

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Навчально-науковий центр заочної форми навчання
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Інформаційно-вимірювальна система
градування датчиків температури
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МВТ_{ЗМ}-20-1

Клигін С.М.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Метрологія та
вимірювальна техніка
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Єгоров А.Б.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Захаров І.П.
(прізвище, ініціали)

2021 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Метрологія та вимірювальна техніка
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Клигіну Сергію Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інформаційно-вимірювальна система градування датчиків температури

затверджена наказом університету від 23 жовтня 2021 р. № 161 Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 06 грудня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

1. Тип термоперетворювачів: терморезистор, термопара.

2. Діапазон температур: $-50 \dots 100$ °С.

3. Максимальна відстань між комп'ютером та вимірювальною установкою: 60 м.

4. Максимальна кількість термопар, що одночасно градуються: 16.

5. Максимальна кількість терморезисторів, що одночасно градуються: 16.

6. Максимально допустима похибка вимірювання опору: ± 0.1 %.

7. Максимально допустима похибка вимірювання термоЕРС: ± 0.1 %.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1. Основні відомості про термометрію.

2. Вимірювальні перетворювачі температури.

3. Загальні відомості про інформаційно-вимірювальні системи.

4. Розробка інформаційно-вимірювальної системи для градування датчиків температури.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

1. Вихідні дані для проєктування. 2. Первинні перетворювачі температури.

3. Схема автоматизованого вимірювального експерименту.

4. Характеристики інтерфейсу RS-485.

5. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи.

6. Модулі збирання даних.

7. Схема алгоритму функціонування вимірювальної системи.

8. Аналіз похибок.

9. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми та методів її вирішення	25.10.2021 – 31.10.2021	
2	Розробка загальної структури вимірювальної системи	01.11.2021 – 07.11.2021	
3	Вибір елементної бази та компонентів	08.11.2021 – 14.11.2021	
4	Розробка питань метрологічного забезпечення	15.11.2021 – 21.11.2021	
5	Написання пояснювальної записки	22.11.2021 – 28.11.2021	
6	Виконання графічної частини	29.11.2021 – 05.12.2021	
7	Представлення закінченої кваліфікаційної роботи на кафедрі	06.12.2021	

Дата видачі завдання 25 жовтня 2021 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Єгоров А.Б.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської кваліфікаційної роботи містить 67 сторінок, 16 рисунків, 6 таблиць, перелік посилань з 17 назв.

Мета роботи – розробити інформаційно-вимірювальну систему для автоматизованого градування термоперетворювачів (терморезисторів та термопар).

У магістерській кваліфікаційній роботі було проведено огляд термоперетворювачів, обґрунтовано вибір структури вимірювальної системи та елементної бази. Розглянуто питання метрологічного забезпечення.

Вимірювальна система реалізована на базі персонального комп'ютера з використанням інтерфейсів RS-232, RS-485.

Запропонована інформаційно-вимірювальна система може застосовуватись в калібрувальних лабораторіях та наукових дослідженнях

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ТЕРМОРЕЗИСТОР,
ТЕРМОПАРА, ІНТЕРФЕЙС, ПРОТОКОЛ ОБМІНУ, ГРАДУЮВАННЯ**

ABSTRACT

The explanatory note for the master's qualification work contains 67 pages, 16 figures, 6 tables, a list of references from 17 names.

The purpose of the work is to develop an information-measuring system for automated calibration of temperature sensors (thermistors and thermocouples).

In the master's qualification work the review of thermocouples was carried out, the choice of structure of measuring system and element base was substantiated. The issue of metrological support is considered.

The measuring system based on PC with RS-232, RS-485 interfaces.

The proposed information measuring system may use in the calibration laboratories and scientific researches.

INFORMATION MEASURING SYSTEM, THERMAL RESISTOR,
THERMOCOUPLE, INTERFACE, COMMUNICATIONS PROTOCOL,
CALIBRATION

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	8
ВСТУП	9
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕРМОМЕТРІЮ	10
2 ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТЕМПЕРАТУРИ.....	16
2.1 Термоперетворювачі опору.....	19
2.2 Термоелектричні перетворювачі	24
3 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ	29
3.1 Автоматизація вимірювального експерименту.....	29
3.2 Основні напрямки розвитку автоматизації вимірювань	33
3.2.1 Вимірювальні прилади з вбудованими мікропроцесорами	33
3.2.2 Вимірювально-обчислювальні комплекси	35
3.2.3 Комп'ютерні вимірювальні системи	36
4 ІНТЕРФЕЙСИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ	37
4.1 Приладовий інтерфейс (канал загального користування)	39
4.2 Інтерфейс RS-232C.....	41
4.3 Інтерфейс RS-485	45
5 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ГРАДУЮВАННЯ ДАТЧИКІВ ТЕМПЕРАТУРИ.....	53
5.1 Постановка задачі.....	53
5.2 Розробка структурної схеми вимірювальної системи	54
5.3 Вибір елементної бази	55
5.3.1 Комп'ютер.....	55
5.3.2 Інтерфейс.....	56
5.3.3 Вимірювальна частина.....	57
5.3.4 Установка для відтворення температурної шкали	58
5.4 Розробка алгоритму функціонування системи	59

5.5 Метрологічне забезпечення	61
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	65
ДОДАТОК А. Відомість кваліфікаційної роботи.....	67

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

БД – база даних

ГОСТ – міждержавний стандарт

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

ЕРС – електрорушійна сила

ЗВ – засіб вимірювань

ІВС – інформаційно-вимірювальна система

КЗК – канал загального користування

МПТШ – міжнародна практична температурна шкала

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ІЕС – International Electrical Committee

ІЕЕЕ – Institute of Electrical and Electronics Engineers

GPІВ – General Purpose Interface Bus

HP-ІВ – Hewlett-Packard Interface Bus

OSI – Open System Interconnection

UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

ВСТУП

У сучасній практиці вимірювань в найрізноманітніших галузях промисловості велику частку складають температурні вимірювання. При вирішенні даної задачі широко використовуються різні первинні перетворювачі температури, серед яких найбільшого поширення набули терморезистори і термопари. На сьогодні час налічується кілька десятків термоперетворювачів різної конструкції і призначення, які випускаються промислово [1].

Однією з поширених задач, які доводиться вирішувати метрологу при обслуговуванні зазначених засобів вимірювальної техніки, є їх градуювання і калібрування. Оскільки дані метрологічні регламенти є досить трудомісткими і вимагають обробки великого обсягу експериментальних даних, то задача автоматизації процедур градуювання і калібрування термоперетворювачів є на сьогоднішній день досить актуальною.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка на базі персонального комп'ютера інформаційно-вимірювальної системи для градуювання датчиків температури різного типу з використанням сучасних інформаційних технологій, яка дозволить збільшити продуктивність праці метролога за рахунок перекладання на неї рутинних операцій з управління апаратурою, збору і обробки вимірювальної інформації, і тим самим значно підвищити ефективність процедур градуювання і калібрування.

Ще одним завданням кваліфікаційної роботи є розробка питань метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальної системи.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕРМОМЕТРІЮ

В основі автоматизації багатьох технологічних процесів лежать контроль і регулювання температури як одного з найбільш важливих енергетичних параметрів. Саме тому прилади для вимірювання температури широко застосовуються в енергетичній, хімічній, металургійній промисловості, судно- та машинобудуванні, а також в інших галузях народного господарства.

Вимірювання температури, величини неелектричної, в промисловості здійснюється шляхом її перетворення в електричну величину за допомогою термоперетворювачів опору, термоелектричних перетворювачів і подальшого її вимірювання вторинними автоматичними приладами [2-6].

Розвиток вимірювальної техніки вимагає вдосконалення приладобудування як шляхом розробки нових принципів вимірювання, так і шляхом збільшення числа типів і модифікацій приладів для різноманітних умов їх застосування. Це, в свою чергу, забезпечує створення технічних засобів вимірювання, контролю та управління процесами, що вкрай необхідно для підвищення ефективності виробництва на основі автоматизованих систем управління в народному господарстві.

Поняття температури виникло з відчуттів людини, якою мірою нагріті або, навпаки, охолоджені навколишні тіла. І тільки в результаті вимог науки і техніки про кількісне визначення температури було сформульовано більш чітке поняття температури. За визначенням Максвелла, температура тіла є його термічним станом, що розглядається з точки зору його здатності передавати тепло іншим тілам. З іншого боку, температуру можна визначити як ступінь нагрітості тіла. Перші прилади для вимірювання температури, що з'явилися в XVI столітті, дозволили виділити температуру як особливу фізичну величину, значення якої визначалося по температурній залежності

будь-якої властивості тіла, тобто за шкалою цієї властивості. Так виникла область вимірювань температури, яку згодом назвали термометрією.

Термометрія – розділ технічної фізики, в якому вивчаються методи і засоби вимірювання температури, теоретичні основи способів побудови термодинамічної і практичних температурних шкал і створені на цій основі еталони і зразкові засоби вимірювання температури [5].

Значення термодинамічної температури знаходяться в межах від 0 К до таких високих значень, які виходять в реальних системах елементарних частинок, що знаходяться в тепловій рівновазі. При цьому абсолютний нуль температури недосяжний, так як будь-яка частка відповідно до квантової теорії матиме одне нижчу квантовий стан і тому відсутня можливість переходу в інше більш низький стан, тобто і неможлива передача енергії іншої частинки або системі частинок. Однак система частинок не може мати і нескінченне значення термодинамічної температури, так як відповідно до теорії відносності швидкість часток не може перевищувати швидкості поширення електромагнітного випромінювання. Таким чином, виходячи з кінцевого значення швидкості світла, верхня межа температури може бути оцінений значенням порядку 10^{12} К.

Температура – один з параметрів стану речовини: газу, рідини або твердого тіла. Температура визначає тепловий стан тіла і напрям теплопередачі. Якщо привести в контакт два тіла при різних температурах, то більш нагріте тіло (з більш високою температурою) буде охолоджуватися, а менш нагріте – нагріватися. Процес теплопередачі і зміни температур тіл триватиме доти, поки їх температури не стануть рівними, тобто настане теплова або термодинамічна рівновага. Подібний процес спостерігається в тому випадку, якщо обидва тіла в тепловому відношенні ізольовані від навколишнього середовища і не спостерігається приплив ззовні тепла або ж втрати тепла в середовище.

Температура визначає внутрішню енергію тіла: потенційна і кінетична енергії молекул газу, рідини або твердого тіла залежать від температури. Енергія окремо взятої молекули не збігається із середньою енергією тіла, тому поняття температури до молекули не застосовується. Отже, поняття температури є статистичним і може бути застосовано до тіл, що складаються з дуже великого числа молекул.

Згідно кінетичної теорії середня енергія E поступального руху молекул газу пов'язана з його температурою T співвідношенням

$$E = \frac{3}{2} kT, \quad (1.1)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана.

Розподіл енергії поступального руху між молекулами газу залежить від їх швидкості.

Для рідин і твердих тіл функціональний зв'язок температури з внутрішньою енергією виражається складними аналітичними залежностями. Температура визначає не тільки характеристики теплових процесів, від неї залежать багато фізичні властивості: теплопровідність, температуро-провідність, теплоємність, температурні коефіцієнти лінійного і об'ємного розширення, кристалічні структури речовин, електричні, магнітні, оптичні і атомні властивості.

Температурні залежності фізичних властивостей речовин можна покласти в основу методів вимірювання температури і побудови температурної шкали.

Температурна шкала – це ряд послідовних значень температури, що утворюється відповідно до обраного закону, що визначає взаємозв'язок термометричного параметра (властивості) і температури.

Для побудови температурної шкали вибирають дві основні точки t_1 і t_2 , яким присвоюють довільні значення температури. Інтервал між цими точками називають основним інтервалом температурної шкали. Розділивши основний інтервал на N рівних частин, встановлюють ціну поділки шкали, іншими словами розмір одиниці температури

$$M = \frac{t_2 - t_1}{N}. \quad (1.2)$$

Беручи лінійну залежність між температурою t і фізичним (термометричною) властивістю E , можна знайти рівняння шкали в наступному вигляді

$$t = t_1 + (t_2 - t_1) \frac{E - E_1}{E_2 - E_1} = t_1 + MN \frac{E - E_1}{E_2 - E_1}. \quad (1.3)$$

Експериментально встановлено, що рівняння (1.3) для різних термометричних речовин (або властивостей), як правило, не має лінійну залежність $t = f(E)$. На основі цього рівняння побудовані такі температурні шкали.

Шкала Фаренгейта (1723 р.) визначена за двома реперними точками: за 0°F прийнята температура суміші льоду з сіллю і нашатирем, а за 96°F – температура тіла людини. Точка плавлення льоду на такій шкалі має температуру 32°F , а точка кипіння води 212°F . Звідси випливає, що $1/180$ частина інтервалу між точками плавлення льоду і точкою кипіння води становить розмір одиниці температури – градуса Фаренгейта ($^\circ\text{F}$). Як термометричну речовину Фаренгейт використовував спочатку спирт, а потім ртуть.

Шкала Ренкіна – температурна шкала з початком при абсолютному нулі, причому розмір одиниці температури – градуса Ренкіна (T_{Rn}) дорівнює розміру одиниці температури Фаренгейта (t_F): $1^\circ Rn = 1^\circ F$. Співвідношення між температурами T_{Rn} і t_F таке: $t_F = T_{Rn} - 459,67$.

Шкала Реомюра (1736 р.) заснована на ртутному термометрі з двома опорними точками: точкою плавлення льоду ($0^\circ R$) і точкою кипіння води ($80^\circ R$). Інтервал між цими точками становить 80 рівних температурних частин, а розмір одиниці температури – градуса Реомюра дорівнює $1/80$ частини зазначеного інтервалу.

Шкала Цельсія (1742 р.) заснована на ртутному термометрі з двома опорними точками: точкою плавлення льоду ($0^\circ C$) і точкою кипіння води ($100^\circ C$), інтервал між якими складає 100 рівних температурних частин, а розмір одиниці температури – градуса Цельсія дорівнює $1/100$ частини зазначеного інтервалу.

Зв'язки між температурами Фаренгейта (t_F), Реомюра (t_R) і Цельсія (t) і їх одиницями виражаються наступним чином:

$$t^\circ C = 5/4 t_R^\circ R = 5/9 (t_F^\circ F - 32); \quad 1^\circ C = 4/5^\circ R = 9/5^\circ F.$$

Використовуючи різні теоретичні властивості, можна побудувати безліч температурних шкал, які збігаються в однакових опорних точках, але розходяться поза інтервалу між точками і в самому інтервалі. Такі температурні шкали називаються умовними, а масштаби цих шкал – умовними градусами або умовними одиницями температури. Умовні температури і умовні температурні шкали називають також практичними на відміну від термодинамічної температури (інакше дійсної або істинної) та термодинамічної температурної шкали.

Прийнято застосовувати Міжнародну практичну температурну шкалу (МПТШ) редакції 1968 р., згідно з якою основною величиною є

термодинамічна температура T , одиниця якої Кельвін (К) – $1 / 273,16$ частина термодинамічної температури потрійної точки води (точки рівноваги води в твердій, рідкій і газоподібній фазах).

Температура за шкалою Цельсія t визначається з виразу

$$t = T - T_0, \quad (1.4)$$

де T – термодинамічна температура;

$T_0 = 273,15$ К – температура точки танення льоду за шкалою Кельвіна.

2 ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТЕМПЕРАТУРИ

При підготовці до застосування і при регламентованому технічному обслуговуванні виробів – об'єктів контролю доводиться проводити вимірювання великої кількості механічних, теплових, хімічних, оптичних, акустичних та інших фізичних величин, які належать до числа неелектричних. Такі вимірювання проводять приладами, в основі побудови яких лежать відомі фізичні явища, зокрема, перетворення неелектричних величин в електричні.

Вимірювальний перетворювач встановлює однозначну функціональну залежність вихідної електричної величини (ЕРС, заряду, ємності тощо) від вхідної вимірюваної неелектричної величини (температури, тиску, переміщення та ін.). Розрізняють дві групи вимірювальних перетворювачів: параметричні та генераторні.

Параметричними називають вимірювальні перетворювачі, в яких вимірювана неелектрична величина перетворюється в один з параметрів електричного кола (опір, індуктивність, ємність, взаємну індуктивність), який функціонально пов'язаний з вимірюваною величиною.

Генераторними називають перетворювачі, в яких функцією вимірюваної неелектричної величини є ЕРС, що генерується, або заряд.

У табл. 2.1 наведено узагальнені дані про області застосування основних відомих типів перетворювачів (точка на перетині «тип перетворювача – вимірювана фізична величина або вид вимірювань»). Кольором виділені теплові вимірювальні перетворювачі. Їх характеристики наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Области застосування основних відомих типів перетворювачів

Тип перетворення (перетворювача)	Вид вимірювань								
	Тиск (сила)	Зміщення	Положення	Швидкість	Прискорення	Вібрація	Температура	Магнітний потік	Оптичні вимірювання
Тензодатчик	•	•	•	•	•	•			
Потенціометричний	•	•	•	•	•				
Лінійний диференційний трансформатор	•	•	•	•	•				
Змінна індукція		•	•	•	•	•			
Ефект Холла		•	•					•	
Вихоровий струм		•	•	•				•	
Магніторезистивний		•	•					•	
Ємнісний датчик	•	•	•		•	•			
П'єзоелектричний*	•	•		•	•	•			
Термометр опору							•		
Термопара*							•		
Термістор							•		
Фотоелемент									•
Фотоопір									•
Фотогальванічний елемент*									•

* – Автогенеруючі (активні) прилади

Таблиця 2.2 – Характеристики основних відомих типів перетворювачів

Параметр	Термометр опору	Термопара	Термістор
Чутливість	0,1...10 Ом/°С	1...10 мкВ/°С	0,1...1,0 кОм/°С
Стабільність (дрейф за рік)	0,01%	0,5 °С	1%
Відтворюваність, °С	0,05	5	0,5
Діапазон температур, °С	150 ... 850	- 200 ... +1600	- 100 ... +350
Лінійність*	1	2	3
Мінімальні габарити	Діаметр 5 мм, довжина 5 мм	Діаметр 0,4 мм	Діаметр 0,4 мм
Точність*	1	2	3
Вартість*	3	1	2

* 1 – найкраще або найменше значення

Теплові вимірювальні перетворювачі побудовані на основі теплових процесів і для них виконується рівняння теплового балансу:

$$Q_{\text{ел}} + Q_{\text{то}} = Q_{\text{тв}} \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{тв}}$ – тепловміст термоперетворювача;

$Q_{\text{ел}}$ – теплота, яка створюється внаслідок виділення в термоперетворювачі електричної потужності;

$Q_{\text{то}}$ – теплота, яка надходить в перетворювач або віддається ним внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем.

Фізичний сенс цього рівняння полягає в тому, що вся теплота, яка надходить в перетворювач, йде на підвищення його тепловмісту $Q_{\text{тв}}$ і, отже, якщо тепловміст перетворювача залишається незмінним (не змінюється температура і агрегатний стан), то кількість теплоти, яка надходить за одиницю часу, дорівнює кількості теплоти $Q_{\text{то}}$, що віддається. Теплота, яка надходить в перетворювач, є сумою кількості теплоти, яка створюється внаслідок виділення в ньому електричної потужності $Q_{\text{ел}}$, і кількості теплоти

$Q_{\text{то}}$, яка надходить в перетворювач чи віддається ним внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем.

2.1 Термоперетворювачі опору

Принцип дії термоперетворювачів опору, званих також терморезисторами, заснований на властивості металів змінювати свій опір зі зміною температури [3, 5-8]. Зазвичай для неточних електротехнічних розрахунків ця залежність приймається лінійною. Температурний коефіцієнт електричного опору більшості чистих металів при кімнатній температурі приблизно дорівнює 0,4%, тобто за величиною він відповідає температурному коефіцієнту розширення газу в газовому термометрі. При точних вимірюваннях (до 0,01 град) схема вимірювання повинна бути чутливою до змін опору в 0,004%. При високій точності вимірювань можна відчутти більш ніж на один порядок менші вимірювання опору.

Таким чином, чутливість термометрів опору досить висока для вимірювання величини зміни температури менше 0,001 град. Термометри опору позбавлені ряду недоліків, властивих скляно-рідинним термометрам, покази яких залежать від температури навколишнього середовища, депресії скла, похибок калібрування та ін. Завдяки цьому термометри опору застосовуються при точних вимірюваннях температур починаючи від околиці абсолютного нуля до 1000 °С.

Технічні термоперетворювачі опору розрізняють:

а) за способом контакту з вимірюваним середовищем: ті, що занурюються, і поверхневі;

б) за інерційністю: з великою інерційністю, із середньою інерційністю, з малою інерційністю;

в) за кількістю зон, в яких вимірюється температура: однозонні і багатозонні;

г) по захищеності від зовнішнього і вимірюваного середовища: негерметичні і герметичні;

д) за кількістю чутливих елементів для вимірювання температури в одній зоні: одинарні та подвійні;

е) за точністю: перший клас (А); другий клас (В); третій клас (С);

є) за кількістю вивідних провідників: з двома, трьома і чотирма провідниками;

ж) відповідно до умов експлуатації: стаціонарні і переносні.

Найкращим матеріалом для вимірювальних термперетворювачів опору є чиста платина. У широкому діапазоні температур вона не вступає в хімічні сполуки, тим самим стабільно зберігаючи властивості чутливого елемента. Крім того, вона має порівняно високий коефіцієнт електроопору (приблизно в п'ять разів більший, ніж у срібла, золота, міді).

Платинові терморезистори (ТСП) призначені для вимірювання температур в межах від -260 до 1100 °С. У діапазоні температур від 0 до 650 °С їх використовують в якості зразкових і еталонних засобів вимірювань, причому нестабільність градууювальної характеристики таких перетворювачів не перевищує $0,001$ °С.

Залежність опору платинових терморезисторів від температури визначається наступними формулами:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad \text{при } 0 < t < 650 \text{ °С};$$

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)) \quad \text{при } -200 < t < 0 \text{ °С},$$

де R_t – опір терморезистора при температурі t , °С;

R_0 – опір при 0 °С;

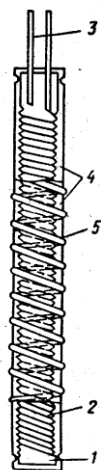
$A = 3,96847 \cdot 10^{-3} (\text{°С})^{-1}$;

$B = -5,847 \cdot 10^{-7} (\text{°С})^{-2}$;

$$C = -4.22 \cdot 10^{-4} (\text{°C})^{-4}.$$

Платинові терморезистори мають високу стабільність і відтворюваність характеристик. Їх недоліками є висока вартість і нелінійність функції перетворення. Тому вони використовуються для точних вимірювань температур у відповідному діапазоні.

У стандартному платиновому термометрі опору (рис. 2.1) платиновий дріт діаметром 0,07 мм і довжиною близько 2 м біфілярно намотано на слюдяну пластинку з зубчастими краями і з обох сторін прикрито двома слюдяними прямокутними накладками для забезпечення його ізоляції і додання механічної міцності. Всі три слюдяні пластинки з'єднані між собою у пакет срібною стрічкою. До кінців платинового дроту припаяні виводи з срібних дротиків діаметром 1 мм, ізольованих порцеляновими намистом. Елемент опору поміщений в алюмінієву захисну трубку, вільний перетин якої заповнений по всій довжині чутливої частини термометра алюмінієвим вкладишем. Зібраний елемент термометра опору поміщається ще в одну зовнішню захисну трубку з завареним дном, що має штуцерних гайку і алюмінієву головку.



- 1 – слюдяна пластинка з зубчастими краями;
- 2 – платиновий дріт;
- 3 – срібні виводи;
- 4 – слюдяні накладки;
- 5 – срібна стрічка

Рисунок 2.1 – Чутливий елемент платинового термометра опору

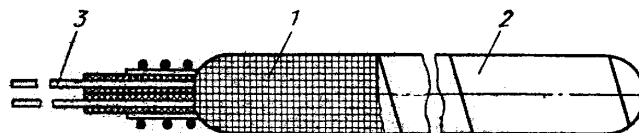
Широкого поширення на практиці набули більш дешеві мідні терморезистори (ТСМ), що мають лінійну залежність опору від температури:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \text{ при } -50 < t < 180 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де $\alpha = 4.26 \cdot 10^{-3} \text{ (} ^\circ\text{C)}^{-1}$.

Недоліком міді є невеликий питомий опір і легка окислюваність при високих температурах, внаслідок чого кінцева межа застосування мідних термометрів опору обмежується температурою 180 °С. За стабільністю і відтворюваністю характеристик мідні терморезистори поступаються платиновим.

Стандартний мідний термометр опору (рисунок 2.2) вітчизняного виробництва виконаний з мідного емальованого дроту діаметром 0,1 мм, багат шарово намотаного на циліндричний пластмасовий стрижень. Дріт покрито зверху шаром лаку. До кінців мідного дроту припаяні виводи також з мідного дроту діаметром 1,0...1,5 мм. Зібраний термометр опору поміщений в захисну сталеву трубку.



1 – безіндукційна намотка з мідного дроту;
2 – фторопластова плівка; 3 – виводи

Рисунок 2.2 – Чутливий елемент мідного термометра опору

Чутливий елемент всіх мідних термометрів опору являє собою безкаркасну безіндукційну намотку з мідного дроту діаметром 0,08 мм, покрити фторопластовою плівкою. До намотки припаяні два виводи. З метою

забезпечення вібростійкості чутливий елемент поміщається в тонкостінну металеву гільзу, засипається керамічним порошком і герметизується.

Теплова інерційність стандартних термометрів опору характеризується показником теплової інерції (сталою часу), значення якого лежать в межах від десятків секунд до одиниць хвилин. Стала часу спеціально виготовлених малоінерційних термометрів опору може бути зменшена до 0,1 с.

Знаходять застосування також нікелеві термометри опору. Нікель має відносно високий питомий опір, але залежність його опору від температури лінійна тільки до температур не вище 100 °С, температурний коефіцієнт опору нікелю в цьому діапазоні дорівнює $6,9 \cdot 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$.

Мідні і нікелеві терморезистори випускають також з литого мікродроту в скляній ізоляції. Мікродротові терморезистори герметизовані, високостабільні, малоінерційні і при малих габаритних розмірах можуть мати опір до десятків кілоом.

У порівнянні з металевими терморезисторами більш високу чутливість мають напівпровідникові терморезистори (термістори). Вони мають негативний температурний коефіцієнт опору, значення якого при 20 °С становить $(2 \dots 8) \cdot 10^{-2} (\text{°C})^{-1}$, тобто на порядок більше, ніж у міді і платини. Напівпровідникові терморезистори при досить малих розмірах мають високі значення опору (до 1 МОм). Для вимірювання температури найбільш поширені напівпровідникові терморезистори типів КМТ (суміш оксидів кобальту і марганцю) і ММТ (суміш оксидів міді і марганцю).

Термістори мають нелінійну функцію перетворення, яка описується наступною формулою:

$$R_t = A e^{B/T},$$

де T – абсолютна температура;

A – коефіцієнт, що має розмірність опору;

B – коефіцієнт, що має розмірність температури.

Серйозним недоліком термісторів, що не дозволяє з достатньою точністю нормувати їх характеристики при серійному виробництві, є погана відтворюваність характеристик (значна відмінність характеристик одного екземпляра від іншого).

Напівпровідникові датчики температури мають високу стабільність характеристик в часі і застосовуються для вимірювання температур в діапазоні від -100 до 200 °С.

Вимірювальна схема за участю терморезисторів опору найчастіше є мостовою; урівноваження моста здійснюється за допомогою потенціометра. При зміні опору терморезистора відповідно змінюється положення движка потенціометра, положення якого щодо шкали формує показання приладу; шкала градується безпосередньо в одиницях температури. Недоліком такої схеми включення є похибка, що вноситься проводами підключення терморезистора; оскільки через зміни опору проводів при зміні температури навколишнього середовища компенсація зазначеної похибки неможлива, застосовують трьохпровідну схему включення проводів, при використанні якої опори підвідних проводів опиняються в різних гілках, і їх вплив значно зменшується.

2.2 Термоелектричні перетворювачі

Принцип дії термоелектричних перетворювачів (термопар) заснований на термоелектричному ефекті, що полягає в тому, що в замкнутому контурі, що складається з двох різнорідних провідників (або напівпровідників), тече струм, якщо місця спаїв провідників мають різні температури [5-7]. Якщо взяти замкнутий контур, що складається з різнорідних провідників (термоелектродів), то на їх спаях виникнуть термоЕРС $E(t)$ і $E(t_0)$, що залежать від температур цих спаїв t і t_0 . Так як ці термоЕРС

виявляються включеними зустрічно, то результуюча термоЕРС, діюча в контурі, дорівнює $E(t) - E(t_0)$.

У разі рівного розподілу температур обох спаїв результуюча термоЕРС дорівнює нулю. Спай, що занурюється в контрольоване середовище, називається робочим кінцем термопари, а інший спай – вільним.

У будь-якої пари однорідних провідників значення результуючої термоЕРС залежить тільки від природи провідників і від температури спаїв і не залежить від розподілу температури уздовж провідників. Термоелектричний контур можна розімкнути в будь-якому місці і включити в нього один або кілька різнорідних провідників. Якщо всі місця з'єднань, що з'явилися при цьому, перебувають при однаковій температурі, то результуюча термоЕРС, діюча в контурі, не змінюється. Це використовується для вимірювання термоЕРС термопари. Створювана термопарами ЕРС порівняно невелика: вона не перевищує 8 мВ на кожні 100 °С і зазвичай не перевищує за абсолютною величиною 70 мВ.

Таблиця 2.3 – Основні характеристики термоелектричних перетворювачів

Тип	Межі вимірювань, °С	Інерційність, с
ТХА(КН)806	0 – 1000	–
ТХА(К)-280М	0 – 900	–
ТПР(В)-1408М	1300 – 1800	5
ТПР(В)-0555	300 – 1600	40
ТХА(К)-0806	0 – 1000	2 – 10
ТХА(К)-1489	0 – 1000	–
ТХА(К)-1172	0 – 900	2 – 30

Термопари дозволяють вимірювати температуру в діапазоні від –200 до 2200 °С. Для вимірювання температур до 1100 °С використовують в основ-

ному термопарі з неблагородних металів, для вимірювання температур від 1100 до 1600 °С – термопарі з благородних металів і сплавів платинової групи, а для вимірювання більш високих температур – термопарі з жаростійких сплавів (на основі вольфраму).

Найбільшого поширення для виготовлення термоелектричних перетворювачів отримали платина, платинородій, хромель, алюмель.

Термоелектричні перетворювачі розрізняють:

а) за способом контакту з вимірюваним середовищем: ті, що занурюються, і поверхневі;

б) за найменуванням матеріалу: ТВР (А) – термоелектричний перетворювач вольфрамрениєвий; ТПР (В) – платинородієвий; ТПП (К, 8) – платинородій-платиновий; ТХА (К) – хромель-алюмелевий; ТХК (Е) – хромель-копелевий;

в) за умовами експлуатації: стаціонарні і переносні;

г) за герметичністю по відношенню до вимірюваного середовища: звичайні і герметичні;

д) за інерційністю: малоінерційні, середньої інерційності, великої інерційності, ненормованої інерційності;

е) за кількістю гарячих спаїв в одній зоні: одинарні та подвійні;

є) за кількістю зон: однозонні і багатозонні.

При вимірюваннях температури в широкому діапазоні враховується нелінійність функції перетворення термоелектричного перетворювача. Так, наприклад, функція перетворення мідь-константових термопар в діапазоні температур від –200 до 300 °С з похибкою ± 2 мкВ описується емпіричною формулою

$$E = At^2 + Bt + C,$$

де A , B и C – сталі, які визначаються шляхом вимірювання термоЕРС при трьох відомих температурах,

t – температура робочого спаю.

Стала часу термоелектричних перетворювачів залежить від їх конструкції і якості теплового контакту робочого спаю термопари з середовищем і для промислових термопар обчислюється в хвилинах. Однак відомі конструкції малоінерційних термопар, у яких стала часу лежить в межах 5...20 секунд і нижче.

Електровимірювальний прилад (мілівольтметр) або вимірювальний підсилювач термоЕРС можуть підключатися до контуру термопари двома способами: у вільний кінець термопари або в один з термоелектродів; вихідна термоЕРС від способу підключення вимірювальних пристроїв не залежить.

Як зазначено вище, при вимірюванні температури вільні кінці термопари повинні знаходитися при постійній температурі, але як правило, вільні кінці термопари конструктивно виведені на затискачі на її голівці, а отже, розташовані в безпосередній близькості від об'єктів, температура яких вимірюється. Щоб віднести ці кінці в зону з постійною температурою, застосовуються подовжувальні дроти, що складаються з двох жил, виготовлених з металів або сплавів, що мають однакові термоелектричні властивості з термоелектродами термометра.

Для термопар з неблагородних металів подовжувальні дроти виготовляються найчастіше з тих же матеріалів, що і основні термоелектроди, тоді як для датчиків з благородних металів з метою економії подовжувальні дроти виконуються з матеріалів, що розвивають в парі між собою в діапазоні температур 0...150 °С ту ж термоЕРС, що і електроди термопари. Так, для термопари платина-платинородій застосовуються подовжувальні термоелектроди з міді і спеціального сплаву, що утворюють термопару, ідентичну по термоЕРС термопарі платина-платинородій в

діапазоні $0 \dots 150$ °С. Для термопари хромель-алюмель подовжувальні термоелектроди виготовляються з міді і константана, а для термопари хромель-копель подовжувальними є основні термоелектроди, але виконані у вигляді гнучких проводів. При неправильному підключенні подовжувальних термоелектродів виникає суттєва похибка.

У лабораторних умовах температура вільних кінців термопари підтримується рівною 0 °С шляхом приміщення їх в посудину Дьюара, наповнений стовченим льодом з водою. У виробничих умовах температура вільних кінців термопари зазвичай відрізняється від 0 °С. Так як градування термопар здійснюється при температурі вільних кінців 0 °С, то ця відмінність може бути джерелом суттєвої похибки; для зменшення зазначеної похибки, як правило, вводять поправку в показання термометра. При виборі поправки враховуються як температура вільних кінців термопари, так і значення вимірюваної температури (це пов'язано з тим, що функція перетворення термопари нелінійна); це ускладнює точну корекцію похибки.

На практиці для усунення похибки широке застосування знаходить автоматичне введення поправки на температуру вільних кінців термопари. Для цього в ланцюг термопари і мілівольтметра включається міст, одним з плечей якого є мідний терморезистор, а інші утворені манганіновим терморезисторами. При температурі вільних кінців термопари, що дорівнює 0 °С, міст знаходиться в рівновазі; при відхиленні температури вільних кінців термопари від 0 °С напруга на виході моста не дорівнює нулю і підсумовується з термоЕРС термопари, вносячи поправку в показання приладу (значення поправки регулюється спеціальним резистором). Внаслідок нелінійності функції перетворення термопари повної компенсації похибки не відбувається, але зазначена похибка істотно зменшується.

У лабораторних умовах для точного вимірювання термоЕРС застосовуються лабораторні і зразкові компенсатори постійного струму з ручним зрівноважуванням.

3 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

3.1 Автоматизація вимірювального експерименту

Ефективне застосування засобів вимірювання (ЗВ) в сучасному промисловому виробництві, їхнє метрологічне обслуговування можливі за умови автоматизації вимірювань і функціонального контролю. Тільки на цьому шляху можна домогтися істотного зниження трудомісткості вимірювань, підвищення продуктивності праці при проведенні вимірювань, у тому числі при проведенні метрологічних досліджень і в повірочних роботах.

Керування складними сучасними технологічними процесами (хімічні виробництва, металургія, атомна і теплоенергетика) вимагає контролювати одночасно сотні і тисячі фізичних параметрів (температура, тиск, густина, швидкість обертання турбіни, витрата та ін.) і обробляти потоки вимірювальної інформації високої інтенсивності.

У метрологічній практиці часто доводиться займатися вивченням властивостей вимірювальних приладів, датчиків, зразкових мір. Через вплив різних факторів у ЗВ протікають деградаційні процеси, у результаті чого їхні метрологічні характеристики змінюються, а самі вони вимагають періодичної повірки.

Автоматизація – один з магістральних напрямів підвищення ефективності метрологічних робіт, покликаний забезпечити високі темпи науково-технічного прогресу в приладобудуванні та машинобудуванні за рахунок:

- підвищення якості досліджень на основі уточнення моделей досліджуваних об'єктів, явищ, процесів;
- одержання більш повних даних про досліджувані ЗВ;

- скорочення строків метрологічних досліджень і зниження витрат на основі зменшення трудомісткості вимірювань, прискорення експериментів, зменшення помилок;

- оптимізації вимірювального експерименту, підвищення точності вимірювань.

Можна виділити декілька основних напрямків автоматизації метрологічної діяльності [8]:

1) дослідження еталонів фізичних величин. Висока точність еталону підтримується двома способами: активним і пасивним. Активний спосіб пов'язаний з стабілізацією зовнішніх умов, послаблення впливу негативних факторів, виключення форсованих режимів використання еталона. Пасивний спосіб полягає в непрямих дослідженнях метрологічних характеристик еталона.

Для підвищення надійності основні вузли еталона виконують в декількох екземплярах. Основним прийомом в дослідженнях групової міри є взаємне порівняння мір в групі. Процедура порівняння формалізується і тому легко піддається автоматизації.

Для виявлення можливого систематичного дрейфу всієї групової міри проводять міжнародні порівняння.

Сучасні еталони – це складні вимірювальні комплекси, і дослідження їх властивостей являє собою різноплановий фізичний експеримент. Автоматизація досліджень еталонів має на меті інтенсифікацію цих робіт, скорочення часу на їх проведення, а також підвищення точності;

2) дослідження засобів вимірювання і повірочні роботи. Призначення повірочних робіт полягає у вилучення з обігу засобів вимірювання, метрологічні характеристики яких змінилися настільки, що не задовольняють приписаним вимогам. У подальшому ці ЗВ або відновлюються, або списуються.

Масовість повірочних робіт, ускладнення вимірювальної техніки потребують інтенсифікації цього виду метрологічної діяльності шляхом автоматизації.

Автоматизація повірки передбачає:

- скорочення часу повірки на основі програмно керованих мір фізичних величин, автоматичного опрацювання і документування результатів повірки;

- підвищення точності вимірювань на основі багаторазових спостережень;

- скорочення часу переладнання з одного виду повірки на інший на основі використання програмно переналагоджуваних повірочних засобів;

- збільшення міжповірочного інтервалу засобів вимірювань на основі автоматизованих процедур самоповірки і вбудованих мір;

- підвищення продуктивності повірочних робіт на основі широкого використання типових автоматизованих робочих місць метролога і уніфікації їх апаратних засобів;

- скорочення непродуктивних затрат на основі оперативного отримання проміжних даних у зручній формі і прийняття проміжних рішень в ході повірочної процедури;

3) дослідження вимірювальних перетворювачів (датчиків). Задача метрологічних досліджень датчика – визначення його градуювальної характеристики (функції перетворення) (рисунок 3.1). Для здійснення градуювання виконуються сумісні вимірювання вхідної та вихідної фізичної величини перетворювача з подальшою математичною обробкою результатів, що включає вибір адекватної математичної моделі для опису вимірювального перетворювача (вибір класу функцій або структурна ідентифікація) та подальшого оцінювання параметрів обраної моделі (параметрична ідентифікація) за допомогою методів математичного аналізу, найбільш відомим та поширеним з яких є метод найменших квадратів.

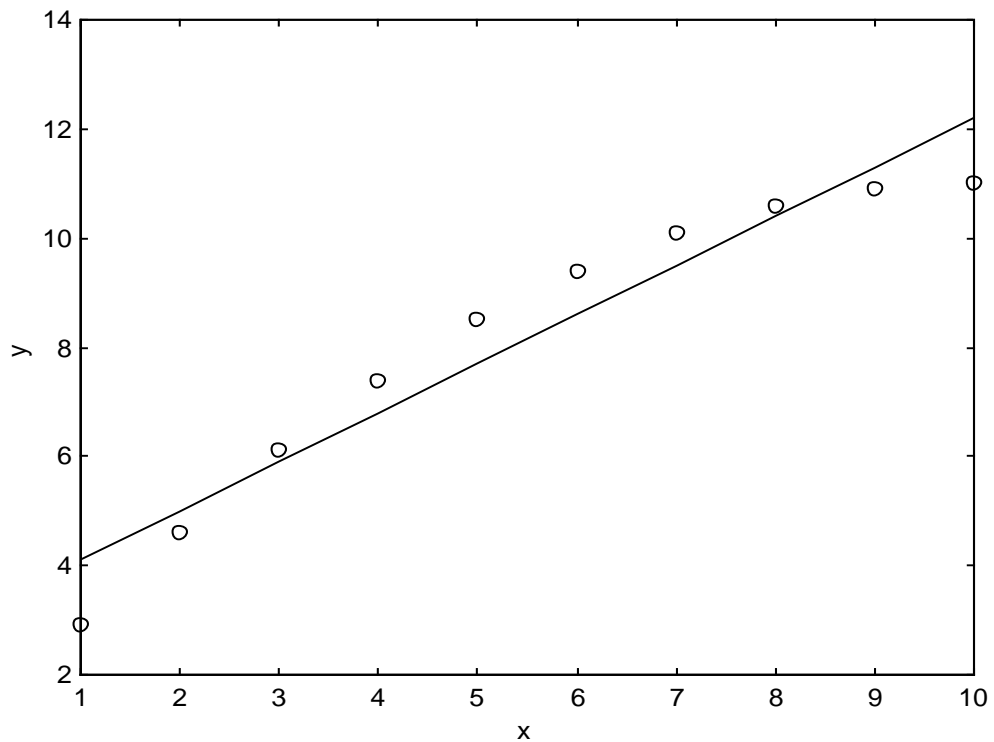


Рисунок 3.1 – Градувальна характеристика ЗВ

Типову схему автоматизованого вимірювального експерименту наведено на рис. 3.2.

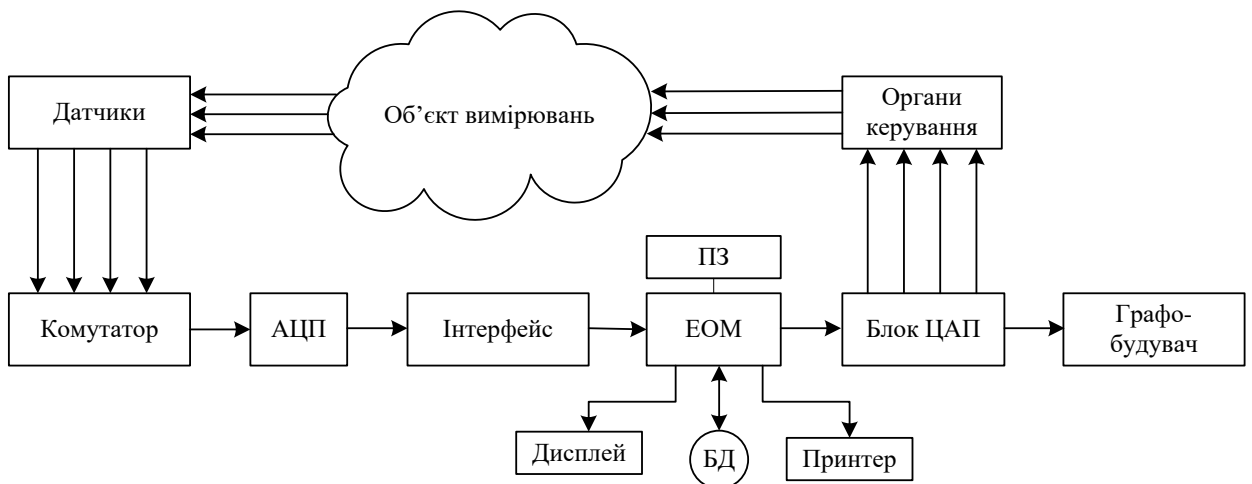


Рисунок 3.2 – Типова схема автоматизованого вимірювального експерименту

Канал вимірювання включає набір датчиків, необхідних для перетворення вимірюваних фізичних величин в електричні сигнали, комутатор, що дозволяє підключати потрібний аналоговий сигнал до входу АЦП, сам аналого-цифровий перетворювач, що виконує перетворення аналогового сигналу в цифровий двійковий код.

Інтерфейс служить для сполучення вимірювальної частини системи з керуючою ЕОМ і реалізує функції обміну інформацією.

Канал керування дозволяє активно впливати на об'єкт (мінати температурний режим, деформувати і т.п.), стежачи одночасно за реакцією на цей вплив. Така можливість значно збагачує вимірювальний експеримент.

Наявність ЕОМ в експерименті при відповідному математичному забезпеченні дозволяє проводити ще й обчислювальний експеримент, тобто використовувати імітаційне моделювання замість натурального.

3.2 Основні напрямки розвитку автоматизації вимірювань

Історично склалося кілька основних напрямків розвитку автоматизації вимірювань [8]:

- а) вимірювальні прилади з вбудованими мікропроцесорами;
- б) вимірювально-обчислювальні комплекси;
- в) комп'ютерні вимірювальні системи.

Основна відмінність ЗВ з вбудованими мікропроцесорами від аналогових вимірювальних засобів полягає в тому, що в перших частина вимірювальної процедури виконується в числовій формі за допомогою програмованої обчислювальної потужності, яка вводиться в вимірювальний ланцюг.

3.2.1 Вимірювальні прилади з вбудованими мікропроцесорами

Складаються з двох нероздільно пов'язаних частин – апаратної і програмної; апаратна частина містить в собі вимірювальні, обчислювальні і

допоміжні засоби, програмна – системне, інструментальне і прикладне програмне забезпечення. Функціонування таких приладів спирається на прийнятту сукупність інтерфейсів, які забезпечують взаємодію всіх компонентів.

Введення процесора до складу вимірювального ланцюга і відповідно числових вимірювальних перетворень в вимірювальну процедуру радикально змінює функціональні і метрологічні можливості засобів вимірювань. З'являється можливість виконувати складні непрямі, сукупні і загальні вимірювання. Змінюються принципи реалізації статистичних вимірювань. Розширюються можливості з корекції похибок і застосування адаптивних і ітеративних вимірювальних процедур.

До типових вимірювальних перетворень, які реалізуються в числовій формі, належать: масштабування, функціональні перетворення (включаючи усереднення), формування коригувальних впливів, забезпечення адаптації та ітеративних вимірювань.

Природно, що при цьому змінюється структура повної похибки – з'являються складові, обумовлені числовими вимірювальними перетвореннями, і виникають проблеми метрологічного аналізу в зв'язку з ускладненням алгоритмів вимірювань.

Для процесорних перетворень характерна зміна (зменшення) питомої ваги інструментальних похибок, які визначаються збоями в функціонуванні процесора.

Активна участь процесора в реалізації вимірювального алгоритму може потребувати строго, з позиції метрології, підходити до похибок вимірювань, які стають складовою частиною загальної похибки результату вимірювання. Це особливо важливо для тих випадків, коли використовуються порівняно малорозрядні мікропроцесори. До вимірювальних засобів, які використовуються в автономних

електровимірювальних засобах, висуваються вимоги мінімальних маси і габаритів, які також обмежують розрядність процесорів.

З іншого боку, немає необхідності істотно завищувати вимоги до точності вимірювань порівняно з тією похибкою, яку вносять первинні вимірювальні перетворювачі. Щодо раціональності застосування процесора, потрібно прагнути до того, щоб похибка обчислень незначно збільшувала загальну похибку вимірювань.

Можна побудувати таку класифікацію функцій, які виконуються мікропроцесором в вимірювальних пристроях:

- 1) контролерні функції, пов'язані з управлінням з боку мікропроцесора елементами апаратного забезпечення;
- 2) обчислювальні функції, пов'язані з обробкою і аналізом даних;
- 3) тестові функції, пов'язані з визначенням працездатності пристрою, діагностикою та локалізацією несправності;
- 4) сервісні функції, пов'язані із взаємодією з пристроєм з боку оператора і інформаційно-вимірювальної системи.

3.2.2 Вимірювально-обчислювальні комплекси

Реалізуються на основі магістральної-модульного принципу побудови. При цьому кожен функціональний елемент реалізований у вигляді окремого модуля, а з'єднання здійснюється за допомогою одного зі стандартних інтерфейсів. Типова структура вимірювально-обчислювального комплексу, виконаного на базі приладового інтерфейсу, наведена на рис. 3.3.

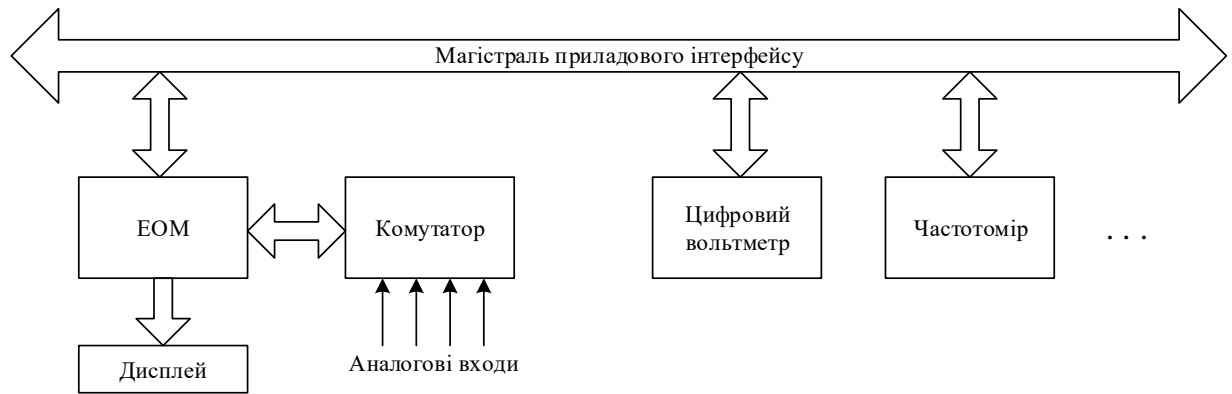


Рисунок 3.3 – Приклад структури вимірювально-обчислювального комплексу

3.2.3 Комп'ютерні вимірювальні системи

Об'єднують вимірювальні, обчислювальні і керуючі засоби на власній шині ЕОМ, що дозволяє виконати більшість функціональних блоків на одній платі, вбудованій в ЕОМ. Приклад структури комп'ютерної вимірювальної системи наведено на рис. 3.4.

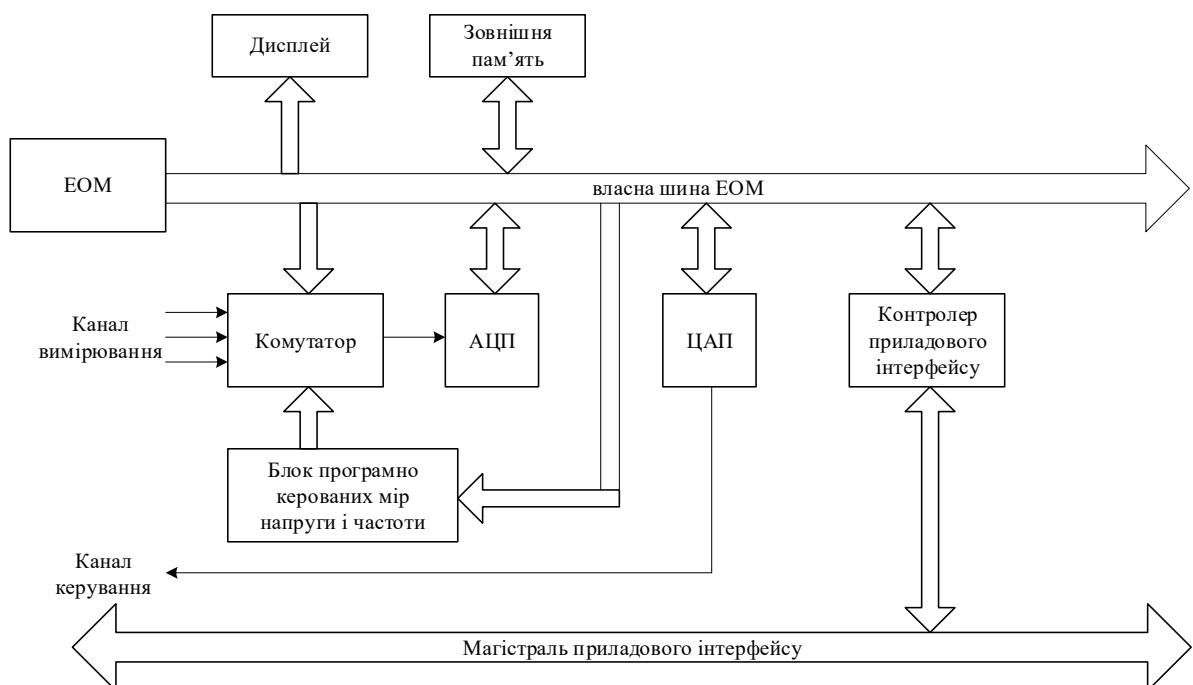


Рисунок 3.4 – Приклад структури комп'ютерної вимірювальної системи

4 ІНТЕРФЕЙСИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Інтерфейс – це сукупність уніфікованих правил і засобів (апаратних, програмних і конструктивних), які встановлюють і реалізують взаємодію компонентів автоматичних систем збору і обробки інформації в умовах, приписаних стандартом і спрямованих на забезпечення інформаційної, електричної та конструктивної сумісності зазначених елементів (ГОСТ 15971-84).

Будь-яку інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) можна уявити як сукупність інтерфейсів, які можуть передавати інформацію іншим пристроям, приймати інформацію від інших пристроїв і керувати процесом обміну. Конкретний блок системи може виконувати або окремі, або всі перераховані функції.

Найбільш поширений принцип побудови систем обробки інформації, в тому числі і ІВС – принцип агрегування. Його суть полягає в тому, що система виконується як агрегат, який складається з незалежних функціональних блоків-модулів. Кожен блок має конструктивну закінченість (АЦП, ЦАП, цифровий вольтметр, цифровий частотомір, принтер і т.ін.).

При побудові агрегованих систем повинні бути вирішені дві основні задачі: сумісності і сполучення модулів як між собою, так і з зовнішніми пристроями.

Щодо ІВС розрізняють 5 видів сумісності:

1) інформаційна – узгодженість вхідних і вихідних сигналів модулів за видами і номенклатурою, інформативними параметрами, рівнями. Для інформаційних зв'язків модулів застосовують сигнали декількох різновидів: інформаційні, керуючі, програмні, адресні, спеціальні;

2) конструктивна – узгодженість конструктивних параметрів, механічних з'єднань модулів при спільному використанні, а також узгодженість естетичних вимог;

3) енергетична – узгодженість напруг і струмів, які живлять модулі, ліній мережі змінного струму, батарейної лінії і робочої лінії, яка пов'язує модулі з центральним блоком живлення;

4) метрологічна – порівнянність результатів вимірювань, раціональний вибір і нормування метрологічних характеристик модулів, а також узгодження вхідних і вихідних ланцюгів;

5) експлуатаційна – узгодженість характеристик модулів по надійності і стабільності, а також характеристик, які визначають вплив зовнішніх факторів.

Всю множину інтерфейсів в залежності від призначення можна розділити на 3 типи:

1) машинні – вирішують задачу з'єднання центрального процесора ЕОМ з іншими її функціональними блоками, а також підключення периферійних пристроїв, в тому числі пристроїв зв'язку з об'єктом. Прикладом таких інтерфейсів можуть служити інтерфейси ISA, PCI, USB, RS-232;

2) системно-модульні – вирішують задачу уніфікації з'єднання модулів (функціональних блоків), призначених для роботи в системі, яка визначає і їх конструктивні особливості. Модулі, виконані з урахуванням застосування подібного інтерфейсу, як правило, не розраховані на використання як автономні прилади, які можуть працювати окремо, поза системою. Прикладом системно-модульного інтерфейсу є інтерфейс КАМАК;

3) системно-приладові – здійснюють об'єднання в систему модулів-приладів, які можуть працювати автономно і для яких характерні значні функціональні можливості (вимір ряду параметрів, різні режими роботи, програмуємість і т.п.). Конструктивні вимоги до інтерфейсів цього типу,

як правило, стосуються лише роз'ємів. Прикладом може бути приладовий інтерфейс (канал загального користування).

4.1 Приладовий інтерфейс (канал загального користування)

Вичерпні відомості про приладовий інтерфейс (інша назва – канал загального користування (КЗК)) наведено в ГОСТ 26.003-80 «ЕССП. Система інтерфейса для измерительных устройств с байт-последовательным, бит-параллельным обменом информации. Требования к совместимости».

Інші назви цього інтерфейсу:

- IEEE 488 (Institute of Electrical and Electronics Engineers);
- HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus);
- GPIB (General Purpose Interface Bus);
- IEC 625.1 (International Electrical Committee).

Інтерфейс призначений для з'єднання в систему програмованих і непрограмованих електронних вимірювальних приладів. Він забезпечує біт-паралельний і байт-послідовний асинхронний спосіб обміну. Максимальне число пристроїв, які підключаються – 15, максимальна довжина з'єднань – 20 м, максимальна швидкість передачі – 1 Мбайт/с.

Особливість стандарту – відсутність обмежень на конструктивну реалізацію і способи з'єднання пристроїв, а також на способи об'єднання їх в систему. Стандарт визначає тільки магістраль, по якій здійснюється обмін інформацією, синхронізація і управління [9]. Магістраль повністю пасивна. Всі активні ланцюги, за якими виробляють керуючу інформацію і здійснюють прийом і передачу інформації, розміщуються на друкованих платах пристроїв.

За характером взаємодії з магістраллю встановлюється 4 групи функціональних пристроїв: контролер, джерело, приймач, джерело-приймач.

Структуру приладового інтерфейсу зображено на рис. 4.1.

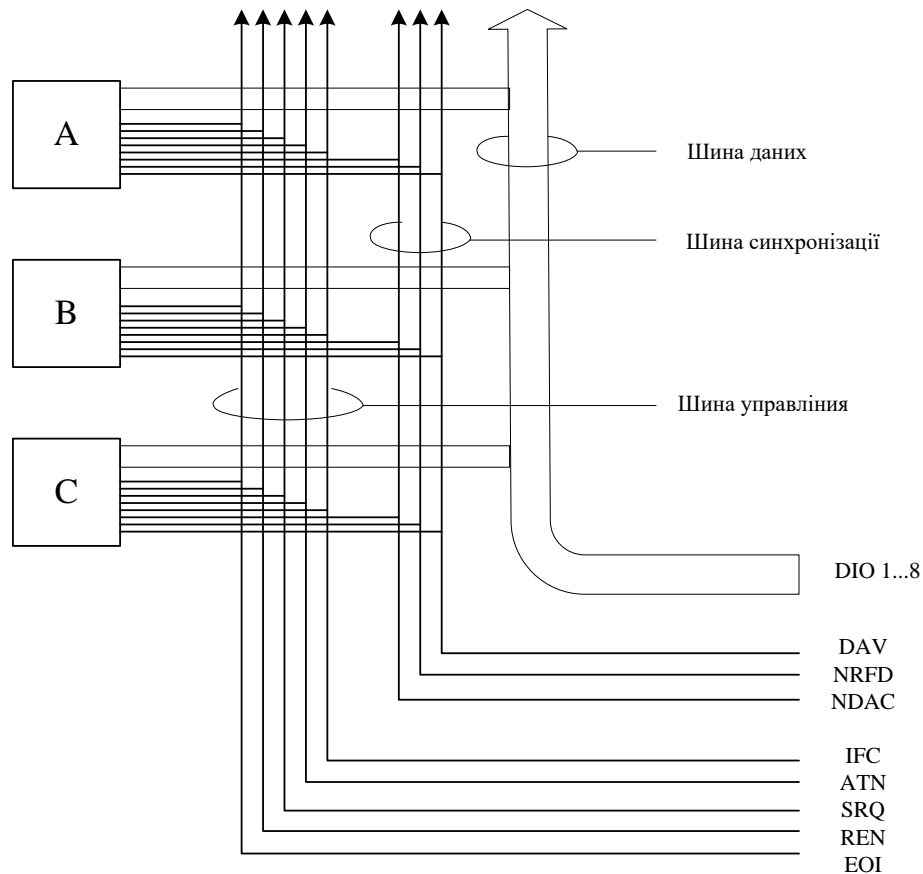


Рисунок 4.1 – Структура приладового інтерфейсу

Призначення сигналів магістралі КЗК:

а) шина даних:

DIO 1...8 (Data input/output) – служать для передачі даних, адрес модулів, команд;

б) шина синхронізації:

1) DAV (Data valid) – служить для сигналу, який вказує на наявність, достовірність інформації на шині даних;

2) NRFD (Not ready for data) – на цій лінії встановлюється сигнал готовності приймаючого приладу;

3) NDAC (Not data accepted) – призначена для пересилання сигналу-квитанції приймають приладів;

в) шина управління:

1) ATN (Attention) – при установці 1 всі пристрої переходять в режим очікування, контролер пересилає по шині адреси і команди, при установці 0 здійснюється обмін між приладами, адреси яких були переслані за час протилежного стану лінії;

2) IFC (Interface clear) – по цій лінії контролер дає сигнал, який переводить всі пристрої в початковий стан (скидання);

3) SRQ (Service request) – по цій лінії кожен з приладів, підключених до інтерфейсу, посилає в контролер сигнал запиту на обслуговування, тобто вимагає переривання поточного обміну в магістралі і пріоритетного обслуговування даного приладу контролером;

4) REN (Remote enable) – дозвіл дистанційного керування, тобто передача контролером сигналів програмного управління приладами;

5) EOI (End of identify) – ознака кінця передачі, встановлюється на лінії синхронно з пересилкою останнього байта.

4.2 Інтерфейс RS-232C

До складу персонального комп'ютера можуть входити до чотирьох послідовних інтерфейсів, які працюють у стандарті RS-232C (вітчизняний аналог – Стык С2-ИС, ГОСТ 23675-79 (електричні параметри), ГОСТ 18145-81 (номенклатура ланцюгів стику і їхня взаємодія)) і мають назву COM1 – COM4. Вони мають такі адреси в області портів вводу-виводу: COM1: 3F8 h – 3FF h; COM2: 2F8 h – 2FF h; COM3: 338 h – 33F h; COM4: 238 h – 23F h (інтерфейси COM3 і COM4 підтримуються тільки в моделях PS/2).

Кожен із пристроїв RS-232C являє собою контролер 8250, оснащений 25- або 9-штирковим роз'ємом на задній стінці корпусу комп'ютера. Цей роз'єм може використовуватися для підключення миші, графобудувача або організації зв'язку між комп'ютерами. Назви контактів стику RS-232C і їхнє функціональне призначення наведені в табл. 4.1.

Кожний інтерфейс пов'язаний з певним рівнем контролера переривань: COM1 викликає переривання IRQ4 (Int 0C h), COM2 викликає переривання IRQ3 (Int 0B h), COM3 і COM4 не мають стандартних векторів переривань.

Таблиця 4.1 – Назви і призначення ліній інтерфейсу RS-232C

Назва сигналу	Номер контакту		Призначення	Напрямок передачі
	9-шт.	25-шт.		
TXD	3	2	Передавання даних Установлюється 1, коли дані не передаються	Із комп'ютера
RXD	2	3	Приймання даних Установлюється 1, коли дані не приймаються	В комп'ютер
RTS	7	4	Запит на передачу 1 – комп'ютер перейшов у режим передавання 0 – комп'ютер перейшов у режим приймання	Із комп'ютера
CTS	8	5	Готовність периферійного пристрою (ПП) до приймання 0 – ПП готовий до приймання 1 – ПП не готовий до приймання	В комп'ютер
DTR	4	20	Готовність комп'ютера до роботи 0 – комп'ютер готовий до обміну даними з ПП 1 – комп'ютер не готовий до обміну даними з ПП	Із комп'ютера
DSR	6	6	Готовність ПП до роботи 0 – ПП готовий до обміну даними з комп'ютером 1 – ПП не готовий до обміну даними з комп'ютером	В комп'ютер
DCD	1	8	Сигнал виявлення несучої у фізичній лінії зв'язку 0 – зв'язок модемів встановлений 1 – зв'язок модемів не встановлений	В комп'ютер
SG	5	7	Сигнальна земля	–
RI	9	22	Індикатор виклику	В комп'ютер
FG	–	1	Захисна земля	–

Вимоги стандарту до формувача лінії зв'язку:

- 1) вихід повинен витримувати режими короткого замикання та холостого ходу;
- 2) опір при вимкненому живленні не повинен перевищувати 300 Ом;
- 3) максимальна напруга на вході і виході в режимі холостого ходу – 25 В;
- 4) максимальний вихідний струм короткого замикання – 500 мА;
- 5) значення сигналу на навантаженні від 3 кОм до 7 кОм: рівень послілки (1) – від – 5 В до – 15 В, рівень паузи (0) – від + 5 В до + 15 В;
- 6) час наростання і спаду сигналу в межах перехідної зони між мінімальними рівнями послілки і паузи (– 3 В и + 3 В) не повинен перевищувати 1 мс;
- 7) швидкість наростання і спаду вихідного сигналу не повинна перевищувати 30 В/мкс.

Вимоги стандарту до приймача інформації:

- 1) вхідний опір – від 3 кОм до 7 кОм;
- 2) максимальна ефективна шунтувальна ємність на вході приймача (включаючи ємність сполучної лінії) – менше 2500 пФ;
- 3) межі рівнів вхідної напруги: рівень послілки (1) – від – 3 В до – 25 В, рівень паузи (0) – від + 3 В до + 25 В.

При асинхронному способі обміну передача кожного інформаційного символу (від 5 до 8 біт) супроводжується службовими сигналами: стартовий біт, біт парності, стоп-біти (1, 1.5 або 2). Формат кадру, що передається по лінії зв'язку послідовного інтерфейсу, зображений на рис. 4.2. Біт парності призначений для виявлення помилок передачі даних. Передавач генерує цей біт таким чином, щоб загальна сума бітів кадру була парною або непарною залежно від обраного режиму роботи. Приймач підраховує кількість одиниць у прийнятому кадрі. Якщо дані не проходять перевірку, генерується сигнал помилки.



Рисунок 4.2 – Формат кадру повідомлення, що передається по лінії зв'язку RS-232С

Для з'єднання комп'ютера з периферійним пристроєм часто використовують усього 3 лінії: TXD, RXD, SG (нуль-модемне з'єднання, рис. 4.3). У цьому випадку реалізується дуплексний режим обміну за протоколом XON/XOFF. Комп'ютер, одержавши символ керування XOFF (13H), зупиняє передачу даних по лінії TXD і відновлює її тільки після одержання коду XON(11H). Аналогічно на сигнали XON і XOFF реагує і периферійний пристрій.

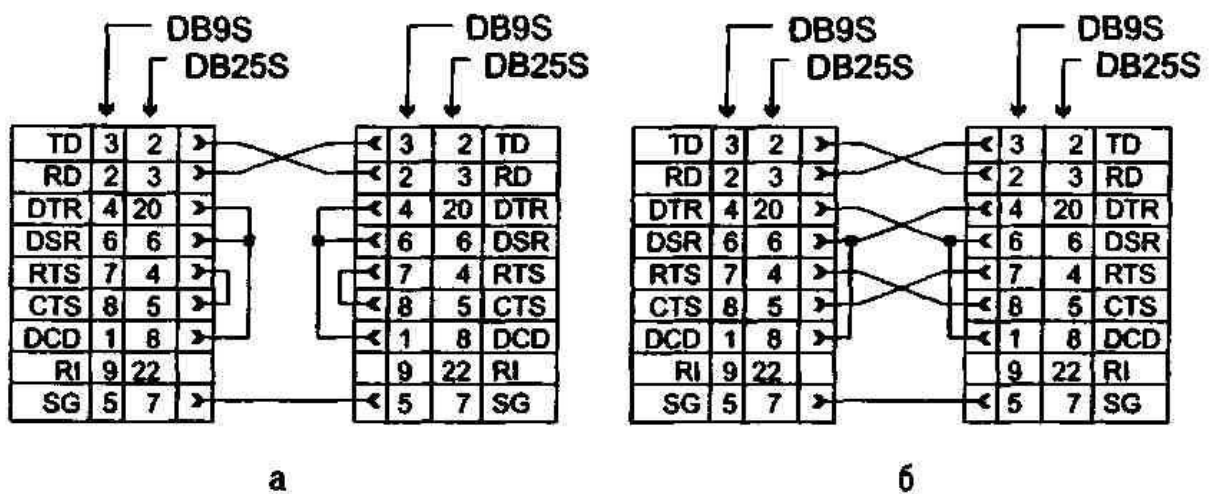


Рисунок 4.3 – Нуль-модемний кабель: а – мінімальний, б – повний

Для забезпечення напівдуплексного режиму роботи до перерахованих ліній додаються ще 2: RTS і CTS.

RTS = 1 – комп'ютер переходить у режим передачі. Одержавши підтвердження CTS = 0, комп'ютер передає дані і перед передачею кожного байта перевіряє сигнал CTS. Одержавши CTS = 1, комп'ютер припиняє передачу і або переходить на прийом, або очікує від ПП сигналу готовності.

Контролер стику RS-232C є повністю програмованим пристроєм, для якого можна задати такі параметри обміну: кількість бітів даних і стоп-бітів, вид парності і швидкість обміну в бодах (біт/с) [9, 10].

4.3 Інтерфейс RS-485

Стандарт RS-485 був спільно розроблений двома асоціаціями виробників: Асоціацією електронної промисловості (EIA – Electronics Industries Association) і Асоціацією промисловості засобів зв'язку (TIA – Telecommunications Industry Association). EIA колись маркувала всі свої стандарти префіксом «RS» (рекомендований стандарт). Багато інженерів продовжують використовувати це позначення, однак EIA/TIA офіційно замінив «RS» на «EIA/TIA» з метою полегшити ідентифікацію походження своїх стандартів. На сьогоднішній день, різні розширення стандарту RS-485 охоплюють широке коло додатків.

Інтерфейс RS-485 – один з найпоширеніших стандартів фізичного рівня зв'язку моделі взаємодії відкритих систем OSI.

Мережа, побудована на інтерфейсі RS-485, являє собою приймачі-передавачі, з'єднані за допомогою скрученої пари – двох скручених проводів. В основі інтерфейсу RS-485 лежить принцип диференціальної (балансової) передачі даних. Суть його полягає в передачі одного сигналу по двох проводах. Причому по одному провіднику (умовно А) іде оригінальний сигнал, а по іншому (умовно В) – його інверсна копія. Інакше кажучи, якщо

на одному проводі "1", то на іншому "0" і навпаки. Таким чином, між двома проводами скрученої пари завжди є різниця потенціалів: при "1" вона позитивна, при "0" – негативна.

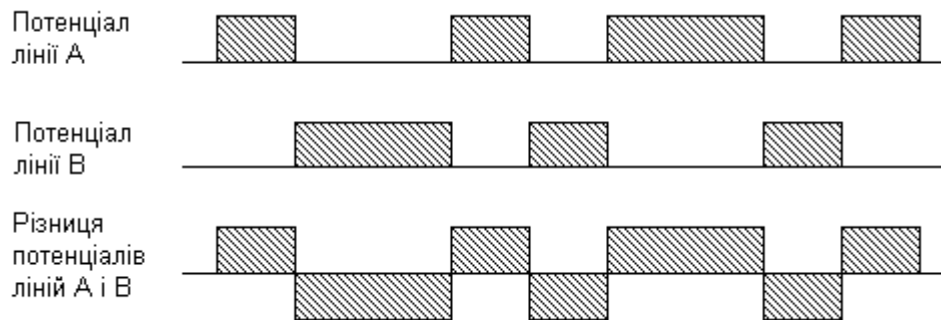


Рисунок 4.4 – Сигнали на лініях інтерфейсу RS-485

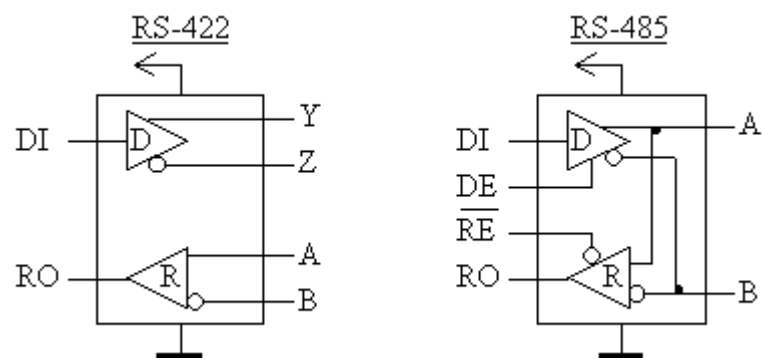
Саме цією різницею потенціалів і передається сигнал. Такий спосіб передачі забезпечує високу стійкість до синфазної завади. Синфазною називають заваду, що діє на обидва проводи лінії однаково. Приміром, електромагнітна хвиля, проходячи через ділянку лінії зв'язку, наводить в обох проводах потенціал. Якщо сигнал передається потенціалом в одному проводі відносно загального, як в RS-232, то наведення на цей провід може спотворити сигнал відносно добре поглинаючого наведення загального («землі»). Крім того, на опорі довгого загального проводу буде падати різниця потенціалів земель – додаткове джерело спотворень. А при диференціальній передачі спотворення не відбувається. Справді, якщо два проводи пролягають близько один до одного, так ще скручені, то наведення на обидва проводи однакові. Потенціал в обох однаково навантажених проводах змінюється однаково, при цьому інформативна різниця потенціалів залишається без змін.

Апаратна реалізація інтерфейсу – мікросхеми приймачів-передавачів з диференціальними входами/виходами (до лінії) і цифровими портами (до

портів UART контролера). Існують два варіанти такого інтерфейсу: RS-422 і RS-485.

RS-422 – повнодуплексний інтерфейс. Приймання і передавання йдуть по двох окремих парах проводів. На кожній парі проводів може бути тільки по одному передавачі.

RS-485 – напівдуплексний інтерфейс. Приймання і передавання йдуть по одній парі проводів з розділенням у часі. У мережі може бути багато передавачів, тому що вони можуть відключатися в режимі прийому.



D (driver) – передавач;
 R (receiver) – приймач;
 DI (driver input) – цифровий вхід передавача;
 RO (receiver output) – цифровий вихід приймача;
 DE (driver enable) – дозвіл роботи передавача;
 RE (receiver enable) – дозвіл роботи приймача;
 A – прямий диференціальний вхід/вихід;
 B – інверсний диференціальний вхід/вихід;
 Y – прямий диференціальний вихід (RS-422);
 Z – інверсний диференціальний вихід (RS-422).

Рисунок 4.5 – Приймачі-передавачі інтерфейсів RS-422 і RS-485

Зупинимося детальніше на приймачі-передавачі RS-485. Цифровий вихід приймача (RO) підключається до порту приймача UART (RX), а цифровий вхід передавача (DI) до порту передавача UART (TX). Оскільки на диференціальній стороні приймач і передавач з'єднані, то під час приймання потрібно відключати передавач, а під час передавання – приймач. Для цього

служать керуючі входи – дозвіл приймача (RE) і дозвіл передавача (DE). Оскільки вхід RE інверсний, те його можна з'єднати з DE і перемикати приймач і передавач одним сигналом з будь-якого порту контролера. При рівні "0" – робота на приймання, при "1" – на передавання.

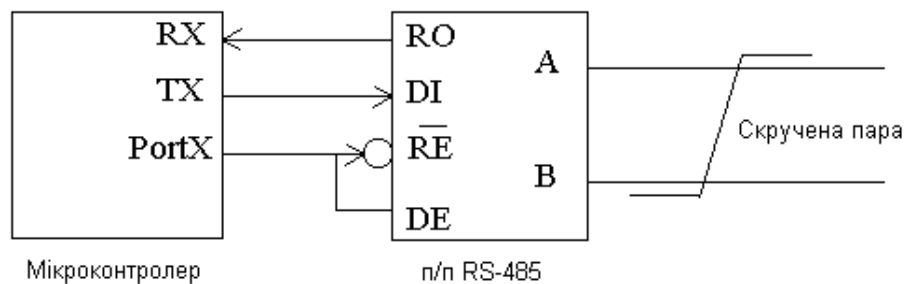


Рисунок 4.6 – Підключення приймача-передавача RS-485 до UART

Приймач, одержуючи на диференціальних входах (AB) різницю потенціалів (U_{AB}), переводить їх у цифровий сигнал на виході RO. Чутливість приймача може бути різною, але гарантований граничний діапазон розпізнавання сигналу виробники мікросхем приймачів-передавачів пишуть у документації. Зазвичай ці пороги становлять ± 200 мВ. Тобто, коли $U_{AB} > +200$ мВ – приймач визначає "1", коли $U_{AB} < -200$ мВ – приймач визначає "0". Якщо різниця потенціалів у лінії настільки мала, що не виходить за граничні значення – правильне розпізнавання сигналу не гарантується. Крім того, у лінії можуть бути і не синфазні завади, які спотворять настільки слабкий сигнал.

Всі пристрої підключаються до однієї скрученої пари однаково: прямі виходи (A) до одного проводу, інверсні (B) – до іншого.

Вхідний опір приймача з боку лінії (R_{AB}) зазвичай становить 12 кОм. Оскільки потужність передавача не безмежна, це створює обмеження на кількість приймачів, підключених до лінії. Відповідно до специфікації RS-485 з урахуванням узгоджувальних резисторів передавач може вести до

32 приймачів. Однак є ряд мікросхем з підвищеним вхідним опором, що дозволяє підключити до лінії значно більше 32 пристроїв.

Максимальна швидкість зв'язку по специфікації RS-485 може досягати 10 Мбод/сек. Максимальна відстань – 1200 м. Якщо необхідно організувати зв'язок на відстані, більшій ніж 1200 м або підключити більше пристроїв, ніж допускає навантажувальна здатність передавача – застосовують спеціальні повторювачі (репітери).

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики інтерфейсів RS-422 і RS-485

Стандартні параметри інтерфейсів	RS-422	RS-485
Припустиме число передавачів / приймачів	1/10	32/32
Максимальна довжина кабелю	1200 м	1200 м
Максимальна швидкість зв'язку	10 Мбіт/с	10 Мбіт/с
Діапазон напруг "1" передавача	+2...+10 В	+1.5...+6 В
Діапазон напруг "0" передавача	-2...-10 В	-1.5...-6 В
Діапазон синфазної напруги передавача	-3...+3 В	-1...+3 В
Припустимий діапазон напруг приймача	-7...+7 В	-7...+12 В
Граничний діапазон чутливості приймача	±200 мВ	±200 мВ
Максимальний струм короткого замикання передавача	150 мА	250 мА
Припустимий опір навантаження передавача	100 Ом	54 Ом
Вхідний опір приймача	4 кОм	12 кОм
Максимальний час наростання сигналу передавача	10% біта	30% біта

При великих відстанях між пристроями, зв'язаними по скрученій парі, і високих швидкостях передачі починають проявлятися так звані ефекти довгих ліній. Причина цьому – кінцева швидкість поширення електромагнітних хвиль у провідниках. Швидкість ця істотно менше швидкості світла у вакуумі й становить трохи більше 200 мм/нс. Електричний сигнал має також властивість відбиватися від відкритих кінців лінії передачі і її відгалужень. Для коротких ліній і малих швидкостей передачі цей процес відбувається так

швидко, що залишається непоміченим. Однак, час реакції приймачів – десятки-сотні нс. У такому масштабі часу кілька десятків метрів електричний сигнал проходить аж ніяк не миттєво. І якщо відстань досить велика, фронт сигналу, що відбився наприкінці лінії і повернувся назад, може спотворити поточний або наступний сигнал. У таких випадках потрібно якимось чином приглушувати ефект відбиття.

Електротехніка пропонує рішення цієї проблеми. У будь-якої лінії зв'язку є такий параметр, як хвильовий опір Z_w . Він залежить від характеристик використовуваного кабелю, але не від довжини. Для звичайно застосовуваних у лініях зв'язку скручених пар $Z_w = 120$ Ом. Виявляється, що якщо на віддаленому кінці лінії між провідниками скрученої пари включити резистор з номіналом, що дорівнює хвильовому опорі лінії, то електромагнітна хвиля, яка дійшла до «тупика», поглинається на такому резисторі. Звідси його назва – резистор узгодження або «термінатор».

Великий мінус узгодження на резисторах – підвищене споживання струму від передавача, адже в лінію включається низькоомне навантаження. Тому рекомендується включати передавач тільки на час відправлення послідовки. Є способи зменшити споживання струму, включаючи послідовно з резистором узгодження конденсатор для розв'язки по постійному струму. Однак, такий спосіб має свої недоліки. Для коротких ліній (кілька десятків метрів) і низьких швидкостей (менше 38400 бод) узгодження можна взагалі не робити.

Ефект відбиття і необхідність правильного узгодження накладають обмеження на конфігурацію лінії зв'язку. Лінія зв'язку повинна являти собою один кабель скрученої пари, до якого приєднуються всі приймачі і передавачі. Відстань від лінії до мікросхем інтерфейсу RS-485 повинна бути як можна коротше, тому що довгі відгалуження вносять неузгодженість і викликають відбиття.

В обоє найбільш віддалені кінці кабелю ($Z_B = 120 \text{ Ом}$) включають резистори узгодження R_t по 120 Ом . Якщо в системі тільки один передавач і він перебуває на кінці лінії, то досить одного резистора узгодження на протилежному кінці лінії.

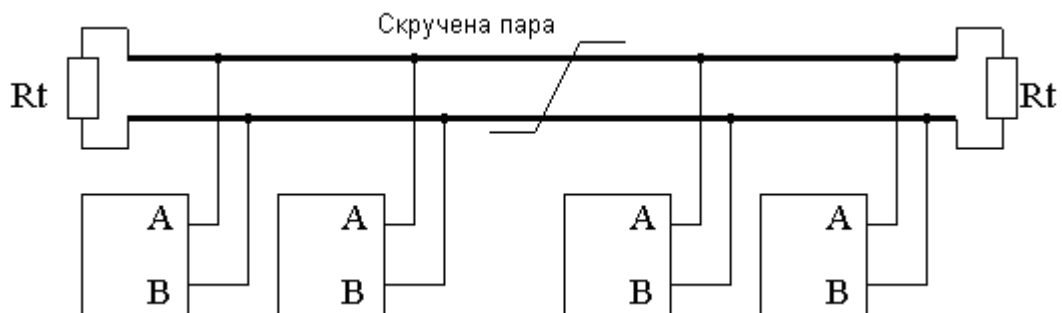


Рисунок 4.12 – Узгодження лінії зв'язку RS-485

На фізичному рівні лінія зв'язку готова до роботи, однак, потрібний ще й протокол – домовленість між пристроями системи про формат посилок.

По природі інтерфейсу RS-485 пристрої не можуть передавати одночасно – буде конфлікт передавачів. Отже, потрібно розподілити між пристроями право на передачу. Звідси основний розподіл: централізований обмін і децентралізований.

У централізованій мережі один пристрій завжди ведучий (master). Він генерує запити і команди іншим (веденим, slave) пристроям. Ведені пристрої можуть передавати тільки по команді ведучого. Як правило, обмін між веденими йде тільки через ведучого, хоча для прискорення обміну можна організувати передачу даних від одного веденого до іншого по команді ведучого.

У децентралізованій мережі роль ведучого може передаватися від пристрою до пристрою або за деяким алгоритмом черговості, або по команді поточного ведучого до наступного (передача маркера ведучого). При цьому

ведений пристрій може у своїй відповіді ведучому передати запит на перехід у режим ведучого й очікувати дозволу або заборони.

Послідовний канал за мірками контролера – штука повільна. На швидкості 9600 бод передача одного символу займає більше мілісекунди. Тому, коли контролер щільно завантажений обчисленнями і не повинен їх зупиняти на час обміну по UART, потрібно використовувати переривання по завершенню прийому і передачі символу. Можна виділити місце в пам'яті для формування посилки на передачу й збереження прийнятої посилки (буфер посилки), а також покажчики на позицію поточного символу. Переривання по завершенню прийому або передачі символу викликають відповідні підпрограми, які передають або зберігають черговий символ зі зрушенням покажчика і перевіркою ознаки кінця повідомлення, після чого повертають керування основній програмі до наступного переривання. По завершенню відправлення або прийому всієї посилки або формується користувальницький прапор, що відпрацьовується в основному циклі програми, або відразу викликається підпрограма обробки повідомлення.

У загальному випадку посилка по послідовному каналу складається з керуючих байтів (синхронізації посилки, адрес відправника і одержувача, контрольної суми та ін.) і власне байтів даних.

Основне завдання в організації протоколу – змусити всі пристрої розрізняти керуючі байти і байти даних. Приміром, ведений пристрій, одержуючи по лінії потік байтів, повинен розуміти, де початок посилки, де кінець і кому вона адресована.

Протоколів існує безліч і можна придумати ще більше, але краще користуватися найбільш уживаними з них. Одним зі стандартних протоколів послідовної передачі є Modbus, його підтримку забезпечують багато виробників промислових контролерів.

5 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ГРАДУЮВАННЯ ДАТЧИКІВ ТЕМПЕРАТУРИ

5.1 Постановка задачі

Відповідно до завдання на кваліфікаційну роботу необхідно розробити інформаційно-вимірювальну систему для градуювання датчиків температури на базі персонального комп'ютера з такою мінімальною конфігурацією:

- процесор Intel Celeron 3 ГГц;
- об'єм оперативної пам'яті 2 Гбайт;
- жорсткий магнітний диск з об'ємом 200 Гбайт;
- відеоадаптер SVGA;
- операційна система Windows XP.

Вихідні дані для проєктування наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для проєктування

№ п/п	Характеристика	Значення
1	Тип термоперетворювачів	Терморезистор, термопара
2	Діапазон температур, °С	–50 ... 100
3	Максимальна відстань між комп'ютером та вимірювальною установкою, м	60
4	Максимальна кількість терморезисторів, що одночасно градуюються	16
5	Максимальна кількість термопар, що одночасно градуюються	16
6	Максимально допустима похибка вимірювання опору, %	0,1
7	Максимально допустима похибка вимірювання термоЕРС, %	0,1

5.2 Розробка структурної схеми вимірювальної системи

Градування вимірювальних перетворювачів – один з поширених в метрологічній практиці регламентів, суть якого зводиться до проведення сумісних вимірювань вхідного і вихідного сигналів вимірювального перетворювача в заданому робочому діапазоні вимірюваної фізичної величини з наступною побудовою градувальної характеристики (функції перетворення) даного датчика. Функція перетворення може бути отримана у вигляді таблиці, графіка або рівняння (аналітичної залежності), що зв'язує вхідну і вихідну величину перетворювача.

Таким чином, проєктована інформаційно-вимірювальна система повинна забезпечити проведення вимірювань вихідних сигналів терморезисторів і термопар, а також температури, на значній відстані від об'єкта вимірювання. Виходячи з технічного завдання, розробимо узагальнену структурну схему інформаційно-вимірювальної системи для градування датчиків температури.

Основними структурними елементами нашої системи будуть:

- персональний комп'ютер, що виконує функції програмного управління процесом вимірювань, отримання та зберігання результатів вимірювань, обробку результатів вимірювань і подання інформації користувачу;
- інтерфейс, який дозволить об'єднати в одну систему всі основні функціональні вузли, забезпечить функції сумісності та обміну інформацією між комп'ютером і вимірювальною частиною системи;
- вимірювальні функціональні модулі, що дозволяють здійснювати вимірювання вихідних сигналів терморезисторів і термопар із заданою точністю і мають можливість підключення до вибраного інтерфейсу для взаємодії з управляючою частиною системи;

- установка для відтворення температурної шкали в заданому діапазоні;
- зразковий засіб вимірювання для контролю температури з можливістю підключення до вибраного інтерфейсу.

Узагальнена структурна схема інформаційно-вимірювальної системи для градуювання датчиків температури наведена на рис. 5.1.

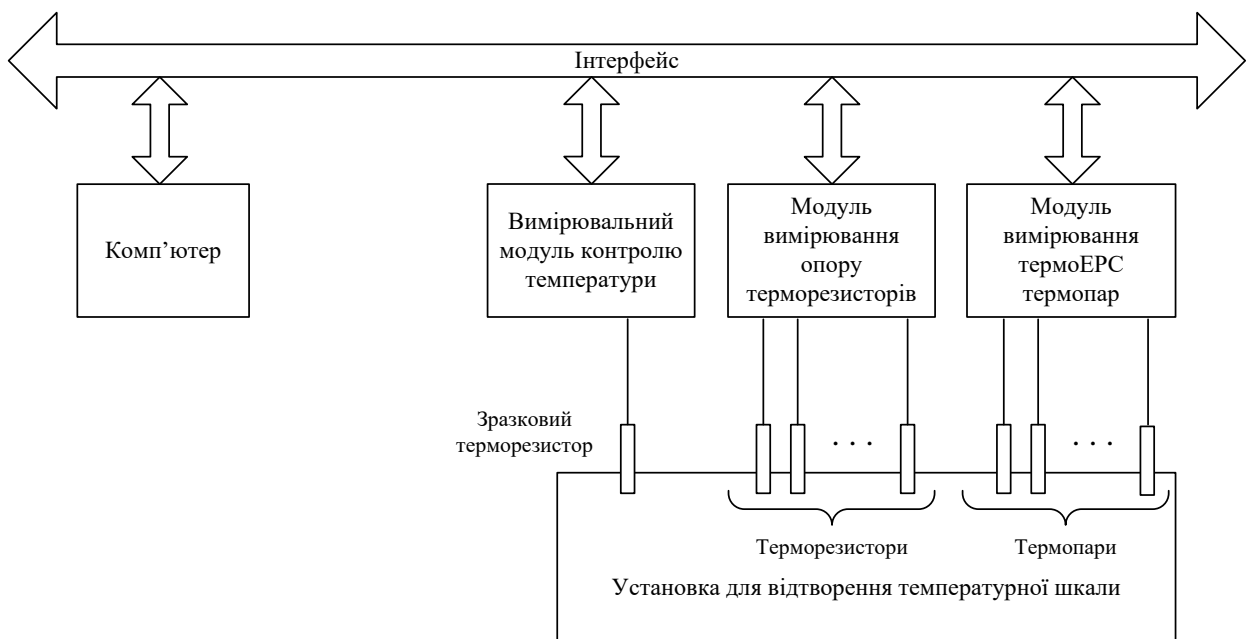


Рисунок 5.1 – Узагальнена структурна схема інформаційно-вимірювальної системи для градуювання датчиків температури

5.3 Вибір елементної бази

Наступним етапом проєктування є вибір елементної бази вимірювальної системи. Розглянемо по черзі основні функціональні блоки.

5.3.1 Комп'ютер

Відповідно до вимог технічного завдання персональний комп'ютер повинен мати наступні мінімальні характеристики:

- процесор Intel Celeron 3 ГГц;

- об'єм оперативної пам'яті 2 Гбайт;
- жорсткий магнітний диск з об'ємом 200 Гбайт;
- відеоадаптер SVGA;
- операційна система Windows XP.

Крім цього, на персональному комп'ютері має бути встановлено спеціалізоване програмне забезпечення для реалізації функцій взаємодії з інтерфейсом, програмного управління вимірювальною частиною і зчитування результатів вимірювань з вимірювальних модулів.

5.3.2 Інтерфейс

Вибір інтерфейсу є дуже важливим етапом проєктування, оскільки від нього багато в чому залежить як загальна структура системи і ефективність її роботи, так і вибір основних функціональних блоків, які будуть підключатися до цього інтерфейсу. В результаті аналізу вимог технічного завдання на розробку інформаційно-вимірювальної системи для градування датчиків температури був обраний інтерфейс RS-485. Перевагами даного інтерфейсу є:

- досить велика протяжність шини (до 1200 м без повторювачів);
- можливість підключення до 32 пристроїв до магістралі;
- досить висока швидкість передачі даних (до 10 Мбіт/с);
- підтримка протоколу ModBus;
- реалізація даного інтерфейсу більшістю виробників сучасного вимірювального обладнання для систем промислової автоматки і контролю.

Основні технічні характеристики і особливості реалізації інтерфейсу RS-485 були описані в розділі 4.3. Необхідно відзначити, що персональний комп'ютер не має вбудованого інтерфейсу RS-485, тому для підключення його до шини необхідно використовувати перетворювач інтерфейсів (або конвертор) RS-232C / RS-485.

Для реалізації вимірювальної системи були обрані модулі збору даних компанії Advantech. Модулі серії ADAM-4000 призначені для побудови

розподілених систем збору даних і управління та є компактними і інтелектуальними пристроями обробки сигналів датчиків, спеціально розробленими для застосування в промисловості. Наявність вбудованих мікропроцесорів дозволяє їм здійснювати нормалізацію сигналів, операції аналогового і дискретного вводу/виводу, відображення даних і їх передачу (або прийом) по інтерфейсу RS-485. Всі модулі мають гальванічну розв'язку по ланцюгах живлення і інтерфейсу RS-485, програмну установку параметрів, командний протокол ASCII і ModBus, а також сторожовий таймер.

Живлення модулів здійснюється нестабілізованою напругою 10...30 В постійного струму. Діапазон робочих температур від -10 до $+70^{\circ}\text{C}$, діапазон температур зберігання $-25...+80^{\circ}\text{C}$, відносна вологість повітря до 95% без конденсації вологи.

Для інтеграції модулів ADAM-4000 в системи збору даних і управління можуть бути використані елементи управління ActiveX, OPC сервери (для ASCII_команд і протоколу ModBus/RTU), а також SCADA-пакет ADAMView, які поставляються компанією Advantech.

Підключення шини інтерфейсу RS-485 до персонального комп'ютера будемо здійснювати через модуль перетворювача RS-232 в RS-422/485 ADAM-4520. Цей конвертер інтерфейсів забезпечує швидкість передачі даних до 115,2 кбіт/с, автоматичний контроль напрямку передачі, гальванічну ізоляцію 3000 В постійного струму. Для підключення до інтерфейсу RS-232 використовується розетка DB-9, а для підключення до магістралі RS-422/485 – клемна колодка.

5.3.3 Вимірювальна частина

Для підключення зразкового термометра опору Pt100 пропонується використовувати модуль аналогового вводу ADAM-4013, особливостями якого є:

– 16-розрядний АЦП;

- програмна настройка для роботи з термометрами опору (платиновими або нікелевими);

- гальванічна ізоляція 3000 В постійного струму;

- 2-, 3- або 4-провідна схема підключення.

Для підключення терморезисторів, що градууються, будемо використовувати 6-канальний модуль аналогового вводу ADAM-4015, який має такі характеристики:

- 16-розрядний АЦП;

- програмна настройка для роботи з термометрами опору;

- 6 диференціальних вхідних аналогових каналів;

- гальванічна ізоляція 3000 В постійного струму;

- 2- або 3-провідна схема підключення;

- підтримка ModBus/RTU.

Оскільки передбачається підключення до 16 терморезисторів, в вимірювальній системі буде використовуватися три модулі ADAM-4015.

Для підключення термопар, що градууються, будемо використовувати універсальний модуль аналогового вводу ADAM-4019, який має такі характеристики:

- 16-розрядний АЦП;

- 8 диференціальних каналів аналогового вводу з індивідуальною установкою параметрів для кожного каналу;

- тип вхідного сигналу: сигнал з термопари, напруга (мВ, В), струм (мА);

- гальванічна ізоляція 3000 В постійного струму.

Оскільки передбачається підключення до 16 термопар, в вимірювальній системі буде використовуватися два модулі ADAM-4019.

5.3.4 Установка для відтворення температурної шкали

Для відтворення необхідної температури із заданого діапазону будемо використовувати температурну камеру MO-71 японської фірми Tabai MFG

Co. Ltd, в яку будуть поміщатися терморезистори і термопари, що градууються, а також зразковий термометр опору Pt100, який використовується для контролю температури в камері. Температурна камера дозволяє відтворювати температури в діапазоні від -75 до $+100$ °C.

Остаточний варіант функціональної схеми вимірювальної системи представлений на рис. 5.2.

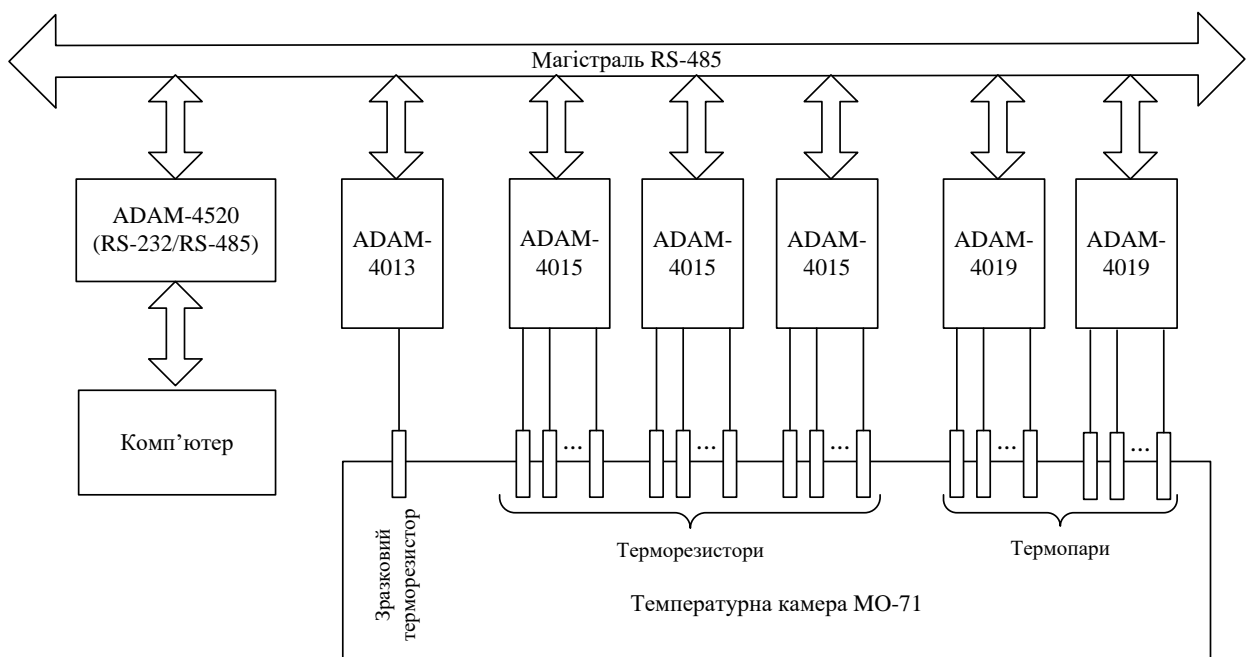


Рисунок 5.2 – Функціональна схема інформаційно-вимірювальної системи для градування датчиків температури

5.4 Розробка алгоритму функціонування системи

Узагальнена схема алгоритму функціонування вимірювальної системи зображена на рис. 5.3.

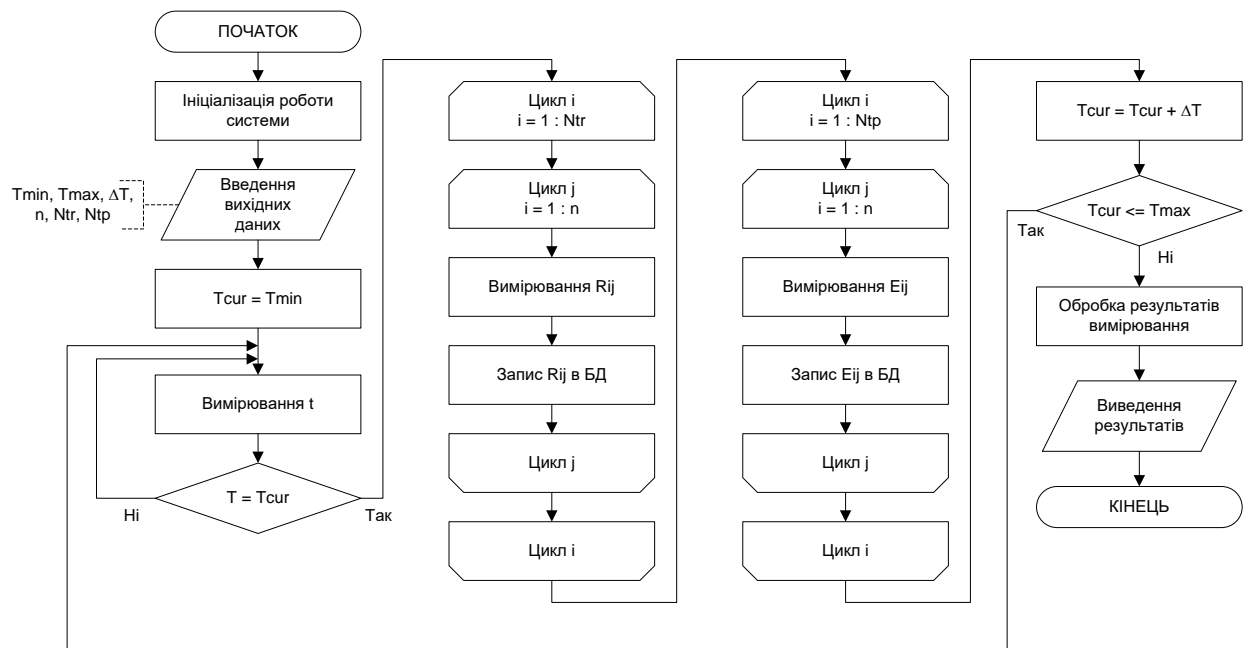


Рисунок 5.3 – Узагальнена схема алгоритму функціонування вимірювальної системи

Перед проведенням процедури градування здійснюється конфігурація вимірювальної системи, терморезистори і термопари підключаються до відповідних модулів збору даних і поміщаються в температурну камеру. Після цього температурна камера встановлюється на мінімальну температуру -50°C і по досягненню заданої температури витримується в такому стані 30 хвилин.

Робота починається з ініціалізації керуючої програми. Користувач за допомогою графічного інтерфейсу задає основні параметри роботи системи: мінімальну температуру T_{\min} , максимальну температуру T_{\max} , крок температурної сітки ΔT , кількість вимірювань в кожній контрольній точці n , кількість терморезисторів N_{tr} , кількість термопар N_{tp} .

Після цього температурна камера МО-71 включається на нагрів. Керуюча програма опитує в циклі канал вимірювання температури. При досягненні чергової контрольної точки проводиться циклічне опитування термоперетворювачів і виконується n вимірювань вихідного сигналу для

кожного термоперетворювача, результати вимірювань заносяться в базу даних.

При досягненні останньої контрольної точки процедура вимірювання закінчується, програма здійснює обробку результатів вимірювань і виводить градувальні таблиці по кожному термоперетворювачу.

5.5 Метрологічне забезпечення

Метрологічні характеристики проєктованої інформаційно-вимірювальної системи будуть визначатися:

- а) похибкою вимірювання температури зразковим термометром опору;
- б) похибкою вимірювання опору терморезисторів;
- в) похибкою вимірювання термоЕРС термопар.

Проведемо апріорний аналіз цих похибок.

Розрядність вимірювального пристрою істотно впливає на похибку вимірювання. Наявність великої кількості розрядів в АЦП важливо тому, що безперервний (аналоговий) сигнал перетворюється в цифровий з деякою похибкою. Ця похибка буде тим більше, чим менше рівнів квантування сигналу, тобто чим далі відстоять один від іншого допустимі значення квантованого сигналу. Число рівнів квантування, в свою чергу, залежить від розрядності АЦП. Похибки, які виникають в результаті заміни аналогового сигналу рядом квантованих за рівнем відліків, можна розглядати як його спотворення, викликані дією завади. Цю заваду прийнято образно називати шумом квантування. Шумом квантування є різниця відповідних значень реального і квантованого за рівнем сигналів.

Для нормованого сигналу величина зведеної похибки квантування дорівнює:

$$\gamma_k = \frac{1}{N-1} \cdot 100\%, \quad (5.1)$$

де N – число рівнів квантування.

Крім того, на похибку вимірювання впливають внутрішні шуми вимірювального модуля і зовнішні завади, наприклад, наведення по ланцюгах живлення.

Всі вимірювальні модулі, використовувані в проєктованій системі, мають 16-розрядні АЦП, тому похибка квантування для них буде однаковою. За формулою (5.1) знаходимо:

$$\gamma_k = \frac{1}{2^{16}-1} \cdot 100\% = 0,0015\% .$$

Відповідно до технічної документації, для модулів аналогового вводу ADAM-4013, ADAM-4015 і ADAM-4019 коефіцієнт ослаблення завади загального вигляду на частоті 50...60 Гц становить не менше 92 дБ. Отже, цією складовою похибки вимірювання можна знехтувати, оскільки вона буде мізерно малою в порівнянні з похибкою квантування.

Градувальні характеристики термопар визначають при температурі вільних кінців 0 °С, тому під час проведення градуювання вільні кінці термопар поміщаються у ванну, заповнену сумішшю води і льоду, причому цю суміш необхідно періодично ущільнювати, щоб позбутися від бульбашок повітря. Градувальні таблиці термопар, що випускаються промисловістю, складені для температури вільних кінців 0 °С, тому при проведенні вимірювань необхідно вводити поправку на температуру вільних кінців.

У технічній документації наведені основні характеристики похибок модулів аналогового вводу. Так, модулі ADAM-4013, ADAM-4015 мають наступні характеристики:

– основна похибка вимірювання не перевищує $\pm 0,05\%$;

- температурний коефіцієнт зсуву нуля $\pm 3 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$;
- температурний коефіцієнт зсуву шкали $\pm 25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Універсальний модуль аналогового вводу ADAM-4019 має наступні характеристики:

– основна похибка вимірювання не перевищує $\pm 0,1\%$ при вимірюванні напруги;

- температурний коефіцієнт зсуву нуля $\pm 30 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$;
- температурний коефіцієнт зсуву шкали $\pm 25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

ВИСНОВКИ

Дана кваліфікаційна робота присвячена розробці інформаційно-вимірювальної системи для градуювання датчиків температури.

У пояснювальній записці розглянуто основні відомості про температурні вимірювання і первинні вимірювальні перетворювачі температури. Також розглянуті основні завдання автоматизації вимірювань і найбільш популярні інтерфейси, що використовуються в інформаційно-вимірювальних системах.

Розроблено проєкт інформаційно-вимірювальної системи для градуювання датчиків температури на базі персонального комп'ютера з використанням модулів аналогового вводу серії ADAM-4000 фірми Advantech. Система реалізована на базі інтерфейсу RS-485.

Розроблено узагальнену структурну схему інформаційно-вимірювальної системи, здійснено вибір елементної бази, розроблений алгоритм функціонування системи.

У розділі, присвяченому метрологічному забезпеченню, виконано апіорний аналіз похибок вимірювання проєктованої системи.

Перевагами розробленої інформаційно-вимірювальної системи є можливість у автоматичному режимі здійснювати градуювання до 16 терморезисторів та до 16 термопар одночасно та обробляти значні обсяги вимірювальної інформації, позбавляючи фахівців-метрологів від рутинної роботи. Спроєктована автоматизована система може застосовуватись при здійсненні наукових досліджень, проведенні метрологічних регламентів та у навчальному процесі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Датчики для измерения температуры в промышленности [Текст] / К. : Наукова думка, 1972. – 224 с .
2. Приборы для измерения температуры контактным способом [Текст] / Львов : Вища школа, 1978. – 208 с.
3. Приборы и методы температурных измерений [Текст] : учеб. пособие / Б. Н. Олейник, С. И. Лаздина, В. П. Лаздин, О. М. Жагулло. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 296 с.
4. Исследования в области температурных измерений при высоких температурах [Текст]. – М. : ВНИИ метрологии, 1975. – 118 с.
5. Температура и её измерение [Текст]. – М. : Иниздат, 1960. – 433 с.
6. Геращенко, О. А. Температурные измерения [Текст] / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, А. К. Еремина, В. И. Лах, Я. Т. Луцик, В. И. Пуцыло, Б. И. Стаднык, Н. А. Ярышев. – К. : Наукова думка, 1989. – 702 с.
7. Геращенко, О. А. Тепловые и температурные измерения [Текст] : справ. руководство / О. А. Геращенко, В. Г. Федоров. – К. : Наукова думка, 1965. – 304 с.
8. Основы метрологии и электрические измерения [Текст] : учеб. пособие / Б. Я. Авдеев, Е. М. Антонюк, Е. М. Душин и др.; под ред. Е. М. Душина. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
9. Тесленко, А. И. Стандартные интерфейсы и их применение в радиоизмерительной технике [Текст]: учеб. Пособие / А. И. Тесленко. – К. : УМКВО, 1992. – 120 с.
10. Третьяк, О. В. Засоби та системи автоматизації наукових досліджень [Текст] : підручник / О. В. Третьяк, Ю. В. Бойко. – К. : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. – 319 с.

11. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
12. Захаров, И. П. Обработка результатов измерений [Текст] : учеб. пособие / И. П. Захаров.– Харьков : Изд-во НУВД, 2002. – 126 с.
13. Захаров, И. П. Теоретическая метрология [Текст] : учеб. пособие / И. П. Захаров.– Харьков : ХТУРЭ, 2000. – 172 с.
14. Романов, В. Н. Теория измерений. Анализ и обработка экспериментальных данных [Текст] : учеб. пособие / В. Н. Романов, В. В. Комаров. – СПб : СЗТУ, 2002. – 127 с.
15. Рабинович, С. Г. Погрешности измерений [Текст] / С. Г. Рабинович. – Л. : Энергия. Ленинградское отд-ние, 1978. – 262 с.
16. Кукуш, В. Д. Определение погрешностей результатов и средств измерений [Текст] / В. Д. Кукуш. – Харьков : ХПИ, 1979. – 116 с.
17. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.