

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ, МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕ-  
ТУ РЕЧЕЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Шутко В.М.  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р

**ДИПЛОМНА РОБОТА  
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР  
ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ «ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»

**Тема:** «Цифровий пристрій вимірювання температури радіокомпонентів»

**Виконавець:** група ЕС-201Мз, *БОБИРЕНКО Максим Олексійович*

**Керівник:** доцент, к.т.н., *Морозова Ірина Володимирівна*

**Охорона праці** *Кічата Н.М.*

**Охорона навколишнього середовища** *Фролов В.Ф.*

**Нормоконтролер:** *Сініцин Р. Б.*

Київ 2020

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра електроніки, робототехніки, моніторингу та інтернету речей

Спеціальність, ОПП: 171 «Електроніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Шутко В.М.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020р.

## ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи**

Бобиренко Максима Олексійовича

(П.І.Б., випускника)

1. Тема дипломної роботи: «Цифровий пристрій вимірювання температури радіокомпонентів»

затверджена наказом ректора від «06» жовтня 2020 р. № 1912/ст

2. Термін виконання роботи: з 05 жовтня 2020 р по 27 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані роботи: теоретичний матеріал по вимірюванню температури радіокомпонентів.

4. Зміст пояснювальної записки: 1.Основні способи вимірювання температури;2. Аналіз датчиків температури та їх характеристики;3. Види мікроконтролерів;4. Розробка структурної, принципової схем приладу;5.Програмування мікроконтролера;6.Охорона праці та надзвичайні ситуації;7.Охорона навколишнього середовища.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: Презентація основних результатів роботи в електронному вигляді.

## 6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання	Підпис керівника
1.	Вступ	01.10.2020	Виконано	
2.	Обробка матеріалів за темою дипломної роботи: підручники, Інтернет-ресурси	05.10.2020	Виконано	
3.	Огляд основних видів датчиків температури. Принцип дії	20.10.2020	Виконано	
4.	Огляд сучасних мікроконтролерів. Вибір основних компонентів.	01.11.2020	Виконано	
5.	Розробка структурної і функціональної схеми приладу	15.11.2020	Виконано	
6.	Алгоритм роботи	01.12.2020	Виконано	
7.	Написання розділу по охороні праці та охороні навколишнього середовища за темою дипломної роботи	10.12.2020	Виконано	
8.	Подання на кафедру. Усунення недоліків. Оформлення пояснювальної записки.	20.12.2020	Виконано	
9.	Електронна версія доповіді, ілюстративний матеріал доповіді	23.12.2020	Виконано	

## 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	асистент Кічата Н.М.		
Охорона навколишнього середовища	д.т.н., доцент, завідувач кафедри екології Фролов В.Ф.		

8. Дата видачі завдання: 01 жовтня 2020 року

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

Морозова І.В.  
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис випусника)

Бобиренко М.О.  
(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту “Цифровий пристрій вимірювання температури радіокомпонентів”: 126 сторінки, 30 рисунків, 3 таблиць, 21 використаних джерел.

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ТЕРМОДАТЧИК, ТЕМПЕРАТУРА, ЕЛЕКТРОННИЙ ТЕРМОМЕТР, ПРОГРАМУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА.

Об’єкт дослідження – Електронний термометр на основі мікроконтролера ATtiny2313 і термодатчика DS18B20.

Мета дипломного проекту – розробка пристрою для автоматичного вимірювання температури. Розробка програми для роботи з електронним термометром.

Метод дослідження – аналітично інструментальне та комп’ютерне проектування.

Розроблений електронний термометр з робочим діапазоном температур  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $125^{\circ}\text{C}$ . Матеріали дипломного проекту рекомендується використовувати при проведенні наукових досліджень, у навчальному процесі та в практичній діяльності при викладанні дисциплін, пов’язаних з мікропроцесорними системами.

# ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ СПОСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.	
ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ .....	11
1.1 Структура датчиків температури.....	11
1.2 Загальні характеристики.....	13
1.3 Терморезистивні датчики.....	15
1.3.1 Резистивні детектори температури.....	15
1.3.2 Кремнієві резистивні датчики.....	19
1.3.3 Термістори.....	21
1.4 Термоелектричні контактні датчики.....	28
Висновки.....	30
РОЗДІЛ 2 ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЇХ ОСНОВНІ	
ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	31
2.1 Напівпровідникові датчики температури.....	31
2.1.1 Датчики температури на основі діодів и транзисторів.....	31
2.1.2 Датчики температури на основі терморезисторів.....	33
2.1.3 Плівкові напівпровідникові датчики температури.....	38
2.2 Пірометричні датчики.....	39
2.3 Оптичні датчики.....	40
2.3.1 Флуоресцентні датчики.....	40
2.3.2 Інтерферометричні датчики.....	42
2.3.3 Датчики на основі растрів.....	43
2.4 Акустичні датчики.....	44
2.5 П'єзоелектричні датчики.....	46
Висновки.....	47
РОЗДІЛ 3 МІКРОКОНТРОЛЕРИ.....	48
3.1 Типи мікроконтролерів.....	48
3.1.1 Мікроконтролери із зовнішньою пам'яттю.....	53

3.1.2 Цифрові сигнальні процесори.....	54
3.2 CISC і RISC архітектура процесора.....	55
3.3 Особливості МК RISC архітектури.....	59
РОЗДІЛ 4 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО ТЕРМОМЕТРА.....	65
4.1 Розробка структурної схеми.....	65
4.2 Мікроконтролер ATtiny2313.....	65
4.2.1	Опис
дів.....	69
4.2.2 Регістри загального призначення.....	71
4.2.3 Арифметико-логічний пристрій.....	72
4.2.4 Пам'ять.....	73
4.2.5 Завантажувальна пам'ять програм.....	73
4.2.6 EEPROM пам'ять даних.....	73
4.2.7 Статичне ОЗП даних.....	73
4.3 Датчик температури Dallas DS18B20.....	75
4.4 Створення програми.....	82
4.5 Програмування мікроконтролера.....	84
4.6 Опис та робота термометра.....	82
Висновок.....	88
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ.....	89
5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що діють при експлуатації цифрового термометра.....	89
5.2 Зменшення або ліквідація небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	92
5.3 Рациональне освітлення.....	96
5.4 Пожежна і вибухова безпеки.....	98
5.5 Інструкція з техніки безпеки при експлуатації цифрового термометра.....	99
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	105
6.1 Електромагнітне забруднення.....	105

6.2 Електромагнітні випромінювання комп'ютера.....	106
6.3 Захист від електромагнітних випромінювань.....	108
ВИСНОВКИ.....	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	114
ДОДАТОК А.....	

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

РДТ – резистивні детектори температури

ЕРС – електрорушійна сила

ТЕРМО-ЕРС – термоелектрична електрорушійна сила

ПТК – позитивний температурний коефіцієнт

НТК – негативний температурний коефіцієнт

ТКО – температурний коефіцієнт опору

КНС – "кремній на сапфірі" структура

АЧТ – Абсолютно чорне тіло

ПАХ – поверхневі акустичні хвилі

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

МК – мікроконтролер

ПЗП – постійно-запам'ятовуючий пристрій

ОЗП – оперативно-запам'ятовуючий пристрій

АЛП – арифметико-логічний пристрій

ЕМП – електромагнітне поле

ТО – технічне обслуговування



## ВСТУП

Вимірювання – єдиний спосіб здобуття кількісної інформації про величини, що характеризують ті або інші фізичні явища або процеси. Тому розробка нових приладів, машин, механізмів, апаратів, а також безпосереднє здійснення складних технологічних процесів в сучасній промисловості зв'язані з необхідністю виміру багаточисельних фізичних величин. При цьому число механічних, теплових, хімічних або акустичних величин, що підлягають виміру, тобто так званих неелектричних величин, науку, що цікавлять, і виробництво, у багато разів більше всіх можливих електричних і магнітних величин. Тому вимірювання неелектричних величин досяг зараз високого розвитку і утворює найбільш крупну і розгалужену область сучасної вимірювальної техніки, а виробництво приладів для виміру різних фізичних величин складає основну частину приладобудівної промисловості.

Поняття температури виникло з відчуттів людини, якою мірою нагріті, або, навпаки, охолоджені навколишні тіла. І лише в результаті вимог науки і техніки про кількісне визначення температури було сформульовано чіткіше поняття температури. За визначенням Максвелла, температура тіла є його термічний стан, що розглядається з точки зору його здатності повідомляти тепло іншим тілам. З іншого боку температуру можна визначити як міра нагретості тіла або об'єкту. Перші прилади для виміру температури, що з'явилися в XVI ст, дозволили виділити температуру як особливу фізичну величину, значення якої визначалося по температурній залежності якої-небудь властивості тіла, тобто за шкалою цієї властивості.

Підвищення ефективності промислових об'єктів йде по шляху вдосконалення, як самих технологічних процесів, так і процесів управління ними. Важливим чинником, що утрудняє побудову систем управління, є те, що тех-

нологи, обізнані, що слід вимірювати в об'єкті, як правило, погано обізнані про можливості сучасної вимірювальної техніки. Температура є одним з найважливіших параметрів, як лабораторних експериментів, так і технологічних процесів багатьох галузей промисловості. По оцінках вітчизняних і зарубіжних фахівців технічні виміри температури складають 40-50% загального числа всяких вимірів. Тому якість температурного контролю часто обуславлює успіх процесу виробництва. Для того, щоб зробити короткий огляд способів виміру температури, слід чітко розмежувати наукові і виробничі методи і практичні прийоми. Для виміру можуть бути використані будь-які властивості твердих, рідких і газоподібних речовин, що змінюються залежно від температури фізичне або хімічне полягання, лінійні розміри, електричні властивості, швидкість звуку в газах, власна частота кварцевих резонаторів і так далі. Багато з параметрів об'єктів можна вимірювати лише із застосуванням складної дорогої апаратури або жорсткої стабілізації параметрів довкілля, що у край не вигідно в технічній або науковій діяльності.

Метою дипломного проекту було створення пристрою для автоматичного вимірювання компонентів – електронний термометр. Даний термометр може використовуватись в різних температурних режимах в діапазоні від  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ .

## **РОЗДІЛ 1**

### **ОСНОВНІ СПОСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ**

#### **1.1 Структура датчиків температури**

Серед широкої різноманітності вимірювальних параметрів одним з основних є температура. Її вимір необхідний у всіх складних технологічних процесах. Велика різноманітність датчиків температури, що працюють на різних фізичних принципах і виготовлених з різних матеріалів, дозволяє вимірювати її навіть в самих важкодоступних місцях – там, де інші параметри виміряти неможливо.

Датчики (у літературі часто звані також вимірювальними перетворювачами), або по-іншому, сенсори є елементами багатьох систем автоматики - з їх допомогою отримують інформацію про параметри контрольованої системи або пристрою.

Датчик – це елемент вимірювального, сигнального, регулюючого або такого, що управляє пристроєм, що перетворює контрольовану величину (температуру, тиск, частоту, силу світла, електричну напругу, струм і так далі) в сигнал, зручний для виміру, передачі, зберігання, обробки, реєстрації, а інколи і для дії ним на керовані процеси. Або простіше, датчик – це пристрій, що перетворює вхідну дію будь-якої фізичної величини в сигнал, зручний для подальшого використання[1].

В основі роботи будь-яких температурних датчиків, що використовуються в системах автоматичного керування, лежить принцип перетворення

вимірюваної температури в електричну величину. Це обумовлено наступними позитивними характеристиками електричних вимірів: електричні величини зручно передавати на відстань, причому передача здійснюється з високою швидкістю; електричні величини універсальні в тому розумінні, що будь-які

інші величини можуть бути перетворені в електричні й навпаки; вони точно перетворюються в цифровий код і дозволяють досягти високої точності, чутливості й швидкодії засобів вимірів.

Типовий контактний датчик температури складається з наступних компонентів (рис. 1.1а):

1. Чутливого елемента: матеріалу, що реагує на зміну його власної температури. Хороший елемент володіє низькою питомою теплоємністю, малою масою, великою теплопровідністю, високою і прогнозованою чутливістю.

2. Контактів: проводять пластинок або проводів, що пов'язують чутливий елемент з зовнішньою електронною схемою. Контакти повинні мати мінімально можливими теплопровідністю і електричним опором. Також вони часто виконують роль опорної конструкції.

3. Захисного корпусу: спеціальної оболонки або покриття, фізично розділяє чутливий елемент від навколишнього середовища. Хороший корпус має низький тепловий опір (високу теплопровідність) і гарні діелектричні властивості. Він повинен бути вологонепроникним, щоб вода і інші фактори навколишнього середовища не могли позначитися на роботі чутливого елемента.

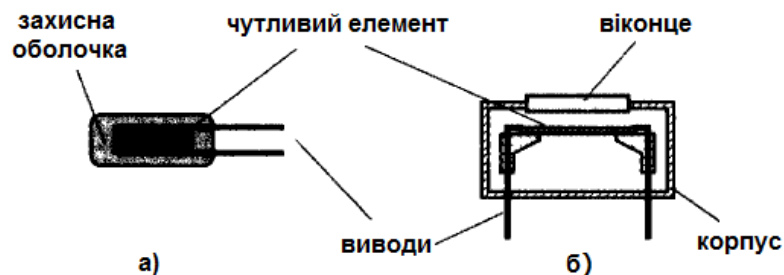


Рис.1.1 - Основні структури датчиків температури: а) - контактний датчик, б) - без-  
контактний датчик (детектор теплового випромінювання)

На рис. 1.1б показано безконтактний датчик температури, що представляє собою оптичний детектор теплового випромінювання. До його складу також входить чутливий елемент, що реагує на зміна власної температури. Основна відмінність контактних і безконтактних датчиків полягає в способі передачі тепла від об'єкта до елементу: у контактних датчиках задіяний механізм теплопровідності через фізичний контакт, в безконтактних тепло передається через випромінювання або оптичним методом.

Для поліпшення швидкодії датчиків теплових випромінювань товщину чутливого елемента роблять мінімальною, в той час як для підвищення чутливості збільшують його площа поверхні. На додаток до чутливого елементу до складу безконтактного теплового датчика може входити оптичне віконце і вбудована інтерфейсна схема. Внутрішня частина корпусу датчика зазвичай заповнюється сухим повітрям або азотом.

Всі датчики температури можна розділити на два класи: абсолютні і відносні детектори. Абсолютні датчики вимірюють температуру щодо не будь абсолютного нуля, або будь-який інший точки на температурній шкалою, наприклад, відносно  $0^{\circ}\text{C}$  ( $273.15^{\circ}\text{K}$ ),  $25^{\circ}\text{C}$  і т.д. Прикладами абсолютних датчиків є термістори і резистивні детектори температури (РДТ). Відносні датчики вимірюють різницю температур двох об'єктів, один з яких називається еталонним. Типовим представником відносних датчиків є термопара.

## 1.2 Загальні характеристики

Будь-датчик, в тому числі і датчик температури, може бути описаний рядом характеристик, сукупність яких дозволяє порівнювати датчики між собою і цілеспрямовано вибирати датчики, найбільш відповідні конкретних завдань.

1. Функція перетворення (градууювальних характеристика) являє собою функціональну залежність її вихідної величини від вимірюваної величини:

$$y = f(x) \quad (1.1)$$

Залежність представляється в іменованих величинах:  $y$  - в одиницях вихідного сигналу або параметрах датчика,  $x$  - в одиницях вимірюваної величини.

Для датчиків температури - Ом/°C або мВ/К.

2. Чутливість - відношення приросту вихідної величини датчика до збільшення його вхідної величини:

$$S = dy/dx \quad (1.2)$$

Для лінійної частини функції перетворення чутливість датчика постійна. Чутливість датчика характеризує ступінь досконалості процесу перетворення в ньому вимірюваної величини.

3. Поріг чутливості - мінімальна зміна значення вхідної величини, яку можна впевнено виявити. Поріг чутливості пов'язаний як з природою самої вимірюваної величини, так і з досконалістю процесу перетворення вимірюваної величини в датчику.

4. Межа перетворення - максимальне значення вимірюваної величини, яке може бути виміряно без незворотних змін в датчику в результаті робочих впливів. Верхня межа вимірювань датчика зазвичай менше межі перетворення принаймні на 10%.

5. Метрологічні характеристики - визначаються конструктивно-технологічними особливостями датчика, стабільністю властивостей застосовуваних у ньому матеріалів, особливостями процесів взаємодії датчика з вимірюваним об'єктом.

Метрологічні характеристики, у свою чергу, визначають характер і величини похибок вимірювання датчиків. Частина похибок можуть бути випадковими і вони враховуються методами математичної статистики. Систематичні похибки можуть бути аналітично описані і виключені з результатів вимірювання.

Основними видами систематичних похибок є:

- похибки, обумовлені нелінійністю функції перетворення, що характерно для напівпровідникових датчиків температури ;
- похибки , обумовлені варіацією функції перетворення внаслідок зміни

напрямку дії вхідної величини (для датчиків температури це нагрів-охладження);

- похибки, обумовлені невідповідністю динамічних можливостей датчика швидкості впливу вхідної величини. Може бути враховано введенням коефіцієнта термічної інерції;
- додаткові похибки, зумовлені відмінністю умов роботи датчика від тих, в яких визначалася його функція перетворення;
- похибки, обумовлені нестабільністю функції перетворення внаслідок процесів старіння матеріалу.

6. Надійність - розглядається в двох аспектах: механічна надійність і метрологічна надійність.

7. Експлуатаційні характеристики - до їх числа можуть бути віднесені: маса, габаритні розміри, споживана потужність, міцність електричної ізоляції, номінали використовуваних електричних напруг, а також стійкість до агресивних середовищ, всіляким випромінювань, іскробезпека і т.д.

8. Вартість і можливість серійного виробництва.

### **1.3 Терморезистивні датчики**

Хамфрі Деві ще в 1821 році помітив, що електричний опір різних металів залежить від температури. Вільям Сіменс в 1871 році розробив перший платиновий резистивний термометр. А в 1887 році Хью Каллендар опублікував статтю, в якій він описав способи практичного застосування платинових термометрів. Достоїнствами терморезистивних датчиків є висока чутливість, простота створення інтерфейсних схем і довготривала стабільність. Такі датчики можна розділити на три групи: РДТ, детектори на р-n переходах і термістори.

#### **1.3.1 Резистивні детектори температури**

Цей термін зазвичай відноситься до металевих детекторів, які бувають дротяними і тонкоплівковими. Оскільки питомий опір всіх металів і

більшості сплавів залежить від температури, на їх основі можна розробляти чутливі елементи для вимірювання температури. Хоча для виготовлення температурних детекторів підходять практично всі метали, але все-таки, в основному, для цих цілей використовується тільки платина. Це пояснюється відтворюваністю її характеристик, довгостроковою стабільністю і міцністю. Для вимірювання температур вище  $600^{\circ}\text{C}$  застосовуються вольфрамові РДТ. Всі РДТ володіють позитивними температурними

коефіцієнтами. Випускаються декілька типів РДТ:

1. Тонкоплівкові РДТ, виготовлені з тонких листкове платини або її сплавіна, нанесених на відповідну підкладку, наприклад, на кремнієву мікромембрану. РДТ часто формуються у вигляді серпантинної структури для отримання високого відношення довжини до ширини.

2. Прополювальна РДТ, в яких платиновий дріт намотаний всередині керамічної трубки і прикріплений до неї за допомогою високотемпературного клею. Така конструкція дозволяє виготовляти датчики, що володіють дуже високою стабільністю. Відповідно до Міжнародної практичної температурної шкалою (IPTS-68) прецизійні датчики температури повинні калібруватися при температурах, визначених відтворюваними рівноважними станами деяких матеріалів. У цій шкалі температури в Кельвінах позначаються символом  $T_{68}$ , а в градусах Цельсія -  $t_{68}$ . Міжнародний Комітет Мір і Ваг (МКМВ) у вересні 1989 року прийняв нову Міжнародну температурну шкалу (ITS-90) У ній температура в градусах Цельсія позначається як  $T_{90}$ .

У таблиці 1.1 наведені відмінності між цими двома шкалами, які важливі при проведенні прецизійних вимірювань.

Зазвичай РТД калібруються при стандартних температурах, які можна відтворити в лабораторних умовах з високим ступенем точності (табл. 1.1). Калібрування в таких точках дозволяє дуже точно визначити коефіцієнти апроксимації  $\alpha$  и  $\delta$ . Типові допуски для дріт'яних РДТ рівні  $\pm 10\text{ МОм}$ , що відповідає  $\pm 0.025^{\circ}\text{C}$ .



Трійна точка визначається рівноважним станом трьох фаз: твердою, рідкою і газподобною.

Для забезпечення високої точності вимірювань необхідно ретельно проектувати корпус РДТ, приділяючи особливу увагу його теплоізоляції. Це особливо важливо при проведенні вимірювань на високих температурах, коли опір ізоляції різко падає. Наприклад, резистор 10-МОм при температурі 550 ° С обкладає похибкою близько 3 МОм, що відповідає температурної помилку:  $-0.0075^{\circ}\text{C}$ .

Еталонні температурні точки. Таблиця 1.1

Опис точки	°C
Трійна точка водню	-259
Точка кипіння нормального водню	-253
Трійна точка кисню	-219
Точка кипіння азоту	- 196
Трійна точка аргону	- 189
Точка кипіння кисню	-183
Точка сублімації вуглекислого газу	-78
Точка замерзання ртуті	-39
Трійна точка води	0,01
Точка замерзання води (суміші води і льоду)	0,00
Точка кипіння води	100
Трійна точка бензолової кислоти	122
Точка плавлення індія	157
Точка плавлення олова	232
Точка плавлення вісмуту	271
Точка плавлення кадмію	321
Точка плавлення свинцю	328
Точка плавлення цинку	420
Точка плавлення сурми	631
Точка плавлення алюмінію	660
Точка плавлення срібла	962
Точка плавлення золота	1064
Точка плавлення міді	1085
Точка плавлення нікелю	1455
Точка плавлення паладію	1554
Точка плавлення платини	1769

### 1.3.2 Кремнієві резистивні датчики

Кремній широко використовується для виготовлення датчиків температури, що володіють позитивним температурним коефіцієнтом (ПТК) опору. В даний час кремнієві резистивні датчики часто вбудовуються в мікроструктури для здійснення температурної компенсації або проведення прямих вимірювань температури. Також існують дискретні кремнієві датчики, наприклад, детектори температури КТУ фірми Philips. Такі датчики мають досить хорошою лінійністю (яка може бути поліпшена за допомогою простих термокомпенсаційних ланцюгів) і високої довгострокової стабільністю (зазвичай  $\pm 0.05\text{K}$  на рік). ПТК кремнієвих резисторів дозволяє їх використовувати в системах, що забезпечують безпеку нагрівальних пристроїв: середнє перевищення температури (до  $200^\circ\text{C}$ ) призводить до збільшення їх опору, за рахунок чого здійснюється функція самозахисту.

Чистий кремній, як монокристалічний, так і полікремній, сам по собі має негативним температурний коефіцієнт (НТК) опору. Однак після легування домішками n-типу, в певному температурному діапазоні його температурний коефіцієнт стає позитивним (рис. 1.2).

Цей ефект пояснюється зниженням рухливості носіїв зарядів при зниженні температури. При високих температурах кількість вільних носіїв зарядів збільшується за рахунок спонтанно утворених носіїв, тому в цьому температурному діапазоні переважають власні напівпровідникові властивості кремнію.

Таким чином, при температурах нижче  $200^\circ\text{C}$ , питомий опір кремнію має ПТК, а при температурах вище  $200^\circ\text{C}$  він стає негативним КТУ датчик складається з кристала кремнію n-типу розміром  $500\times 500\times 240$  мкм. металізованого з одного боку і з контактною площадкою з іншого боку.

При такій конструкції датчика створиться ефект «розтягування» опору, в результаті якого всередині кристала встановлюється конічне розподіл струму, значно знижує залежність характеристик від виробничих допусків.

При великих токах і високих температурах КТҮ датчик стає чутливим до напрямку струму. Для вирішення цієї проблеми застосовується здвоєний датчик, в якому два чутливих елемента включаються послідовно назустріч один одному. Такі датчики часто використовуються в автомобілях.

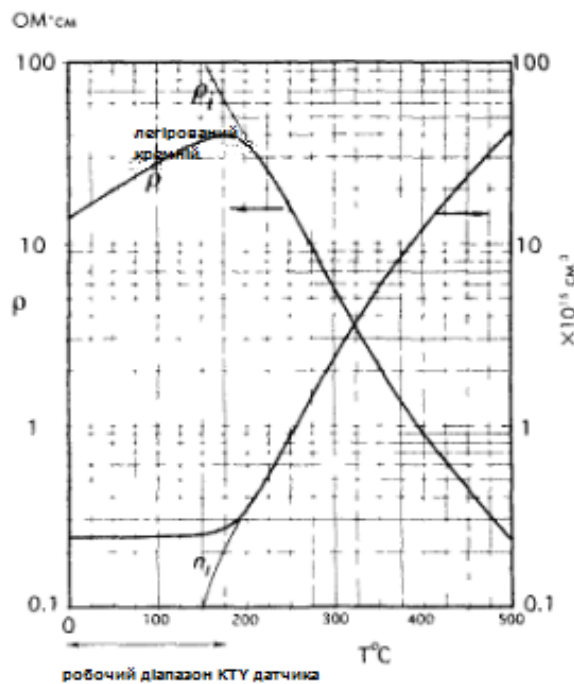


Рис. 1.2 - Питомий опір і кількість вільних носіїв зарядів в кремнії, легованому домішками n-типу

Типова чутливість кремнієвого датчика з ПТК становить порядку  $0,7\% / ^\circ \text{C}$ . т з його опір змінюється на  $0,7\%$  при зміні температури на  $1^\circ \text{C}$  Передавальну функцію КТҮ датчика можна апроксимувати поліномом другого порядку:

$$R_T = R_0 [1 + A(T - T_0) + B(T - T_0)^2], \quad (1.3)$$

де  $R_0$  и  $T_0$  - опір в Ом і температура в К, виміряні в точці. Наприклад, робочий діапазон датчиків КТҮ-81 становить -  $55 + 150^\circ \text{C}$ ,  $A = 0,007874 \text{ K}^{-1}$ ,  $B = 1,874 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2}$ . На рис.1.3 показана типова передатна функція кремнієвої резистивного датчика.

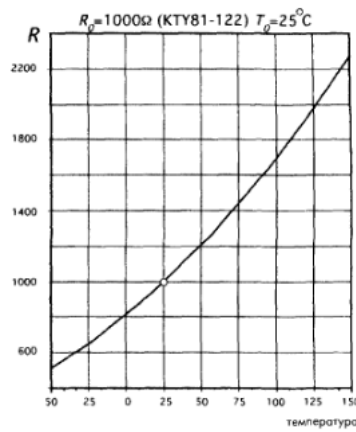


Рис. 1.3 - Передавальна функція кремнієвого датчика температури

### 1.3.3 Термістори

Термін термістор утворився в результаті з'єднання двох слів: теплової та резистор. Ця назва дано метал-оксидним детекторам, які мають форму крапель, стрижнів, циліндрів, прямокутних пластин і товстих плівок. Термістори відносяться до класу датчиків абсолютної температури, свідчення яких відповідає абсолютній температурній шкалою. Всі термістори діляться на дві категорії: з негативним температурним коефіцієнтом (НТК) і позитивним температурним коефіцієнтом (ПТК) опору. Для проведення прецизійних вимірювань використовуються термістори тільки з НТК[2].

Термістори з негативним температурним коефіцієнтом опору

Звичайні металоксидні термістори мають НТК. Це означає, що при збільшенні температури їх опір падає. Опір термісторів з НТК, також як і будь-яких інших резисторів, визначається їх фізичними розмірами і питомою опором матеріалу. Залежність між величиною опору і температурою є сильно нелінійною.

При проведенні прецизійних вимірі або при роботі в широкому температурному діапазоні не можна безпосередньо використовувати характеристики термісторів, наведені в документації на них, оскільки типові допуски на номінальні значення серійно випускаються виробів при температурі 25 ° С становлять близько  $\pm 20\%$ . Тому для досягнення високої точності вимірювань термістори необхідно індивідуально калібрувати в широкому температурному діапазоні. Правда, існують і прецизійні термістори, характеристики яких в

заводських умовах підганяються методом шліфування до необхідних розмірів.

Цей процес проводиться під безперервним контролем за номінальними значеннями опорів при заданій температурі. Однак така процедура налаштування термісторів призводить до значного підвищення їхньої вартості. Тому на практиці частіше застосовується метод індивідуального калібрування термісторів. В процесі калібрування вимірюється опір термістора при приміщенні його в середину точно відомою температурою (для цих цілей часто застосовується камера з мішалкою, в яку може бути залита вода, але частіше мінеральне масло або спеціальний склад, наприклад, Flourent ®).

Якщо потрібно багатоточкове калібрування, ця процедура виконується при різних температурах. Природно, що якість проведеної калібрування сильно залежить від точності еталонного термометра. Для визначення опору термістор включається в вимірювальну ланцюг, по зміні струму в якій і судять про величину опору. Залежно від заданого рівня точності і вартості калібрування термістора може проводитися на основі однієї з відомих апроксимаційні моделей.

При використанні термістора в якості датчика абсолютної температури передбачається, що при проходженні через нього електричного струму, його власна температура не зміниться, що означає, що він не внесе в систему значних теплових збурень, здатних вплинути на точність вимірювань. У цьому випадку говорять, що термістор має "нульовий потужністю". Збільшення температури термістора в сталому режимі внаслідок явища саморозігріву описується рівнянням:

$$\Delta T_H = r \frac{N^2 V^2}{S}, \quad (1.4)$$

де  $r$  - тепловий опір між термісторів і навколишнім середовищем,  $V$  прикладена постійна напруга,  $S$  - опір термістора при вимірюваній температурі, а  $N$  - робочий цикл вимірювань (наприклад,  $N = 0,1$  означає, що постійна напруга подається на термістор тільки на час, що дорівнює 10% від повного часу вимірів). При проведенні вимірювань по постійному току  $N = 1$ .

З рівняння (1.4) видно, що для виконання умов «нульової потужності» необхідно, щоб:

- Термістор володів високим питомим опором,
- Термістор і об'єкт вимірювання мали гарну теплову зв'язок один з одним, що повинно знизити значення  $\tau$ ,
- Вимірювання проводилися при невеликому постійній напрузі, що подається протягом короткого інтервалу часу.

При використанні термісторів в будь-яких вимірювальних системах необхідно знати їх передавальні функції, які є аналітичними виразами, що зв'язують величину опору і температуру. Для опису передавальної функції термісторів були запропоновані декілька математичних моделей. Слід помітитися, що всі математичні моделі є тільки апроксимаціями, і, як правило, чим простіше модель, тим нижче її точність. З іншого боку, при використанні більш складних моделей значно ускладнюється калібрування термісторів. Всі існуючі моделі термісторів побудовані на експериментально доведений факт, що логарифм опору термістора пов'язаний з його абсолютною температурою наступної поліноміальної залежністю:

$$\ln S = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3}. \quad (1.5)$$

Термістори з позитивним температурним коефіцієнтом

Всі метали відносяться до матеріалів з позитивним температурним коефіцієнтом (ПТК). РДТ, описані раніше, також мають невеликий ПТК. На відміну від них багато керамічні матеріали в певному температурному діапазоні володіють досить значними ПТК. Термістори з ПТК зазвичай виготовляються на базі полікристалічних керамічних матеріалів, основні компоненти яких (титанат барію або тверді розчини титанату барію та стронцію), що володіють високим питомим опором, легується додатковими домішками для надання їм властивостей напівпровідників.

При температурах, що перевищують точку Кюрі композиційних матеріалів, їх фероелектричні властивості змінюються дуже швидко, що призводить до значного збільшення опору, іноді на кілька порядків. На рис. 1.4

показані передавальні характеристики для всіх типів температурних детекторів: з НТК, ПТК і РДТ.

Як видно з рисунка, для термісторів з ПТК дуже складно підібрати математичну апроксимацію, тому для них в документації зазвичай наводяться такі характеристики:

1. Опір при нульовій прикладеній потужності,  $R_{25}$ . При цьому значенні вплив ефекту саморозігріву незначно.

2. Мінімальний опір  $R_m$ , при якому термістор змінює знак свого температурного коефіцієнта (точка  $m$ ).

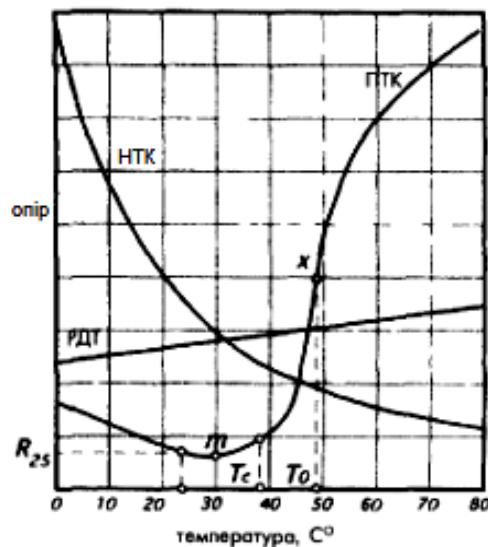


Рис. 1.4. -Передавальні функції для термісторів НТК, ПТК і РДТ

3. Температура переходу  $T_1$ , починаючи з якої починається швидке зміна опору. Вона приблизно збігається з точкою Кюрі матеріалу. Значення температури переходу зазвичай лежать в інтервалі  $-30 \dots +160 \text{ } ^\circ \text{C}$  (Keystone Carbon Co.).

4. ТКО, який визначається як:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (1.6)$$

Цей коефіцієнт сильно залежить від температури і часто визначається в точці  $x$  (тобто там, де він володіє максимальним значенням).

Він може досягати значень  $2 / ^\circ \text{C}$ , що означає 200% зміна опору на  $^\circ \text{C}$ .

5. Максимальна напруга  $E_m$  відповідне гранично допустимого значення, що витримується термісторів.



6. Теплові характеристики: теплоємність, коефіцієнт розсіювання  $\delta$  (визначений для заданих умов зв'язку детектора з навколишнім середовищем) і теплова постійна часу (характеризує швидкість термістора при певних умовах).

Слід зазначити, що для термісторів з ПТК важливими чинниками є: температура навколишнього середовища і ефект саморозігріву. Будь-який з них впливає на положення робочої точки)термістора.

На рис. 1.5 показані вольтамперні характеристики термістора з ПТК при різних температурах навколишнього середовища, за якими можна оцінити його температурну чутливість. Відповідно до закону Ома звичайний резистор з близьким до нуля ТКО володіє лінійною вольтамперною характеристикою.

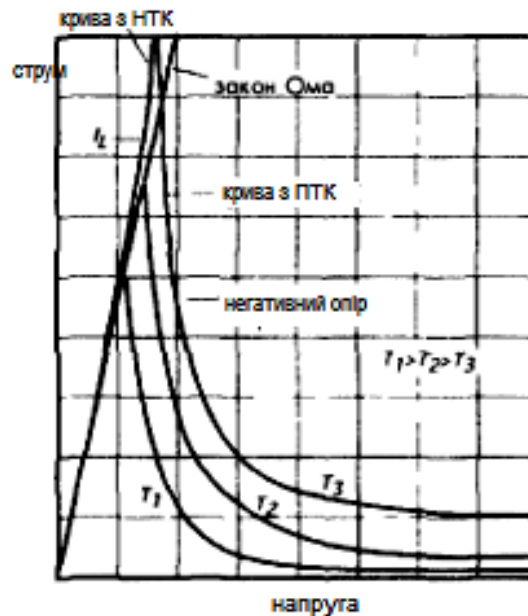


Рис. 1.5 - Вольтамперна характеристика детектора з ПТК

При НТК коефіцієнт кривизни позитивний, а при ПТК - негативний.

При підключенні термісторів з НТК до ідеального джерела напруги (володіє практично нульовим вихідним опором і здатністю виробляти будь-який струм без зміни величини напруги) явище саморозігріву, що виникає через розсіяння тепла, призводить до зменшення опору, що, в свою чергу, викликає збільшення струму і більшого нагрівання детектора. Якщо термістор з НТК має поганий тепловідвід, може статися його перегрів і навіть руй-

нування.

На відміну від термісторів з НТК, детектори з ПТК при підключенні до ідеальних джерел напруги ведуть себе як саморегульовані пристрою. Наприклад, нитка розжарювання розпеченій лампи не перегорає через те, чого збільшення се температури веде до зростання опору, що обмежує струм. Ефект саморегулювання значний в термісторах з ПТК. З рис. 1.5 видно, що у відносно вузькому температурному діапазоні, термістор з ПТК має негативним опором, тобто

$$R_x = -\frac{V_x}{i}. \quad (1.7)$$

У цій зоні пристрої мають внутрішньої негативним зворотним зв'язком, тобто працюють саморегульованими термостатами. При цьому будь-яке зростання напруги на термістори призводить до виділення тепла, яке, в свою чергу, викликає збільшення опору та зменшення теплових втрат, в результаті чого виникає динамічна рівновага, що дозволяє утримувати температуру пристрою на постійному рівні  $T_0$  (рис. 1.5). Ця температура відповідає точці  $x$ , в якій дотична до кривої має максимальний нахил.

Слід зазначити, що термістори з ПТК мають максимальною ефективністю при великих значеннях  $T_0$  (близько  $100^\circ \text{C}$ ), а при менших температурах їх ефективність (нахил характеристики  $R(T)$  в точці  $x$ ) різко падає.

По своїй фізичній природі термістори з ПТК краще використовувати при температурах, які значно перевищують температуру навколишнього середовища.

Наведемо чотири приклади застосування термісторів з ПТК:

1. У пристроях захисту електронних схем термістори з ПТК можуть грати роль неруйнуючих запобіжників, що реагують на струми, значення яких перевищують допустимі рівні. На рис. 1.6а показаний термістор з ПТК, включений послідовно з джерелом напруги  $E$ , подають його на навантаження струм  $i$ . При кімнатній температурі термістор має дуже низьким опором (близько  $10 \dots 140 \text{ Ом}$ ). При струмі  $i$  падіння напруги на навантаженні становить  $V_L$ , а на термістори -  $V_x$ . Вважаємо, що  $V_L \gg V_x$ . Потужність, що

розсіюється на термістори:  $P = V_x i$ , віддається у навколишнє середовище. При цьому температура термістора зростає, але дуже на невелику величину. Проте при значному збільшенні навколишньої температури або сильній зміні струму навантаження відбувається різке зростання температури термістора до величини  $T_t$ , після досягнення якої його опір починає зростати, що запобігає подальше збільшення струму. При короткому замиканні в навантаженні  $V_x = E$ , а струм  $i$  падає до мінімального значення. Це значення буде зберігатися до тих пір, поки опір навантаження не прийде в норму, після чого, термістор відновить свої вихідні характеристики. Однак при цьому необхідно виконання умови  $E < 0,9 E_{max}$ , інакше може відбутися руйнування термістора.

2. У мініатюрних термостатах з саморозігріву (рис. 1.6б), використовуваних в мікроелектроніці, біомедицині, хімічних дослідженнях і т.д, також використовуються термістори з ПТК з відповідно підбраною температурою переходу. Термостат складається з кювети, теплоізольованої від навколишнього середовища і пов'язаної з термісторів. Для усунення сухого контакту між термісторів і кюветою роблять шар зі спеціальної мастила. Висновки термістора підключаються до джерела напруги, напруга якого можна оцінити за допомогою виразу:

$$E \geq 2\sqrt{\delta(T_t - T_a)R_{25}}, \quad (1.8)$$

де  $\delta$  - коефіцієнт розсіювання, що залежить від теплоізоляції термістора від навколишнього середовища, а  $T_a$ -температура навколишнього середовища. Робоча точка термостата визначається фізичними властивостями керамічного матеріалу (точкою Кюрі). Завдяки внутрішній теплової зворотного зв'язку, пристрій може працювати в порівняно широкому діапазоні напруг і оточуючих температур. Природно, що навколишня температура повинна бути завжди менше  $T_t$ .

3. Термістори з ПТК через велику тривалості перехідних процесів, визначених часом між подачею напруги і переходом пристрою в робочий стан, часто вимагає підключення схем затримки.

4. Витратоміри і детектори рівня рідких середовищ, що працюють на принципі детектування теплового розсіювання, також часто реалізуються на основі термісторів з ПТК.

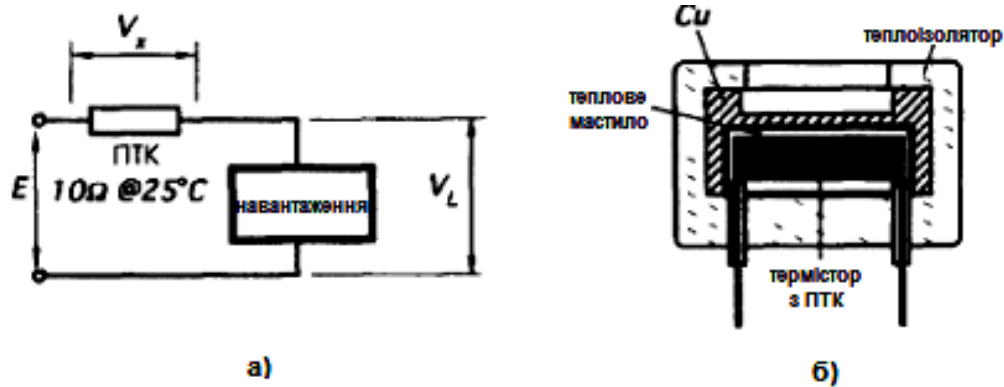


Рис. 1.6 - Використання термісторів з ПТК:

а - в схемах обмеження струму, б - в мікротермостатах

#### 1.4 Термоелектричні контактні датчики

Оскільки термоелектричні контактні датчики складаються, принаймні, з двох різних провідників і двох сполук (пар) цих провідників, їх часто називають термопарами[3]. Вони є пасивними датчиками, тому що самі виробляють напругу у відповідь на зміну температури і не вимагають для цього зовнішнього джерела живлення. Термопари відносяться до класу відносних датчиків, оскільки їх вихідна напруга визначається різницею температур між двома спаями і практично не залежить від абсолютної температури кожного з'єднання.

Принцип дії термоелектричних термометрів заснований на використанні термоелектричного ефекту, який полягає в тому, що в замкнутому ланцюзі, що складається з двох або декількох різнорідних провідників, виникає електричний струм, якщо хоч би два місця з'єднання цих провідників мають різну температуру. На рисунку 1.7 представлено двох різних провідників А і В з однорідного матеріалу, кінці яких сполучені і мають різну температуру:  $t$  і  $t_0$ .

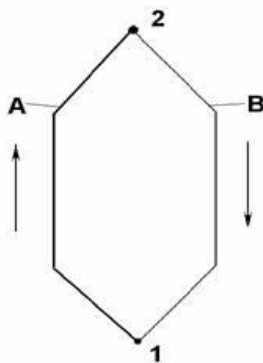


Рис. 1.7 – Схема термопари

Термоелектричний ефект пояснюється наявністю в металах вільних електронів, число яких в одиниці об'єму різне для різних металів. На кінці з температурою  $t$  електрони з металу А дифундують в метал В в більшій кількості, ніж у зворотному напрямі, тому метал А заряджає позитивно, а метал В – негативно.

У місці зіткнення провідників виникає електричне поле, що перешкоджає дифузії. Коли швидкість дифузії електронів стає рівній швидкості їх зворотного переходу під впливом сталого електричного поля, настає стан рухливої рівноваги.

При такому стані між провідниками А і В виникає деяка різниця потенціалів, тобто ТЕРМО-ЕРС, залежна також і від температури місць з'єднання провідників 1 і 2.

Для практичного використання термопар необхідно знати три основних закони, що встановлюють правила їх підключення. Слід підкреслити, що інтерфейсні електронні схеми завжди повинні приєднуватися до двох ідентичним провідникам. Ці провідники, як правило, формують одне з плечей термопарного контуру, використовуваного для підключення вимірювального пристрою. На рис.1.8 показані основні правила підключення.

На основі цих трьох законів може бути побудовано безліч практичних схем, які застосовуються для виміру, наприклад, середньої температури об'єкта, різниці температур між двома об'єктами, а також для включення в вимірювальну ланцюг детекторів температури інших типів для визначення

температури еталонних спаїв.

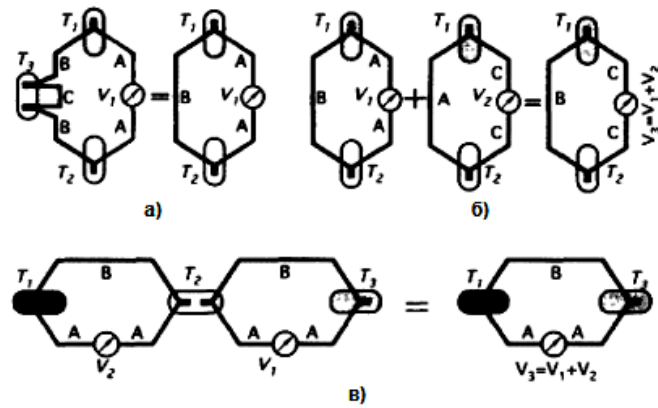


Рис. 1.8 - Правила з'єднання термопар

Останнім часом були створені термоелектричні термометри з термоелектродами з тугоплавких з'єднань або їх комбінацій з графітом і іншими матеріалами, призначені для виміру високих температур. Проте вони ще не набули поширення для контролю температур технологічних процесів в галузі.

## **РОЗДІЛ 2**

### **ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЇХ ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

#### **2.1 Напівпровідникові датчики температури**

Вплив температури на електрофізичні параметри напівпровідників в основному виявляються в зміні концентрації носіїв заряду, що приводить до відповідної зміни електричній провідності[5]. На цьому принципі працюють напівпровідникові терморезистори. Як напівпровідникові датчики температури також використовуються діоди і транзистори, де зміна концентрації носіїв заряду приводить до зміни струму, що протікає через напівпровідниковий прилад.

##### **2.1.1. Датчики температури на основі діодів и транзисторів**

У датчиках температури на основі діодів і транзисторів використовують залежність параметрів р-n переходу в напівпровіднику від температури. Історично першим температуро залежним параметром був зворотний струм діодів і транзисторів. Значення струму зростає з температурою по експоненціальному закону із швидкістю порядку  $10\% \cdot K^{-1}$ . Проте, діапазон температур, в межах яких можливе використання зворотних струмів, вельми

обмежених. Верхня температурна межа вживання визначається температурою їх теплового пробую.

Найбільшого поширення набуло використання прямих параметрів діодів і транзисторів. Їх істотними перевагами перед зворотними є лінійність температурної залежності, широкий діапазон робочих температур, висока стабільність. Найчастіше для виміру температури використовується пряма напруга на р-п переході при майже постійному струмі емітера. Зміна прямої напруги складає порядку  $2,5 \text{ мВ} \cdot \text{К}^{-1}$ . При підвищенні температури

транзисторів р-п-р типу напруга емітер-база з області позитивних значень переходить в область негативних. Так наприклад, датчик Ts-560, розроблений ФТІ ім. А.Ф.Іоффе РАН (м. Санкт-Петербург) є напівпровідниковим діодом на основі арсеніду галію. Діапазон виміру такого датчика (4,2...500) К, основна похибка  $\pm 0,1\%$ , чутливість (2...3) мВ/К, розміри  $3 \times 3 \text{ мм}$ .

Відомі випадки використання як температуро залежного параметра коефіцієнта посилення по струму на низьких і високих частотах. Проте невисока чутливість коефіцієнта посилення до температури і його залежність від передісторії, а також необхідність індивідуального градуювання у всьому діапазоні робочих температур обмежують вживання цього параметра при створенні термодатчиків.

На основі транзисторів, емітерний перехід яких включений в одне з плечей моста, створені термодатчики типа ТЕТ-1, ТЕТ-2. Перший тип використовується для виміру температури в польових умовах в діапазоні  $(-10...+40)^\circ\text{C}$  з основною похибкою не більше  $\pm 1 \text{ К}$ , другий – в діапазоні  $(-40...+80)^\circ\text{C}$  з похибкою не більше (0,3...2) К.

Температурні межі застосовності транзисторів в термодатчиках значно ширші, ніж при використанні транзисторів по прямому призначенню. Обмеження застосовності з боку високих температур настає унаслідок переходу



домішкового напівпровідника у власний, зменшення пробивної напруги і підвищення генерації носіїв в базовій області при негативній напрузі. Застосовність при низьких температурах визначається зменшенням концентрації основних носіїв із-за дезактивації легуючих домішок і зменшення коефіцієнта посилення по струму.

Важливою характеристикою для широкого впровадження термодатчиків на основі транзисторів і діодів є стабільність їх параметрів. Результати дослідження довготривалої стабільності термодатчиків на основі транзисторів з температуро залежним параметром – прямою напругою на р-п переході залежно від температури і тривалості експлуатації, приведені в показують, що погрішність виміру ними може складати (0,01...0,15) К в перший рік експлуатації (0,002...0,04) К - в другий рік. Основними причинами нестабільності слід вважати оборотний процес гідратації-дегідратації оксидного шару на поверхні напівпровідникового кристала і виникнення залишкових деформацій в ній унаслідок неоднаковості температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів деталей транзисторів.

### **2.1.2. Датчики температури на основі терморезисторів**

Найбільш широкого поширення набули датчики на основі терморезисторів. Принцип терморезистивного перетворення заснований на температурній залежності активного опору металів, сплавів і напівпровідників, що володіють високою відтворюваністю і достатньою стабільністю по відношенню до дестабілізуючих чинників.

Температурну чутливість термометричного матеріалу прийнято характеризувати температурним коефіцієнтом опору (ТКО). Типові випадки поведінки термометричної залежності представлені на рисунках 2.1 і 2.2 .

Як видно з рисунка, напівпровідникові терморезистивні перетворювачі відрізняються чималою чутливістю (на порядок і більше) ніж металеві.

Досить давно розроблені і випускаються вітчизняною промисловістю напівпровідникові датчики температури з чутливими елементами, створеними на основі оксидів перехідних металів з неповністю заповненою 3d елек-

тронною оболонкою. Особливістю таких датчиків (зазвичай званих терморезисторами) є велике значення температурного коефіцієнта опору і порівняно малі розміри. Залежно від вживаного напівпровідникового матеріалу терморезистори розділяють на кобальто-марганцевих (КМТ і СТ1), мідно-марганцевих (ММТ і СТ2), мідно-кобальтових (СТ3 і СТ4) і титано-барієвих, таких, що мають малий допуск по опору і ТКО (позистори СТ5 і СТ6).

Змінюючи склад матеріалу чутливого елементу, можна отримати терморезистори як з позитивним, так і з негативним значенням ТКС в межах від  $-6,5$  до  $+20$  %/К. Номінальні опори чутливих елементів залежать від їх складу і розмірів і можуть знаходитися в межах від 1 до  $10^6$  Ом. Високий номінальний опір терморезисторів спрощує вимоги до системи терморегулювання, що дозволяє обмежитися двопровідною лінією зв'язку датчика з системою регулювання і зменшує погрішність перетворення, обумовлену завдовжки лінією зв'язку.

Залежність опору від температури описується відношенням (2.1):

$$R_T = A \exp(B/T), \quad (2.1)$$

де  $R_T$  – опір терморезистора при температурі  $T$ ;  $A$ ,  $B$  – постійні коефіцієнти, залежні від матеріалу терморезистора і номінального значення його опору.

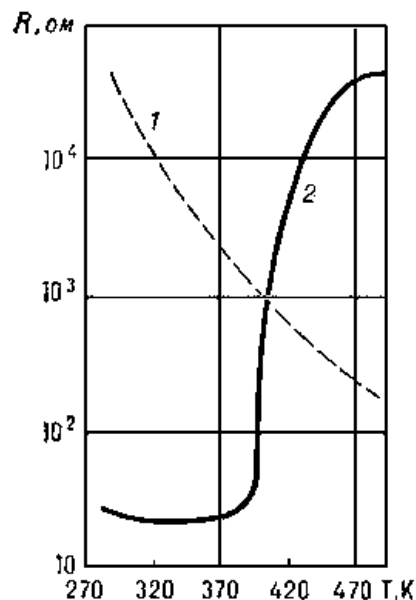


Рис. 2.1 - Залежність електричного опору від температури

Залежності електричного опору терморезисторів від температури: негативним (1) і позитивним (2) температурними коефіцієнтами опору.

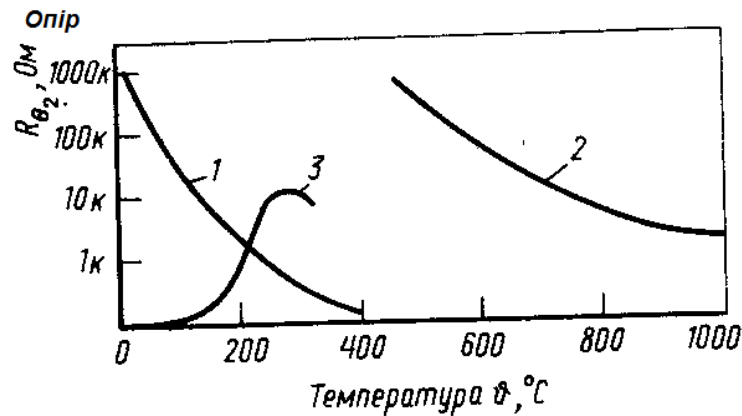


Рис. 2.2 - Температурна характеристика напівпровідникових термометрів опору

- 1 – звичайний терморезистор; 2 – високотемпературний терморезистор;  
3 – терморезистор з позитивним температурним коефіцієнтом.

Це співвідношення забезпечує високу точність апроксимації лише у вузькому діапазоні температур. Так наприклад, для терморезисторів типа СТ4-16 погрішність апроксимації не більше  $\pm 0,05$  К досягається тільки в діапазоні (15...55) °С. Кращі результати дають рівняння типу (2.2) і (2.3):

$$R_t = A_1 \exp\left(\frac{B_1}{T} + \frac{C_1}{T^2}\right) \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{T} = A_2 + B_2 \lg R_t + C_2 (\lg R_t)^3 \quad (2.3)$$

де  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$  – сталі.

Рівняння (2.2) забезпечує точність апроксимації  $\pm(0,2...0,4)$  К в інтервалі (-60...+100) °С, а рівняння (2.3) – точність  $\pm 0,1$  К в інтервалі (-20...+120) °С.

Чутливі елементи виготовляють самих різних конфігурацій – від намістинок діаметром 0,2 мм, дисків і шайб діаметром (3...25) мм до стрижнів діаметром 12 і завдовжки до 40 мм. Чутливі елементи намістинок зазвичай заливають склом або поміщають в скляні і пластмасові корпуси. Діскові чутливі елементи часто захищають ізоляційними плівками з лаку або епок-

сидних смол, вмонтовують на металевих пластинах і герметизують в металевий і пластиковий корпус.

Проте, термодатчики такого типа володіють рядом недоліків.

Температурна залежність опору носить нелінійний характер, оскільки величина ТКО в робочому діапазоні температур змінює свою величину, інколи навіть на декілька порядків. Технологія виготовлення чутливих елементів не дозволяє набувати номінальних значень опорів навіть для одного типу з розкидом менше (10...20)%. Крім того, значення температурного коефіцієнта опору терморезисторів одній конфігурації можуть відрізнятися майже в два рази, унаслідок чого відсутня їх взаємозамінність. Але основним недоліком термометрів цього типу є те, що вони, не дивлячись на проведення в процесі виготовлення штучного старіння, володіють низькою тимчасовою стабільністю і відтворюваністю.

Значно більшою стабільністю електрофізичних властивостей у порівнянні з аморфними речовинами володіють монокристали. Для створення монокристалічних чутливих елементів термометрів широке вживання отримали кремній і германій. У чистому вигляді германій і кремній використовуються вищим 20 К.

В області нижчих температур найчастіше використовується легований германій, як добре вивчений напівпровідниковий матеріал, технологія здобуття кристалів якого добре відпрацьована. При легуванні германію елементами III і IV груп, такими як галій і сурма, дрібними домішками, що є, з енергією активації порядку 0,01 еВ, можна виготовляти високочутливі термометри для роботи в діапазоні від 1 до 40 К з погрешністю 0,005 К. Конструкція такого термодатчика розробки Всеросійського Науково-Дослідницького Інституту Фізико-Технічних і Радіотехнічних Вимірювань при ведена на рисунку 2.3.

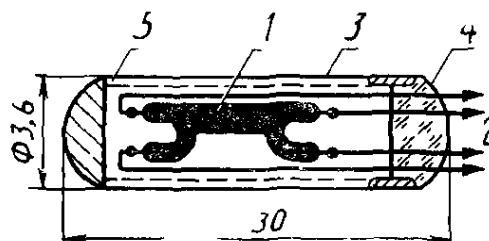


Рис. 2.3 – Конструкція германієвого термоперетворювача опору

Чутливий елемент 1 термоперетворювача виконаний з монокристалъного легованого сурмою германію. До різних кінців елемента припаяно чотири золотих провідники, якими приварені виводи 2 з платинової проволочки. Чутливий елемент поміщений в мельхіорову гільзу 3, що закінчується скляною голівкою 4 з платиновим поясочком і припаяними через неї платиновими виводами, звареними усередині гільзи із золотими виводами від чутливого елемента. Зсередини гільза датчика покрита фторопластовою захисною плівкою 5. Гільза термометра заповнена газоподібним гелієм. Такі термометри мають нелінійну температурну залежність опору. Їх статистична характеристика близька до експоненціальної і апроксимується поліномами вигляду (2.4):

$$\ln R = \sum a_i (\ln T)^i \quad (2.4)$$

де  $a_i$  – коефіцієнти.

До цієї ж групи умовно можуть бути віднесені вугільні термодатчики, які по характеру провідності займає проміжне положення між металами і напівпровідниками, але володіють високими негативним ТКО і знайшли широке вживання в криогенній техніці. Як чутливий елемент вуглецевих термодатчиків часто використовуються вуглецеві радіотехнічні опори. Для широкого інтервалу температур статичні характеристики перетворення вуглецевих термодатчиків пропонується представляти співвідношенням типу (2.5):

$$\ln R = A/T^m + B \quad (2.5)$$

де  $A$ ,  $B$  и  $m$  – сталі.

Це рівняння дозволяє в діапазоні (3...60) К отримати апроксимацію експериментальних даних з погрішністю не більш  $\pm 0,03$  К. Вуглецеві термодатчики вимагають індивідуального градуювання. Вони не дорогі, проте в експлуатації вимагають акуратного звернення, оскільки вельми чутливі до механічних навантажень як на сам вугільний елемент, так і на електричні виводи, які запресовані в елемент.

В даний час в області практичного використання жоден напівпровідниковий матеріал не може конкурувати з кремнієм по мірі вивченої характеристик і, особливо, по мірі розробленості і освоєності технології виготовлення. Оскільки кремній має досить широку ( $E_g \cong 1,17$  eV) зону провідності і, крім того, інтенсивне окислення поверхні кремнію відбувається при температурах, великих 1000 К, то на його основі можуть створюватися високотемпературні термодатчики. На основі монокристалічного кремнію можна виготовляти термодатчики як з позитивним, так і з негативним значенням ТКО в області середніх температур. Негативного значення ТКО набувають при легуванні кремнію такими домішками, як золото і залізо, які створюють в забороненій зоні “глибокі” рівні, тобто рівні, енергія активації яких близька до  $0,5 E_g$ .

### **2.1.3. Плівкові напівпровідникові датчики температури**

Поліпшення характеристик напівпровідникових датчиків температури і спрощення їх конструкції може бути досягнуте при використанні чутливих елементів, виготовлених з тонких плівок напівпровідника, нанесеного на напівпровідникову або діелектричну підкладку. Виготовлення таких датчиків здійснюється масовими методами планарної технології, які забезпечують набуття значень номінальних опорів з досить високою точністю і, крім того, дозволяють використовувати при виготовленні лазерні методи підгонки номінальних опорів.

Основним недоліком датчиків на основі автоепітаксіальних структур «кремній на кремнії», а також на основі чутливих елементів з дифузійними кремнієвими тензорезисторами є низька верхня межа робочих температур, що обумовлене різким погіршенням ізолюючих властивостей р-п переходу при температурах більш (410...430) К.

Великі можливості по подальшому вдосконаленню плівкових термодатчиків виникли з появою в серійному виробництві гетероепітаксіальних структур «кремній на сапфірі» (КНС), які є тонкою (від доль до декількох

мікрометрів) плівкою монокристалічного кремнію, вирощеною на підкладці з монокристалічного сапфіра. Використання структур КНС дозволяє створювати термодатчики, що характеризуються поєднанням достоїнств датчиків з монокристалічними і плівковими кремнієвими чутливими елементами. Вживання монокристалічної плівки кремнію для виготовлення терморезисторів забезпечує підвищену стабільність характеристик термодатчиків. Хороші ізолюючі властивості сапфіра аж до температур близько 1300 К дозволяють створювати термодатчики, верхню межу робочих температур яких, в принципі, обмежений лише фізичними властивостями кремнію. Високий коефіцієнт теплопровідності сапфіра сприяє зниженню показника теплової інерції термодатчика. В даний час на основі чутливих елементів з КНС-структур розроблений ряд термодатчиків. Так датчик температури ТЕЕ-295, розроблений в НВО вимірювальної техніки р. Королєв, працює в діапазоні температур від 73 до 473К і має основну похибку 0,25% .

## **2.2. Пірометричні датчики**

Про температуру нагрітого тіла можна судити на підставі виміру параметрів його теплового випромінювання, що є електромагнітними хвилями різної довжини. Чим вище температура тіла, тим більше енергії воно випромінює[6]. Датчики, дія яких заснована на вимірі теплового випромінювання, називають пірометричними сенсорами. Одним з головних достоїнств даних пристроїв є відсутність впливу вимірника на температурне поле нагрітого тіла, оскільки в процесі виміру не вступають в безпосередній контакт один з одним. Тому дані методи отримали назву безконтактних.

На підставі законів випромінювання розроблені датчики наступних типів:

- датчик сумарного випромінювання – вимірюється повна енергія випромінювання;
- датчик часткового випромінювання – вимірюється енергія в обмеженому фільтром (або приймачем) ділянки спектру;
- датчики спектрального відношення – вимірюється відношення

енергії фіксованих ділянок спектру.

Залежно від типу датчика розрізняється радіаційні, датчики яскравості, колірні.

Радіаційною температурою реального тіла  $T_r$  називають температуру, при якій повна потужність АЧТ дорівнює повній енергії випромінювання даного тіла при дійсній температурі  $T_d$ .

Температурою яскравості реального тіла  $T_j$  називають температуру, при якій щільність потоку спектрального випромінювання АЧТ дорівнює щільності потоку спектрального випромінювання реального тіла для тієї ж довжини хвилі (або вузького інтервалу спектру) при дійсній температурі  $T_d$ .

Колірною температурою реального тіла  $T_c$  називають температуру, при якій стосунки щільності потоків випромінювання АЧТ для двох довжин хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  дорівнює відношенню щільності потоків випромінювань реального тіла для тих же довжин хвиль при дійсній температурі  $T_d$ .

## **2.3 Оптичні датчики**

Безконтактні датчики температури приміняються і в випадках, коли необхідно проводити вимірювання швидкоплинних процесів[7]. Без таких детекторів не можна обійтися при роботі в агресивних середовищах, в умовах сильних електричних, магнітних і електромагнітних полів і при впливі високої напруги, т е там де або велика ймовірність виникнення серйозних перешкод при безпосередньому контакті з досліджуваним об'єктом, або неможливо забезпечити безпеку оператора. Такі датчики також необхідні там, де до об'єкту вимірів просто неможливо добратися. Крім ІЧ детекторів існують датчики, хоча й контактні за своєю природою, але використовують фотони як носителей інформації про температуру.

### **2.3.1 Флуоресцентні датчики**

Ці датчики реалізуються на основі властивості деяких фосфорних компонентів випромінювати світло у відповідь на порушення променями видимого діапазону спектра.



Такі компоненти наносяться на поверхню об'єкта. температуру якого необхідно виміряти. Після чого об'єкт піддається впливу УФ імпульсного випромінювання. Виник в результаті його опромінення післясвітіння детектується і аналізується. Форма імпульсу післясвітіння залежить від температури[7].

Час спаду імпульсу післясвітіння в широкому температурному діапазоні являється параметром, що володіє дуже високою відтворюваністю. В якості чутливого матеріалу в флуоресцентних датчиках застосовується фтормагнетит магнію, активований чотиривалентним марганцем. Фосфор тривалий час застосовувався тільки як коректор кольору ртутних ламп, використовувався для освітлення вулиць. Порошок фосфору виходить в ході реакції у твердій фазі при температурі  $1200^{\circ}\text{C}$ . Він є відносно інертним і термостійким речовиною, безпечним з біологічної точки зору. Він не руйнується від впливу більшості хімічних реагентів і тривалого УФ випромінювання. Він переходить у збуджений стан при опроміненні його світлом УФ або синій області спектра. Флуоресцентне світіння фосфору знаходиться і дальньому червоному спектральному діапазоні, а його інтенсивність спадає за експоненціальним законом. Для зниження можливості виникнення перехресних перешкод між сигналами збудливого і флуоресцентного випромінювань, на їхньому шляху встановлюються смугові фільтри, пропускають хвилі тільки заданих зон спектру (рис. 2.4а). Як джерело збудження застосовується ксеноновий імпульсна лампа, яка може одночасно використовуватися декількома оптичними каналами у складі комплексних систем вимірювання. Процес вимірювання температури полягає у визначенні швидкості залишення флуоресцентного світіння (рис. 2.4б). Це означає, що значення температури знаходиться за постійною часу  $\tau$ , величина якої в температурному діапазоні  $-200...+400^{\circ}\text{C}$  зменшується в п'ять разів. Вимірювання часу виконується за допомогою електронної схеми, як правило, з дуже високою точністю. Тому датчики флуоресцентного типу дозволяють вимірювати температуру з гарною роздільною здатністю і точністю порядку  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  в широкому температурному діапазоні без проведення калібровки.

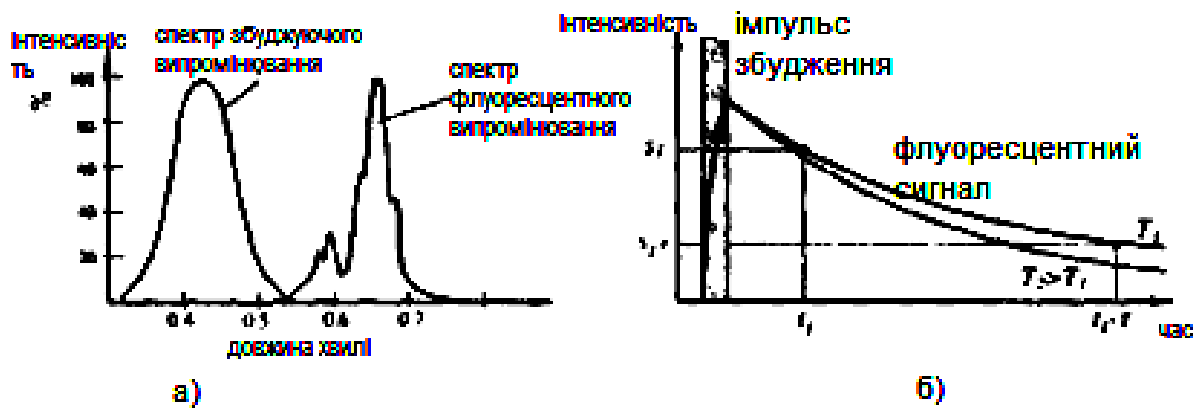


Рис. 2.4 - Флуоресцентний метод вимірювання температури:

а -спектральні характеристики збуджуючого і флуоресцентного випромінювання;  
б - спад після світіння по експотенціальному закону

Оскільки постійна часу не залежить від інтенсивності збудливого випромінювання, можлива реалізація датчиків самих різноманітних конструкцій. Наприклад, фосфорний склад може наноситься безпосередньо на поверхню об'єкта, при цьому оптична система проводить вимірювання безконтактним способом (рис. 2.5а). Це дає можливість проведення безперервного моніторингу температури об'єкта без внесення збурень в зону вимірювань. В іншій конструкції фосфор наноситься на кінець пружного зонда, здатною вступати в щільний контакт об'єктом (рис. 2.5б і 2.5 в).

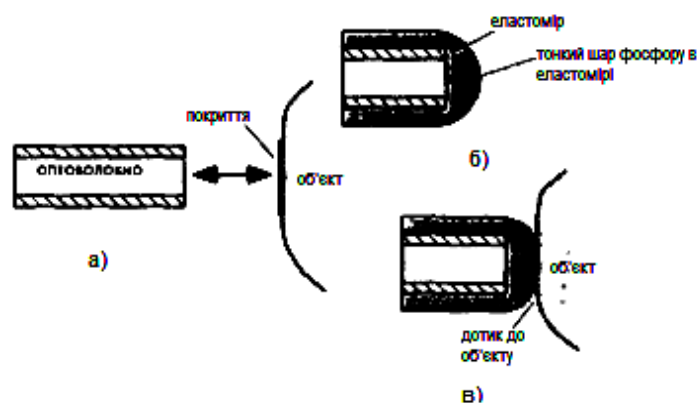


Рис. 2.5 - Розташування фосфорних компонентів:

а -на поверхні об'єкту. б і в - на кінці зонду

### 2.3.2 Інтерферометричні датчики

Інший метод оптичного вимірювання температури полягає в модуляції інтенсивності світла, що виникає внаслідок інтерференції двох променів світла. Один промінь є еталонним, а інший пропускається через середовище, параметри якої залежать від температури, що викликає появу фазового зсуву між сигналами. Величина цього фазового зсуву, а, значить, і параметри інтерференційного сигналу, визначаються температурою. Як чутливого елемента інтерферометричного датчика температури часто використовують тонкий шар кремнію, оскільки його коефіцієнт заломлення залежить від температури, що призводить до зміни довжини шляху променя.

На рис. 2.6 показана схема тонкоплівочного оптичного датчика, який складається з трьох шарів плівок, нанесених на кінці багатомодового оптоволоконного хвилеводу зі східчастим зміною показника заломлення з діаметром серцевини 100 мкм, і діаметром покриття - 140 мкм [17]).

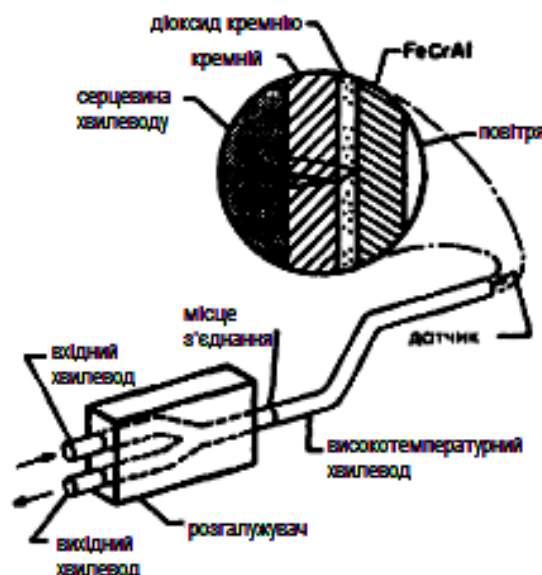


Рис. 2.6 - Схема тонкоплівочного оптичного датчика температур

Перший шар формується з кремнію, другий їх діоксиду кремнію. Плівка з FeCrAl наноситься в самому кінці для захисту нижчих верств від окислення. Такі оптоволоконна можуть використовуватися при температурах до 350° С. Однак при використанні хвилеводів з золотим покриттям робочий діапазон збільшується до 650 ° С. Як джерела випромінювання тут застосовуються світловипромінюючі діоди з довжиною хвилі випромінювання близько 860 нм, а аналіз результуючого сигналу проводиться за допомогою спектрометра.

### 2.3.3 Датчики на основі растрів

Такі датчики застосовуються в біомедичних системах. В якості розчину часто застосовують  $\text{CoCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  (розчин хлориду кобальту). Принцип дії таких датчиків заснований на характерній для певних хроматичних розчинів температурної залежності коефіцієнтів поглинання випромінювань видимого діапазону спектра (400 ... 800 нм) (рис. 2.7а).

Очевидно, що до складу таких датчиків повинні входити: джерело випромінювання, детектор і розчин хлориду кобальту, що має тепловий зв'язок з об'єктом виміру. На рис. 2.7б і 2.7в показані два варіанти хроматичних датчиків температури.

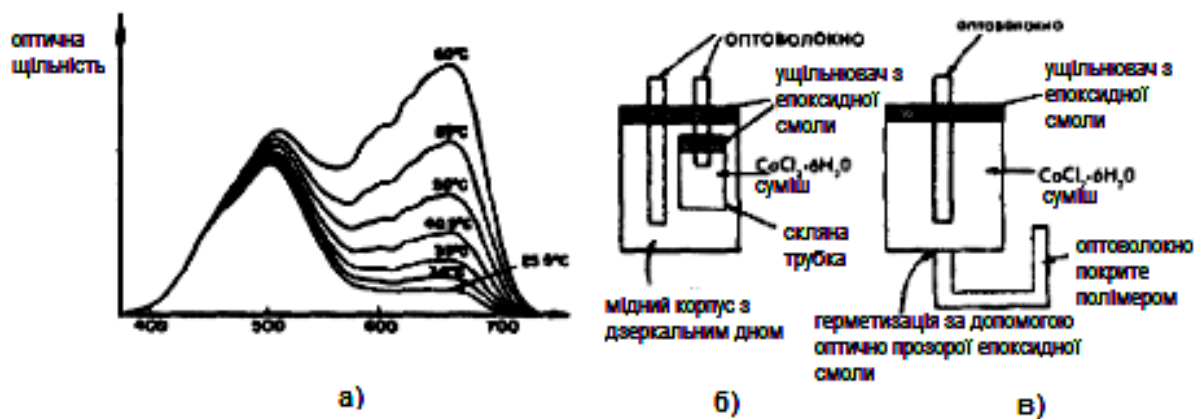


Рис. 2.7 - Датчики на основі растрів, колір яких залежить від температури: а - абсорбційний спектр розчину хлориду кобальта, б - датчик з дзеркальною поверхністю, в - датчик прохідного типу

### 2.4 Акустичні датчики

При роботі в екстремальних умовах (в діапазоні криогенних температур, при високих рівнях радіації в ядерних реакторах і т.д.). а також при проведення вимірювань у замкнутому герметичному об'ємі, де неможливо розмістити контактні датчики або використовувати ІЧ детектори, буває дуже складно визначати температуру. У таких випадках зазвичай застосовують акустичні датчики температури, принцип дії яких заснований на залежності швидкості звуку від температури середовища, через яку він поширюється. Наприклад, для сухого повітря при нормальному атмосферному тиску ця залежність має вигляд:

$$v \approx 331.5 \sqrt{\frac{T}{273.15}}, \text{ м/с}, \quad (2.6)$$

де  $v$  швидкість світла, а  $T$  - абсолютна температура.

Акустичний датчик температури (рис. 2.8) складається з трьох компонентів: ультразвукового передавача і приймача, а також герметичної трубки, заповненої газом. Передавач і приймач є керамічні п'єзоелектричні пластини, акустично незв'язані з трубкою, що забезпечує поширення звуку переважно через газ в ніврі трубки. В якості газу найчастіше використовується сухе повітря. У альтернативної конструкції датчика передає і приймає кристали вбудовуються всередину замкнутої камери з відомим вмістом, температуру якого необхідно виміряти. У випадку, коли обсяг і маса внутрішнього середовища підтримуються постійними, не потрібно застосування проміжної трубки. У випадках коли без неї не обійтися, її необхідно захищати від механічних деформацій і втрати герметичності при дії дуже високих температур. Відповідним матеріалом для трубки є інвар.

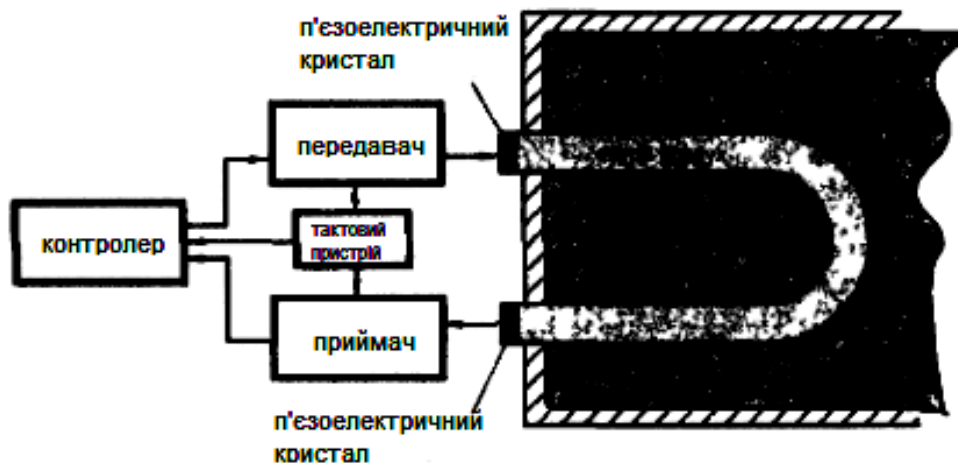


Рис. 2.8 - Акустичний термометр з ультразвуковим детектором

Тактовий пристрій працює на низькій частоті (близько 100 Гц). Його імпульси запускають передавач і приймач блокують. Передавальний кристал згинається і тим самим запускає ультразвукову хвилю, що поширюється уздовж трубки. На приймаючий кристал приходить сигнал дозволу, і він перетворює отриману до нього акустичну хвилю в електричний сигнал, який підсилюється і передається в схему керування. Блок управління по часу поши-

ренню хвилі вздовж трубки обчислює швидкість звуку, по якій за допомогою калібрувальних коефіцієнтів, що зберігаються в спеціальних таблицях, знаходиться шукана температура. Альтернативний акустичний детектор температури реалізований на основі одного п'єзоелектричного кристала, поперемінно працюючих то приймачем, то передавачем. У цьому випадку порожній кінець трубки заварюється. Ультразвукові хвилі відбиваються від завареного кінця трубки і повертається назад на кристал, який до цього моменту часу переключається в режим приймача. Електронна інтерфейсна схема перетворює отримані імпульси в сигнал, відповідний температурі усередині трубки.

На основі поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) і площинних хвиль будуються мініатюрні датчики температури. Їх принцип дії базується на температурній модуляції деяких механічних параметрів елементів електронних генераторів, що призводить до зміни їх частоти. Фактично, такі інтегральні акустичні датчики є прямими перетворювачами температури в частоту. Типова чутливість таких датчиків лежить в межах декількох кГц на градус.

## 2.5 П'єзоелектричні датчики

При п'єзоелектричному ефекті спостерігається залежність частоти вібрацій кварцового кристала від температури. Саме на основі цього явища і реалізуються п'єзоелектричні датчики температури[8]. Оскільки кварц є анізотропним матеріалом, резонансна частота пластини сильно залежить від кута зрізу кристала (його кристалографічної орієнтації). Тому вибираючи зрізи АТ- і ВТ-, можна отримати кристали, що володіють незначною температурною чутливістю. І навпаки, при використанні кристалів інших зрізів можна реалізувати датчики з яскраво вираженою залежністю частоти від температури. Температурну залежність резонансної частоти від температури часто апроксимують поліноміальною залежністю третього порядку:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3, \quad (2.7)$$

де  $\Delta T$  і  $\Delta f$  - температура і частотний зсув,  $f_0$ - частота калібрування, а

а - коефіцієнти апроксимації. Перший п'єзоелектричний детектор температури був реалізований в 1962 році на основі кристала з Y-зрізів. Після цього компанія Hewlett-Packard розробила дуже вдалий лінійний датчик на основі кристала з LC-зрізу. При використанні кристалів Y-зрізів третім і четвертим членами виразу (2.7) можна знехтувати. Чутливість такого датчика складає  $35 \text{ ppm} / ^\circ \text{C}$ , а робочий температурний діапазон - від  $-80 ^\circ \text{C}$  ...  $+230 ^\circ \text{C}$  при точності калібровки  $0,02 ^\circ \text{C}$ . Із застосуванням мікропроцесорів лінійність стає не так важлива, а головним фактором є чутливість. Так в нелінійних датчиках температури, реалізованих на основі злегка повернених кристалів Y-зразу з  $Q = -4 ^\circ \text{C}$ , була отримана чутливість  $90 \text{ ppm} / ^\circ \text{C}$ . Перспективними також є резонатори, що використовують ізгибні і торсіонні моди коливань.

Слід зазначити, що в п'єзоелектричних датчиках температури завжди дуже складно організувати хорошу теплову зв'язок кристала з об'єктом вимірювання, тому вони обласають найгіршим швидкодією в порівнянні з термісторами і термоелектричними детекторами.

## **РОЗДІЛ 3**

### **МІКРОКОНТРОЛЕРИ**

#### **3.1 Типи мікроконтролерів**

Мікроконтролер (MCU) - мікросхема, призначена для керування електронними пристроями. Типовий мікроконтроллер поєднує в собі функції процесора і периферійних пристроїв, може містити ОЗП і ПЗП. По суті, це однокристальний комп'ютер, здатний виконувати прості завдання. Використання однієї мікросхеми, замість цілого набору, як у випадку звичайних процесорів, що застосовуються в персональних комп'ютерах, значно знижує розміри, енергоспоживання і вартість пристроїв, побудованих на базі мікроконтролерів. Мікроконтролери є основою для побудови вбудованих систем, їх можна зустріти в багатьох сучасних приладах, таких, як телефони, пральні машини і т. п. Термін «мікроконтроллер» (МК) витіснив з ужитку раніше використовувався термін «однокристальна мікро-ЕОМ». Перший же патент на однокристальних мікро-ЕОМ був виданий в 1971 році інженерам М. Кочрену і Г. буну, співробітникам Texas Instruments. Саме вони запропонували на одному кристалі розмістити не лише мікропроцесор, але й пам'ять, пристрої введення-виведення. З появою однокристальних мікро-ЕОМ пов'язують початок ери комп'ютерної автоматизації в галузі управління. Ма-



буть, ця обставина і визначило термін «мікроконтролер» (control - управління). У 1979 році НДІ ТТ розробили однокристальних 16-розрядну ЕОМ K1801BE1, архітектура якої називалася «Електроніка НЦ». У 1980 році фірма Intel випускає мікроконтролер i8048. Трохи пізніше в цьому ж році Intel випускає наступний мікроконтролер: i8051. Вдалий набір периферійних пристроїв, можливість гнучкого вибору зовнішньої або внутрішньої програмної пам'яті і прийнятна ціна забезпечили цьому мікроконтролеру успіх на ринку. З точки зору технології мікроконтролер i8051 був для свого

часу дуже складним виробом - у кристалі було використано 128 тис. транзисторів, що в 4 рази перевищувало кількість транзисторів в 16-розрядному мікропроцесорі i8086[9].

На сьогоднішній день існує більше 200 модифікацій мікроконтролерів, сумісних з I8051, що випускаються двома десятками компаній, і велика кількість мікроконтролерів інших типів. Популярністю у розробників користуються 8-бітові мікроконтролери PIC фірми Microchip Technology і AVR фірми Atmel, шістнадцятибітну MSP430 фірми TI, а також ARM, архітектуру яких розробляє фірма ARM і продає ліцензії іншим фірмам для їх виробництва, процесорів - мікроконтролери.

При проектуванні мікроконтролерів доводиться дотримувати баланс між розмірами і вартістю з одного боку і гнучкістю і продуктивністю з іншого.

Для різних додатків оптимальне співвідношення цих і інших параметрів може розрізнятися дуже сильно. Тому існує величезна кількість типів мікроконтролерів, що відрізняються архітектурою процесорного модуля, розміром і типом вбудованої пам'яті, набором периферійних пристроїв, типом корпусу і т. д.

В даний час випускається цілий ряд типів МК. Всі ці прилади можна умовно розділити на три основні класи:

- 8-розрядні МК для вбудованих додатків;
- 16 - і 32-розрядні МК;
- цифрові сигнальні процесори (DSP).

Найбільш поширеним представником сімейства МК є 8-розрядні прилади, широко використовуються в промисловості, побутової та комп'ютерної техніки. Вони пройшли в своєму розвитку шлях від найпростіших приладів з відносно слаборозвиненою периферією до сучасних багатофункціональних контролерів, які забезпечують реалізацію складних алгоритмів керування в реальному масштабі часу. Причиною життєздатності 8-розрядних МК є використання їх для управління реальними об'єктами, де застосовуються, в основному, алгоритми з переважанням логічних операцій, швидкість обробки яких практично не залежить від розрядності процесора. Зростанню популярності 8-розрядних МК сприяє постійне розширення номенклатури виробів, що випускаються такими відомими фірмами, як Motorola, Microchip, Intel, Zilog, Atmel і багатьма іншими.

Сучасні 8-розрядні МК володіють, як правило, поруч відмінних ознак. Перелічимо основні з них:

- модульна організація, при якій на базі одного процесорного ядра (центрального процесора) проектується ряд (лінійка) МК, що розрізняються обсягом і типом пам'яті програм, обсягом пам'яті даних, набором периферійних модулів, частотою синхронізації;
- використання закритої архітектури МК, яка характеризується відсутністю ліній магістралей адреси і даних на висновках корпусу МК. Таким чином, МК являє собою закінчену систему обробки даних, нарощування можливостей якої з використанням паралельних магістралей адреси і даних не передбачається;
- використання типових функціональних периферійних модулів (таймери, процесори подій, контролери послідовних інтерфейсів, аналого-цифрові перетворювачі тощо, що мають незначні відмінності в алгоритмах роботи в МК різних виробників;
- розширення числа режимів роботи периферійних модулів, які задаються в процесі ініціалізації регістрів спеціальних функцій МК.

При модульному принципі побудови всі МК одного сімейства містять процесорне ядро, однакове для всіх МК даного сімейства, і змінюваний

функціональний блок, який відрізняє МК різних моделей. Процесорний ядро включає в себе:

- центральний процесор;
  - внутрішню контролерну магістраль (ВКМ) у складі шин адреси, даних і управління;
  - схему синхронізації МК;
  - схему управління режимами роботи МК, включаючи підтримку режимів зниженого енергоспоживання, початкового запуску (скиду) і т.д.
- Змінний функціональний блок включає в себе модулі пам'яті різного типу й обсягу, порти введення / виводу, модулі тактових генераторів (Г), таймери. У відносно простих МК модуль обробки переривань входить до складу процесорного ядра. У більш складних МК він являє собою окремий модуль з розвиненими можливостями. До складу змінюваного функціонального блоку можуть входити і такі додаткові модулі як компаратори напруги, аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) та інші. Кожен модуль проектується для роботи в складі МК з урахуванням протоколу ВКМ. Даний підхід дозволяє створювати різноманітні за структурою МК в межах одного сімейства.

Вбудовувані мікроконтролери містять значну кількість домоміжних пристроїв, завдяки чому забезпечується їх включення в реалізацію зручних систем з використанням мінімальної кількості додаткових компонентів. До складу цих мікроконтролерів зазвичай входять:

- Схема початкового запуску процесора (Reset)
- Генератор тактових імпульсів
- Центральний процесор
- Пам'ять програм EEPROM і програмний інтерфейс
- Пам'ять даних RAM
- Засоби введення-виведення даних
- Таймери, що фіксують число командних циклів

Загальна структура мікроконтролера показана на рис. 3.1. Ця структура дає уявлення про те, як мікроконтролер зв'язується із зовнішнім світом.

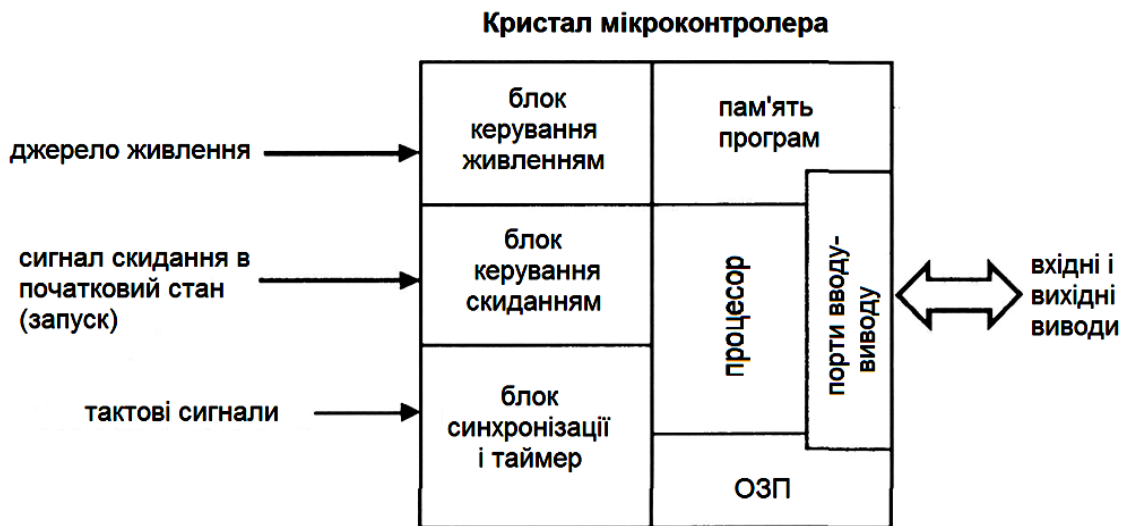


Рис. 3.1 - Загальна структура мікроконтролера

Більш складні вбудовувані мікроконтролери можуть додатково реалізовувати наступні можливості:

- Вбудований монітор / відладчик програм
- Внутрішні засоби програмування пам'яті програм (ROM)
- Обробка переривань від різних джерел
- Аналоговий введення-виведення
- Послідовний введення-виведення (синхронний і асинхронний)
- Паралельний введення-виведення (включаючи інтерфейс з комп'ютером)
- Підключення зовнішньої пам'яті (мікропроцесорний режим)

Всі ці можливості значно збільшують гнучкість застосування мікроконтролерів і роблять простішим процес розробки систем на їх основі. Слід зауважити, що для реалізації цих можливостей в більшості випадків потрібне розширення функцій зовнішніх висновків.

Раніше мікроконтролери виготовлялися за біполярною або NMOS технології. Всі сучасні мікроконтролери виробляються за допомогою CMOS технології, яка дозволяє значно зменшити розмір кристалів і рассеиваемую потужність.

Типові значення максимальної частоти тактових сигналів складають для різних мікроконтролерів 10 - 20 МГц. Головним фактором, що обмежує їх швидкість, є час доступу до пам'яті, яка застосовується в

мікроконтролерах. Однак для типових застосувань це обмеження не є суттєвим.

### 3.1.1. Мікроконтролери із зовнішньою пам'яттю

Деякі мікроконтролери (особливо 16 - і 32-розрядні) використовують тільки зовнішню пам'ять, яка включає в себе як пам'ять програм (ROM), так і певний обсяг пам'яті даних (RAM), необхідний для даного застосування. Структура мікроконтролера із зовнішньою пам'яттю показана на рис.3.2.

Класичним прикладом такого мікроконтролера є Intel 80188. По суті він являє собою мікропроцесор 8088, який використано в компютерах IBM PC, інтегрований на загальному кристалі з до-виконавчими схемами, що реалізують ряд стандартних функцій, таких як переривання і прямий доступ до пам'яті (DMA). Мета створення 80188 со-стояла в тому, щоб об'єднати в одному корпусі всі пристрої, необхідні інженеру для реалізації систем, в яких можуть використовуватися функціональні можливості та програмне забезпечення мікропроцесора 8088.

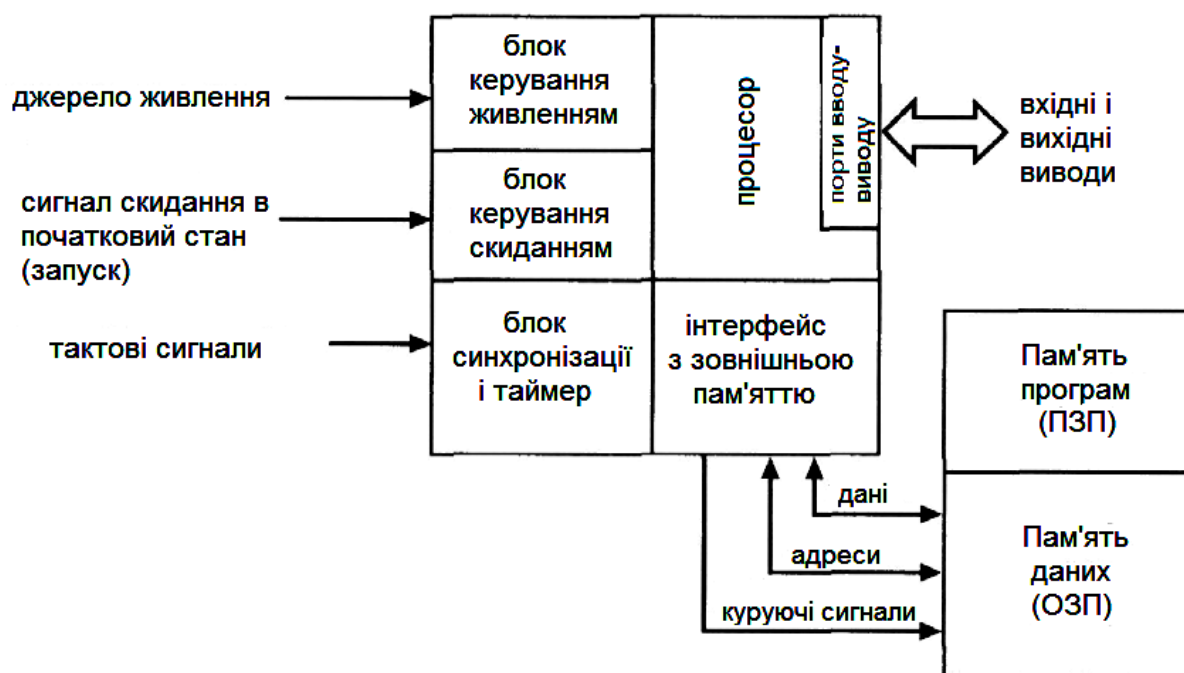


Рис. 3.2 - Структура мікроконтролера із зовнішньою пам'яттю

Аналогічні цілі досягаються при використанні мікроконтролера 80186, який має 16-розрядну зовнішню шину (80188 має 8-розрядну зовнішню шину) і являє собою 16-розрядний процесор 8086, інтегрований на загальному

кристалі з додатковими периферійними схемами (такими ж, як в 80188). Також як мікропроцесор 8088 є спрощеною (8-розрядна зовнішня і 16-розрядна внутрішня шина) версією 8086 (16-розрядні зовнішня і внутрішня шини), так і мікроконтролер 80188 є спрощеною версією 80186.

Мікроконтролери із зовнішньою пам'яттю призначені для інших застосувань, ніж вбудовувані мікроконтролери. Ці застосування зазвичай вимагають великого обсягу пам'яті (RAM) і невеликої кількості пристроїв (портів) вводу-виводу. Для мікроконтролерів з зовнішньою пам'яттю найбільш придатними є програми, в яких критичним ресурсом є пам'ять, а не число логічних входів-виходів загального призначення, тоді як для вбудованих мікроконтролерів має місце протилежна ситуація. Типовим прикладом застосування для мікроконтролера з зовнішньою пам'яттю є контролер жорсткого диска з буферної кеш-пам'яттю, який забезпечує проміжне зберігання і розподіл великих обсягів дан-них (зазвичай вимірюваних в мегабайтах). Зовнішня пам'ять дає можливість та-кому мікроконтролеру працювати з більш високою швидкістю, ніж вбудовує-мий мікроконтролер.

### **3.1.2 Цифрові сигнальні процесори**

Цифрові сигнальні процесори (DSP) - відносно нова категорія процесорів. Призначення DSP полягає в тому, щоб отримувати поточні дані від аналогової системи і формувати відповідний відгук. DSP і їх ALL) (Arithmetic Logic Unit - арифметико-логічний пристрій, що є апаратним засобом для виконання обчислень) працюють з дуже високою швидкістю, що дозволяє здійснювати обробку даних в реальному масштабі часу. DSP часто використовуються в активних шумо-пригнічують мікрофонах, які встановлюються в літаках (другий мікрофон забезпечує сигнал навколишнього шуму, який віднімається від сигнал першого мікрофона, дозволяючи таким чином придушити шум і залишити тільки голос) або для придушення роздвоєння зображення в телевізійних сигналах.

Розробка DSP алгоритмів - це спеціальний розділ теорії управ-ня. Виклад цієї теорії вимагає використання вельми просунутої ма-тематики і вихо-

дять за рамки цієї книги (хоча пізніше ви познайомитеся з «нечіткою логікою», яка представляє собою нетрадиційний метод управління системами за допомогою комп'ютера).

У різноманітних DSP можна знайти особливості, властиві як вбудовуваним мікроконтролерів, так і мікроконтролерів з зовнішньою пам'яттю. DSP не призначені для автономного застосування. Зазвичай вони входять до складу систем, використовуючись як пристрої керування зовнішнім устаткуванням, а також для обробки вхідних сигналів і формування відповідного відгуку.

### 3.2 CISC і RISC архітектура процесора

Двома основними архітектурами набору команд, що використовуються комп'ютерної промисловістю на сучасному етапі розвитку обчислювальної техніки, є архітектури CISC і RISC.

*CISC* повна система команд - *Complicated Instruction Set Computer*) характеризуються досить розвиненою системою команд, наприклад, МК серії *i80x51* мають 111 команд. Однак аналіз програм показав, що 20% з них використовується в 80% випадків, а дешифратор команд займає більше 70% площі кристалу. Команди достатньо складні і виконуються за різний час. Тому у розробників виникла ідея скоротити кількість команд, надати їм єдиний формат і зменшити площу кристала, тобто використати *RISC* (скорочена система команд - *Reduced Instruction Set Computer*) архітектуру.

Особливістю МК, виконаних за *RISC* архітектурою, є те, що всі команди виконуються за один-три такти, тоді як у *CISC* контролерах – за один-три машинних цикли, кожний з яких складається з кількох тактів, наприклад для *i80x51* – з 12 тактів. Тому *RISC* контролері мають значно більшу швидкодію. Однак повніша система команд *CISC* контролерів у деяких випадках сприяє економії часу виконання певних фрагментів програми та економії пам'яті програм.

Основні порівняльні характеристики CISC і RISC- архітектур в таблиці 3.1.

CISC-процесори виконують великий набір різноманітних команд, даючи розроблювачеві можливість вибрати найбільше підходящу команду для виконання необхідної операції. Вибірка команди на виконання здійснюється побайтно протягом декількох циклів роботи МК. Час виконання команди може складати від 1 до 12 циклів. До МК із CISC-архітектурою відносяться МК фірми Intel з ядром MCS-51, що підтримуються в даний час великою кількістю виробників[10].

Схема синхронізації МК забезпечує формування сигналів синхронізації, необхідних для виконання командних циклів центрального процесора та мітки часу, які необхідні для роботи таймерів МК. Вона звичайно будується на основі ділників частоти опорної імпульсної послідовності. Сучасні МК містять вбудовані тактові генератори, але практично всі МК допускають роботу від зовнішнього джерела сигналу з метою завдання довільної тактової частоти МК.

У МК використовується три основних види пам'яті:

Пам'ять програм являє собою ПЗП, призначену для збереження про-

CISC- архітектура	RISC-архітектура
Багатобайтові команди	Однобайтові команди
Мала кількість регістрів	Велика кількість регістрів
Складні команди	Прості команди
Одна чи менше команд за один цикл процесора	Декілька команд за один цикл процесора
Традиційно один виконавчий пристрій	Декілька виконавчих пристроїв

грам і констант.

Пам'ять даних призначена для збереження змінних у процесі виконання програми і являє собою, як правило, статичне ОЗП. Термін «статичне» означає, що вміст комірок ОЗП зберігається при зниженні тактової частоти МК до як завгодно малих значень.



Регістри МК – внутрішні реєстри процесора (акумулятор, реєстри стану, індексні реєстри) і реєстри, що служать для керування периферійними пристроями (реєстри спеціальних функцій).

Обсяг пам'яті даних МК, як правило, невеликий і складає звичайно десятки і сотні байт. Цю обставину необхідно враховувати при розробці програм для МК.

Незважаючи на існуючу тенденцію переходу до закритої архітектури МК, у деяких випадках виникає необхідність підключення додаткової зовнішньої пам'яті. Для цього використовуються порти введення-виведення. Такий спосіб дозволяє уникнути реалізації складних шинних інтерфейсів, однак приводить до зниження швидкодії системи при звертанні до зовнішньої пам'яті.

Кожен МК має декілька паралельних портів введення-виведення, які виконують роль пристроїв часового узгодження функціонування МК і об'єкта керування, що у загальному випадку працюють асинхронно. Звертання до реєстра даних порту здійснюється тими ж командами, що і звертання до пам'яті даних. Крім того, у багатьох МК окремі розряди портів можуть бути опитані або встановлені бітовими командами процесора.

Більшість задач керування, що реалізуються за допомогою МК, виконуються у реальному часі. Під цим розуміється здатність системи одержати інформацію про стан керованого об'єкта, виконати необхідні розрахункові процедури і видати керуючі впливи (сигнали) на протязі інтервалу часу, достатнього для бажаної зміни стану об'єкта.

Покладати функції керування в реальному масштабі часу тільки на центральний процесор неефективно, тому що це займає ресурси, необхідні для розрахункових процедур. Тому в більшості сучасних МК використовується апаратна підтримка роботи в реальному часі з використанням таймерів.

Модулі таймерів служать для прийому інформації про час настання тих або інших подій від зовнішніх датчиків подій, а також для формування керуючих впливів у часі. Таймер – це 8-ми або 16-розрядний лічильник зі схемою керування. Схемотехнікою МК передбачається можливість використання

таймера в режимі лічильника зовнішніх подій, тому його часто називають таймером/лічильником. Напрямок рахування – тільки прямий, тобто при надходженні вхідних імпульсів вміст лічильника інкрементується (збільшується на одиницю).

Лічильник може використовувати, у якості джерела вхідних сигналів як імпульсну послідовність з виходу керованого дільника частоти  $f_{BUS}$ , так і сигнали зовнішніх подій. У першому випадку говорять, що лічильник працює в режимі таймера, у другому – у режимі лічильника подій.

Наступним етапом розвитку модулів підсистеми реального часу МК стали модулі процесорів подій. Вперше модулі процесорів подій були використані компанією Intel у МК сімейства 8x51Fx. Цей модуль одержав назву програмувального лічильного масиву (Programmable Counter Array — PCA). Він забезпечує більш широкі можливості роботи в реальному масштабі часу і менше витрачає ресурси центрального процесора, чим таймери/лічильники. Тенденція розвитку підсистеми реального часу сучасних МК – збільшення числа каналів процесорів подій і розширенні їхніх функціональних можливостей.

Обробка переривань у МК відбувається відповідно до загальних принципів обробки переривань у МПС. Модуль переривань приймає запит переривання і організує перехід до виконання програми, що перериває. Запити переривань можуть надходити як від зовнішніх джерел, так і від джерел, розташованих у різних внутрішніх модулях МК (зовнішні та внутрішні переривання). Як входи для прийому запитів зовнішніх переривань найчастіше використовуються виводи паралельних портів.

Адреса, що завантажується в програмний лічильник при переході до обробки переривання, називається «вектор переривання». Питання про пріоритети при одночасному надходженні декількох запитів на переривання вирішується в різних МК по-різному. Є МК з однорівневою системою пріоритетів (усі запити рівноцінні), багаторівневою системою з фіксованими пріоритетами і багаторівневою програмованою системою пріоритетів.

Сучасні МК надають користувачеві великі можливості в плані економії енергоспоживання і мають наступні режими роботи:

- активний режим (Run mode) — основний режим роботи МК. У цьому режимі МК виконує робочу програму, і всі його ресурси доступні. Споживана потужність має максимальне значення  $P_{\text{RUN}}$ .

- режим очікування (Wait mode, Idle mode або Halt mode). У цьому режимі припиняє роботу центральний процесор, але продовжують функціонувати периферійні модулі, що контролюють стан об'єкта керування. При необхідності сигнали від периферійних модулів переводять МК в активний режим, і робоча програма формує необхідні керуючі впливи. У режимі очікування потужність споживання МК знижується в порівнянні з активним режимом у 5...10 разів;

- режим зупинки (Stop mode, Sleep mode або Power Down mode). У цьому режимі припиняє роботу як центральний процесор, так і більшість периферійних модулів. Перехід МК зі стану останова в робочий режим можливий, як правило, тільки за перериваннями від зовнішніх джерел або після подачі сигналу скидання. У режимі останова потужність споживання МК  $P_{\text{STOP}}$  знижується в порівнянні з активним режимом приблизно на три порядки і складає одиниці мікроват.

З метою забезпечення надійного запуску, контролю роботи МК і відновлення працездатності системи (автоматичного скидання і ініціалізації) всі сучасні МК забезпечуються апаратними засобами забезпечення надійної роботи, а саме: схемою формування сигналу скидання МК, модулем моніторингу напруги живлення та сторожовим таймером.

### **3.3 Особливості МК RISC архітектури**

У процесорах з RISC-архітектурою набір команд, що виконуються, скорочений до мінімуму. До МК із RISC-процесором відносяться МК AVR фірми Atmel, МК PIC16 і PIC17 (Peripheral Interface Controller) фірми Microchip і інші.

Сруктура мікроконтролера з RISC архітектурою представлена на

рис. 3.3.

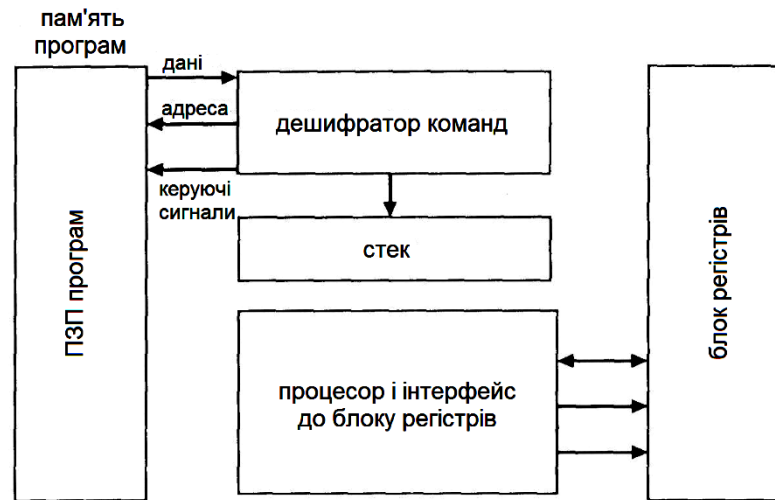


Рис. 3.3 - Структура МК з RISC архітектурою

RISC МК мають наступні характерні риси.

1. Всі команди мають формат фіксованої довжини (наприклад, 12, 14 або 16 біт).
2. Вибірка команди з пам'яті і її виконання здійснюється за один цикл (такт) синхронізації, що ілюструється рис. 3.4.

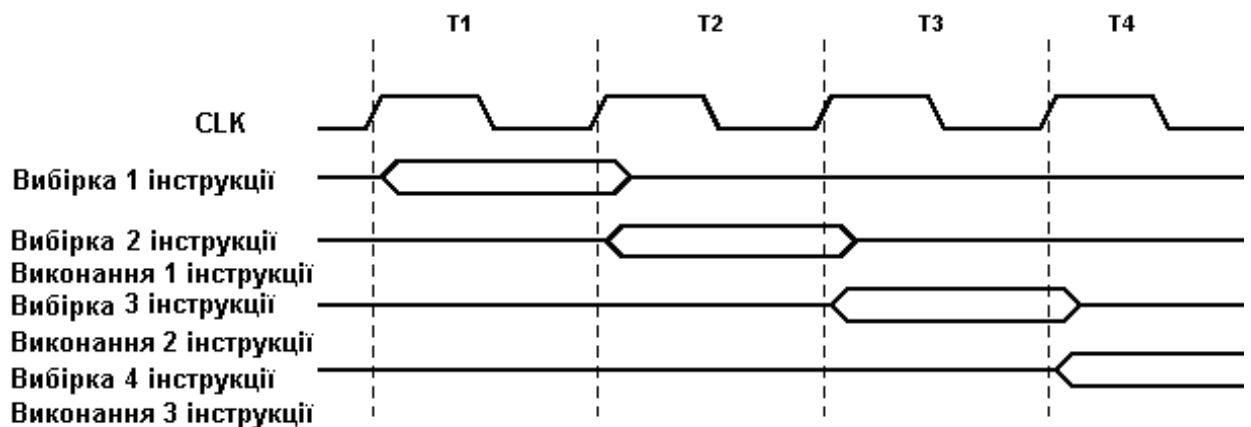


Рис. 3.4. Паралельні вибірки і виконання інструкцій

3. Система команд процесора припускає можливість рівноправного використання всіх реєстрів процесора. У МК із RISC-процесором усі реєстри (часто й акумулятор) розташовуються по адресах, що явно задаються. Це забезпечує додаткову гнучкість при виконанні ряду операцій.

На перший погляд, МК із RISC-процесором повинні мати більш високу продуктивність у порівнянні з CISC МК при одній і тій же тактовій частоті

внутрішньої магістралі ВКМ. Однак на практиці питання про продуктивність більш складне і неоднозначне.

По-перше, оцінка продуктивності МК за часом виконання команд різних систем (RISC і CISC) не зовсім коректна. Звичайно продуктивність МП і МК прийнято оцінювати числом операцій пересилання «регістр-регістр», що можуть бути виконані протягом однієї секунди. У МК із CISC-процесором час виконання операції «регістр-регістр» складає від 1 до 3 циклів, що, здавалося б, уступає продуктивності МК із RISC-процесором. Однак прагнення до скорочення формату команд RISC-процесора приводить до змушеного обмеження числа доступних в одній команді регістрів. Так, наприклад, системою команд МК PIC16 передбачена можливість пересилання результату операції тільки в один із двох регістрів — регістр-джерело операнда або робочий регістр. Таким чином, операція пересилання вмісту одного з доступних регістрів в іншій (не джерело операнда і не робочий) потребує використання двох команд. Така необхідність часто виникає при пересиланні вмісту одного з регістрів загального призначення (РЗП) в один з портів МК. У той же час, у системі команд більшості CISC-процесорів присутні команди пересилання вмісту РЗП в один з портів введення-виведення. Тобто більш складна система команд іноді дозволяє реалізувати більш ефективний спосіб виконання операції.

По-друге, оцінка продуктивності МК по швидкості пересилання «регістр-регістр» не враховує особливостей конкретного реалізованого алгоритму керування. Так, при розробці швидкодіючих пристроїв автоматизованого керування основну увагу варто приділяти часу виконання операцій множення і розподілу при реалізації рівнянь різних передаточних функцій. А при реалізації пульта дистанційного керування побутовою технікою варто оцінювати час виконання логічних функцій, що використовуються при опитуванні клавіатури і генерації послідовної кодової посилки керування. Тому в критичних ситуаціях, що вимагають високої швидкодії, варто оцінювати продуктивність на множині тих операцій, що переважно використовуються в алгоритмі керування і мають обмеження за часом виконання.

По-третє, необхідно ще враховувати, що зазначені в довідкових даних на МК частоти синхронізації звичайно відповідають частоті кварцового резонатора, що підключається, у той час як тривалість циклу центрального процесора визначається частотою обміну по ВКМ. Співвідношення цих частот індивідуально для кожного МК і повинно бути прийняте в розрахунок при порівнянні продуктивності різних моделей контролерів.

### RISC-процесори 3-го покоління

Найбільшими розробниками RISC-процесорів вважаються Sun Microsystems (архітектура SPARC - Ultra SPARC), IBM (багатокристалльні процесори Power, однокристалльних PowerPC - PowerPC 620), Digital Equipment (Alpha - Alpha 21164), Mips Technologies (сімейство Rxx00 - R 10000), а також Hewlett-Packard (архітектура PA-RISC - PA-8000). Всі RISC-процесори третього покоління:

- є 64-х розрядними і суперскалярної (запускаються не менше 4-х команд за такт);
- мають вбудовані конвеєрні блоки арифметики з плаваючою точкою;
- мають багаторівневу кеш-пам'ять.

Більшість RISC-процесорів кешує попередньо дешифровані команди;

- виготовляються по КМОП-технології з 4 шарами металізації.

Для обробки даних застосовується алгоритм динамічного прогнозування розгалужень і метод перепризначення регістрів, що дозволяє реалізувати позачергове виконання команд.

Підвищення продуктивності RISC-процесорів досягається за рахунок підвищення тактової частоти і ускладнення схеми кристала. Представниками першого напрямку є процесори Alpha фірми DEC, найбільш складними залишаються процесори компанії Hewlett-Packard.

Зменшення набору машинних команд в RISC-архітектурі дозволило розмістити на кристалі обчислювального ядра велика кількість регістрів загального призначення. Збільшення кількості регістрів загального призначення дозволило мінімізувати звернення до повільної оперативної пам'яті, залишивши для роботи з RAM тільки операції читання даних з оперативної

пам'яті в регістр і запис даних з регістра в оперативну пам'ять, всі інші машинні команди використовують в якості операндів регістри загального призначення.

Основними перевагами RISC-архітектури є наявність наступних властивостей:

1. Велика кількість регістрів загального призначення.
2. Універсальний формат всіх мікрооперацій.
3. Рівна час виконання всіх машинних команд.
4. Практично всі операції пересилки даних здійснюються за маршрутом регістр-регістр.

Рівний час виконання всіх машинних команд дозволяють обробляти потік командних інструкцій з конвеєрним принципом, тобто виконується синхронізація апаратних частин з урахуванням послідовної передачі управління від одного апаратного блоку до іншого.

Апаратні блоки в RISC-архітектурі:

Блок завантаження інструкцій включає в себе наступні складові частини: блок вибірки інструкцій з пам'яті інструкцій, регістр інструкцій, куди поміщається інструкції після її вибірки і блок декодування інструкцій. Цей ступінь називається щаблем вибірки інструкцій.

Регістри загального призначення спільно з блоками управління регістрами утворюють другий ступінь конвеєра, що відповідає за читання операндів інструкцій. Операнди можуть зберігатися в самій інструкції або в одному з регістрів загального призначення. Цей ступінь називається щаблем вибірки операндів.

Арифметико-логічний пристрій і, якщо в даній архітектурі реалізований, акумулятор, разом з логікою управління, яка, виходячи з вмісту регістра інструкцій, визначає тип виконуваної мікрооперації. Джерелом даних крім регістру інструкцій може бути лічильник команд, при виконанні мікрооперацій умовного або безумовного переходу. Дана ступінь називається виконавчої щаблем конвеєра.

Набір складається з регістрів загального призначення, логіки записи і

іноді з RAM утворюють ступінь збереження даних. На цьому ступені результат виконання інструкцій записуються в регістри загального призначення або в основну пам'ять.

В даний час RISC-процесори отримали широке поширення. Сучасні RISC-процесори характеризуються наступним[11]:

- Спрощеним набором команд;
- Використовуються команди фіксованої довжини та фіксованого формату, прості способи адресації, що дозволяє спростити логіку декодування команд;
- Більшість команд виконуються за один цикл процесора;
- Логіка виконання команд з метою підвищення продуктивності орієнтована на апаратну, а не на мікропрограмних реалізацію, відсутні дії, що ускладнюють структуру процесора і зменшують швидкість його роботи;
- Взаємодія з оперативною пам'яттю обмежується операціями пересилання даних;
- Для обробки, як правило, використовуються трехадресні команди, що крім спрощення дешифрації дає можливість зберігати більше число змінних в регістрах без їх подальшої перезавантаження;
- Створено конвеєр команд, що дозволяє обробляти декілька з них одночасно;
- Наявність великої кількості регістрів;
- Використовується високошвидкісна пам'ять.

У RISC-процесорах обробка машинної команди розділена на декілька ступенів, кожен ступінь обслуговують окремі апаратні засоби та організована передача даних від одного ступеня до наступної. Продуктивність при цьому зростає завдяки тому, що одночасно на різних щаблях конвеєра виконуються декілька команд. Виконання типової команди можна розділити на наступні етапи:

- 1) вибірка команди IF - за адресою, заданому лічильником команд, з пам'яті витягується команда;
- 2) декодування команди ID - з'ясування її змісту, вибірка операндів із регістрів;



- 3) виконання операції EX, при необхідності звернення до пам'яті - обчислення фізичної адреси;
- 4) звернення до пам'яті ME;
- 5) запам'ятовування результату WB.

## РОЗДІЛ 4

### ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО ТЕРМОМЕТРА

#### 4.1 Розробка структурної схеми

У даному дипломному проєкті виконується розробка електронного термометра для автоматичного вимірювання температури радіокомпонентів. Термометр може використовуватись з будь-яким ПК, який має USB вхід. Діапазон вимірюваних температур від  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ .

Структурна схема електронного термометра показана на рисунку 4.1.

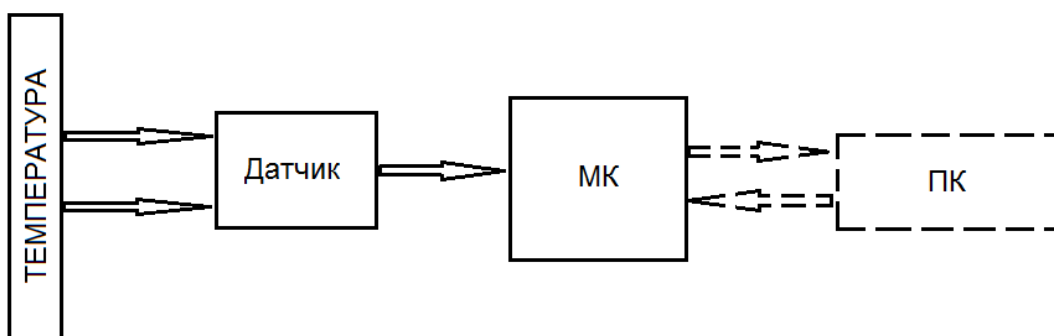


Рис. 4.1 - Структурна схема електронного термометра

Даний прилад складається з пристрою вводу інформації, пристрою обробки і пристрою відображення у вигляді ПК. Для відображення інформації можна використовувати будь-який ПК, що має USB вихід. Інформація надходить через датчик температури фірми Dallas – DS18B20. Обробка наданих даних проводиться запрограмованим спеціальним чином мікроконтролером фірми ATMEL ATtiny2313.

Для роботи даного термометру необхідно під'єднати живлення напругою у 1.8 – 5.5В. В даному випадку ми використовуємо USB вихід ПК з постійною напругою.

## **4.2 Мікроконтролер ATtiny2313**

AVR – найобширніша виробнича лінія серед інших флеш- мікроконтролерів корпорації Atmel. Фірма Atmel представила свій перший 8-розрядний флеш-микроконтроллер в 1993 році і з тих пір безперервно удосконалює свою технологію. Прогрес даної технології спостерігався в зниженні питомого енергоспоживання (мА/МГц), розширення діапазону живлячої напруги (до 1.8 В) для продовження ресурсу батарейних систем, збільшенні швидкодії до 16 млн. операцій в секунду, реалізації функції самопрограмування, вдосконаленні і розширенні кількості периферійних модулів, встроюваних спеціалізованих пристроїв (радіочастотний передавач, USB – контролер, драйвер РКІ, програмована логіка, контроллер DVD, пристрої захисту даних) і ін.

Успіх AVR-мікроконтролерів пояснюється можливістю простого виконання проекту з досягненням необхідного результату в найкоротші терміни, чому сприяє доступність великої кількості інструментальних засобів проектування, що поставляються, як безпосередньо корпорацією Atmel, так і сторонніми виробниками. Ведучі сторонні виробники випускають повний спектр компіляторів, програматорів, асемблерів, отладчиков, роз'ємів і адаптерів. Відмінною рисою інструментальних засобів від Atmel є їх невисока вартість.

ATtiny2313 - низькоспоживаючі 8 бітними КМОП мікроконтролер з AVR RISC-архітектурою. Виконуючи команди за один цикл, ATtiny2313 досягає продуктивності 1 MIPS при частоті генератора, що задає 1 МГц, що дозволяє розробнику оптимізувати ставлення споживання до продуктивності.

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

дозволяє забезпечити в десятки разів більшу продуктивність, ніж стандартна CISC архітектура[12].

АТtiny2313 має такі характеристики: 2 КБ програмованої в системі

флеш пам'ять програми, 128 байтний EEPROM пам'ять даних, 128 байтного SRAM (статичний ОЗП), 18 ліній введення - виведення загального застосування, 32 робочих регістра загального призначення, однопровідна інтерфейс для вбудованого отладчика, два гнучких таймера / лічильника зі схемами порівняння, внутрішні і зовнішні джерела переривання, послідовний програмований USART, універсальний послідовний інтерфейс з детектором стартового умови, програмований сторожовий таймер з вбудованим генератором і три програмно ініціалізуємих режиму зниженого споживання. У режимі Idle зупиняється ядро, але ОЗУ, таймери / лічильники і система переривань продовжують функціонувати. У режимі Power-вниз регістри зберігають своє значення, але генератор зупиняється, блокуючи всі функції приладу до наступного переривання або апаратного скидання. В очікування режимі задаючий генератор працює, в той час як інша частина приладу не діє. Це дозволяє дуже швидко запустити мікропроцесор, зберігаючи при цьому в режимі бездіяльності потужність.

Прилад виготовлений за високощільної енергонезалежної технології виготовлення пам'яті компанії Atmel. Вбудована флеш ISP дозволяє перепрограмувати пам'ять програми в системі через послідовний SPI інтерфейс або звичайним програматором енергонезалежній пам'яті. Об'єднавши в одному кристалі 8 - бітове RISC ядро з самопрограмирующей в системі флеш пам'яттю, АТtiny2313 став потужним мікроконтроллером, який дає велику гнучкість розробнику мікропроцесорних систем.

Основні характеристики:

- 2 КБ програмованої в системі FLASH пам'яті;
- 128-байтну EEPROM пам'ять даних;
- 128 байтний SRAM простір;

- 18 ліній вводу-виводу загального призначення;
- 32 загальних регістри;
- однодротовий інтерфейс для вбудованого налагоджувача;
- 2 гнучких таймера/лічильника з схемами порівняння, внутрішні та зовнішні джерела преривань;
- послідовний програмований USART;
- універсальний послідовний інтерфейс з детектором стартової умови;
- програмований сторожовий таймер з вбудованим генератором і три програмно ініційованих режими зниженої енергоємності.

Блок-схема мікроконтролера показана на рисунку 4.2.

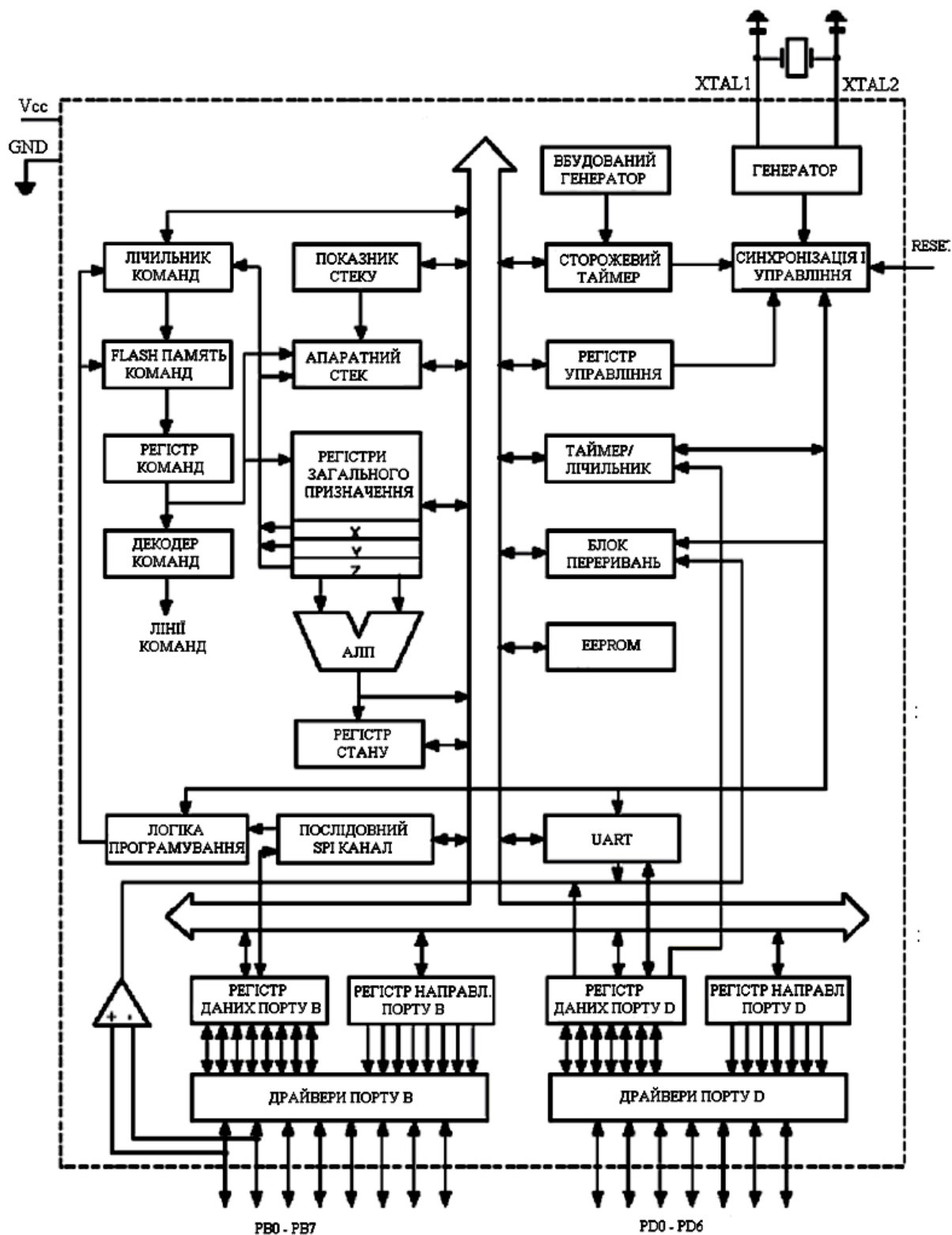


Рис. 4.2- Блок-схема мікроконтролера ATtiny2313

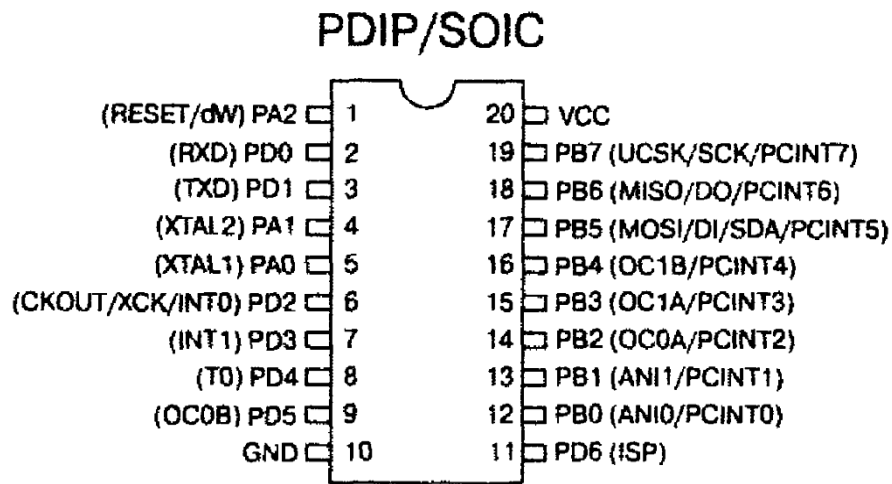


Рис. 4.3 - Розташування виводів

#### 4.2.1 Опис виводів

<b>VCC</b>	Напруга живлення
<b>GND</b>	Загальний привід
<b>Port A (PA2..PA0)</b>	Порт А – трьох розрядний двонаправлений порт вводу/виводу. Кожна з ліній порту має можливість підключення до внутрішнього резистора навантаження. Підключення резистора виробляється програмною дорогою лише в тому випадку, якщо даний конкретний вивід знаходиться в режимі введення. Коли резистор підключений, він створює вихідний витікаючий струм для зовнішніх пристроїв, що формують низький логічний рівень. Вихідний буфер кожної лінії порту А має симетричний каскад з високою здатністю навантаження. Після системного скидання всі виводи порту А переходять у високоімпедантний стан (режим вводу без резистора навантаження ) навіть в тому випадку, якщо системний генератор не працює. Всі виводи порту А, окрім своїх основних функцій, мають також і альтернативу. Всі альтернативні функції виводів описані нижче.
<b>Port B (PB7..PB0)</b>	Порт В – восьмирозрядний двонаправлений порт вводу-виводу Кожна з ліній порту має можливість підключен-

	<p>ня внутрішнього резистора навантаження. Підключення резистора виробляється програмною дорогою лише в тому випадку, якщо даний конкретний вивід знаходиться в режимі вводу. Коли резистор підключений, він створює вихідний витікаючий струм для зовнішніх пристроїв, що формують низький логічний рівень. Вихідний буфер кожної лінії порту A має симетричний каскад з високою здатністю навантаження. Після системного скидання всі виводи порту B переходять у високоімпедантний стан (режим вводу без резистора навантаження) навіть в тому випадку, якщо системний генератор не працює. Всі виводи порту B, окрім своїх основних функцій, мають також і альтернативні. Всі альтернативні функції виводів описані нижчим.</p>
<p><b>Port D</b> <b>(PD6..PDO)</b></p>	<p>Порт D – семирозрядний двонаправлений порт вводу-виводу. Кожна з ліній порту має можливість підключення внутрішнього резистора навантаження. Підключення резистора виробляється програмною дорогою лише в тому випадку, якщо даний конкретний вивід знаходиться в режимі вводу. Коли резистор підключений, він створює вихідний витікаючий струм для зовнішніх пристроїв, що формують низький логічний рівень. Вихідний буфер кожної лінії порту A має симетричний каскадс високою здатністю навантаження. Після системного скидання всі виводи порта переходять у високоімпедантний стан (режим вводу без завантажувального резистора) навіть в тому випадку, якщо системний генератор не працює. Всі виводи порту D, окрім своїх основних функцій, мають також і альтернативні. Всі альтернативні функції виводів описані нижчим.</p>
<p><b>RESET</b></p>	<p>Вхід скидання.</p>

	Низький рівень на цьому вході з тривалістю не менше мінімально допустимого значення приведе до повного скидання мікроконтролера навіть у тому випадку, коли не працює тактовий генератор.. Коротший імпульс не гарантує нормального скидання. Вхід скидання має альтернативні функції лінії PA2 і лінії dW.
<b>XTAL1</b>	Інвертуючий вхід для кварцевого резонатора, вхід зовнішнього генератора. Вхід XTAL1 має альтернативну функцію. Він може використовуватися як лінії PA0.
<b>XTAL2</b>	Вихід на зовнішній резонатор. Виведення XTAL2 має альтернативну функцію. Він може використовуватися як лінія PA1

#### 4.2.2 Регістри загального призначення

Регістровий файл швидкого доступу містить 32 8-розрядних регістра загального призначення, доступ до яких здійснюється за один машинний цикл. Тому за один машинний цикл виконується одна операція АЛП. Два операнда вибираються з регістрового файлу, виконується операція, результат її записується в регістровий файл – усе це за один машинний цикл.

Всі команди оперуючі регістрами прямо адресуються до кожного з регістрів за один машинний цикл. Виключення – п'ять команд оперуючих з константами SBCI, SUBI, CPI, ANDI, ORI і команда LDI, що завантажує регістр константою. Ці команди працюють тільки із другою половиною регістрового файлу – R16..R31. Команди SBC, SUB, CP, AND і OR, також як і всі інші, застосовні до всього регістрового файлу. Кожному регістру привласнена адреса в просторі даних, вони відображаються на перші 32 осередки ОЗП. Хоча регістровий файл фізично розміщений поза ОЗП, подібна організація пам'яті дає гнучкий доступ до регістрів. Регістри X, Y і Z можуть використовуватися для індексації будь-якого регістра.

Шість із 32 регістрів, регістри R26..R31, можна використовувати як три 16-розрядних покажчики в адресному просторі даних, що дає можливість ви-



користовувати високоефективну адресну арифметику ( 16-розрядні регістри X, Y і Z). Один із трьох адресних показників (регістр Z) можна використовувати для адресації таблиць у пам'яті програм.

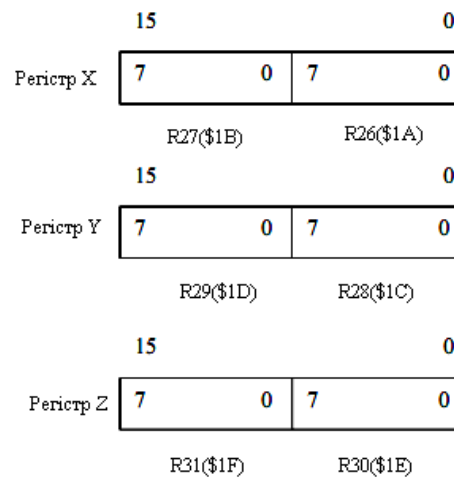


Рис.4.4 - Показники регістрів

При різних режимах адресації ці регістри можуть використовуватися як фіксовану адресу, для адресації з автоінкрементом або з автодекрементом.

### 4.2.3 Арифметико-логічний пристрій

Високоефективне АЛП працює в прямому зв'язку зі всіма 32 регістрами загального призначення. За один цикл тактового генератора виконується арифметична операція між двома РОН або між РОН і безпосередньо вказаною константою. Всі операції АЛП розділені на три головні категорії:

- арифметичні;
- логічні;
- операції з розрядами.

Особливістю архітектури є те, що при виконанні арифметичних операцій всі операнди можуть розглядатися як числа без знаку, так і числа із знаком.

### 4.2.4. Пам'ять

Тепер розглянемо різні види пам'яті мікроконтролера ATtiny2313. Архітектура AVR містить два основних види пам'яті:

- пам'ять даних;
- пам'ять програм.

Крім того, мікросхема ATtiny2313 має Flash-пам'ять для довготимчасового зберігання даних. Всі три види пам'яті являють собою безперервні області з лінійно зростаючими адресами.

#### **4.2.5 Завантажувальна пам'ять програм**

ATtiny2313 містить 2кб завантажувальної Flash-пам'яті для зберігання програм. Оскільки всі команди займають одне 16- або 32-розрядне слово, то Flash – пам'ять організована як 1Kx16. Flash -пам'ять витримує не менш 1000 циклів перезапису. Програмний лічильник має ширину 10 біт і дозволяє адресуватися до 1024 слів програмної Flash -пам'яті.

Таблиці констант, які необхідно розташовувати в пам'яті програм для економічного використання ОЗП, можуть розташовуватися в діапазоні адрес від 0 до 2К. Для цього використовується команда LPM.

#### **4.2.6 EEPROM пам'ять даних**

ATtiny2313 містить 128 байт з електричної стираємої енергонезалежної пам'яті (EEPROM). EEPROM організована як окрема область даних, кожний байт якої може бути прочитаний і перезаписаний. EEPROM витримує не менш 100000 циклів запису/стирання. Доступ до енергонезалежної пам'яті даних задається регістрами адреси, даних і керування.

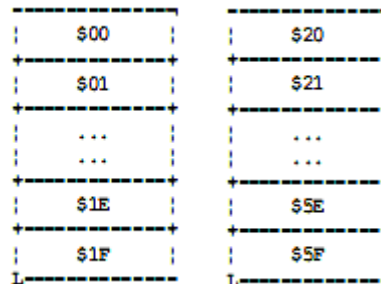
#### **4.2.7 Статичне ОЗП даних**

На наступному рисунку показана організація пам'яті даних в ATtiny2313.

Регістровий файл                      Область адрес даних



### Регістри вводу/виводу



### Вбудоване ОЗП

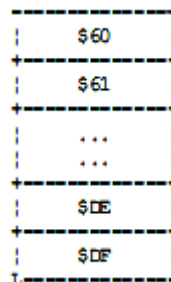


Рис.4.5 Розподіл пам'яті даних

224 комірки пам'яті містять у собі регістровий файл, пам'ять вводу/виводу й статичне ОЗП даних. Перші 96 адрес використовуються для регістрового файлу і пам'яті вводу/виводу, а наступні 128 – для ОЗП даних.

При звертанні до пам'яті використовуються п'ять різних режимів адресації:

- прямій;
- безпосередній зі зсувом;
- безпосередній;
- безпосередній з попереднім декрементом;
- безпосередній з постінкрементом.

Регістри R26..R31 регістрового файлу використовуються як покажчики для безпосередньої адресації.

Пряма адресація має доступ до всієї пам'яті даних.

Безпосередня адресація зі зсувом використовується для доступу до 63 осередків, базова адреса яких задається вмістом регістрів Y або Z. Для безпосередньої адресації з інкрементом і декрементом адреси використовуються адресні регістри X, Y і Z.

За допомогою кожного із цих режимів виробляється доступ до всіх 32 регістрам загального призначення, 64 регістрам вводу/виводу й 128 осередкам ОЗП.

#### 4.3 Датчик температури Dallas DS18B20

У якості термодатчика у даному термометрі будемо використовувати датчик фірми “Dallas” модель DS18B20(рис. 4.6)

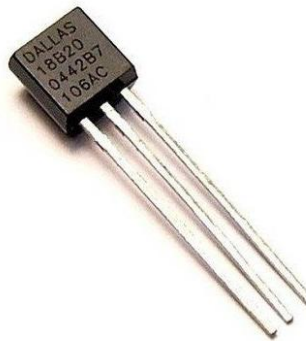


Рис. 4.6 - Датчик температури Dallas DS18B20

Датчик DS18B20 випускається у двох модифікаціях - у корпусі SOIC (8 виводів) і в корпусі TO -92. Такі датчики дуже зручно використовувати для вимірювання температури в різних місцях, які знаходяться на великій площі..

Цей датчик забезпечує вимірювання температури в діапазоні - 55..+125°C з дискретністю 0.5°C.

За допомогою додаткових обчислень дискретність представлення температури можна зменшити, в нашому випадку вона рівна 0.1°C.

Найпривабливішим є те, що такий термометр вже відкалібрований на заводі, гарантована точність складає  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  в діапазоні  $-10...+85^{\circ}\text{C}$  і  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  у всьому діапазоні робочих температур. Не дивлячись на обмежену абсолютну точність, мала дискретність представлення температури є вельми бажаною,

оскільки дуже часто на практиці потрібні відносні вимірювання. DS18B20 допускає напругу живлення від +3 до +5.5В. В режимі очікування споживаний струм близький до нуля (менш 1мкА), а під час перетворення температури він рівний приблизно 1мА. Процес перетворення триває максимум 750мс.

Принцип дії цифрових датчиків температури фірми "Dallas" заснований на підрахунку кількості імпульсів, що виробляються генератором з низьким температурним коефіцієнтом в тимчасовому інтервалі який формується генератором з великим температурним коефіцієнтом. Лічильник ініціалізувався значенням, відповідним  $-55^{\circ}\text{C}$  (мінімальній температурі, що вимірюється). Якщо лічильник досягає нуля перед тим, як закінчується часовий інтервал (це означає, що температура більше  $-55^{\circ}\text{C}$ ), то регістр температури, який також ініціалізував значенням  $-55^{\circ}\text{C}$ , інкрементується.

Одночасно лічильник ініціалізується новим значенням, яке задається схемою формування нахилу характеристики. Ця схема потрібна для компенсації параболічної залежності частот генераторів від температури. Лічильник знову починає працювати, і якщо він знову досягає нуля, коли інтервал ще не закінчений процес повторюється знову. Схема формування нахилу завантажує лічильник значеннями, які відповідають кількості імпульсів генератора на один градус Цельсія для кожного конкретного значення температури. По закінченню процесу перетворення регістр температури міститиме значення температури.

Для DS18B20 температура подається у вигляді 9-бітового значення в додатковому коді. Оскільки це значення займає 2 байти, всі розряди старшого байта рівні знаковому розряду. Дискретність представлення температури складає  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Залежність вихідного коду від температури приведена в таблиці 4.1.

Більш висока роздільна здатність може бути отримана, якщо провести додаткові обчислення на основі значень COUNT\_REMAIN (значення, що залишилося в лічильнику в кінці вимірювання) і COUNT\_PER\_C (кількість імпульсів на один градус для даної температури), які доступні. Для обчислень

вимагається взяти лічене значення температури і відкинути молодший біт. Отримане значення назовемо TEMP\_READ.

Дійсне значення температури може бути обчислено за формулою 4.1:

$$TEMPERATURE = TEMP\_READ - 0.25 + (COUNT\_PER\_C - COUNT\_REMAIN) / COUNT\_PER\_C \quad (4.1)$$

Залежність вихідного коду від температури. Таблиця 4.1

Температура	Вихідний код(двійковий)		Вихідний код (шістнадцятковий)
	Старший байт	Молодший байт	
+125°C	0000 0000	1111 1010	00FAh
+25°C	0000 0000	0011 0010	0032h
+0.5°C	0000 0000	0000 0001	0001h
0°C	0000 0000	0000 0000	0000h
-0.5°C	1111 1111	1111 1111	FFFFh
-25°C	1111 1111	1100 1110	FFCEh
-55°C	1111 1111	1001 0010	FF92h

В нашому випадку такий розрахунок дозволяє отримати дискретність представлення температури 0,1°C.

Кожний екземпляр DS18B20 має унікальний 48-бітовий номер, записаний за допомогою лазера в ПЗП в процесі виробництва.

Цей номер використовується для адресації пристроїв. Окрім серійного номера в ПЗП міститься код сімейства (для DS18B20 це 10h) і контрольна сума.

Окрім ПЗП DS18B20 має проміжне ОЗП об'ємом 8 байт, плюс два байти енергозалежної пам'яті.

Байти TH і TL є температурними порогоми, з якими порівнюються 8 біт кожного виміряного значення температури (молодший біт відкидається). За допомогою спеціальної команди можна організувати сигналізацію виходу

температури за межі цих порогів. Якщо така функція не потрібна, байти TH і TL можна використовувати для зберігання будь-яких даних користувача.

Зчитування значення вимірної температури, а також передача команди початку перетворення і інших команд проводиться за допомогою 1-дротяного інтерфейсу (1-Wire™) фірми DALLAS. На основі цього інтерфейсу фірма DALLAS навіть створила так звану мережу microLAN (або &micro;LAN). Для роботи в цій мережі випускається цілий ряд пристроїв, таких як ключі, АЦП, термометри, годинник реального часу, цифрові потенціометри. Протокол, який використовується 1-дротяним інтерфейсом, достатньо простий. У будь-який момент часу на 1-дротяній шині можна виділити пристрій-майстер, яким може бути мікропроцесор або комп'ютер, і підлеглий пристрій. У нашому випадку це мікросхема термометра. Оскільки у нас на шині присутній тільки майстер і всього один підлеглий пристрій, можна опустити все те, що пов'язано з адресацією пристроїв. В результаті вимагається знати лише протокол передачі байтів, які можуть бути командами або даними.

Спочатку розглянемо апаратну конфігурацію 1-дротяна шина є двонаправленою. У кожного 1-дротяного пристрою до шини підключений вхід приймача і вихід передавача з відкритим стоком. Відкритий стік дозволяє підключати до шини безліч пристроїв, забезпечуючи логіку «монтажне або».

Генератор струму 5мкА забезпечує на вході 1-дротяного пристрою низький логічний рівень, коли шина не підключена. Оскільки лінія тактового сигналу відсутня, обмін є синхронним. Це означає що в процесі обміну потрібно достатньо точно витримувати необхідні часові співвідношення.

1-дротова шина оперує з TTL-рівнями, тобто логічна одиниця представлена рівнем напруги близько 5В, а логічний нуль – напругою близько 0В. В початковому стані на лінії присутній рівень логічної одиниці, який забезпечується підтягаючим резистором номіналом приблизно в 5кОм.

Ініціатором обміну по 1-дротяній шині завжди виступає майстер. Всі пересилки починаються з процесу ініціалізації.

Майстер посилає імпульс скидання (reset pulse) – сигнал низького рівня тривалістю не менше 480 мкс.

За імпульсом скидання слідує відповідь підлеглого пристрою (presence pulse) – сигнал низького рівня тривалістю 60 – 240 мкс, який генерується через 15 – 60 мкс після завершення імпульсу скидання.

Відповідь підлеглого пристрою дає майстру зрозуміти, що на шині присутній термометр і він готовий до обміну. Після того, як майстер знайшов відповідь, він може передати термометру одну з команд.

Передача ведеться шляхом формування майстром спеціальних часових інтервалів (time slots). Кожний часовий інтервал служить для передачі одного біта. Першим передається молодший біт. Інтервал починається імпульсом низького рівня тривалість якого лежить в межах 1 – 15 мкс. Оскільки перехід з одиниці в нуль менш чутливий до місткості шини (він формується відкритим транзистором, тоді як перехід з нуля в одиницю формується підтягаючим резистором) саме цей перехід використовують 1-дротяні пристрої для синхронізації з майстром. В підлеглому пристрої запускається схема тимчасової затримки, яка визначає момент прочитування даних. Номінальне значення затримки рівно 30 мкс, проте воно може коливатися в межах 15 - 60 мкс. За імпульсом низького рівня слідує передаваний біт. Він повинен утримуватися майстром на шині протягом 60 - 120 мкс від початку інтервалу. Часовий інтервал завершується перекладом шини в стан високого рівня на якийсь час не менше 1 мкс. Потрібно відзначити, що обмеження на цей час зверху не накладається. Аналогічним чином формуються часові інтервали для всіх передаваних бітів.

Першою командою, яку повинен передати майстер для DS18B20 після ініціалізації, є одна з команд функцій ПЗП. Всього DS18B20 має 5 команд функцій ПЗП:

1) Read ROM [33h]. Ця команда дозволяє прочитати вміст ПЗП. У відповідь на цю команду DS18B20 передає 8-бітовий код сімейства (10h), потім 48-бітовий серійний номер, а потім 8-бітову CRC для перевірки правильності прийнятої інформації.



2) Match ROM [55h]. Ця команда дозволяє адресувати на шині конкретний термометр. Після цієї команди майстер повинен передати потрібний 64-бітовий код, і лише той термометр, який має такий код, «відгукуватиметься» до наступного імпульсу скидання.

3) Skip ROM [CCh]. Ця команда дозволяє пропустити процедуру порівняння серійного номера і тим самим заощадити час в системах, де на шині є всього один пристрій.

4) Search ROM [F0h]. Ця досить складна у використуванні команда дозволяє визначити серійні номери всіх термометрів, присутніх на шині.

5) Alarm Search [ECh]. Ця команда аналогічна попередній, але «відгукуватися» будуть тільки ті термометри, у яких результат останнього вимірювання температури виходить за передвстановлені межі TH та TL.

Оскільки у нас всього один пристрій, найбільш відповідної для нас функцією є функція Skip ROM. Окрім неї ще може бути корисною функція Read ROM яка дозволяє ідентифікувати підключене на шину пристрій за його кодом сімейства і серійним номером.

Прийнявши команду Read ROM, DS18B20 буде готовий передати 64-бітовий код, який майстер повинен прийняти.

При прийомі даних від підлеглого пристрою тимчасові інтервали для бітів, що приймаються, теж формує майстер. Інтервал починається імпульсом низького рівня тривалістю 1 - 15 мкс. Потім майстер повинен звільнити шину щоб дати можливість термометру вивести біт даних. По переходу з одиниці в нуль DS18B20 виводить на шину біт даних і запускає схему часової затримки, яка визначає, як довго біт даних буде присутній на шині. Цей час лежить в межах 15 - 60 мкс. Для того, щоб дані на шині, яка завжди володіє деякою місткістю, гарантований встановилися, потрібен якийсь час.

Прийом байта починається з молодшого біта. Спочатку йде байт коду сімейства. За кодом сімейства йде 6 байт серійного номера, починаючи з молодшого. Потім йде байт контрольної суми (CRC). В обчисленні байта контрольної суми беруть участь перші 7 байт, або 56 передаваних біт. Для обчислення здійснюються за формулою 4.2:

$$CRC = X_8 + X_5 + X_4 + 1 \quad (4.2)$$

Після прийому даних майстер повинен обчислити контрольну суму і порівняти значення, що вийшло, з переданою CRC. Якщо ці значення співпадають, значить, прийом даних пройшов без помилок. Можна також обчислити контрольну суму для всіх 64 прийнятих біт яка в цьому випадку повинна бути рівний нулю. Алгоритм використовує операції зсуву «виключне або».

Після обробки однієї з команд функцій ПЗП, DS18B20 здатний сприймати ще декілька команд:

- Write Scratchpad [4Eh]. Ця команда дозволяє записати дані в проміжне ОЗУ DS18B20.
- Read Scratchpad [BEh]. Ця команда дозволяє рахувати дані з проміжного ОЗУ.
- Copy Scratchpad [48h]. Ця команда копіює байти TH і TL з проміжного ОЗУ в енергозалежну пам'ять. Ця операція вимагає близько 10мс.
- Convert T [44h]. Ця команда запускає процес перетворення температури.
- Recall E2 [B8h]. Ця команда діє зворотним чином по відношенню до команди Write Scratchpad, тобто вона дозволяє рахувати байти TH та TL з енергозалежної пам'яті в проміжне ОЗП. При включенні живлення ця команда виконується автоматично.
- Read Power Supply [B4h]. Ця команда дозволяє перевірити, чи використовує DS18B20 паразитне живлення. Річ у тому, що DS18B20 можна підключати всього за допомогою двох дротів, в цьому випадку для живлення використовується лінія даних. Особливості цього режиму ми розглядати не будемо.

При використанні DS18B20 тільки для вимірювання температури потрібні всього дві з цих команд: Convert T і Read Scratchpad.

Послідовність дій при вимірюванні температури повинна бути наступною:

- Посилаємо імпульс скидання і приймаємо відповідь термометра.
- Посилаємо команду Skip ROM [CCh];

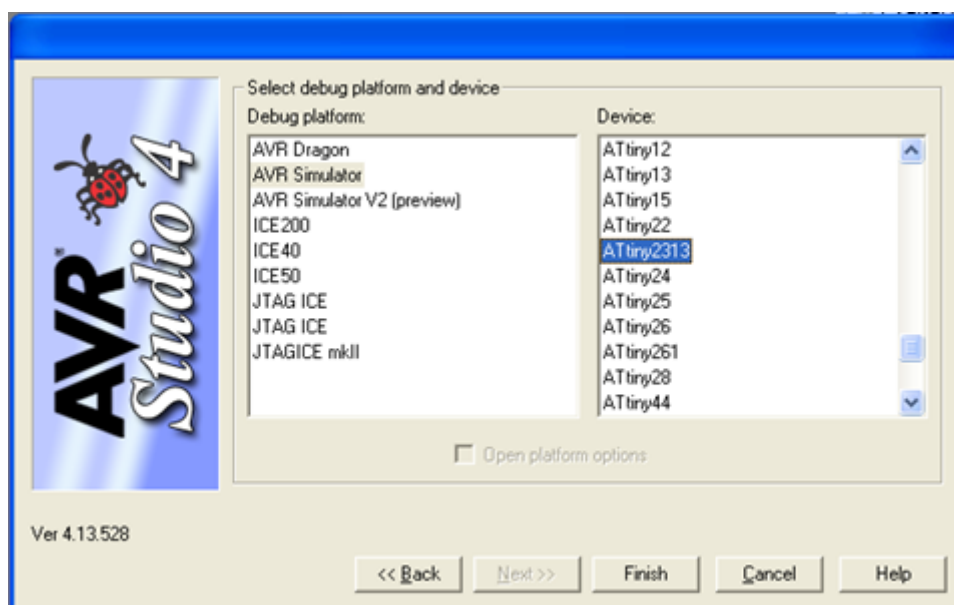
- Посилаємо команду Convert T [44h];
- Формуємо затримку мінімум 750мс;
- Посилаємо імпульс скидання і приймаємо відповідь термометра;
- Посилаємо команду Skip ROM [CCh];
- Посилаємо команду Read Scratchpad [BEh];
- Читаємо дані з проміжного ОЗУ (8 байт) і CRC;
- Перевіряємо CRC, і якщо дані лічені вірно, обчислюємо температуру.

#### 4.4 Створення програми

Для роботи з мікроконтролерами AVR доцільно використовувати програму AVR Studio. Це професійна інтегроване середовище розробки (Integrated Development Environment – IDE), призначена для написання і налагодження прикладних програм для AVR мікропроцесорів в середовищі Windows 9x/NT/2000. AVR Studio 4 містить асемблер і симулятор.

Для створення проекту потрібно вибрати Project→New Project, знову з'явиться вікно для створення проект. Необхідно вибрати пункт Atmel AVR Assembler і ввести назву проекту Project Name. Автоматично заповнюється поле введення Initial file. У поле Location необхідно вказати місце розташування (папку) проекту на диску.

Далі потрібно визначити платформу програмування – вибрати Debug platform = AVR Simulator; Device = ATtiny2313(рис. 4.7).



Нажати кнопку Finish. Треба уважно стежити за тим, щоб всі каталоги й підкаталоги розташування проекту були записані латинськими буквами.

Структура програми. Далі робота триває у вікні, назва якого збігається з назвою проекту. Це вікно відповідає головному модулю проекту.

У вікно головного модуля вводиться текст програми відповідно до правил написання програм мовою асемблер:

- Коментарі - це рядки (або частина рядка), які починаються зі знака «крапка з коми - ; »
- Директиви починаються зі знака «крапка - . » і пишуться без відступу від лівого краю тексту.
- Команди пишуться з відступом (натискання клавіші Tab).

Варто підкреслити, що асемблер один із самих абстрактних мов програмування, оскільки в основному програма управляє процесами пересилання між комірками пам'яті, а засобу керування обмежуються умовними й безумовними переходами. Тому доводиться використовувати велику кількість коментарів – на початковому етапі доводиться коментувати практично кожний рядок програми[13].

У вікно головного модуля необхідно ввести текст, який приведений у Додатку А.

Особливістю програмування мікроконтролерів є той факт, що програма не носить універсального характеру, а пишеться для конкретного типу пристрою. Тому далі директиви (.include) повинні довантажувати файл системних змінних у якому абсолютним адресам пам'яті мікроконтролера привласнюються умовні імена (наприклад, RAMEND – максимальна адреса оперативної пам'яті) і вказувати компіляторіві асемблера які команди він може використовувати для даного типу мікроконтролера (.device). Щоб файл системних змінних автоматично був знайдений системою програмування необхідно в пункті Project→Assembler Options→Additional include file указати шлях:

C:/Programm Files/Atmel/AVR Tools/AvrAssembler2/Appnotes/

Далі нам необхідно за допомогою директиви (.def) дати умовні імена регістрам понадоперативній пам'яті з якими безпосередньо працює процесор.

Всі мови програмування мають багато загального. Не виключення мова асемблера в сучасній версії. Програма структурована й ділиться на розділи:

- Назва – опис мети й дати програми.
- Розділ конкретизації – вказівка типу мікроконтролера через підключається файл, що (\*.inc) і директиву (.device).
- Розділ констант (директива .equ).
- Розділ регістрів (понадоперативна пам'ять процесора в якій виробляються всі операції й команди обробки)
- Розділ змінних (починається з директиви .dseg може зустрічатися в головному й допоміжному модулях програми)
- Розділ програми ( flash-пам'ять). Підрозділяється на розділ переривань, команди організації стека, підключення файлу ініціалізації мікроконтролера й змістовну (робочу) частина програми.
- Розділ допоміжних модулів
- Команда закінчення програми (необов'язкова)

Особливість програм на асемблері є відсутність локальних змінних. Асемблер прямо працює з фізичною пам'яттю мікроконтролера, тому виділення локальних змінних є недоцільним. Саме тому у відмінності від мов високого рівня допоміжні модулі підключаються наприкінці програми, а не на початку.

#### **4.5 Програмування мікроконтролера**

Програмування мікроконтролера здійснюється внутрішньосхемно через послідовний синхронний інтерфейс SPI. У процесі програмування коди команд, записані у формі шістнадцаткових чисел записуються за допомогою послідовності електричних імпульсів у пам'ять програм. Мікроконтролер переходить у режим програмування за допомогою сигналу RESET, що при про-

грамуванні скидається. Після завершення програмування програматор установлює сигнал RESET і мікроконтролер починає виконання програми..

Програмування мікроконтролера (прошивання) зручніше здійснювати за допомогою програми файлового менеджера FAR. В одному з вікон програми потрібно перейти в папку головного проекту й за допомогою командного файлу WriteToChip2313.cmd запустити утиліту AVREAL і знайти файл з розширенням hex.

Дана команда повинна бути уведена в командному рядку й запущена на виконання клавішею ENTER.

Для запису скомпільованої програми безпосередньо в чіп AVR, IDE CodeVision AVR має вбудований In-System AVR Chip Programmer (Внутрішньосхемний програматор чіпів AVR).

Вбудований програматор має два буфери пам'яті:

- буфер FLASH-пам'яті;
- буфер EEPROM-пам'яті.

Програмне забезпечення внутрішньосхемного програматора призначене працювати разом з наступними апаратними програматорами:

- Atmel STK500/AVRISP;
- AVRProg(AVR910);
- Kanda Systems STK200+/300;
- VogelElektronikVTEC-ISP;
- Futurlec JRAVR;
- MicroTronicsATCPU/Mega2000.

За відсутності перерахованих вище фірмових програматорів можна самостійно зібрати програматор по схемі, яка показана на рисунку 4.8.

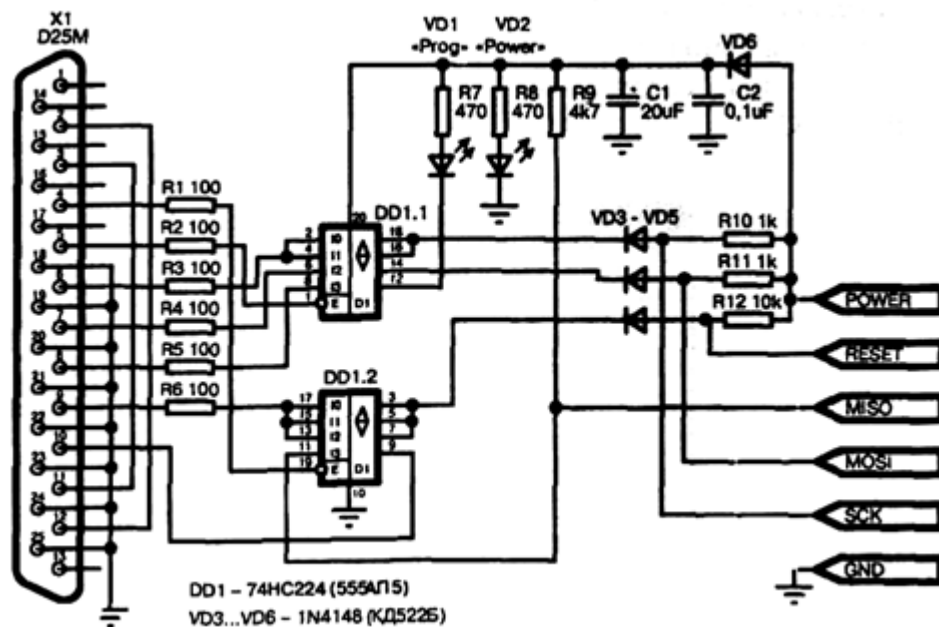


Рис. 4.8 Схема програматора

Аналогічним програматором комплектуються налагоджувальні плати STK200/STK300. X1 слід підключити до вільного LPT-порту комп'ютера, а вказані справа ланцюги – до відповідних виводів мікроконтролера. Приклад підключення мікроконтролера до програматора до ATtiny2313 показаний на рисунку 4.9.

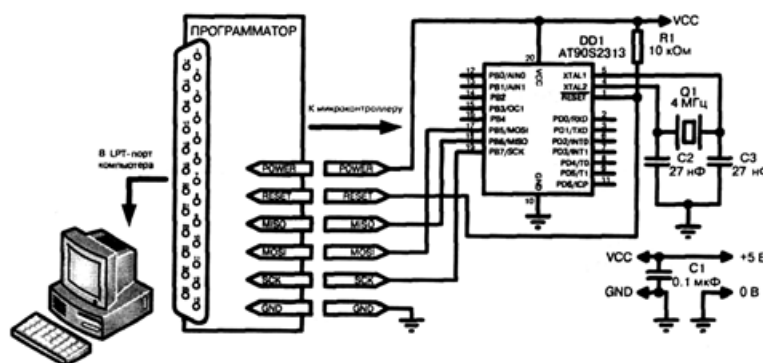


Рис. 4.9 Схема підключення мікроконтролера до програматора

Внутрішньосхемний програматор дозволяє програмувати мікроконтролери, не витягуючи їх з схеми пристрою, що розробляється.

Перед використанням вбудованого програматора слід задати його **Команда Settings → Programmer (Настройки → Програматор)**.

#### 4.6 Опис та робота термометра

Термометр призначений для вимірювання температури радіокомпонентів і відображення на моніторі ПК, може вимірювати температуру як окремих деталей чи поверхонь так і температуру навколишнього середовища.

Термометр призначений для вимірювання температури в діапазоні від  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ .

Для відображення інформації і для живлення термометру використовуємо будь-який ПК з портом USB і програмним забезпеченням, програмою "USB THERM" рис. 4.10.

Для роботи термометру достатньо підключити пристрій до USB входу і комп'ютер знайде його як нове обладнання.

Термометр є HID-пристроєм (Human Interface Device).

Програма працює під операційними системами Windows 98/ME/2000/XP. Написана для компілятора Visual C++ 6 з використанням HID-бібліотек Windows DDK. Основою послужила аналогічна програма Cypress USB-термометр (HIDTHERM).



Рис. 4.10 - Зовнішній вигляд програми



У вікні відображається температура в градусах Цельсія, а при згортанні в трей температура з'являється при наведенні курсору миші на іконку. Колір іконки червоний, якщо температура позитивна, синій - якщо нульова або від'ємна, сірий - термометр не підключений до USB-порту.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці являється системою законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на створення безпечних умов, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. Складовими охорони праці є законодавство про працю, виробнича санітарія і безпека застосування різних технічних засобів на виробничих процесах включаючи пожежну безпеку.

Трудове законодавство регламентується законодавчими актами, основними з яких є Конституція України, Кодекс законів про працю, Закон України „Про охорону праці”.

Конституційне право громадян нашої держави на охорону їх життя і здоров'я у процесі їх трудової діяльності відображено у Законі України, прийнятому Верховною Радою України 14 жовтня 1992 р. Дія закону поширюється на всі підприємства, установи і організації незалежно від форм власності і виду їх діяльності, на всіх працюючих незалежно від їх посади і рівня кваліфікації.

#### **5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що діють при експлуатації цифрового термометра**

Шкідливі і небезпечні фактори, що виникають під час роботи з апаратурою систем передачі даних, класифікуються згідно ГОСТу 12.0.003-74 [14]. Небезпечними називаються такі фактори, що приводять до раптового погіршення здоров'я людини. Шкідливими називають такі фактори, які у випадку порушення вимог безпеки можуть при контакті з організмом людини визивати виробничі травми, професійні захворювання чи відхилення в стані здоров'я .

При експлуатації апаратури систем передачі даних виникають наступні групи шкідливих і небезпечних виробничих факторів:

- підвищене значення електричного струму (перемінний струм  $U=220V$ ,  $f=50$  Гц), що може проходити через людину і становити небезпеку для нього;

- підвищені значення статичної електрики;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- недостатня чи надмірна освітленість робочої зони інженера;
- небезпека пожежі і вибуху.

#### Ураження електричним струмом

Необхідно виділити наступні основні причини ураження людини електричним струмом, який необхідно приймати в увагу при використанні розробки:

- випадкові дотики людини до неізольованих струмоведучих частин електричних пристроїв, що знаходяться під напругою;
- наближення на небезпечну відстань людини до струмоведучих;
- неізольованих частин електричних установок;
- випадкові дотики до металевих корпусів електровимірювальних пристроїв, які знаходяться під напругою;
- організаційні порушення.

У процесі роботи оператор може випадково доторкнутися до струмоведучих частин і одержати електричний удар. Ступінь поразки залежить від величини струму, умов і характеру дотику. Величина струму у свою чергу залежить від напруги мережі, стану ізоляції струмоведучих частин, ємності проводів щодо землі й опору людини.

#### Нагромадження статичної електрики

Статична електрика - це сукупність явищ, зв'язаних з виникненням, скороченням і реалізацією вільного заряду на поверхні й в обсязі діелектричних і напівпровідникових речовин, матеріалів, чи виробів на ізольованих провідниках.

При роботі з цифровим термометром і проведенні налагоджувальних і профілактичних робіт виникає небезпека ураження електричним струмом від провідників, що знаходяться під струмом. Струм, що притікає через тіло,

може викликати порушення життєдіяльності людини (втрата свідомості, зупинка дихання, припинення роботи серця). Таку ж небезпеку ураження організму людини має коротке замикання.

У приміщенні, де знаходиться цифровий термометр, статичний заряд може виникати на незаземлених металевих і діелектричних поверхнях устаткування, на покриттях підлог і робочих місць, на панелях стін і т.д. Крім ушкоджень електронних виробів, розряди статичної електрики між операторами й елементами устаткування викликають болючі відчуття в людей, створюють нервозну обстановку, можуть привести до втрати працездатності, зниженню продуктивності праці.

#### Електромагнітне випромінювання

Джерелами випромінювання електромагнітних полів (ЕМП) в цифрового термометра є монітори комп'ютерів, елементи блоків живлення, принтери.

Систематичний вплив ЕМП на працюючого з рівнями, що перевищують припустимі, приводить до порушення стану їхнього здоров'я. При цьому можуть виникати зміни в нервовій, серцево-судинній, ендокринній і іншій системах організму людини.

Ступінь шкідливого впливу ЕМП на організм людини визначається напруженістю електромагнітного поля, довжиною хвилі і тривалістю перебування організму в зоні діяльності ЕМП [15].

У залежності від відстані до джерела випромінювання працюючий може знаходитися або в зоні індукції, або в хвильовій зоні (зоні випромінювання). Зона індукції:

- розташовується поблизу джерела випромінювання на відстані

$$R \leq L / 2 * \pi, \quad (5.1)$$

Хвильова зона:

- розташовується на відстані

$$R > L / 2 * \pi, \text{ при } R \gg F^2 / L, \quad (5.2)$$

де  $L$  - довжина хвилі,  $\pi=3,14159$ ,

$F$  - геометричні розміри джерела випромінювання.

Деякі можливі причини виникнення пожежі в робочій зоні:

- перевантаження проводів електромережі, що викликає нагрівання струмоведучих частин, загоряння ізоляції;
- неякісне виконання пайки і з'єднання проводів, що приводить до короткого замикання і загоряння;
- неправильний вибір перетину сполучних проводів.

Недостатнє чи надмірне освітлення

У силу тісного взаємозв'язку зору людини з роботою мозку освітлення впливає на центральну нервову систему, що керує всією життєдіяльністю людини. Рациональне освітлення сприяє підвищенню продуктивності і безпеки праці і збереженню здоров'я працюючих.

Недостатнє освітлення робочих місць - одна з причин низької продуктивності праці. У цьому випадку очі працюючого сильно напружені, важко розрізняють оброблювані предмети, у людини знижується темп і якість роботи, погіршується загальний стан.

На органах зору негативно позначається як недостатнє так і надмірне освітлення. Надмірна освітленість приводить до сліпоти, що характеризується різкою дратівною дією і різцю в очах, при цьому очі працюючого швидко втомлюються і зорове сприйняття різко погіршується.

## **5.2 Організаційні та конструктивно-технологічні заходи для зниження впливу шкідливих виробничих факторів**

Захист від ураження електричним струмом

Відповідно до ГОСТу ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту.[16]  
Ці норми при експлуатації і ремонті цифрового термометра забезпечені:

- вирівнюванням потенціалів;
- застосуванням малих напруг;
- електричним поділом мереж;
- ізоляцією струмоведучих мереж;
- обґрунтуванням і оптимальним вибором елементної бази, що виключає передумови поразки електрострумом;

- правильним компонуванням, монтажем пристроїв і елементів;
- огороженням струмоведучих частин, запобіганням випадкових доторкань до них;
- застосуванням електричної, електромагнітної, механічний блокувань і знаків безпеки;
- надійними контактними з'єднаннями з урахуванням перепаду кліматичних параметрів;
- світловою і звуковою сигналізацією з появою небезпечного фактора поразки електричним струмом;
- дотриманням умов безпеки при установці і заміні приладів і ін.

### 5.2.1. Розрахунок штучного заземлення комп'ютера.

Згідно ГОСТ 12.1.030-81 вхідними даними для розрахунку заземлення є:

- опір заземляючого пристрою,  $R_{доп} = 4 \text{ Ом}$ ;
- удільний опір ґрунту  $\rho = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- підвищуючий коефіцієнт сезонності з урахуванням опору ґрунту  $K_{II}'' = 3$  (для магістралі заземлення) и  $K_{II}' = 1,6$  (для вертикальних електродів заземлення);
- тип заземлювача – кут, його довжина  $l = 2,5 \text{ м}$ , ширина сторін  $b = 0,05 \text{ м}$ , розміщений на рівні землі;
- вид розміщення вертикальних розміщувачів – в рядок, відстань між ними  $a = 2,5 \text{ м}$ .

1. Розрахункове значення удільного опору ґрунту для вертикальних заземлювачів ( $\rho'_{РАСЧ}$ ) і для магістралі ( $\rho''_{РАСЧ}$ ):

$$\rho'_{РАСЧ} = \rho \cdot K_{II}' \quad (5.3)$$

$$\rho'_{РАСЧ} = 30 \cdot 1,6 = 48 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$$\rho''_{РАСЧ} = \rho \cdot K_{II}''$$

$$\rho''_{РАСЧ} = 30 \cdot 3 = 90 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

2. Опір розтікання струму  $R_T$  для одиночного кутового заземлювача:

$$R_T = (\rho'_{РАСЧ} / 2\pi l) \cdot \ln(4,2 \cdot l / b) \quad (5.4)$$

$$R_T = (48 / 2 \cdot 3,1416 \cdot 3) \cdot \ln(4,2 \cdot 3 / 0,05) = 16,2 \text{ Ом}$$

3. Умовна кількість вертикальних заземлювачів:

$$n' = R_T / R_{\text{ДОП}} \quad (5.5)$$

$$n' = 16,2 / 4 = 4$$

4. Коефіцієнт використання заземлювачів ( $\eta_{\text{ЭТ}}$ ), що враховує взаємне екранування заземлювачів:

$$\eta_{\text{ЭТ}} = 0,7$$

5. Дійсна кількість вертикальних заземлювачів:

$$n = n' / \eta_{\text{ЭТ}} \quad (5.6)$$

$$n = 4 / 0,7 \approx 6$$

6. Довжина магістралі, що з'єднує вертикальні заземлювачі:

$$L' = 1,05 \cdot a \cdot n \quad (5.7)$$

$$L' = 1,05 \cdot 2,5 \cdot 6 = 15,75 \text{ м}$$

7. Визначаємо опір розтікання струму для заземлюючої магістралі:

$$R_M = (\rho''_{\text{РАСЧ}} / 2\pi L') \cdot \ln(2 \cdot L'^2 / b \cdot h)$$

$$R_M = (90 / 2 \cdot 3,1416 \cdot 15,75) \cdot \ln(2 \cdot 15,75^2 / 0,05) = 8,77 \text{ Ом}$$

8. Опір розтікання всього заземлюючого пристрою:

$$R_3 = (R_M \cdot R_T) / (R_T \cdot \eta_{\text{ЭТ}} + R_M \cdot \eta_{\text{ЭТ}} \cdot n) \quad (5.8)$$

$$R_3 = (8,77 \cdot 16,2) / (16,2 \cdot 0,7 + 8,77 \cdot 0,7 \cdot 6) = 3 \text{ Ом}$$

9. Розрахунок січення заземлюючого проводу розраховуємо по формулі:

$$S \geq (I_{\text{КЗ}} \sqrt{t_{\text{СР}}}) / 272 \quad (5.9)$$

де  $S$  – січення заземлюючого проводу,  $\text{мм}^2$ ;

$I_K$  – струм короткого замикання (для електроустановок до 1000 В

$I_{\text{КЗ}} = 125 / R_3 = 41,7 \text{ А}$ ;  $R_3 = 3 \text{ Ом}$ );

$t_{\text{СР}}$  – час зпрацювання захисту ( $t_{\text{СР}} = 0,1 \text{ с}$ ).

$$S \geq (41,7 \sqrt{0,1}) / 272 \geq 0,05 \text{ мм}^2$$

Згідно ГОСТ 12.1.038-82 електроустановки з'єднуються з внутрішньою магістраллю з допомогою мідних і алюмінієвих провідників з січенням 4-6 мм. Прокладку заземлюючих провідників із полосової сталі, рекомендується

проводить відкрито по конструкції споруди, з метою більш доступного їх огляду.

#### Захист від статичної електрики

Загальні вимоги щодо безпеки від розрядів статичної електрики наведені в НПАОП 0.00-1.29-97. Правила захисту від статичної електрики. Класифікація основних засобів захисту від статичної електрики наведена в ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Для усунення причин утворення статичного заряду застосовані провідні матеріали для покриття підлог, панелей, робочих столів, стільців. Для зниження ступеня електризації і підвищення провідності діелектричних поверхонь підтримується відносна вологість повітря на рівні максимально припустимого значення за ГОСТом 12.1.005- 88 “Санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони”. Для апаратури систем передачі даних прокладена шина захисного заземлення перетином не менш 120 мм<sup>2</sup>. Ділянки шин зварюються внаклад на довжині не менш подвійної ширини шини. Шина захисного заземлення з'єднується з заземленням первинного джерела живлення трифазної чотирьохпровідної мережі 380/220 В, 50 Гц.

Розроблена документація на систему електроживлення, правила по техніці безпеки при експлуатації апаратури систем передачі даних.

На робочих місцях усі металеві й електропровідні неметалічні устаткування заземлені.

#### Захист від електромагнітних випромінювань

На сьогоднішній день, основним методом захисту від електромагнітних випромінювань застосовуваних в цифровому термометрі є екранування джерел випромінювань. Усі монітори, що випускаються, а також блоки живлення мають корпус виконаний зі спеціального матеріалу, що практично цілком затримує проходження електромагнітного випромінювання. Застосовуються також спеціальні екрани, що зменшують ступінь впливу електромагнітних і рентгенівських випромінювань на оператора.

Виконано:



1. У вміст комп'ютера включати рідкокристаічний монітор, оскільки його випромінювання значно менше, ніж у розповсюджених ЕЛП моніторів (монітор з електроннопроменевою трубкою).

2. Використовувати сертифіковані монітори.

3. Системні блоки знаходяться на відстані більш 1.5 м від користувача.

4. Неприпустимою відстанню розташування монітора від користувача є 0,5 м, критичним - 1,2 м, оптимальним - більш 1,2 м.

5. Комп'ютер не залишається включеним на тривалий час, якщо він не використовується, а також використовується "сплячий режим" для монітора.

6. У зв'язку з тим, що електромагнітне випромінювання максимальне збоку монітора, монітор розташований таким чином, що він практично не випромінює на сусідні робочі місця.

7. Робота за комп'ютером не перевищує двох годин підряд, а також супроводжується не-великими перервами по 15 хв.

Системний блок комп'ютера має заземлення.

Одним з факторів, що визначають сприятливі умови праці, є раціональне освітлення робочої зони і робочих місць. ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Передбачене освітлення відповідає таким вимогам:

- достатнє, щоб очі без напруги могли розрізняти деталі;
- постійне за часом, для цього напруга в мережі не повинне коливатися більше чим на 4%;
- рівномірно розподілене по робочих поверхнях, щоб не було різкого колірної контрасту;
- не викликати осліплюючої дії на органи зору людини, як від самого джерела світла, так і від відбиваючих поверхонь, що знаходяться в полі зору працюючого (зменшення яскравості джерела світла досягається застосуванням світильників, що розсіюють світло );
- не викликати різких тіней на робочих місцях.

Показником ефективності природного освітлення є коефіцієнт природної освітленості (КПО), що розраховується у відсотках:

$$\text{КПО} = E_B / E_H, \quad (5.10)$$

де  $E_B$  - освітленість у даній точці, що освітлена світлом видимого крізь світловий проріз ділянки небокраю, лк;

$E_H$  - освітленість у той самий момент часу горизонтальної площі поза виробничим приміщенням, що освітлюється рівномірно розсіяним світлом усього небокраю, лк.

Коефіцієнт природної освітленості і мінімально припустимі значення освітленості виробничих приміщень штучним освітленням установлюється ДБН В.2.5-28-2006у залежності від точності виконуваних робіт. У приміщеннях, де розташоване устаткування систем передачі даних коефіцієнт природного освітлення  $\text{КПО} = 4\%$ .

У приміщеннях використовуються люмінесцентні лампи для створення рівномірного штучного освітлення. У порівнянні зі звичайними лампами накаливання люмінесцентні лампи мають велику світловіддачу, кращий спектр світлового потоку, низьку температуру трубки, більш тривалий термін використання (у 3-5 разів).

У розглянутому приміщенні застосовано комбіноване освітлення. Використовуються люмінесцентні лампи.

Їхньої переваги в порівнянні з лампами розжарення полягає в наступному:

- висока світловіддача;
- кращий спектр світлових потоків;
- великий термін служби (у 2-5 разів вище);
- низька температура нагрівання поверхні трубки.

Розрахуємо потужність однієї лампи по формулі:

$$P = \frac{W \cdot S}{N \cdot n}, \quad (5.11)$$

де:  $W$  - необхідна потужність Ут/м<sup>2</sup>;

$S$  - площа приміщення м<sup>2</sup>;

$N$  - кількість ліхтарів;

$n$  - кількість ламп у ліхтарі.

Схема освітлюючих приладів.

В нашем случае:

$$W = 18.7 \text{ Вт/м}^2$$

$$N = 6 \text{ од.}$$

$$S = 30 \text{ м}^2$$

$$n = 2 \text{ од.}$$

$$P = \frac{18.7 \cdot 30}{6 \cdot 2} = 46.8 (\text{Вт}) \approx 50 (\text{Вт})$$

Для приміщення площею 30 м<sup>2</sup> необхідний 6 ліхтарів по 2 лампи потужністю 50 Вт кожна.

У силу тісного взаємозв'язку зору людини з роботою мозку, освітлення впливає на центральну нервову систему. Рациональне освітлення сприяє підвищенню продуктивності і безпеки роботи і збереженню здоров'я працюючих.

### **5.3 Пожежна та вибухова безпека**

У системі заходів, спрямованих на охорону державної й особистої власності громадян, запобігання впливу на людей небезпечних факторів пожежі і вибуху, питання пожежної і вибухової безпеки займають важливе місце. Загальні вимоги до систем запобігання пожеж і пожежного захисту (вибухозахисту) регламентуються вимогами НАПБ А.01.001-2004. Правила пожежної безпеки в Україні, приміщення повинні мати II ступінь вогнестійкості.[17].

По класифікації приміщень по пожежній небезпеці СПД відносяться до категорії В, що характеризується наявністю твердих палих і важкогорючих речовин і матеріалів, а також легкозаймистих матеріалів.

У зв'язку з цим передбачено ряд заходів для пожежобезпеки:

- не курити і не використовувати нагрівальні прилади в приміщеннях СПД;
- не від'єднувати і приєднувати кабелі, усувати несправності при наявності напруги в мережі;
- не визначати наявності напруги в ланцюзі, замикаючи клема торканням одного проводу про інший;

- автоматизовані системи й обчислювальні комплекси розташовані в будинках II ступеня вогнестійкості з розташуванням залів з ЕОМ на першому поверху;
- комплекс виробничих приміщень має двоє самостійних евакуаційних виходів;
- двері машинного залу розташовані з межею вогнестійкості не менш 0,75 г.;
- сховища інформації розміщуються у відособлених приміщеннях, обладнаних шафами з непальних матеріалів;
- джерела електричної енергії (розподільні пристрої, трансформатори) розташовані у відособлених приміщеннях;
- освітлювальну електричну мережу виконано відповідно до вимог ППЕ - правилам пристрою електроустановок для пожежонебезпечних зон.
- прокладку кабелю через перекриття, стіни, здійснено в інших трубах з ущільненням з непальних матеріалів;
- аварійні мережі освітлення, дистанційного й автоматичного пуску протипожежних систем і сигналізації прокладено окремо від силових і інших робочих електричних мереж, а при спільній прокладці їх розділено перегородками з непальних матеріалів;
- система електроживлення обчислювальних комплексів має блокування, що забезпечує її відключення у випадку зупинки системи охолодження і кондиціонування;

Пожежновибухова небезпека кожного об'єкту визначається пожежновибуховою небезпекою його складових частин.

## **5.4 Інструкція з техніки безпеки при експлуатації електронно-обчислювальних машин.**

### **5.4.1 Вимоги до організації робочого місця при роботі на ПК.**

Робочі місця слід розташовувати відносно світових прорізів, щоб природнє світло збоку переважно зліва. При розміщенні робочих столів з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) – 1,2 м, відстань від тильної поверхні одного ВДТ до екрана іншого ВДТ – 2,5 м. Висота робочої поверхні робочого столу з ВДТ має регулюватися в межах 680...800 мм, а ширина – 600..800 мм, а глибина – 800...1000 мм. Робочий стілець має бути підйомно-поворотним, регульованим за висотою, з кутом і нахилу сидіння та спинки. Регулювання за кожним із параметрів має здійснюватися незалежно, легко і надійно фіксуватися. Висота поверхні сидіння має регулюватися в межах 400...500 мм, а ширина і глибина становити не менше ніж 400 мм. Кут нахилу сидіння – до  $15^0$  вперед і до  $5^0$  назад. Висота спинки стільця має становити  $(300\pm 20)$  мм, ширина – не мене ніж 380 мм. Кут нахилу спинки має регулюватися в межах  $1...30^0$  від вертикального положення. Поверхня сидіння і спинки стільця має бути напівм'якою з нековзним, повітронепроникним покриттям, що легко чиститься і не електризується. Робоче місце з ВДТ слід обладнати пюпітром для документів, що легко переміщується.

#### **5.4.2 Вимоги безпеки під час роботи**

При роботі з ПК чи офісною технікою необхідно тримати тіло прямо, не припускаючи скривлення до одного боку, згорблення: це призводить до крайньої втоми, а при систематичному порушенні положення до сколіозу та остеохондрозу. Витримувати кут зору до екрана монітора близько до прямого, це допоможе запобігти напруженню м'язів шиї і позбавить вас від головного болю. Використовувати допоміжний кронштейн для документів, це зменшить кількість необхідних для виконання роботи рухів очей. Під час роботи передпліччя розташовувати під прямим кутом до плечей, а кісті рук – у горизонтальному положенні; уникайте згинання рук у зап'ясті догори чи донизу. При горизонтальному розміщенні стегон і опорі ступенів на підлогу чи підставку відбувається природна циркуляція кровообігу у малому тазі, що особливо важливо для жінок. Натомість, якщо ноги вільно звисають і не тор-

каються підлоги, або торкаються лише пальцями, вага тіла припадає на стегна і кровообіг утруднюється. Для забезпечення захисту і досягнення нормованих рівнів комп'ютерних випромінювань необхідне застосування приєднаних фільтрів, засобів індивідуального захисту очей, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат. Сучасні дисплеї мають мінімальні та безпечні рівні електромагнітного, рентгенівського випромінювання та магнітного поля. Згідно п.5 ДСанПіН 3.3.2 007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» необхідно робити 1-2 перерви по 10-20 хвилин протягом дня та часті мікропаузи по 10-15 секунд з відведенням очей від екрану. Під час цих перерв необхідно зробити нахилення впре-назад, м'яко витягнути шию та спині. В цілому, згідно ДСанПіН 3.3.2 007-98, тривалість безпервної роботи на комп'ютері не повинна перевищувати 4 години.

#### **5.4.3 Вимоги безпеки після закінчення роботи**

Після закінчення роботи користувач ПК повинен виконати наступну послідовність операцій: провести закриття всіх активних завдань; переконатися, що в дисководах немає дискет; виключити живлення процесорного блока, відеотермінала та всіх периферійних пристроїв; відключити комп'ютер від мережі живлення (штепсельні вилки витягнути з розеток). Клавіатуру накрити кришкою для запобігання попаданню до неї пилу. Прибрати робоче місце. Оригінали та інші документи покласти в ящик стола. Вимити руки теплою водою з милом. Вимкнути вентиляцію, освітлення та зачинити вікна. Повідомити керівника підрозділу про виявлені несправності, що мали місце під час роботи. Після напруженої роботи, вдома, покладіть на заплющені очі ватні тампони, змочені охолодженим завареним чаєм .

## **РОЗДІЛ 6**

### **ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

#### **6.1 Електромагнітне забруднення**

Охорона навколишнього середовища й раціональне використання її ресурсів в умовах бурхливого зростання промислового виробництва стала однією з проблем сучасності. Результати впливу людини на природу необхідно розглядати не тільки у світлі розвитку технічного прогресу й росту населення, але й залежно від соціальних умов, у яких вони проявляються. Відношення до природного середовища є мірою соціальних і технічних досягнень людського суспільства, характеристикою рівня цивілізації. Співробітництво між країнами в області охорони природи здійснюється через такі організації як Європейський економічний союз (ЄЕС), Організація об'єднаних націй (ООН) у рамках “Програми ООН по навколишньому середовищу”[18]. До головних напрямків діяльності її ставляться екологічні проблеми населених пунктів, а також проблеми здоров'я й добробуту людини, охорона наземних екосистем і боротьба з поширенням пустель, діяльність, пов'язана з екологічним утворенням і інформацією, торговельні, економічні й технологічні аспекти по захисту природи, захист Світового океану від забруднення, охорона рослинності й диких тварин, екологічні питання енергетики.

Інтенсивне використання електромагнітної та електричної енергії в сучасному інформаційному суспільстві призвело до того, що в останній третині ХХ століття виник і сформувався новий значущий фактор забруднення навколишнього середовища - електромагнітний. До його появи призвів розвиток сучасних технологій передачі інформації та енергії, дистанційного контролю та спостереження, деяких видів транспорту, а також розвиток ряду технологічних процесів. В даний час світовою громадськістю визнано, що електромагнітне поле (ЕМП) штучного походження є важливим значимим екологічним фактором з високою біологічною активністю. Аналіз планів галузей зв'язку, передачі і обробки інформації, транспорту і ряду сучасних технологій показує, що в найближчому майбутньому буде наростати використання технічних засобів, що генерують електромагнітну енергію в навколишнє середовище.

З початку 90-х років відбулися зміни в структурі джерел ЕМП, пов'язані з виникненням їх нових видів (стільникового та інших видів персональної та мобільної комунікації, освоєнням нових частотних діапазонів теле-і радіомовлення, розвитком засобів дистанційного спостереження та контролю і т.д. Особливістю цих джерел є створення рівномірної зони "радіопокриття", що є нічим іншим, як збільшенням електромагнітного фону в навколишньому середовищі.

Термін "глобальне електромагнітне забруднення навколишнього середовища" офіційно введений в 1995 році Всесвітньою Організацією Охорони Здоров'я (ВООЗ), що включила цю проблему до переліку пріоритетних для людства. У числі небагатьох світових проєктів ВООЗ реалізує Міжнародний електромагнітний проєкт (WHO International EMF Project), що підкреслює актуальність і значення, що надається міжнародною громадськістю цій темі[19]. У свою чергу практично всі технічно і культурно розвинені країни реалізують свої національні програми дослідження біологічної дії ЕМП і забезпечення безпеки людини та екосистем в умовах нового глобального чинника забруднення навколишнього середовища.

Живі організми в процесі еволюції пристосувалися до певного рівня



ЕМП, однак, різке значне підвищення (в історичному аспекті) рівня ЕМП викликає напругу адаптаційно-компенсаторних можливостей організму, довготривале дію цього чинника може призвести до їх виснаження, що спричинить незворотні наслідки на системному рівні.

## **6.2 Електромагнітні випромінювання комп'ютера**

Дослідження вчених за останні 20 років показали, що електромагнітні поля, що створюються технічними системами, навіть у сотні разів слабші природного поля Землі, можуть бути небезпечними для здоров'я людини. Якщо не змінити принципи побудови електронних та радіотехнічних систем, то тенденція їх розвитку і негативний вплив на біологічні системи на рівні дії полів можуть призвести до катастрофічного, за своїми наслідками, впливу на біосферу та людину.

Плоди науково-технічного прогресу, які повинні служити на благо людства, стають агресивними по відношенню навіть до своїх творців. Стрімко зростає енергонасиченість побуту людей. Електроніка підступає все ближче до людини. Комп'ютер, телевізор, відеосистеми, мікрохвильові печі, радіотелефони – ось далеко не повний перелік технічних засобів, з якими людина постійно взаємодіє. Павутиння проводів електропостачання в будинках та в службових приміщеннях оточують людину. Людина знаходиться тривалий час під дією штучних полів, створених електронними системами та системами електропостачання.

Особливо стрімко в наше життя входять комп'ютери і телевізійні системи. Сьогодні у всьому світі комп'ютери посідають важливе місце у роботі, житті та відпочинку людей. Без них вже неможливо уявити сучасний світ. Одним із шкідливих апаратних забезпечень ЕОМ для людського організму є дисплеї. Дисплеї, сконструйовані на основі електронно-променевої трубки, є джерелами електростатичного поля, м'якого рентгенівського, ультрафіолетового, інфрачервоного, видимого, низькочастотного, наднизькочастотного та високочастотного електромагнітного випромінювання (ЕМВ). Вплив комплексу ЕМВ чи окремих його видів на виникнення різних захворювань поча-

ли вивчати з моменту їх використання. В кінці 50-х років у СРСР були введені перші нормативи, які обмежували радіочастотний вплив. Наприкінці 60-х років радянські вчені встановили вплив електромагнітних полів, навіть дуже слабких, на нервову систему людини. У 70-ті роки ця проблема стала предметом широких дискусій і досліджень.

Джерелами електромагнітних випромінювань є мережі живлення (частота 50 Гц), система рядкової розгортки (2–400 кГц), блок модуляції променя (5–10 МГц)[20].

Було встановлено, що випромінювання низької частоти, в першу чергу, негативно впливають на центральну нервову систему, викликаючи головний біль, запаморочення, нудоту, депресію, безсоння, відсутність апетиту, виникнення синдрому стресу, причому нервова система реагує навіть на короткі за тривалістю впливу відносно слабких полів частоти: змінюється гормональний стан організму, порушуються біоструми мозку. Все це відображається на процесах навчання і запам'ятовування.

Особливу увагу медики приділяють дослідженням впливу електромагнітних випромінювань на жінок в період вагітності. Статистичні дані свідчать про те, що робота за комп'ютером порушує нормальний хід вагітності, часто є причиною появи на світ дітей із вродженими вадами, з яких найпоширенішими є дефекти розвитку головного мозку. Тому необхідно, щоб керівництво своєчасно переводило вагітних жінок на роботу, не пов'язану з використанням моніторів.

Існують переконливі докази несприятливого комплексного впливу моніторів ПК на організм працюючих. Як вважають деякі автори, основною причиною негативного впливу моніторів ПК, телевізорів, іншої побутової техніки на їх користувачів є торсійна компонента електромагнітних випромінювань.

### **6.3 Захист від електромагнітних випромінювань**

Вибір того чи іншого способу захисту від дії електромагнітних випромінювань залежить від робочого діапазону частот, характеру виконуваних

робіт, напруженості та щільності потоку енергії ЕМП, необхідного ступеня захисту.

До числа заходів зменшення впливу на працівників ЕМП належать: організаційні, інженерно-технічні та лікувально-профілактичні.

Організаційні заходи здійснюють органи санітарного нагляду. Вони проводять санітарний нагляд за об'єктами, в яких використовуються джерела електромагнітних випромінювань. Крім того, ще на стадії проектування об'єктів потребує забезпечення таке розташування джерел ЕМП, яке б зводило до мінімуму їх вплив на працюючих.

Інженерно-технічні заходи передбачають використання в умовах виробництва дистанційного керування апаратурою, яка є джерелом випромінювання, екранування джерел випромінювання, застосування індивідуальних заходів захисту (халатів, комбінезонів із металізованої тканини, з виводом на заземлюючий пристрій). Для захисту очей доцільно використовувати захисні окуляри ЗП5–90. Скло окулярів вкрито напівпровідниковим оловом, що послаблює інтенсивність електромагнітної енергії при світло пропусканні не нижче 75%.

Взагалі, засоби індивідуального захисту необхідно використовувати лише тоді, коли інші захисні засоби неможливі чи недостатньо ефективні: при проходженні через зони опромінення підвищеної інтенсивності, при ремонтних і налагоджувальних роботах в аварійних ситуаціях, під час короткочасного контролю та при зміні інтенсивності опромінення. Такі засоби незручні в експлуатації, обмежують можливість виконання трудових операцій, погіршують гігієнічні умови.

У радіочастотному діапазоні засоби індивідуального захисту працюють за принципом екранування людини з використанням відбиття і поглинання ЕМП. Для захисту тіла використовується одяг з металізованих тканин і радіопоглинаючих матеріалів. Металізовану тканину виготовляють із бавовняних ниток з розміщеним всередині них тонким дротом, або з бавовняних чи капронових ниток, спірально обвитих металевим дротом. Така тканина, наче металева сітка, і при відстані між нитками до 0,5 мм ослаблює випроміню-

вання не менше як на 20...30 дБ. При зшиванні деталей захисного одягу треба забезпечити контакт ізольованих проводів. Тому електрогерметизацію швів здійснюють електропровідними масами чи клеями, які забезпечують гальванічний контакт або збільшують, ємкісний зв'язок неконтактуючих проводів[21].

Лікувально-профілактичні заходи передбачають проведення систематичних медичних оглядів працівників, які перебувають у зоні дії ЕМП, обмеження в часі перебування людей в зоні підвищеної інтенсивності електромагнітних випромінювань, видачу працюючим безкоштовного лікувально-профілактичного харчування, перерви санітарно-оздоровчого характеру.

Розрахунок витрат на утилізацію відпрацьованих джерел струму

Електричні джерела енергії за останнє століття поступово стали найбільш універсальними серед всіх винайдених людством джерел енергії. Головна перевага електричної енергії перед іншими формами (перш за все теплової) – зручність доставки споживачеві, простота дозування і масштабування споживаючих пристроїв.

В даному розробленому пристрої додатково використовуються інші джерела живлення. В якості цього були використані Li-ion батареї.

Для розрахунку ми скористаємося формулою вартості утилізації:

$$B_{\text{відх}} = B_m + (B_{\text{утр}} + E_n \cdot K_c) \cdot A_{\text{від}} \quad (6.1)$$

$B_m$  – втрати на видалення (транспортування, завантаження розвантаження) відходів,  $B_m = 8,18 \text{ грн./т}$ ;

$B_{\text{утр}}$  - експлуатаційні витрати, що пов'язані з обслуговуванням звалища знезараження відходів,  $B_{\text{утр}} = 0,75 \text{ грн./т}$ ;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, беруть  $E = 0.16 \text{ рік}^{-1}$ ;

$K_c$  – питомі капітальні витрати на будівництво систем видалення, знешкодження (знищення) відходів у спеціальних спорудах,  $K_c = 0,3 \text{ грн./т}$ ;

$A_{\text{від}}$  – кількість відходів, т/рік.

$$B_{\text{відх}} = 8,18 + (0,75 + 0,16 \cdot 0,3) \cdot 1,05 = 9,43 \text{ грн} / \text{т}$$

Щоб запобігти забрудненню навколишнього середовища електролітом, батарея виконана в формі герметичного контейнеру.

Сьогодні комп'ютер через ЕМП, які він випромінює, особливо його монітор, не є безпечним для здоров'я людини. Спектр випромінювання комп'ютера містить у собі рентгенівську, ультрафіолетову та інфрачервону ділянки спектра, а також широкий спектр електромагнітних хвиль інших частот.

Небезпеку рентгенівських хвиль спеціалісти вважають досить малою, оскільки цей вид ЕМП поглинається склом екрана. Щодо впливу на людський організм електромагнітного випромінювання більш низьких частот – випромінювання низькочастотного діапазону (50–100 Гц), то тут учені й захисники споживачів поки не мають єдиної думки. Дослідження останніх років тільки підсилили занепокоєння і поставили питання, що залишаються без відповіді.

Джерелами змінних електричного і магнітного полів у ПК є дисплей, інші блоки й елементи (схеми). Змінні ЕМП характерні не тільки в комп'ютерах із дисплеями на ЕПТ, а й у нових комп'ютерах із рідкокристалічними екранами.

Нерівномірність і форма розподілу змінних електромагнітних полів у певних випадках можуть бути небезпечнішими для сусідів по приміщенню, ніж для користувача ПК. Це необхідно враховувати під час вибору розміщення комп'ютерів у робочих кабінетах.

## ВИСНОВКИ

В цьому дипломному проєкті був розроблений електронний термометр, що дозволяє вимірювати температуру радіокомпонентів за допомогою датчика температури DS18B20, обробляти отриману інформацію за допомогою мікроконтролера Atmel ATtiny2313 і виводити результат вимірювань в цифровому вигляді на екран будь-якого ПК. Підключення термометру виконується за допомогою USB-порту. Тривалість машинного циклу AVR складає один період кварцового генератора тому AVR може забезпечувати задану продуктивність за меншої тактової частоти. Саме ця особливість архітектури і дозволяє AVR-мікроконтролерам мати найкраще співвідношення енергоспоживання/ продуктивність.

Написання програм для мікроконтролерів AVR виконується різними мовами програмування, але найбільш відповідним є асемблер та C.

В даній роботі буде використовуватися мікроконтроллер ATtiny2313 фірми ATMEL. Цей прилад є восьмибітним КМОП-мікроконтролером з AVR RISC архітектурою. ATtiny2313 виконує команди за один цикл, досягає продуктивності 1 MIPS при частоті 1МГц, що дозволяє оптимізувати відношення енергоємності до продуктивності, а також є енергозберігаючим та достатньо швидкодіючим.

При використанні вище перерахованих функціональних блоків і режимів роботи, було досягнуто високих позитивних характеристик роботи пристрою. Також у свою чергу був зроблений акцент на простоту у виготовленні пристрою, що дає можливість використання пристрою в навчальних цілях.

У якості елементної бази термометра було використано термодатчик DS18B20, який вже відкалібрований на заводі, гарантована точність складає  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  в діапазоні  $-10...+85^{\circ}\text{C}$  і  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  у всьому діапазоні робочих температур. Не дивлячись на обмежену абсолютну точність, мала дискретність представлення температури є вельми бажаною, оскільки дуже часто на практиці потрібні відносні вимірювання

У ході проектування були розроблені структурна і принципова схеми, написана програма для роботи термометра.

Таким чином, розроблений електронний термометр є компактним, переносним пристроєм, що дає точну інформацію про температуру і дозволяє розширити можливості вимірювань.

Також було розглянуто розділи з охорони праці та надзвичайна ситуації і охорони навколишнього середовища.

## Додаток А

### Програмне забезпечення для електронного термометра

```
; Цифровий термометр на DS18B20
#include "2313def.inc"
#define DS18B20
;.equ UCR                =UCSRB
;.equ UBRR               =UBRRL
;.equ EEAR               =EEARL
;.equ USR                =UCSRA
;.equ E2END              =127
.ifdef
.equ RAMSIZE             =159
.equ RAMEND_MJ           =255
.else
.equ RAMSIZE             = 127
.equ RAMEND_MJ           =RAMEND
.endif
.equ inputport           =PINB
.equ outputport          =PORTB
.equ USBdirection        =DDRB
```

```

.equ DATAplus          =1          ;signal D+ on PB1
.equ DATAminus         =0          ;signal D- on PB0 - give on this pin pull-up 1.5kOhm
.equ USBpinmask         =0b11111100 ;mask low 2 bit (D+,D-) on PB
.equ USBpinmaskDplus    =~(1<<DATAplus) ;mask D+ bit on PB
.equ USBpinmaskDminus =~(1<<DATAminus);mask D- bit on PB
.equ SOPbyte            =0b10000000 ;Start of Packet byte
.equ DATA0PID          =0b11000011 ;PID for DATA0 field
.equ DATA1PID          =0b01001011 ;PID for DATA1 field
.equ OUTPID             =0b11100001 ;PID for OUT field
.equ INPID              =0b01101001 ;PID for IN field
.equ SOFPID             =0b10100101 ;PID for SOF field
.equ SETUPPID           =0b00101101 ;PID for SETUP field
.equ ACKPID             =0b11010010 ;PID for ACK field
.equ NAKPID             =0b01011010 ;PID for NAK field
.equ STALLPID           =0b00011110 ;PID for STALL field
.equ PREPID             =0b00111100 ;PID for FOR field
.equ nSOPbyte           =0b00000001 ;Start of Packet byte - reverse order
.equ nDATA0PID          =0b11000011 ;PID for DATA0 field - reverse order
.equ nDATA1PID          =0b11010010 ;PID for DATA1 field - reverse order
.equ nOUTPID            =0b10000111 ;PID for OUT field - reverse order
.equ nINPID             =0b10010110 ;PID for IN field - reverse order
.equ nSOFPID            =0b10100101 ;PID for SOF field - reverse order
.equ nSETUPPID          =0b10110100 ;PID for SETUP field - reverse order
.equ nACKPID            =0b01001011 ;PID for ACK field - reverse order
.equ nNAKPID            =0b01011010 ;PID for NAK field - reverse order
.equ nSTALLPID          =0b01111000 ;PID for STALL field - reverse order
.equ nPREPID            =0b00111100 ;PID for FOR field - reverse order
.equ nNRZITokenPID      =low(~0b10000000) ;PID mask for Token packet
(IN,OUT,SOF,SETUP) - reverse order NRZI
.equ nNRZISOPbyte       =low(~0b10101011) ;Start of Packet byte - reverse order NRZI
.equ nNRZIDATA0PID      =low(~0b11010111) ;PID for DATA0 field - reverse order NRZI
.equ nNRZIDATA1PID      =low(~0b11001001) ;PID for DATA1 field - reverse order NRZI
.equ nNRZIOUTPID        =low(~0b10101111) ;PID for OUT field - reverse order NRZI
.equ nNRZIINPID         =low(~0b10110001) ;PID for IN field - reverse order NRZI
.equ nNRZISOFPID        =low(~0b10010011) ;PID for SOF field - reverse order NRZI
.equ nNRZISETPID        =low(~0b10001101) ;PID for SETUP field - reverse order NRZI
.equ nNRZIACKPID        =low(~0b00100111) ;PID for ACK field - reverse order NRZI
.equ nNRZINAKPID        =low(~0b00111001) ;PID for NAK field - reverse order NRZI
.equ nNRZISTALLPID      =low(~0b00000111) ;PID for STALL field - reverse order NRZI
.equ nNRZIPREPID        =low(~0b01111101) ;PID for FOR field - reverse order NRZI
.equ nNRZIADDR0         =low(~0b01010101) ;Address = 0 - reverse order NRZI

;status bytes - State
.equ BaseState          =0          ;
.equ SetupState         =1          ;
.equ InState            =2          ;
.equ OutState           =3          ;
.equ SOFState           =4          ;
.equ DataState          =5          ;

;Flags of action
.equ DoNone             =0
.equ DoReceiveOutData   =1
.equ DoReceiveSetupData =2
.equ DoPrepareOutContinuousBuffer =3
.equ DoReadySendAnswer  =4
.equ DoPrepareJoystickAnswer =5
.equ DoReadySendJoystickAnswer =6

; Joystick flags
.equ JoystickDataRequest =1
.equ JoystickDataRequestBit =0
.equ JoystickDataReady   =2
.equ JoystickDataReadyBit =1
.equ JoystickDataProcessing =4
.equ JoystickDataProcessingBit =2
.equ JoystickLastDataPID  =8
.equ JoystickLastDataPIDBit =3

```



```

.equ JoystickReportID          =0b00010000
.equ JoystickReportIDBit      =4
.equ CRC16poly                =0b1000000000000101 ;CRC16 polynomial
;.equ Sym10StructSize         =12
;.equ Sym10EEStructSize      =4
;.equ Asym8StructSize        =8
;.equ Asym8EEStructSize     =4
;.equ XAxisChannel           = 0
;.equ YAxisChannel           = 1
;.equ RudderAxisChannel      = 2
;.equ ThrottleAxisChannel    = 3
;.equ ZAxisChannel           = 4
;.equ RxAxisChannel          = 5
.equ MAXUSBBYTES              =14 ;maximum bytes in USB input message
.equ NumberOfFirstBits       =10 ;how many first bits allowed be longer
.equ NoFirstBitsTimerOffset  =256-12800*12/1024 ;Timeout 12.8ms (12800us) to terminate
after firsts bits
.equ InputBufferBegin        =RAMEND_MJ-RAMSIZE ;compare of re-
ceiving shift buffer
.equ InputShiftBufferBegin    =InputBufferBegin+MAXUSBBYTES ;compare of re-
ceiving buffera
.equ OutputBufferBegin       =RAMEND_MJ-MAXUSBBYTES-2 ;compare of transmitting buffer
.equ AckBufferBegin          =OutputBufferBegin-3 ;compare of transmitting buffer Ack
.equ NakBufferBegin          =AckBufferBegin-3 ;compare of transmitting buffer Nak
.equ ConfigByte              =NakBufferBegin-1 ;0=unconfigured state
.equ AnswerArray             =ConfigByte-8 ;8 byte answer array
.equ JoystickBufferBegin     = AnswerArray - MAXUSBBYTES
.equ JoyOutputBufferLength   = JoystickBufferBegin - 1
.equ JoyOutBitStuffNumber    = JoyOutputBufferLength - 1
.equ BkpOutputBufferLength   = JoyOutBitStuffNumber - 1
.equ BkpOutBitStuffNumber    = BkpOutputBufferLength - 1
.equ JoyVal = BkpOutBitStuffNumber - 2
;.equ ADCChanStarted         =JoyVal - 1
;.equ ADCValueH              =ADCChanStarted - 1
;.equ ADCValueL              =ADCValueH - 1
;
;.equ RegistersBackup = ADCValueL-32
.equ RegistersBackup = JoyVal-32
;.equ EEPROMFlags = RegistersBackup-1
.equ StackBegin          =EEPROMFlags-1 ;low reservoir (stack is big cca 54 byte)
.equ StackBegin          =RegistersBackup-1 ;low reservoir (stack is big cca 54 byte)
;.equ XAxisRAM            =RAMEND - Sym10StructSize
;.equ YAxisRAM            =XAxisRAM - Sym10StructSize
;.equ RudderAxisRAM       =YAxisRAM - Sym10StructSize
;.equ ThrottleAxisRAM     =RudderAxisRAM - Sym10StructSize
;.equ ZAxisRAM            =ThrottleAxisRAM - Asym8StructSize
;.equ RxAxisRAM           =ZAxisRAM - Asym8StructSize
.def JoystickFlags        =R1 ; Endpoint 1 interrupt status flags for joystick reports
.def backupbitcount       =R2 ;backup bitcount register in INT0 disconnected
.def RAMread              =R3 ;if reading from SRAM
.def backupSREGTimer      =R4 ;backup Flag register in Timer interrupt
.def backupSREG           =R5 ;backup Flag register in INT0 interrupt
.def ACC                  =R6 ;accumulator
.def lastBitstufNumber    =R7 ;position in bitstuffing
.def OutBitStuffNumber    =R8 ;how many bits to send last byte - bitstuffing
.def BitStuffInOut        =R9 ;if insertion or deleting of bitstuffing
.def TotalBytesToSend     =R10 ;how many bytes to send
.def TransmitPart         =R11 ;order number of transmitting part
.def InputBufferLength    =R12 ;length prepared in input USB buffer
.def OutputBufferLength   =R13 ;length answers prepared in USB buffer
.def MyUpdatedAddress     =R14 ;my USB address for update
.def MyAddress            =R15 ;my USB address
.def ActionFlag           =R16 ;what to do in main program loop
.def temp3                =R17 ;temporary register
.def temp2                =R18 ;temporary register

```

```

.def temp1                =R19                ;temporary register
.def temp0                =R20                ;temporary register
.def bitcount             =R21                ;counter of bits in byte
.def ByteCount            =R22                ;counter of maximum number of received bytes
.def inputbuf             =R23                ;receiver register
.def shiftbuf             =R24                ;shift receiving register
.def State                =R25                ;state byte of status of state machine
;.def XL                  =R26                ;XL register - pointer to buffer of received IR codes
;.def XH                  =R27
.def USBBufptrY           =R28                ;YL register - pointer to USB buffer input/output
.def ROMBufptrZ           =R30                ;ZL register - pointer to buffer of ROM data
;requirements on descriptors
.equ GET_STATUS           =0
.equ CLEAR_FEATURE        =1
.equ SET_FEATURE          =3
.equ SET_ADDRESS          =5
.equ GET_DESCRIPTOR       =6
.equ SET_DESCRIPTOR       =7
.equ GET_CONFIGURATION     =8
.equ SET_CONFIGURATION    =9
.equ GET_INTERFACE        =10
.equ SET_INTERFACE        =11
.equ SYNCH_FRAME          =12
; Class requests
.equ GET_REPORT            =1
.equ GET_IDLE              =2
.equ GET_PROTOCOL         =3
.equ SET_REPORT            =9
.equ SET_IDLE              =10
.equ SET_PROTOCOL         =11
;Standard descriptor types
.equ DEVICE                =1
.equ CONFIGURATION        =2
.equ STRING                =3
.equ INTERFACE             =4
.equ ENDPOINT              =5
; Class Descriptor Types
.equ CLASS_HID             =0x21
.equ CLASS_Report          =0x22
.equ CLASS_Physical        =0x23
;databits
.equ DataBits5             =0
.equ DataBits6             =1
.equ DataBits7             =2
.equ DataBits8             =3
;parity
.equ ParityNone            =0
.equ ParityOdd             =1
.equ ParityEven            =2
.equ ParityMark            =3
.equ ParitySpace           =4

;stopbits
.equ StopBit1              =0
.equ StopBit2              =1
.equ ReportDescriptorSize = 30
.ifdef MEGA16
.equ DDR1W                 = DDRD
.equ PORT1W                = PORTD
.equ PIN1W                 = PIND
.equ BIT1W                 = 4
.else
.equ DDR1W                 = DDRD
.equ PORT1W                = PORTD
.equ PIN1W                 = PIND

```

```

.equ BIT1W          = 0
.endif
;-----
;*****
;
;* ,* Interrupt table
;*****
;
.cseg
;-----
.org 0                                ;after reset
    rjmp    reset
;-----
.org INT0addr                ;external interrupt INT0
    rjmp    INT0handler
;-----
.org ERDYaddr
    reti
;-----
;*****
;* Init program
;*****
;-----
reset:                                ;initialization of processor and variables to right values
    ldi     temp0,StackBegin        ;initialization of stack
    out     SPL,temp0
    clr     XH                      ;RS232 pointer
    clr     YH                      ;USB pointer
    clr     ZH                      ;ROM pointer
    clr     JoystickFlags
    ldi     temp0,JoystickDataReady
    or      JoystickFlags,temp0
    clr     MyUpdatedAddress        ;new address USB - non-decoded
    rcall   InitACKBuffer           ;initialization of ACK buffer
    rcall   InitNAKBuffer           ;initialization of NAK buffer
    rcall   InitJoystickBuffer      ;initialization of Joystick buffer
    rcall   USBReset                ;initialization of USB addresses
    ldi     temp0,0b00000100        ;set pull-up on PORTB
    out     PORTB,temp0
;    ldi     temp0,0b11000000        ;set pull-up on PORTC
;    out     PORTC,temp0
    ldi     temp0,0; 0b1111011      ;set pull-up on PORTD
    out     PORTD,temp0
    ldi     temp0,0b00000000        ;set input on PORTD
    out     DDRD,temp0
; Init 1-wire interface
    cbi     DDR1W, BIT1W            ; in
    cbi     PORT1W, BIT1W           ; 0
    ldi     temp0,0x0F              ;INT0 - respond to leading edge
    out     MCUCR,temp0
    ldi     temp0,1<<INT0           ;enable external interrupt INT0
    out     GIMSK,temp0
;-----
;*****
;* Main program
;*****
;
    sei                                ;enable interrupts globally
Main:
    sbis    inputport,DATAMinus     ;waiting till change D- to 0
    rjmp    CheckUSBReset           ;and check, if isn't USB reset
    cpi     ActionFlag,DoReceiveSetupData
    breq    ProcReceiveSetupData
    cpi     ActionFlag,DoPrepareOutContinuousBuffer
    breq    ProcPrepareOutContinuousBuffer
    sbrl    JoystickFlags,JoystickDataRequestBit
    rcall   ProcJoystickRequest
    rjmp    Main

```

```

CheckUSBReset:
    ldi    temp0,255                ;counter duration of reset (according to specification is that
    cca 10ms - here is cca 100us)
WaitForUSBReset:
    sbic   inputport,DATAMinus    ;waiting till change D+ to 0
    rjmp   Main
    dec    temp0
    brne   WaitForUSBReset
    rcall  USBReset
    rjmp   Main
ProcPrepareOutContinuousBuffer:
    rcall  PrepareOutContinuousBuffer ;prepare next sequence of answer to buffer
    ldi    ActionFlag,DoReadySendAnswer
    rjmp   Main
ProcReceiveSetupData:
    ldi    USBBufptrY,InputBufferBegin ;pointer to begin of receiving buffer
    mov     ByteCount,InputBufferLength ;length of input buffer
    rcall   DecodeNRZI                ;transfer NRZI coding to bits
    rcall   MirrorInBufferBytes        ;invert bits order in bytes
    rcall   BitStuff                  ;removal of bitstuffing
    ;rcall   CheckCRCIn                ;rcall   CheckCRCIn                ;check CRC
    rcall   PrepareUSBOutAnswer        ;prepare answers to transmitting buffer
    ldi     ActionFlag,DoReadySendAnswer
    rjmp    Main
;*****
;* Joystick Requests Processing Routine
;*****
Reset1Wire:
    sbi DDR1W, BIT1W; 0
    ldi temp0, low(480*2)    ; 480us
    ldi temp1, high(480*2)
s1w_loop1:
    nop
    nop
    subi    temp0, 1
    sbci    temp1, 0
    brcc    s1w_loop1
    cbi DDR1W, BIT1W; 1
    ldi temp0, low(480*2)    ; 480us
    ldi temp1, high(480*2)
s1w_loop2:
    nop
    nop
    subi    temp0, 1
    sbci    temp1, 0
    brcc    s1w_loop2
    ret
ReadWrite1Wire:
    ldi temp0, 8
r1w_nextbit:
    sbi DDR1W, BIT1W; 0
    ldi temp1, 4*6          ; 6us
ri1_start:
    dec temp1
    brne    ri1_start
    sbr     temp2,0
    cbi DDR1W, BIT1W; 1 if needed
    ldi temp1, 4*9          ; 9us
ri1_start2:
    dec temp1
    brne    ri1_start2
    lsr     temp2
    sbic     PIN1W, BIT1W
    sbr     temp2,(1<<7)
    ldi temp1, 4*45         ; 45us

```

```

ri1_end:
    dec temp1
    brne    ri1_end
    cbi DDR1W, BIT1W; 1
    ldi temp1, 4*10    ; 10us
ri1_end2:
    dec temp1
    brne    ri1_end2
    dec temp0
    brne    r1w_nextbit
    ret
ProcJoystickRequest:
    ; clear ready flag to avoid data conflict
    mov     temp0, JoystickFlags
    ldi     temp0, 0xFF
    andi    temp0, ~JoystickDataReady
    andi    temp0, ~JoystickDataRequest ; clear request flag to avoid call on next cycle
    and     temp0, JoystickFlags, temp0
    ; simulate call to AddCRCOOut
    ; simply push point of return onto stack
    ldi     temp0, low(AddCRCOOutReturn) ;ROMpointer to descriptor
    push    temp0
    ldi     temp0, high(AddCRCOOutReturn)
    push    temp0
;sbi DDRD,5
;sbi PORTD,5
    ; Check
    ldi     temp2, 0xFF
    rcall   ReadWrite1Wire
    or      temp2, temp2
    breq    no_temp
    ; Read
    rcall   Reset1Wire
    ldi     temp2, 0xCC ; Skip ROM
    rcall   ReadWrite1Wire
    ldi     temp2, 0xBE ; Read
    rcall   ReadWrite1Wire
    ldi     temp2, 0xFF
    rcall   ReadWrite1Wire
    mov     temp3, temp2
    ldi     temp2, 0xFF
    rcall   ReadWrite1Wire
#ifdef DS18B20
    ; 12-bit resolution
    subi    temp3, low(-0b00001000) ; add 0.5
    sbci    temp2, high(-0b00001000)
    andi    temp3, 0b11110000
    andi    temp2, 0b00001111
    or      temp3, temp2
    swap    temp3
    ldi     temp2, 0
    sbrl    temp3, 7
    ldi     temp2, 255
#else
    ; 8-bit resolution
    subi    temp3, low(-1) ; add 0.5
    sbci    temp2, high(-1)
    lsr     temp3
    bst     temp2, 0
    bld     temp3, 7
#endif
    subi    temp3, low(-273)
    sts JoyVal, temp3
    sbci    temp2, high(-273)
    sts JoyVal+1, temp2

```

```

; Start
rcall    Reset1Wire
ldi      temp2, 0xCC          ; Skip ROM
rcall    ReadWrite1Wire
ldi      temp2, 0x44          ; Start conversion
rcall    ReadWrite1Wire
;
; rcall    Reset1Wire
;
; sts     JoyVal+1, temp2
;
; lds     temp0, JoyVal
;
; lds     temp1, JoyVal+1
;
;
;
; andi    temp0, 0b11110000
;
; andi    temp1, 0b00000111
;
; or      temp0, temp1
;
; swap    temp0
no_temp:
    lds     temp3, JoyVal
    sts     JoystickBufferBegin+2, temp3
    lds     temp3, JoyVal+1
    sts     JoystickBufferBegin+3, temp3
; cbi PORTD, 5
    ldi     USBBufptrY, JoystickBufferBegin
    ldi     ByteCount, 2+2      ;length of output buffer (only SOP and PID) + 2=length of
report
    push    USBBufptrY
    push    ByteCount
    rjmp    AddCRCOut_2        ;addition of CRC to buffer
;*****
AddCRCOutReturn:
    inc     ByteCount          ;length of output buffer + CRC16
    inc     ByteCount
; Backup Control pipe buffer pointers to save Control pipe state
    mov     temp0, OutputBufferLength
    sts     BkpOutputBufferLength, temp0
    mov     temp0, OutBitStuffNumber
    sts     BkpOutBitStuffNumber, temp0
    inc     BitStuffInOut      ;transmitting buffer - insertion of bitstuff bits
    ldi     USBBufptrY, JoystickBufferBegin ;to transmitting buffer
    rcall    BitStuff
;
    mov     OutputBufferLength, ByteCount ;length of answer store for transmitting
    clr     BitStuffInOut      ;receiving buffer - deletion of bitstuff bits
; copy to Joystick buffer
    sts     JoyOutputBufferLength, ByteCount
    sts     JoyOutBitStuffNumber, OutBitStuffNumber
; Restore Control pipe buffer pointers
    lds     temp0, BkpOutputBufferLength
    mov     OutputBufferLength, temp0
    lds     temp0, BkpOutBitStuffNumber
    mov     OutBitStuffNumber, temp0
; set joystick data ready flag
    ldi     temp0, JoystickDataReady
    or      JoystickFlags, temp0
;TestpointEnd -----
;
; rjmp     CRCReturnPoint
ret
;
; rjmp     Main
;*****
; * Main program END
;*****
;-----
;*****
;
; * Interrupt0 interrupt handler
;*****
INT0Handler:
    in      backupSREG, SREG      ;interrupt INT0

```

```

        push    temp0
        push    temp1
        ldi     temp0,3           ;counter of duration log0
        ldi     temp1,2           ;counter of duration log1
        ;waiting for begin packet
CheckchangeMinus:
        sbis    inputport,DATAMinus ;waiting till change D- to 1
        rjmp    CheckchangeMinus
CheckchangePlus:
        sbis    inputport,DATApplus ;waiting till change D+ to 1
        rjmp    CheckchangePlus
DetectSOPEnd:
        sbis    inputport,DATApplus
        rjmp    Increment0        ;D+ =0
Increment1:
        ldi     temp0,3           ;counter of duration log0
        dec     temp1             ;how many cycles takes log1
        nop
        breq    USBBeginPacket    ;if this is end of SOP - receive packet
        rjmp    DetectSOPEnd
Increment0:
        ldi     temp1,2           ;counter of duration log1
        dec     temp0             ;how many cycles take log0
        nop
        brne    DetectSOPEnd        ;if there isn't SOF - continue
        rjmp    EndInt0HandlerPOP2
EndInt0Handler:
        pop     ACC
        pop     R26
        pop     temp3
        pop     temp2
EndInt0HandlerPOP:
        pop     USBBufptrY
        pop     ByteCount
        mov     bitcount,backupbitcount ;restore bitcount register
EndInt0HandlerPOP2:
        pop     temp1
        pop     temp0
        out     SREG,backupSREG
        ldi     shiftbuf,1<<INTF0 ;zero interruptu flag INTF0
        out     GIFR,shiftbuf
        reti                     ;otherwise finish (was only SOF - every millisecond)
USBBeginPacket:
        mov     backupbitcount,bitcount ;backup bitcount register
        in      shiftbuf,inputport;if yes load it as zero bit directly to shift register
USBloopBegin:
        push    ByteCount          ;additional backup of registers (save of time)
        push    USBBufptrY
        ldi     bitcount,6          ;initialization of bits counter in byte
        ldi     ByteCount,MAXUSBBYTES ;initialization of max number of received bytes in
packet
        ldi     USBBufptrY,InputShiftBufferBegin ;set the input buffer
USBloop1_6:
        in      inputbuf,inputport
        cbr     inputbuf,USBpinmask ;unmask low 2 bits
        breq    USBloopEnd          ;if they are zeros - end of USB packet
        ror     inputbuf             ;transfer Data+ to shift register
        rol     shiftbuf
        dec     bitcount             ;decrement bits counter
        brne    USBloop1_6          ;if it isn't zero - repeat filling of shift register
        nop                          ;otherwise is necessary copy shift register to buffer
USBloop7:
        in      inputbuf,inputport
        cbr     inputbuf,USBpinmask ;unmask low 2 bits
        breq    USBloopEnd          ;if they are zeros - end of USB packet

```

```

        ror     inputbuf      ;transfer Data+ to shift register
        rol     shiftbuf
        ldi     bitcount,7    ;initialization of bits counter in byte
        st      Y+,shiftbuf   ;copy shift register into buffer and increment pointer to buffer
USBloop0:                                ;and start receiving next byte
        in      shiftbuf,inputport;zero bit directly to shift register
        cbr     shiftbuf,USBpinmask ;unmask low 2 bits
        breq    USBloopEnd    ;if they are zeros - end of USB packet
        dec     bitcount      ;decrement bits counter
        nop
        dec     ByteCount     ;if not reached maximum buffer
        brne    USBloop1_6    ;then receive next
        rjmp    EndInt0HandlerPOP ;otherwise repeat back from begin
USBloopEnd:
        cpi     USBBufptrY,InputShiftBufferBegin+3 ;if at least 3 byte not received
        brcs    EndInt0HandlerPOP ;then finish
        lds     temp0,InputShiftBufferBegin+0 ;identifier of packet to temp0
        lds     temp1,InputShiftBufferBegin+1 ;address to temp1
        brne    TestDataPacket ;if is length different from 3 - then this can be only DataPaket
TestIOPacket:
        andi    temp1,0xFE    ;MMM mask out bit 0 of address to avoid conflict with end-
point 1
        cp      temp1,MyAddress ;if this isn't assigned (address) for me
        brne    TestDataPacket ;then this can be still DataPacket
TestSetupPacket: ;test to SETUP packet
        cpi     temp0,nNRZISETUPPID
        brne    TestOutPacket ;if this isn't Setup PID - decode other packet
        ldi     State,SetupState
        rjmp    EndInt0HandlerPOP ;if this is Setup PID - receive consecutive Data packet
TestOutPacket: ;test for OUT packet
        cpi     temp0,nNRZIOUTPID
        brne    TestInPacket ;if this isn't Out PID - decode other packet
        ldi     State,OutState
        rjmp    EndInt0HandlerPOP ;if this is Out PID - receive consecutive Data packet
TestInPacket: ;test on IN packet
        cpi     temp0,nNRZIINPID
        brne    TestDataPacket ;if this isn't In PID - decode other packet
        rjmp    AnswerToInRequest
TestDataPacket: ; test for DATA0 and DATA1 packet
        cpi     temp0,nNRZIDATA0PID
        breq    Data0Packet ;if this isn't Data0 PID - decode other packet
        cpi     temp0,nNRZIDATA1PID
        brne    NoMyPacked ;if this isn't Data1 PID - decode other packet
Data0Packet:
        cpi     State,SetupState ;if was state Setup
        breq    ReceiveSetupData ;receive it
        cpi     State,OutState ;if was state Out
        breq    ReceiveOutData ;receive it
NoMyPacked:
        ldi     State,BaseState ;zero state
        rjmp    EndInt0HandlerPOP ;and receive consecutive Data packet

AnswerToInRequest:
        push    temp2 ;backup next registers and continue
        push    temp3
        push    R26
        push    ACC
; this might be Endpoint1 interrupt query
        lds     temp1,InputShiftBufferBegin+1 ;address to temp1
        lds     temp2,InputShiftBufferBegin+2 ;endpoint and CRC to temp2
        ror     temp1 ; move bit 0 to carry
        ror     temp2 ; bring bit 7 to carry
        swap    temp2
        sbrs    temp1, 0; check bit 1 (6) of address
        rjmp    AddrBit6Zero

```



```

        com            temp2
AddrBit6Zero:
        andi    temp2, 0x0F
        cpi     temp2, 0x0A
        breq    ProcessEndpoint0
        cpi     temp2, 0x05
        breq    ProcessEndpoint1
        rjmp    EndInt0Handler
ProcessEndpoint0:
        cpi     ActionFlag,DoReadySendAnswer ;if isn't prepared answer
        brne    NoReadySend ;then send NAK
        rcall   SendPreparedUSBAnswer;transmitting answer back
        and     MyUpdatedAddress,MyUpdatedAddress ;if is MyUpdatedAddress nonzero
        brne    SetMyNewUSBAddress_2 ;then is necessary to change USB address
        ldi     State,InState
        ldi     ActionFlag,DoPrepareOutContinuousBuffer
        rjmp    EndInt0Handler ;and repeat - wait for next response from USB
ReceiveSetupData:
        push    temp2 ;backup next registers and continue
        push    temp3
        push    R26
        push    ACC
        rcall   SendACK ;accept Setup Data packet
        rcall   FinishReceiving ;finish receiving
        ldi     ActionFlag,DoReceiveSetupData
        rjmp    EndInt0Handler
ReceiveOutData:
        push    temp2 ;backup next registers and continue
        push    temp3
        push    R26
        push    ACC
        cpi     ActionFlag,DoReceiveSetupData ;if is currently in process command Setup
        breq    NoReadySend ;then send NAK
        rcall   SendACK ;accept Out packet
        clr     ActionFlag
        rjmp    EndInt0Handler
NoReadySend:
        rcall   SendNAK ;still I am not ready to answer
        rjmp    EndInt0Handler ;and repeat - wait for next response from USB

SetMyNewUSBAddress_2:
        rjmp    SetMyNewUSBAddress
;*****
;
;
; * ENDPOINT 1
;
;*****
ProcessEndpoint1: ; on Endpoint1 In we have interrupt handler which is sending reports of joystick data
; Check if we have joystick data ready
        sbrs    JoystickFlags, JoystickDataReadyBit
        rjmp    NoJoystickDataReady
; Backup Control pipe buffer pointers to save Control pipe state
        mov     temp0, OutputBufferLength
        sts     BkpOutputBufferLength,temp0
        mov     temp0, OutBitStuffNumber
        sts     BkpOutBitStuffNumber,temp0
; Retrieve Joystick buffer parameters
        lds     temp0,JoyOutBitStuffNumber
        mov     OutBitStuffNumber, temp0
        lds     ByteCount,JoyOutputBufferLength ;length of answer
        ldi     USBBufptrY,JoystickBufferBegin ;pointer to start of transmittion
buffer
        rcall   SendUSBBuffer
; Restore Control pipe buffer pointers
        lds     temp0, BkpOutputBufferLength

```

```

        mov     OutputBufferLength, temp0
        lds     temp0, BkpOutBitStuffNumber
        mov     OutBitStuffNumber,temp0
        ; flip data PID
        lds     temp0, JoystickBufferBegin + 1
        cpi     temp0, DATA0PID
        breq     FlipToDATA1PID
        ldi     temp0, DATA0PID
        rjmp     FlipDone
FlipToDATA1PID:
        ldi     temp0, DATA1PID
FlipDone:
        sts     JoystickBufferBegin + 1,temp0
        ldi     temp0,JoystickDataRequest
        or      JoystickFlags,temp0 ;JoystickDataRequest ; request new joystick data
        rjmp     EndInt0Handler      ;and complete
NoJoystickDataReady:
        ; rcall   SendNAK                      ;still I am not ready to answer
        rjmp     EndInt0Handler      ;and repeat - wait for next response from USB
;--END--ENDPOINT1
;-----
SetMyNewUSBAddress:      ;set new USB address in NRZI coded
        clr     MyAddress            ;original answer state - of my nNRZI USB address
        ldi     temp2,0b00000001    ;mask for xoring
        ldi     temp3,8              ;bits counter
SetMyNewUSBAddressLoop:
        mov     temp0,MyAddress      ;remember final answer
        ror     MyUpdatedAddress     ;to carry transmitting bit LSB (in direction firstly LSB then
MSB)
        brcs    NoXORBit             ;if one - don't change state
        eor     temp0,temp2          ;otherwise state will be changed according to last bit of an-
swer
NoXORBit:
        ror     temp0                ;last bit of changed answer to carry
        rol     MyAddress            ;and from carry to final answer to the LSB place (and reverse
LSB and MSB order)
        dec     temp3                ;decrement bits counter
        brne    SetMyNewUSBAddressLoop ;if bits counter isn't zero repeat transmitting with
next bit
        clr     MyUpdatedAddress     ;zero addresses as flag of its next unchanging
        ; mask out bit 0 to avoid conflict with endpoints
        mov     temp2, MyAddress
        andi    temp2,0xFE
        mov     MyAddress, temp2
        rjmp     EndInt0Handler
;-----
FinishReceiving:         ;corrective actions for receive termination
        cpi     bitcount,7           ;transfer to buffer also last not completed byte
        breq     NoRemainingBits     ;if were all bytes transfered, then nothing transfer
        inc     bitcount
ShiftRemainingBits:
        rol     shiftbuf             ;shift remaining not completed bits on right position
        dec     bitcount
        brne    ShiftRemainingBits
        st      Y+,shiftbuf          ;and copy shift register bo buffer - not completed byte
NoRemainingBits:
        mov     ByteCount,USBBufptrY
        subi    ByteCount,InputShiftBufferBegin-1 ;in ByteCount is number of received bytes
(including not completed bytes)
        mov     InputBufferLength,ByteCount ;and save for use in main program
        ldi     USBBufptrY,InputShiftBufferBegin ;pointer to begin of receiving shift buffer
        ldi     R26,InputBufferBegin+1 ;data buffer (leave out SOP)
        push    XH                   ;save RS232BufptrX Hi index
        clr     XH
MoveDataBuffer:

```

```

        ld     temp0,Y+
        st     X+,temp0
        dec   ByteCount
        brne  MoveDataBuffer
        pop   XH                                ;restore RS232BufptrX Hi index
        ldi   ByteCount,nNRZISOPbyte
        sts   InputBufferBegin,ByteCount        ;like received SOP - it is not copied from
shift buffer
        ret
;-----
;*****
;* Other procedures
;*****
;-----
USBReset:                                ;iinitialization of USB state engine
        ldi   temp0,nNRZIADDR0                ;initialization of USB address
        mov   MyAddress,temp0
        clr   State                            ;initialization of state engine
        clr   BitStuffInOut
        clr   OutBitStuffNumber
        clr   ActionFlag
        clr   RAMread                          ;will be reading from ROM
        sts   ConfigByte,RAMread              ;unconfigured state
        ret
;-----
SendPreparedUSBAnswer:                   ;transmitting by NRZI coding OUT buffer with length
OutputBufferLength to USB
        mov   ByteCount,OutputBufferLength    ;length of answer
SendUSBAnswer:                           ;transmitting by NRZI coding OUT buffer to USB
        ldi   USBBufptrY,OutputBufferBegin    ;pointer to begin of transmitting buffer
SendUSBBuffer: ;transmitting by NRZI coding given buffer to USB
        ldi   temp1,0                          ;incrementing pointer (temporary variable)
        mov   temp3,ByteCount                  ;byte counter: temp3 = ByteCount
        ldi   temp2,0b00000011                ;mask for xoring
        ld     inputbuf,Y+                     ;load first byte to inputbuf and increment pointer to buffer
                                                ;USB as output:
        cbi   outputport,DATApplus            ;down DATAPLUS : idle state of USB port
sbi outputport,DATAMinus                   ;set DATAMINUS : idle state of USB portsbi
        USBdirection,DATApplus                ;DATAPLUS as output
        ...

```