш розповсюджених задач як у побуті так і в промисловості від приготування йогуртів до виготовлення спиртів та різноманітних розчинників, жодна зі згаданих задач не обійдеться без тривалого підтримування заданої температури. У наш час завдань, що включають короткочасний або тривалий контроль температури чи підтримання певних температурних режимів або відтворення відповідних температурних циклів з процесами нагрівання та охолодження є безліч. Тому гнучка система налаштування сучасного терморегулятора є доволі актуальною задачею. Не зважаючи на невеликий діапазон контрольованої температури проєктований універсальний терморегулятор на базі волоконно-оптичного датчика амплітудного типу легко знайде своє застосування у різних ситуаціях. Переваги, якими володіє волоконно-оптична техніка по відношенню з більш традиційними датчиками температури створює специфічну нішу застосування де дані датчики є незамінними та поза конкуренцією.

Зважаючи на це алгоритм роботи проєктованого пристрою, повинен бути як універсальним так і достатньо надійним та простим у користуванні. Тому розробка алгоритму роботи проєктованого приладу є одним з найважливіших завдань при його проєктування, що стоїть на тому ж рівні складності як і його електрична принципова та структурна схеми і інші етапи розробки.

Алгоритм роботи пристрою описує логічну послідовність операцій, що повинен виконувати проєктований пристрій. Кожен алгоритм роботи пристрою являє собою список визначених дій, команд та інструкцій для рішення поставленої задачі. Алгоритм роботи включає опис інструкцій процесів обчислення, що відбуваються за заданою послідовністю його станів, які також мають свій кінцевий стан. Переходи від одного до іншого станів є не обов'язково детермінованими, тобто існують алгоритми у яких відсутні алгоритми випадковості. Наданий час одними з найпопулярніших методів візуалізування

					КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алгоритмів функціонування пристрою, крім загально відомих блоксхем також можуть бути UML- діаграми функціонування автоматизованої системи контролю.

Розроблений у даній роботі алгоритм роботи проектованого пристрою наведено на рисунку 4.1.

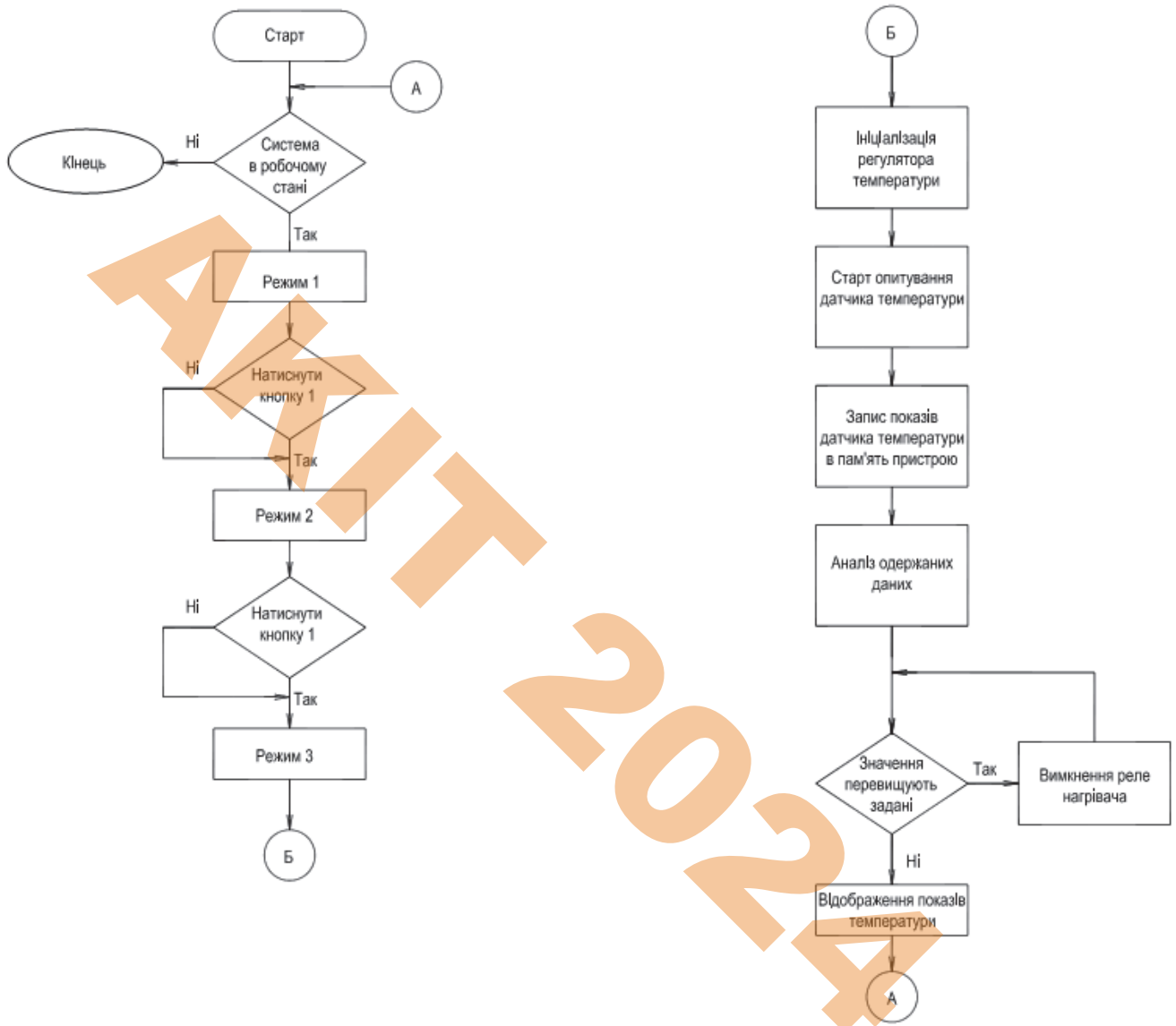


Рисунок 4.1 Блок-схема алгоритму роботи проектованого пристрою

На елементах індикації пристрою повинна відобразитися температура у зоні регулювання та стан виконавчого реле (навантаження ввімкнено або вимкнено).

Також можна переглянути максимальний температурний поріг, при якому повинно вимкнутися реле, та температурний гістерезис. Програмним способом була реалізована функція гістерезису з можливістю його налаштування. Що

дає змогу регулювати циклу вмикання та вимикання нагрівної установки за допомогою силового реле.

АКТИТ  
2024

АКТИТ

					КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи було проведено:

- короткий аналіз стану розробки сучасних автоматичних терморегуляторів, їх переваги та недоліки а також особливості конструкції та технічні характеристики;
- проаналізовано особливості використання волоконно-оптичних технологій для вимірювання температури та обрано варіант конструкції датчика для проектованого пристрою;
- виконано відповідні розрахунки для проектування первинного вимірювального перетворювача проектованого пристрою;
- обрано структурну та електричну принципову схеми та приведеної опис;
- розроблено алгоритм роботи пристрою та розроблено відповідні креслення;
- модель програмного забезпечення мікроконтролера наведено у додатках до даної роботи.

					КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Technical Explanation for Temperature Controllers  
URL: [https://www.ia.omron.com/data\\_pdf/guide/53/temperature\\_tg\\_e\\_6\\_3\\_temperature\\_sensor\\_tg\\_e\\_5\\_3.pdf](https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/53/temperature_tg_e_6_3_temperature_sensor_tg_e_5_3.pdf)
2. Application of Thermo-Fluidic Measurement Techniques  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012809731100006X>
- 3.
4. ATtiny26 datasheet
5. Конструювання друкованих плат. Методичні вказівки до виконання конструкторських розрахунків курсового проекту „Проектування радіоелектронної апаратури”. – Ужгород, УжНУ, 2003, 40с.
6. Методичні рекомендації до виконання розрахунків по оцінці показників надійності радіоелектронної апаратури для студентів інженерних спеціальностей. УжНУ, 2001, 56с.

					КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АКТИВ  
2024

ДОДАТКИ

АКТИВ

					КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток 1. Код програми

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "max6675.h"
#include <EEPROM.h>
LiquidCrystal_I2C _lcd1(0x27, 16, 2);
int _dispTempLength1=0;
boolean _isNeedClearDisp1;
MAX6675 MAX6675_9_10_8(10, 9, 8);
unsigned long MAX6675_StTime;
bool MAX6675_CanPoll = 0;
const byte _menuParamtrsArray[] PROGMEM = {1, 3, 2, 0, 0, 0, 3, 4, 1, 4, 2, 0, 2, 3,
1, 0, 0, 0, 2, 4, 1, 4, 1, 0};
int _menuValueArray_int[2];
const int _menuConstantValuesArray_int[] PROGMEM = {1, 350, 50, 0};
const char _flprogMenuNameString1[] PROGMEM = "Temperature";
const char _flprogMenuNameString2[] PROGMEM = "Hysteresis";
const char* const _flprogMenuStringsArray[] PROGMEM = {
_flprogMenuNameString1, _flprogMenuNameString2};
struct _menuItemStricture {
int startInArrayIndex;
};
struct _menuMainStricture {
byte startIndex;
byte stopIndex;
bool isSwitchMenuAroundRing;
_menuItemStricture currentItem;
};
_menuItemStricture _MenuItems[2];
_menuMainStricture _MainMenus[1];
float _gtv4;
bool _gtv5;
bool _gtv7;
bool _bounseInputD2S = 0;
bool _bounseInputD2O = 0;
unsigned long _bounseInputD2P = 0UL;
bool _bounseInputD3S = 0;
bool _bounseInputD3O = 0;

```

					КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

unsigned long _bounseInputD3P = 0UL;
int _disp6oldLength = 0;
int _disp1oldLength = 0;
int _disp13oldLength = 0;
bool _trgs2 = 0;
int _disp10oldLength = 0;
int _disp8oldLength = 0;
bool _tim2I = 0;
bool _tim2O = 0;
unsigned long _tim2P = 0UL;
bool _trgrt1 = 0;
bool _trgrt1I = 0;
bool _bounseInputD4S = 0;
bool _bounseInputD4O = 0;
unsigned long _bounseInputD4P = 0UL;
bool _MenuBlock_255966044_AMO_129592179 = 0;
bool _MenuBlock_255966044_AMO_103176861 = 0;
String _MenuBlock_255966044_MNO;
String _MenuBlock_255966044_VNO;
bool _MenuBlock_255966044_OEIS = 0;
bool _MenuBlock_255966044_OMUIS = 0;
bool _MenuBlock_255966044_OMDIS = 0;
bool _MenuBlock_255966044_OVUIS = 0;
bool _MenuBlock_255966044_OVDIS = 0;
unsigned long _MenuBlock_255966044_VUDST = 0UL;
unsigned long _MenuBlock_255966044_VUDSPT = 0UL;
byte _MenuBlock_255966044_VUDSM = 0;
int _MenuBlock_255966044_VUDPT = 0;
int _disp12oldLength = 0;
unsigned long MAX6675_9_10_8_TT = 0UL;
float MAX6675_9_10_8_Output = 0.00;
int _disp11oldLength = 0;
bool _trgt2 = 0;
bool _trgt2I = 0;
int _disp2oldLength = 0;
int _disp3oldLength = 0;
void setup()
{

```

					КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

pinMode(2, INPUT_PULLUP);
pinMode(3, INPUT_PULLUP);
pinMode(4, INPUT_PULLUP);
pinMode(5, OUTPUT);
digitalWrite(5, 0);
Wire.begin();
delay(10);
MAX6675_StTime = millis();
MAX6675_9_10_8_TT = millis() +500;
_lcd1.init();
_lcd1.backlight();
_bounceInputD2O = digitalRead(2);
_bounceInputD3O = digitalRead(3);
_bounceInputD4O = digitalRead(4);
_MenuItems[0].startInArrayIndex = 0;
_MenuItems[1].startInArrayIndex = 12;
_MainMenus[0].startIndex = 1;
_MainMenus[0].isSwitchMenuAroundRing = 1;
_MainMenus[0].stopIndex = 2;
_MainMenus[0].currentItem = _MenuItems[0];
_menuValueArray_int[0] = (readIntegerFromEEPROM(0, 0, 0x0));
_menuValueArray_int[1] = (readIntegerFromEEPROM(2, 0, 0x0));
}
void loop()
{
bool _tempVariable_bool;
byte _tempVariable_byte;
if (! MAX6675_CanPoll) { MAX6675_CanPoll = _isTimer(MAX6675_StTime, 500);}
if (_isNeedClearDisp1) {_lcd1.clear(); _isNeedClearDisp1= 0;}
bool _bounceInputTmpD2 = (digitalRead (2));
if (_bounceInputD2S)
{
if (millis() >= (_bounceInputD2P + 40))
{ _bounceInputD2O= _bounceInputTmpD2; _bounceInputD2S=0;}
}
else
{
if (_bounceInputTmpD2 != _bounceInputD2O )

```

					<b>КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

```

{ _bounceInputD2S=1; _bounceInputD2P = millis();}
}
bool _bounceInputTmpD3 = (digitalRead (3));
if (_bounceInputD3S)
{
if (millis() >= (_bounceInputD3P + 40))
{ _bounceInputD3O= _bounceInputTmpD3; _bounceInputD3S=0;}
}
else
{
if (_bounceInputTmpD3 != _bounceInputD3O )
{ _bounceInputD3S=1; _bounceInputD3P = millis();}
}
bool _bounceInputTmpD4 = (digitalRead (4));
if (_bounceInputD4S)
{
if (millis() >= (_bounceInputD4P + 40))
{ _bounceInputD4O= _bounceInputTmpD4; _bounceInputD4S=0;}
}
else
{
if (_bounceInputTmpD4 != _bounceInputD4O )
{ _bounceInputD4S=1; _bounceInputD4P = millis();}
}
}

```

					<b>КБР.ПБ.19050035.01.000 ПЗ</b>	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		