

С. Г. Орловська

Основи метрології, стандартизації і сертифікації

Частина 2

Вимірювання фізичних величин

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені
І. І. МЕЧНИКОВА



С. Г. Орловська

***Основи метрології, стандартизації
і сертифікації***

Частина 2

Вимірювання фізичних величин

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



ОЛДІПІА

2023

УДК 621.317

О-666

Рецензенти:

В. Я. Черняк, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізичної електроніки факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

В. І. Полетаєв, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри технічної кібернетики та інформаційних технологій імені проф. Р.В. Мерктя Одеського національного морського університету

*Рекомендується до друку Вченою радою
ОНУ імені І. І. Мечникова.
(протокол № 11 від 28 червня 2022 р.)*

Орловська С. Г.

О-666 Основи метрології, стандартизації і сертифікації.
Частина 2. Вимірювання фізичних величин : навч. посіб. /
С. Г. Орловська. – Одеса : Олді+, 2023. – 266 с.

ISBN 978-966-289-752-4

У навчальному посібнику розглядаються методи вимірювань фізичних величин, види засобів вимірювань, класи точності засобів вимірювань з визначенням меж допустимих похибок. Проводиться детальний опис засобів та методів вимірювання електричних, оптичних та температурних величин. Розглянуто контактні та безконтактні методи вимірювання температури, сучасні методи визначення температурних полів, температури мікро-та наноб'єктів.

Для студентів природничих факультетів вищих навчальних закладів.

УДК 621.317

ISBN 978-966-289-752-4

© Орловська С.Г., 2023

Передмова

Розвиток науки і техніки, задачі створення сучасних технологій значно посилили роль метрології як науки про вимірювання. Без випереджаючого розвитку метрології неможливий прогрес багатьох напрямків науки і техніки і передусім розробка нових сучасних засобів вимірювання та їх практичне використання. При розробці, виробництві, експлуатації технічних та автоматизованих систем, контролі стану навколишнього середовища, в медицині, в інших видах діяльності суспільства вимірювання були, є і будуть одними з найважливіших умов досягнення поставлених цілей. Одним із основних завдань метрології є забезпечення єдності вимірювань та достовірності їх результатів, оскільки останнім часом підвищились вимоги до точності вимірювань, збільшилася кількість вимірюваних величин.

Запропонований навчальний посібник створено за програмами дисциплін «Технологічні вимірювання та прилади», «Основи метрології, стандартизації та сертифікації» що передбачають підготовку спеціалістів за спеціальностями 151- «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Мета – надання знань з теорії вимірювань, а саме: аналіз методів і технічних засобів вимірювання, принципів і фізичних механізмів їх роботи, особливостей застосування, метрологічного та нормативного забезпечення; формування умінь і навиків щодо оптимального вибору засобів та методів вимірювання, оцінок похибок, необхідних для отримання вимірювальної інформації високої якості.

Рекомендовано для студентів природничих факультетів, аспірантів вищих навчальних закладів, діяльність яких пов'язана з вимірюваннями, а також спеціалістів, які займаються розробкою і використанням засобів вимірювальної техніки.

ЗМІСТ

1. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ.....	7
1.1. Розмірність вимірювальної величини.....	7
1.2. Методи вимірювань.....	12
1.3. Контроль, види контролю.....	17
1.4. Методика виконання вимірювань.....	21
1.5. Види засобів вимірювання.....	24
1.6 .Вимірювальні сигнали.....	31
1.7. Метрологічні показники засобів вимірювань.....	34
1.8. Метрологічні характеристики засобів вимірювань.....	35
1.9. Класи точності засобів вимірювань.....	39
1.10. Метрологічна надійність засобів вимірювання.....	48
1.11. Метрологічна атестація засобів вимірювань.....	50
2. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН.....	52
2.1. Електромеханічні прилади.....	55
2.2. Прилади магнітоелектричної системи.....	59
2.3. Прилади електромагнітної системи.....	69
2.4. Випрямні прилади.....	72
2.5. Термoeлектричні прилади.....	76
2.6. Мостові та компенсаційні схеми вимірювання електричних величин при постійному та змінному струмі.....	78
2.6.1. Мости постійного струму.....	79
2.6.2. Мости змінного струму.....	82
2.7. Компенсатори постійного струму.....	87
2.8. Цифрові електронні вольтметри.....	90
3. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУР. КОНТАКТНІ МЕТОДИ ...	101
3.1. Температурні шкали.....	101

3.1.1. Правила побудови температурних шкал.....	101
3.1.2. Термодинамическая шкала температур.....	104
3.2. Прилади для вимірювання температур. Складі рідинні термометри.....	109
3.3. Види і класифікація термометрів.....	112
3.4. Лабораторні термометри.....	115
3.5. Максимальні та мінімальні термометри.....	120
3.6. Властивості термометричних рідин.....	123
3.7. Властивості термометричного скла.....	125
3.8. Похибки вимірів температури термометрами та їх усунення.....	128
3.9. Вимірювання температури термоелектричними перетворювачами.....	132
3.9.1. Фізичні основи принципу дії термоелектричних перетворювачів.....	132
3.9.2. Введення поправки на температуру вільних кінців термоелектричного термометра.....	136
3.9.3. Термоелектродні матеріали.....	138
3.9.4. Типи та характеристики термоелектричних термометрів.....	143
3.9.5. Основні джерела похибок термоелектричних термометрів.....	149
4. БЕЗКОНТАКТНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.....	151
4.1. Теплообмін випромінюванням. Оптичні пірометри.....	151
4.1.1. Поглинання, відбивання та пропускання світла.....	151
4.1.2. Закони теплового випромінювання.....	155
4.1.3. Вимірювання температури радіаційними пірометрами.....	162
4.1.4. Вимірювання температури яскравісними пірометрами.....	165
4.1.5. Колірні пірометри.....	173

4.2. Вимірювання розподілу температури за допомогою	
тепловізорів.....	177
4.2.1. Фізична основа, будова, принцип дії і класифікація	
тепловізорів	179
4.2.2. Основні характеристики тепловізорів	188
4.2.3. Похибки тепловізійних вимірювань	193
4.2.4. Використання тепловізорів.....	196
5. ТЕРМОМЕТРИЯ ОБ'ЄКТІВ МАЛИХ РОЗМІРІВ.....	200
5.1. Методи вимірювання температури наноструктур	200
5.2. Вимірювання температури кластерів.....	211
5.2.1. Кластери, їх властивості.....	211
5.2.2. Вимірювання температури кластерів за допомогою	
ІЧ-спектрів поглинання	215
5.2.3. Вимірювання температури кластерів за допомогою	
молекул, що утворюють мініатюрні зонди-термометри.....	218
6. ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ВЕЛИЧИН.....	221
6.1. Класифікація оптичних приладів.....	221
6.2. Фотометричні прилади.....	225
6.3. Метрологічні характеристики спектральних приладів	236
6.4. Дисперсійні спектральні вимірювальні прилади.....	239
6.4. Інтерференційні спектральні прилади.....	247
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	259

1. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

Державний стандарт України ДСТУ 2681-94 "Метрологія. Терміни та визначення" визначає метрологію як науку про вимірювання. Деталізуючи це визначення, можна сказати, що метрологія - це наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення єдності вимірювань та способи досягнення потрібної точності [1]. Під єдністю вимірювань розуміють такий їх стан, при якому результати вимірювань виражаються в узаконених одиницях, а їх похибки відомі з заданою ймовірністю.

Методи метрології - сукупність фізичних та математичних методів, що використовуються для одержання вимірювальної інформації із заданими точністю та достовірністю (методів вимірювальних перетворень, методів вимірювань та опрацювання результатів спостережень, планування вимірювального експерименту) [1].

1.1. Розмірність вимірюваної величини

Вимірювання є інструментом пізнання об'єктів і явищ навколишнього світу. Об'єктами вимірювань є фізичні та нефізичні величини (в економіці, медицині, інформатиці, управлінні якістю і ін.).

Вся сучасна фізика може бути побудована на семи основних величинах, які характеризують фундаментальні властивості матеріального світу. До них відносяться: *довжина, маса, час, сила електричного струму, термодинамічна температура, кількість*

речовини та сила світла. За допомогою цих та двох додаткових величин - плоского і тілесного кутів - введених виключно для зручності, утворюється все різноманіття похідних фізичних величин і забезпечується опис будь-яких властивостей фізичних об'єктів і явищ.

Вимірювання фізичних величин поділяються на такі області і види:

1. Вимірювання геометричних величин: довжин; відхилень форми поверхонь; параметрів складних поверхонь; кутів.
2. Вимірювання механічних величин: маси; сили; крутильних моментів, напружень і деформацій; параметрів руху; твердості.
3. Вимірювання параметрів потоку, витрати, рівня, об'єму речовин: масової та об'ємної витрати рідин в трубопроводах; витрати газів; місткості; параметрів відкритих потоків; рівня рідини.
4. Вимірювання тисків, вакуумні вимірювання: надлишкового тиску; абсолютного тиску; змінного тиску; вакууму.
5. Фізико-хімічні вимірювання: в'язкості; щільності; концентрації компонентів в твердих, рідких і газоподібних речовинах; вологості газів, твердих речовин; електрохімічні вимірювання.
6. Теплофізичні і температурні вимірювання: температури; теплофізичних величин.
7. Вимірювання часу і частоти: методи і засоби відтворення і зберігання одиниць і шкал часу і частоти; вимірювання інтервалів часу; вимірювання частоти періодичних процесів; методи і засоби передачі розмірів одиниць часу і частоти.

8. Вимірювання електричних і магнітних величин на постійному і змінному струмі: сили струму, електрорушійної сили, напруги, потужності і енергії, кута зсуву фаз; електричного опору, провідності, ємності, індуктивності та добротності електричних ланцюгів; параметрів магнітних полів; магнітних характеристик матеріалів.

9. Радіоелектронні вимірювання: інтенсивності сигналів; параметрів форми і спектра сигналів; параметрів трактів з зосередженими та розподіленими постійними; властивостей речовин і матеріалів радіотехнічними методами; антенні.

10. Вимірювання акустичних величин: акустичні - в повітряному середовищі і в газах; акустичні - у водному середовищі; акустичні - в твердих тілах; аудіометрія і вимірювання рівня шуму.

11. Оптичні і оптико-фізичні вимірювання: світлові, вимірювання оптичних властивостей матеріалів у видимій області спектра; енергетичних параметрів некогерентного оптичного випромінювання; енергетичних параметрів просторового розподілу енергії та потужності безперервного і імпульсного лазерного і квазімонохроматичного випромінювання; спектральних, частотних характеристик, поляризації лазерного випромінювання; параметрів оптичних елементів, оптичних характеристик матеріалів; характеристик фотоматеріалів і оптичної щільності.

12. Вимірювання іонізуючих випромінювань і ядерних констант: дозиметричних характеристик іонізуючих випромінювань; спектральних характеристик іонізуючих випромінювань; активності

радіонуклідів; радіометричних характеристик іонізуючих випромінювань.

У *кваліметрії* (розділі метрології), присвяченій вимірюванню якості, не прийнято поділ показників якості на основні і похідні. Тут виділяються поодинокі і комплексні показники якості. При цьому одиничні відносяться до одного з властивостей продукції, а комплексні характеризують відразу кілька з властивостей.

Розмірність вимірюваної величини є якісною її характеристикою і позначається символом $\dim$, що походить від слова dimension. Розмірність основних фізичних величин позначається відповідними великими літерами. Наприклад, для довжини, маси і часу відповідно: $\dim l = L$; $\dim m = M$; $\dim t = T$.

При визначенні розмірності *похідних* величин керуються такими правилами [2]:

1. Розмірності лівої і правої частин рівнянь повинні збігатися, так як порівнюватися між собою можуть тільки однакові властивості. Об'єднуючи ліві і праві частини рівнянь, можна прийти до висновку, що алгебраїчно підсумовуватися можуть тільки величини, що мають однакові розмірності.

2. Алгебраїчні правила розмірностей :

2.1. Розмірність добутку кількох величин дорівнює добутку їх розмірностей. Так, якщо залежність між значеннями величин Q, A, B, C має вигляд $Q = A \times B \times C$, то

$$\dim Q = \dim A \times \dim B \times \dim C.$$

2.2. Розмірність частки при діленні однієї величини на іншу дорівнює відношенню їх розмірностей, тобто якщо $Q = A / B$, то

$$\dim Q = \dim A / \dim B.$$

2.3. Розмірність будь-якої величини, яка була зведена в деяку степінь, дорівнює її розмірності в тій же степені. Так, якщо $Q = A^n$,

то
$$\dim Q = \prod_1^n \dim A = \dim^n A.$$

Наприклад, якщо швидкість визначається за формулою $V = L / t$, то $\dim V = \dim L / \dim t = L / T = LT^{-1}$. Якщо сила за другим законом Ньютона $F = m \cdot a$, де $a = V / t$ - прискорення тіла, то $\dim F = \dim m \cdot \dim a = ML / T^2$.

Таким чином, завжди можна висловити розмірність похідної фізичної величини через розмірності основних фізичних величин за допомогою степеневого одночлена:

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma \dots,$$

де $L, M, T, \dots$ - розмірності відповідних основних фізичних величин; $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ - **показники розмірності**. Кожен з показників розмірності може бути позитивним або негативним, цілим або дробовим числом, нулем. Якщо всі показники розмірності дорівнюють нулю, то така величина називається **безрозмірною**. Вона може бути відносною, яка визначається як відношення однойменних величин (наприклад, відносна діелектрична проникність), і **логарифмічною**, яка визначається як логарифм відносної величини (наприклад, логарифм відношення потужностей або напруги). У

гуманітарних науках, мистецтві, спорті, кваліметрії, де номенклатура основних величин не визначена, теорія розмірностей не знаходить поки ефективного застосування.

1.2. Методи вимірювань

Вимірювання – це пізнавальний процес, що полягає в порівнянні даної величини з відомою величиною, прийнятою за одиницю; іншими словами - це отримання інформації щодо розміру фізичної величини [3-5].

При вимірах доводиться мати справу з різними фізичними величинами: дискретними і безперервними, випадковими і не випадковими, постійними і змінними, залежними і незалежними.

Метод вимірювання - це сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювань, при яких відбувається процес вимірювання (ДСТУ 2681-94 [11]).

1) За характером залежності вимірюваної величини від часу методи вимірювань поділяються на [2]:

статичні, при яких вимірювана величина залишається постійною в часі;

динамічні, в процесі яких вимірювана величина змінюється і є непостійною в часі.

Статичними вимірюваннями є, наприклад, вимірювання розмірів тіла, постійного тиску; динамічними - вимірювання пульсуючих тисків, вібрацій.

2) За способом отримання результатів вимірювань (виду рівняння вимірювань) методи вимірювань поділяють на прямі, непрямі, сукупні і спільні.

При **прямому** вимірі шукане значення величини знаходять безпосередньо з дослідних даних, наприклад, вимір кута кутоміром або вимір діаметра штангенциркулем.

При **непрямому** вимірі шукане значення величини визначають на підставі відомої залежності між цією величиною і величинами, що піддаються прямим вимірам, наприклад, визначення об'ємів тіл за допомогою лінійних вимірів геометричних розмірів цих тіл (штангенциркулем, лінійкою, мікрометром).

Спільними називають вимірювання, виконані одночасно (прямі або непрямі) двох або декількох неоднойменних величин. Метою спільних вимірів є знаходження функціональної залежності між величинами, наприклад, залежності довжини тіла від температури, залежності електричного опору провідника від температури і т.п.

Сукупні - це такі вимірювання, в яких значення вимірюваних величин знаходять за даними повторних вимірів однієї або декількох однойменних величин при різних поєднаннях мір або цих величин. Результати сукупних вимірювань знаходять шляхом вирішення системи рівнянь, що складаються за результатами декількох прямих вимірювань. Наприклад, сукупними є вимірювання, при яких маси окремих гир набору знаходять за відомою масою однієї з них і по результатам прямих порівнянь мас різних сполучень гир.

3) За умовами, що визначають точність результату вимірювання, методи діляться на три класи:

Вимірювання максимально можливої точності, яка досягається при існуючому рівні техніки. До них відносяться в першу чергу еталонні вимірювання, пов'язані з максимально можливою точністю отримання встановлених одиниць фізичних величин, і, крім того, вимірювання фізичних констант, перш за все універсальних. До цього ж класу відносяться і деякі спеціальні вимірювання, що потребують високої точності.

Контрольно-повірочні вимірювання, похибка яких з визначеною ймовірністю не повинна перевищувати деяке задане значення. До них відносяться вимірювання, що виконуються лабораторіями державного нагляду за впровадженням і дотриманням стандартів і стану вимірювальної техніки і заводськими вимірювальними лабораторіями з похибкою заздалегідь заданого значення.

Технічні вимірювання, в яких похибка результату визначається характеристиками засобів вимірювань. Прикладами технічних вимірювань є вимірювання, що виконуються в процесі виробництва на машинобудівних підприємствах, на щитах розподільних пристроїв електричних станцій і ін.

4) За способом отримання значень вимірюваних величин розрізняють два основні методи вимірювань: метод безпосередньої оцінки і метод порівняння з мірою.

Метод безпосередньої оцінки - метод вимірювання, при якому значення величини визначають безпосередньо по відліковому пристрою вимірювального приладу прямої дії (наприклад, вимір довжини за допомогою лінійки або розмірів деталей мікрометром, кутоміром і т.д.).

Метод порівняння з мірою - метод вимірювання, при якому вимірювану величину порівнюють з величиною, що відтворюється мірою.

Існують кілька різновидів методу порівняння:

- **метод протиставлення**, при якому вимірювана величина і величина, відтворена мірою, одночасно впливають на прилад порівняння;
- **диференційний метод**, при якому вимірювану величину порівнюють з відомою величиною, що відтворюється мірою. Цим методом, наприклад, визначають відхилення контрольованого діаметра деталі на оптіметрі після його налаштування на нуль по блоку кінцевих мір довжини;
- **нульовий метод**, при якому результуючий ефект впливу величин на прилад порівняння доводять до нуля. Подібним методом вимірюють електричний опір за схемою моста з повним його зрівноваженням;
- **метод збігів**, при якому різниця між вимірюваною величиною і величиною, що відтворюється мірою, визначають, використовуючи співпадиння відміток шкал або періодичних

сигналів (наприклад, при вимірюванні штангенциркулем використовують збіг відміток основної та ноніусної шкал).

5) При вимірюванні фізичних величин незалежно від розглянутих методів розрізняють **контактний і безконтактний методи вимірювань**.

6) **За способом вираження результатів вимірювань розрізняють абсолютні і відносні вимірювання.**

Абсолютне вимірювання засноване на прямих вимірах величини і (або) використанні значень фізичних констант, наприклад, вимір розмірів деталей штангенциркулем або мікрометром.

При **відносних** вимірах величину порівнюють з одноіменною, що відіграє роль одиниці або прийнятої за вихідну, наприклад, вимірювання діаметра деталі, що обертається по числу оборотів атестованого ролика, що стикається з нею.

7) **Залежно від сукупності вимірюваних параметрів** тіла розрізняють **поелементний і комплексний** методи вимірювання.

Поелементний метод характеризується вимірюванням кожного параметра тіла окремо. **Комплексний** метод характеризується вимірюванням сумарного показника якості, на який впливають окремі його складові.

8) **Залежно від вимірювальних засобів**, використовуваних в процесі вимірювання, розрізняють **інструментальний, експертний, евристичний і органолептичний методи вимірювань**.

Інструментальний метод заснований на використанні спеціальних технічних засобів, в тому числі автоматизованих.

Експертний метод заснований на використанні даних декількох фахівців. Широко застосовується в кваліметрії, спорті, мистецтві, медицині.

Евристичні вимірювання засновані на інтуїції. Широко використовується спосіб попарного зіставлення, коли вимірювані величини спочатку порівнюються між собою попарно, а потім здійснюється ранжування на підставі результатів цього порівняння.

Органолептичні вимірювання засновані на використанні органів чуття людини (дотику, нюху, слуху і смаку). Часто використовуються вимірювання на основі вражень (конкурси майстрів мистецтв, змагання спортсменів).

1.3. Контроль, види контролю

Контроль - це процес отримання та обробки інформації про об'єкт (властивості об'єкту, механізму, процесу і т. д.) з метою визначення його придатності або необхідність введення керуючих впливів на фактори, що впливають на об'єкт.

Класифікація видів контролю [2]

1) По можливості (або неможливості) використання об'єкту після виконання контрольних операцій розрізняють **неруйнівний і руйнівний контроль**.

При *неруйнівному* контролі відповідність контрольованого розміру (або значення) норми визначається за результатами взаємодії різних фізичних полів і випромінювань з об'єктом контролю.

Інтенсивність полів і випромінювань вибирається такий, щоб не тільки не відбувалося руйнувань об'єкта контролю, а й не змінювалися його властивості під час контролю. Залежно від природи фізичних полів променеві види неруйнівного контролю поділяються на такі групи: акустичні, радіаційні, оптичні, радіохвильові, теплові, магнітні, вихрові, електричні, контроль проникаючих речовин.

При *руйнівному* контролі визначення відповідності (або невідповідності) контрольованого розміру (або значення) норми супроводжується руйнуванням об'єкта контролю, наприклад, при перевірці виробів на міцність.

2) *За характером розподілу за часом розрізняють безперервний, періодичний і летючий контроль.*

Безперервний контроль полягає в безперервній перевірці відповідності контрольованих розмірів (або значень) нормам протягом усього процесу виготовлення або на певній стадії «життєвого» циклу.

При *періодичному* контролі вимірну інформацію отримують періодично через встановлені інтервали часу τ . Період контролю τ може бути як менше, так і більше часу однієї технологічної операції $\tau_{\text{оп}}$. Якщо $\tau = \tau_{\text{оп}}$, то періодичний контроль є операційним (або післяопераційним).

Летючий контроль проводять в випадкові моменти часу.

3) *Залежно від виконавця* контроль поділяється на: **самоконтроль**, **контроль майстром**, **контроль ВТК** (відділом технічного контролю) та **інспекційний** контроль (спеціально уповноваженими представниками). **Інспекційний** контроль в залежності від того, яка організація уповноважила представника проводити контроль підрозділяється на: відомчий, міжвідомчий, позавідомчий, державний (виконується контролерами Держстандарту).

4) *За стадії технологічного (виробничого) процесу* розрізняють вхідний, операційний і приймальний (приймально-здавальний) контроль.

Вхідному контролю піддають сировину, вихідні матеріали, напівфабрикати, комплектуючі вироби, технічну документацію і т.п., інакше кажучи, все те, що використовується при виробництві продукції або її експлуатації.

Операційний контроль ще незавершеної продукції проводиться на всіх операціях виробничого процесу.

Приймальний контроль готових, складальних і монтажних одиниць здійснюється в кінці технологічного процесу.

5) *За характером впливу на хід виробничого (технологічного) процесу* контроль ділиться на активний і пасивний.

При **активному** контролі його результати безперервно використовуються для управління технологічним процесом. Можна

сказати, що активний контроль суміщений з виробничим процесом в єдиний контрольно-технологічний процес. Як правило, він виконується автоматично.

Пасивний контроль здійснюється після завершення або окремої технологічної операції, або всього технологічного циклу виготовлення деталі або виробу. Він може бути ручним, автоматизований і автоматичним.

6) *Залежно від місця проведення* розрізняють рухомий і стаціонарний контроль.

Рухомий контроль проводиться безпосередньо на робочих місцях, де виготовляється продукція (біля верстата, на складальних і налаштувальних стендах і т.д.).

Стаціонарний контроль проводиться на спеціально обладнаних робочих місцях. Він застосовується при необхідності створення спеціальних умов контролю; при наявності можливості включення в технологічний цикл стаціонарного робочого місця контролера; при використанні засобів контролю, які застосовуються тільки в стаціонарних умовах; при великосерійному і масовому виробництві.

7) *По об'єкту контролю* відрізняють контроль якості **продукції**, що випускається, товарної та супровідної **документації**, **технологічного процесу**, засобів технологічного **оснащення**, проходження **рекламації**, дотримання **умов експлуатації**, а також контроль **технологічної дисципліни і кваліфікації** виконавців.

8) *За кількістю вимірів* відрізняють **одноразовий** і **багаторазовий** контроль.

9) *За способом відбору виробів, що підлягають контролю,* відрізняють суцільний і вибірковий контроль.

Суцільний (стовідсотковий) контроль всіх без винятку виготовлених виробів застосовується при індивідуальному і дрібносерійному виробництві, на стадії освоєння нової продукції, по аварійним параметрам (розмірам), при селективній збірці.

Вибірковий контроль проводиться у всіх інших випадках, найчастіше при великосерійному і масовому виробництві. Для скорочення затрат на контроль великої партії виробів (яку в математичній статистиці прийнято називати генеральною сукупністю) контролю піддається тільки частина партії - вибірка, яка формується за визначеними правилами, що забезпечує випадковий набір виробів. Якщо число бракованих виробів у вибірці перевищує встановлену норму, то вся партія (генеральна сукупність) бракується.

1.4. Методика виконання вимірювань

Основна втрата точності при вимірах відбувається не за рахунок можливої метрологічної несправності застосовуваних засобів вимірювань, а, в першу чергу, за рахунок недосконалості методів і методик виконання вимірювань.

В цілому точність вимірювання залежить від: точності застосовуваного засобу вимірювання; точності методу вимірювання; впливу зовнішніх факторів. Наприклад, при вимірюванні

температури ртутними термометрами слід враховувати точність "зчитування" показань.

Під методикою вимірювання розуміють сукупність методів, засобів, процедур, умов підготовки та проведення вимірювань, а також правил обробки експериментальних даних при виконанні конкретних вимірювань (ДСТУ 7392:2013 [12]).

Розробка методик виконання вимірювань повинна включати наступні пункти:

- 1) аналіз технічних вимог до точності вимірювань, викладених у стандарті; технічних умов або технічних завдань;
- 2) визначення конкретних умов проведення вимірювань;
- 3) вибір випробувального та допоміжного обладнання, а також засобів вимірювальної техніки;
- 4) розробку, при необхідності, нестандартних засобів вимірювань;
- 5) дослідження впливу умов проведення вимірювань та підготовки випробовуваних об'єктів до вимірювань;
- 6) визначення порядку підготовки засобів вимірювань до роботи, послідовності і кількості вимірювань;
- 7) розробку або вибір алгоритму обробки експериментальних даних і правил оформлення результатів вимірювання.

Нормативно-технічними документами (НТД), що регламентують методику виконання вимірювань, є:

1. Державні стандарти або методичні вказівки Держстандарту України по методикам виконання вимірювань. Стандарт розробляється в тому випадку, якщо застосовуються засоби

вимірювань, що внесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки.

2. Галузеві методики виконання вимірювань, що використовуються в одній галузі.

3. Стандарти підприємств на методики виконання вимірювань, використані на одному підприємстві. У НТД на методики виконання вимірювань передбачаються: норми точності вимірювань; специфіка вимірюваної величини (діапазон, найменування продукції і т.д.); максимальна автоматизація вимірювань і обробки даних.

Методики виконання вимірювань перед їх введенням в дію повинні бути *атестовані* або *стандартизовані*. Атестація включає в себе: розробку та затвердження програми атестації; виконання досліджень відповідно до програми; складання та оформлення звіту щодо атестації; оформлення атестата методики виконання вимірювань.

При атестації повинна бути перевірена правильність врахування всіх факторів, що впливають на точність вимірювань, встановлена достовірність їх результатів. Атестацію методик виконання вимірювань проводять державні і відомчі метрологічні служби. При цьому державні метрологічні служби проводять атестацію методик особливо точних, відповідальних вимірювань, а також вимірювань, проведених в організаціях Держстандарту України.

Стандартизація методик застосовується для вимірювань, широко використовуваних на підприємствах. Методики виконання вимірювань періодично переглядаються з метою їх удосконалення.

1.5. Види засобів вимірювання

***Засіб вимірювання** - це технічний пристрій, що використовується при вимірах і має нормовані метрологічні властивості.*

Технічні пристрої, призначені для виявлення (індикації) фізичних властивостей, називаються **індикаторами** (стрілка компаса, лакмусовий папір). За допомогою індикаторів встановлюється тільки наявність вимірюваної фізичної величини, яка нас цікавить, властивості матерії.

По метрологічному призначенню засоби вимірів поділяються на зразкові і робочі.

Зразкові призначені для перевірки по ним інших засобів вимірювання як робочих, так і зразкових менш високої точності.

Робочі засоби вимірювань призначені для вимірювання розмірів величин, необхідних для різноманітної діяльності людини.

Сутність поділу засобів вимірювальної техніки на зразкові і робочі полягає не в конструкції і не в точності, а в їх призначенні.

За рівнем автоматизації всі засоби вимірювань поділяються на три групи:

- **неавтоматичні**;
- **автоматизовані**, що виконують в автоматичному режимі одну або частину вимірювальної операції;
- **автоматичні**, що виконують вимірювання без безпосередньої участі людини, а також всі операції, пов'язані з обробкою їх результатів (реєстрацією), передачею даних або виробленням керуючих сигналів.

За рівнем стандартизації засоби вимірювань підрозділяються на:

- **стандартизовані**, виготовлені відповідно до вимог державного або галузевого стандарту;
- **нестандартизовані** (унікальні), призначені для вирішення спеціального вимірювального завдання, в стандартизації вимог до яких немає необхідності.

По відношенню до вимірюваної фізичної величини засоби вимірювання поділяються на:

- **основні** - це засоби вимірювання тієї фізичної величини, значення якої необхідно отримати відповідно до вимірювальної задачі;
- **допоміжні** - це засоби вимірювання тієї фізичної величини, вплив якої на основний засіб вимірювань або об'єкт вимірювання необхідно врахувати для отримання результатів вимірювання необхідної точності.

До засобів вимірювання відносяться:

1. Міри, призначені для відтворення фізичної величини заданого розміру. Розрізняють **однозначні і багатозначні** міри, а також набори мір (гирі, магазини опорів, ємностей, кварцові генератори і т. п.).

Міри, які відтворюють фізичні величини одного розміру, називаються **однозначними**. **Багатозначні** міри можуть відтворювати ряд розмірів фізичної величини, часто навіть безперервно заповнюють деякий проміжок між визначеними межами. Найбільш поширеними багатозначними мірами є міліметрова лінійка, варіометр і конденсатор змінної ємності, реостат.

У наборах і магазинах окремі міри можуть об'єднуватися в різних поєднаннях для відтворення деяких проміжних або сумарних, але обов'язково дискретних, розмірів величин. У магазинах міри об'єднані в одне механічне ціле, забезпечене спеціальними перемикачами, які пов'язані з відліковими пристроями. В протилежність цього набір складається зазвичай з декількох мір, які можуть виконувати свої функції як окремо, так і в різних поєднаннях одна з одною (набір кінцевих мір довжини, набір гир, набір мір добротності і індуктивності і т. д.).

Порівняння з мірою виконують за допомогою спеціальних технічних засобів - **компараторів** (наприклад, рівноплечні ваги, вимірювальний міст і т. д.).

До однозначних мір належать також зразки і зразкові речовини. ***Стандартні зразки складу та властивостей речовин і матеріалів*** є спеціально оформлені тіла або проби речовини певного і строго регламентованого змісту, одна з властивостей яких за певних умов є величиною з відомим значенням. До них відносяться зразки твердості, шорсткості, білої поверхні, а також стандартні зразки, які використовуються при повірці приладів для визначення механічних властивостей матеріалів. Зразкові речовини відіграють велику роль в створенні реперних точок при побудові шкал. Наприклад, чистий цинк служить для відтворення температури $419,58^{\circ}\text{C}$, золото - $1064,43^{\circ}\text{C}$.

Залежно від похибки атестації міри розподіляються на розряди (міри 1-го, 2-го і т.д. розрядів), а похибка мір є основою їх поділу на

класи. Міри, яким присвоєно той чи інший розряд, застосовуються для перевірки засобів вимірювальної техніки та називаються зразковими.

2. Вимірювальні перетворювачі - це засоби вимірювання, що перероблюють вимірювальну інформацію в форму, зручну для подальшого перетворення, передачі, зберігання і обробки, але, як правило, не доступну для безпосереднього сприйняття спостерігачем (термопари, вимірювальні підсилювачі та ін.).

Переутворювана величина називається *вхідною*, а результат перетворення - *вихідною величиною*. Співвідношення між ними задається **функцією перетворення** (статичною характеристикою). Якщо в результаті перетворення фізична природа величини не змінюється, а функція перетворення є лінійною, то перетворювач називається масштабним, або **підсилювачем**, (підсилювачі напруги, вимірювальні мікроскопи, електронні підсилювачі). Слово "підсилювач" зазвичай вживається з визначенням, яке приписується йому в залежності від роду перетворюваної величини (підсилювач напруги, гідравлічний підсилювач) або від виду одиничних перетворень, що відбуваються в ньому (ламповий підсилювач, струменевий підсилювач). У випадках, коли в перетворювачі вхідна величина перетворюється в іншу за фізичною природою величину, він отримує назву за *типами* цих величин (наприклад, електромеханічний, пневматичний і т.д.).

В залежності від місця, зайнятому в пристрої, перетворювачі діляться на (рис. 1.1): **первинні**, до яких підводиться безпосередньо вимірювана фізична величина; **передавальні**, на виході з яких формуються величини, зручні для їх реєстрації та передачі на відстань; **проміжні**, що займають в вимірювальному ланцюжку місце після первинних.



Рис.1.1. Перетворення вимірювальної інформації. 1 - чутливий елемент; 2 - первинний перетворювач; 3 - проміжні перетворювачі; 4 – передавальний перетворювач.

3. Вимірювальні прилади – засоби вимірювання, призначені для отримання вимірювальної інформації щодо величини, в формі, зручній для сприйняття спостерігачем.

Найбільш поширеними є **прилади прямої дії**, в яких вимірюване значення піддається ряду послідовних перетворень в одному напрямку, тобто без повернення до початкового розміру. До приладів прямої дії відносяться більшість датчиків, термометрів, амперметрів, вольтметрів тощо.

Значно точнішими є **прилади порівняння**, призначені для порівняння вимірюваних величин з величинами, значення яких відомі. Порівняння здійснюється з використанням компенсаційних або мостових ланцюгів. **Компенсаційні ланцюжки** використовуються для порівняння активних величин, таких, що

несуть в собі деякий запас енергії (сили, тиску і моментів сил, електричних напруг і струмів, яскравість джерел випромінювання і т.д.). Порівняння відбувається за допомогою зустрічного включення цих величин в єдину схему і шляхом спостереження за їх різницеvim ефектом. За таким принципом працюють такі прилади, як рівноплічні і нерівноплічні ваги (порівняння на важелі силових ефектів дії мас), вантажопоршневі і вантажопружинні манометричні і вакуумні прилади (порівняння на важелі силових ефектів вимірюваного тиску і мір маси) та ін.

Для порівняння пасивних величин (електричні, гідравлічні, пневматичні та інші опори) застосовуються *мостові ланцюги* типу електричних урівноважених чи неуврівноважених мостів. Звичайно, пасивні величини можуть бути спочатку перетворені на активні або навпаки, і порівнюватися відповідно в компенсаційних або мостових ланцюгах.

За способом відліку значень вимірюваних величин прилади поділяються на такі, що безпосередньо показують значення фізичної величини, зокрема *аналогові, цифрові і реєструючі*.

Найбільшого поширення набули аналогові прилади, відлікові пристрої яких складаються з двох елементів - шкали та покажчика, причому один із них пов'язаний з рухомою системою приладу, а інший - з корпусом. У цифрових приладах відлік здійснюється за допомогою механічних, електронних або інших цифрових пристроїв. Цифрові прилади прямої дії застосовуються найбільш часто у тих випадках, коли вимірювана величина попередньо легко

перетворюється на кут повороту деякого валу (лопатеві лічильники) або на послідовність імпульсів (реєстрація радіоактивних випромінювань).

За способом запису вимірюваної величини реєструючі прилади діляться на **самописні та друкуючі**. У самописних приладах (наприклад, барограф або шлейфовий осцилограф) запис показань є графіком або діаграмою. У приладах друку інформація про значення вимірюваної величини видається в числовій формі на паперовій стрічці.

Автоматичні прилади порівняння випускаються найчастіше як комбіновані прилади, у яких шкальний чи цифровий відлік поєднується із записом на діаграмі чи з друкуванням результатів вимірів.

4. Допоміжні засоби вимірів. До цієї групи відносяться засоби вимірювання величин, що впливають на метрологічні властивості іншого засобу вимірювань при його застосуванні або повірці. Показання допоміжних засобів вимірювань використовуються для обчислення поправок до результатів вимірювань (наприклад, термометрів для вимірювання температури навколишнього середовища під час роботи з вантажопоршневими манометрами) або для контролю за підтримкою значень впливових величин у заданих межах (наприклад, психрометрів для вимірювання вологості при точних інтерференційних вимірюваннях довжин).

5. Вимірювальні установки. Для вимірювання будь-якої величини або одночасно кількох величин іноді буває недостатньо одного вимірювального приладу. У цих випадках створюють цілі комплекси розташованих в одному місці та функціонально об'єднаних один з одним засобів вимірювань (мір, перетворювачів, вимірювальних приладів та допоміжних засобів), призначених для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

6. Вимірювальні системи - це засоби і пристрої, територіально роз'єднані і з'єднані каналами зв'язку. Інформація може бути представлена у формі, зручній як безпосереднього сприйняття, так і автоматичної обробки, передачі та використання у автоматизованих системах управління.

1.6.Вимірювальні сигнали

В одній вимірювальній системі інформація про значення фізичних величин передається з одного засобу вимірювання на інший сигналами.

Найбільш часто використовуваними сигналами є [2]:

- сигнали постійного рівня (постійні електричні струми і напруги, тиск стисненого повітря, світловий потік);
- синусоїдальні сигнали (змінний електричний струм або напруга);
- послідовність прямокутних імпульсів (електричних або світлових).

Сигнал характеризується рядом параметрів. У першому випадку єдиним параметром сигналу є його рівень. Синусоїдальний сигнал характеризується амплітудою, фазою і частотою; послідовність прямокутних імпульсів - амплітудою, фазою, частотою, шириною імпульсів або поєднанням імпульсів різного рівня протягом певного періоду часу.

Для того, щоб вихідний сигнал став вимірювальним, необхідно один з його параметрів зв'язати функціональною залежністю з вимірюваною фізичною величиною. Параметр сигналу, обраний як такий, називається інформативним, інші параметри - неінформативними. Процес перетворення вихідного сигналу на вимірювальний, тобто перетворення одного з параметрів вихідного сигналу, що генерується деяким джерелом, в інформативний параметр, називається **модуляцією**. Залежно від виду модуляції вимірювальні сигнали можна класифікувати в такий спосіб.

Сигнали постійного рівня характеризуються лише одним параметром і тому можуть бути модульовані лише за рівнем. Рівень сигналу є мірою вимірюваної величини.

Синусоїдальні сигнали можуть бути модульовані за амплітудою, фазою або частотою. Залежно від того, який із цих параметрів сигналу є мірою вимірюваної величини, говорять про амплітудно-модульовані, фазо-модульовані або частотно-модульовані сигнали.

Послідовність прямокутних імпульсів може бути модульована по амплітуді (амплітудно-імпульсно модульовані сигнали), по частоті (частотно-імпульсно модульовані сигнали), по фазі (фазо-імпульсно

модульовані сигнали) або по ширині імпульсів (широотно-імпульсно модульовані сигнали). *Сигнал, в якому різним значенням вимірюваної величини поставлена у відповідність певна комбінація імпульсів різного рівня, називається кодо-імпульсним або цифровим.*

Залежно від характеру зміни інформативного параметра сигналу за рівнем та в часі вимірювальні сигнали поділяються на:

- безперервні за рівнем, або аналогові, якщо їх інформативний параметр може приймати будь-які значення в заданому діапазоні;
- дискретні, або квантовані за рівнем, якщо їх інформативний параметр може приймати лише деяку обмежену кількість значень у межах заданого інтервалу;
- безперервні в часі, якщо вони існують протягом усього часу виміру і в будь-який момент можуть бути виведеними на реєстрацію;
- дискретизовані, або квантовані за часом, якщо вони несуть інформацію щодо значення вимірюваної фізичної величини лише протягом деяких проміжків часу. До цієї групи відносяться, наприклад, всі види імпульсно-модульованих сигналів.

При аналізі вимірювальних сигналів їх прийнято описувати або функціями часу, або за допомогою спектральних уявлень, заснованих на перетвореннях Фур'є і Лапласа.

1.7. Метрологічні показники засобів вимірювань

При виборі засобу вимірювання в залежності від заданої точності виготовлення деталей необхідно враховувати їх метрологічні показники [1,2,4]. До них відносяться:

1. Довжина поділки шкали - це відстань між серединами двох сусідніх позначок (штрихів, точок тощо) шкали.

2. Ціна поділки шкали - це різниця значень величин, що відповідають двом сусіднім відміткам шкали (наприклад, для міліметрової лінійки вона дорівнює 1мм).

3. Градувальна характеристика – залежність між значеннями величин на виході та вході засобу вимірювань. Градувальну характеристику знімають для уточнення результатів вимірювання. До них відносяться, наприклад, номінальна статична характеристика перетворення вимірювального перетворювача, номінальне значення однозначної міри, межі та ціна поділки шкали, види та параметри цифрового коду засобів вимірювань, призначених для видачі результатів у цифровому коді.

4. Діапазон показань - область значень шкали, обмежена кінцевим і початковим значеннями шкали, тобто найбільшим і найменшим значеннями вимірюваної величини.

5. Діапазон вимірювань - область значень вимірюваної величини з нормованими похибками засобу вимірювання, що допускаються.

6. Чутливість приладу - відношення зміни сигналу на виході вимірювального приладу до зміни вимірюваної величини (сигналу на вході). Так, якщо при вимірюванні діаметра валу $d=100\text{мм}$ зміна вимірюваної величини на $\Delta d = 0,01\text{мм}$ викликала переміщення стрілки показуючого пристрою на $\Delta l = 10\text{мм}$, абсолютна чутливість приладу становить $S = \Delta l / \Delta d = 10 / 0,01 = 1000$. Для шкальних вимірювальних приладів абсолютна чутливість чисельно дорівнює передаточному відношенню.

7. Варіація (нестабільність) показань приладу - алгебраїчна різниця між найбільшим і найменшим результатами вимірювань при багаторазовому вимірі однієї і тієї ж величини в незмінних умовах.

8. Стабільність засобу вимірювань - властивість, що виражає незмінність з часом його метрологічних характеристик (показань).

1.8. Метрологічні характеристики засобів вимірювань

Всі засоби вимірювань, незалежно від їх виду, мають ряд загальних властивостей, необхідних для виконання ними функціонального призначення. **Технічні характеристики, що описують ці властивості і впливають на результати та похибки вимірювань, називаються метрологічними характеристиками засобів вимірювань.**

Залежно від специфіки та призначення засобів вимірювань нормуються різні набори або комплекси метрологічних характеристик. Однак ці комплекси повинні бути достатні для

врахування властивостей засобів вимірювання в оцінці похибок вимірювань.

Метрологічні характеристики, що входять у встановлений комплекс, вибирають такими, щоб забезпечити можливість їх контролю при прийнятних витратах. В експлуатаційній документації на засоби вимірювань вказують рекомендовані методи розрахунку інструментальної складової похибки вимірювань при використанні засобів вимірювання даного типу в реальних умовах застосування.

За ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 «Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань» [10,13] передбачена наступна номенклатура метрологічних характеристик:

1) Характеристики, призначені для визначення результатів вимірювань (без введення поправок):

- функція перетворення вимірювального перетворювача - $f(x)$;
- значення однозначної чи багатозначної міри – y ;
- ціна поділки шкали вимірювального приладу чи багатозначної міри;
- вид вхідного коду, число розрядів коду, вартість одиниці найменшого розряду засобів вимірювань, призначених для видачі результатів у цифровому коді.

2) Характеристики похибок засобів вимірювань. Вони включають: значення похибки, її систематичну та випадкову складові, похибки випадкової складової $\Delta_{\text{вип}}$ Н від гістерезу – варіація Н вихідного сигналу (показання).

Для систематичної складової $\Delta_{\text{сист}}$ похибки засобів вимірювань вибирають з наступних характеристик [2,7]:

- значення систематичної складової $\Delta_{\text{сист}}$;
- математичне очікування $M[\Delta_{\text{сист}}]$;
- середнє квадратичне відхилення $\sigma[\Delta_{\text{сист}}]$ систематичної складової похибки;

Для випадкової складової $\Delta_{\text{вип}}$ похибки вибирають характеристики з наступних:

- середнє квадратичне відхилення $\sigma[\Delta_{\text{вип}}]$ випадкової складової похибки та нормалізована автокореляційна функція $\gamma_{\Delta_{\text{вип}}}(\tau)$;
- або функція спектральної щільності $S_{\Delta_{\text{вип}}}(\omega)$ випадкової складової похибки.

У нормативно-технічній документації на засоби вимірювань конкретних видів або типів допускається нормувати функції або щільності розподілу ймовірностей систематичної та випадкової складових похибки.

3) Характеристики чутливості засобів вимірювань до впливових, що вибираються з наступних:

- функція впливу $\psi(\xi)$;
- зміни $\varepsilon(\xi)$ значень метрологічних характеристик засобу вимірювання, спричинені зміною впливу величин ξ у встановлених межах.

4) Динамічні характеристики. Ці характеристики відображають інерційні властивості засобу вимірювань при впливі на нього змінних

з часом величин - параметрів вхідного сигналу, зовнішніх величин, навантаження.

За ступенем повноти опису інерційних властивостей засобів вимірювань динамічні характеристики поділяються на повні та частинні.

До повних динамічних характеристик належать:

- диференційне рівняння, що описує роботу засобу вимірювання;
- передавальна функція;
- перехідна характеристика;
- імпульсна перехідна характеристика;
- амплітудно - фазова характеристика;
- сукупність амплітудно-фазових та фазово-частотних характеристик.

Частковими динамічними характеристиками можуть бути окремі параметри повних динамічних характеристик або характеристики, що не відображають динамічних властивостей засобів вимірювань, але необхідні для виконання вимірювань з потрібною точністю (наприклад, час реакції, коефіцієнт демпфування, значення амплітудно - частотної характеристики на резонансній частоті, значення резонансної власної кругової частоти). Комплекс їх обумовлюється у відповідних стандартах.

Норми на окремі метрологічні характеристики наводяться в експлуатаційній документації (паспорті, технічному описі, інструкції з експлуатації тощо) у вигляді номінальних значень, коефіцієнтів функцій, заданих формулами, таблицями або графіками меж відхилень від номінальних значень функцій.

1.9. Класи точності засобів вимірювань

Врахування всіх нормованих метрологічних показників засобів вимірювань є складною і трудомісткою процедурою. Насправді така точність не потрібна. Тому для засобів вимірювань, що використовуються у повсякденній практиці, прийнято виконувати поділ на класи точності [2,7], які дають їхню узагальнену метрологічну характеристику.

Вимоги до метрологічних характеристик встановлюються у стандартах на засоби вимірювань конкретного типу. Класи точності присвоюються засобам вимірювань з урахуванням результатів державних приймальних випробувань.

Клас точності - це узагальнена характеристика засобу вимірювань, що виражається межами допустимих значень його основної та додаткової похибок, а також іншими характеристиками, що впливають на точність. Клас точності не є безпосередньою оцінкою точності вимірювань, які виконуються цим засобом вимірювання, оскільки похибка залежить ще від ряду факторів: методу вимірювань, умов вимірювань і т.д. Клас точності лише дозволяє судити про те, в яких межах знаходиться похибка засобу вимірювань даного типу. Загальні положення поділу засобів вимірювань за класом точності встановлює ДСТУ OIML R 34:2014 Метрологія. Класи точності засобів вимірювальної техніки [14].

Межі основної похибки засобу вимірювань $\Delta_{\text{зв}}$, визначаються класом точності - це інтервал, в якому знаходиться значення основної похибки засобу вимірювань.

Класи точності засобу вимірювань встановлюються в стандартах або технічних умовах. Засіб вимірювання може мати два і більше класу точності. Наприклад, при наявності у нього двох або більше діапазонів вимірювань однієї і тієї ж фізичної величини йому можна привласнювати два або більше класів точності. Прилади, призначені для вимірювання декількох фізичних величин, також можуть мати різні класи точності для кожної вимірюваної величини.

Межі допустимих основної та додаткової похибок виражають у формі **наведених, відносних або абсолютних похибок**. Вибір форми подання залежить від характеру зміни похибок в межах діапазону вимірювань, а також від умов застосування і призначення засобу вимірювань.

1. Абсолютна основна похибка. Межі абсолютної основної похибки встановлюються по одній з формул: $\Delta = \pm a$ або $\Delta = \pm (a + bx)$, де x - значення вимірюваної величини або число поділок, відрахованих за шкалою; a, b - позитивні числа, не залежні від x . Перша формула описує чисто адитивну похибку [15] (рис. 1.3, а), а друга - суму адитивної і мультиплікативної (рис. 1.3, б) похибок (рис. 1.3, в).

У технічній документації класи точності, встановлені у вигляді абсолютних похибок, позначають, наприклад, «Клас точності М», а на приладі - буквою «М». Для позначення використовуються

прописні букви латинського алфавіту або римські цифри, причому менші межі похибок повинні відповідати буквам, що знаходяться ближче до початку алфавіту, або меншим цифрам.

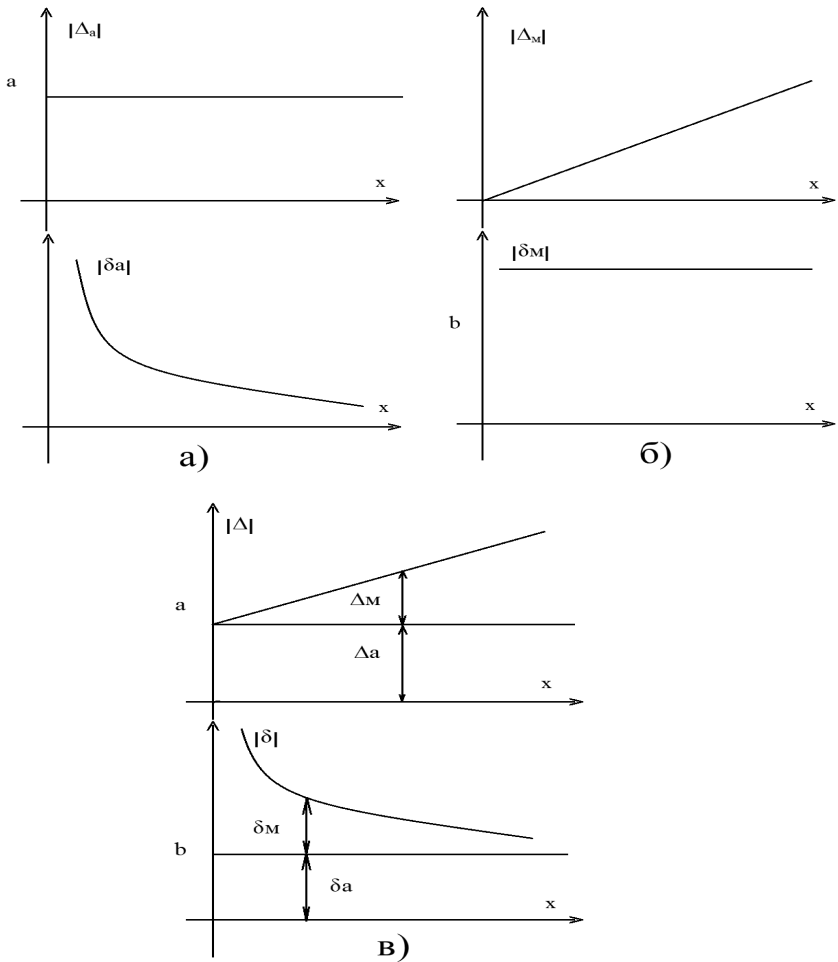


Рис. 1.3. Адитивна (а), мультиплікативна (б) і сумарна (в) похибки в абсолютній і відносній формах.

2. Наведена основна похибка. Межі наведеної основної похибки визначаються за формулою

$$\gamma = \Delta/X_N = \pm p, \quad (1.1)$$

де X_N - нормуюче значення, виражене в тих же одиницях, що і Δ ; p - абстрактне позитивне число, вибирається з ряду значень:

$$(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) 10^n; \quad n = 1; 0; -1; -2; \dots$$

А) Нормуюче значення встановлюється рівним більшому із меж вимірювань (або модулів) для засобів вимірювання з рівномірною, практично рівномірною або степеневою шкалою і для вимірювальних перетворювачів, для яких нульове значення вихідного сигналу знаходиться на краю або поза діапазоном вимірювань. Для засобів вимірювання, шкала яких має умовний нуль, X_N дорівнює модулю різниці меж вимірювань.

Б) Для приладів з суттєво нерівномірною шкалою X_N приймають рівним всій довжині шкали або її частини, що відповідає діапазону вимірювання. В цьому випадку межі абсолютної похибки виражають, як і довжину шкали, в одиницях довжини, а на засобі вимірювань клас точності умовно позначають у вигляді значка $\surd$, наприклад, $\surd_{0,5}$, де 0,5 -значення числа p (рис. 1.4.).

В інших розглянутих випадках клас точності позначають конкретним числом p , наприклад 1,5. Позначення наноситься на циферблат, щиток або корпус приладу (рис. 1.5).



Рис.1.4. Лицьова панель фазометра класу точності 2,5 з нерівномірною шкалою.



Рис. 1.5. Амперметр класу точності 1,5 з рівномірною шкалою

3. Межі відносної основної похибки.

А) У разі якщо абсолютна похибка задається формулою $\Delta = \pm (a + b x)$, межі допустимої відносної основної похибки визначаються за формулою:

$$\delta = \Delta / X = \pm [c + d (|X_K / X| - 1)], \quad (1.2)$$

де c, d - абстрактні позитивні числа, які обираються з ряду: (1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) 10^n ; $n = 1; 0; -1; -2; \dots$; X_K - більша (за модулем) межа вимірювань.

При використанні формули (1.2) клас точності позначається у вигляді «0,02 / 0,01», де чисельник - конкретне значення числа c , знаменник - числа d (рис. 1.6). В обґрунтованих випадках межі допустимої відносної основної похибки визначають за складнішими формулами або у вигляді графіка або таблиці.

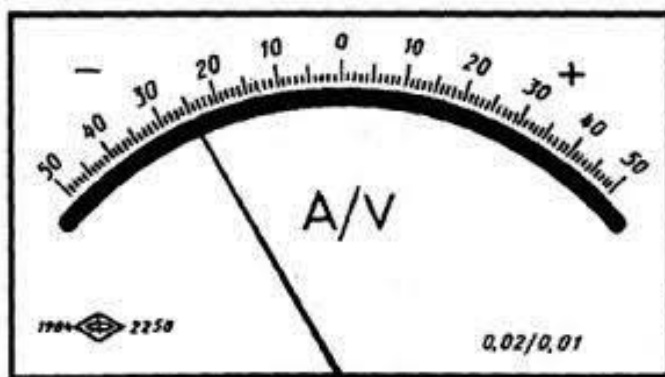


Рис. 1.6. Лицьова панель ампервольт-метра класу точності «0,02/0,01» з рівномірною шкалою.

Б) Якщо абсолютна похибка задається формулою $\Delta = \pm a$, то межі допустимої відносної основної похибки визначаються за формулою

$$\delta = \Delta/x = \pm q. \quad (1.3)$$

Значення постійного числа q встановлюється так само, як і значення числа p .

Клас точності, наприклад, позначається у вигляді $\textcircled{0,5}$, де 0,5 - конкретне значення q (рис. 1.7).

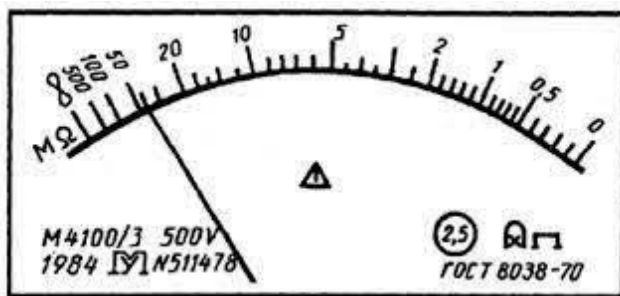


Рис.1.7. Лицьова панель мегаомметра класу точності 2,5 з нерівномірною шкалою.

У стандартах або технічних умовах на засіб вимірювання вказується мінімальне значення x_0 , починаючи з якого можна застосувати прийнятий спосіб вираження меж відносної похибки. Відношення x_k/x_0 називається **динамічним діапазоном вимірювання**.

Правила побудови і приклади позначення класів точності в документації і на засобах вимірювань наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Позначення класів точності засобів вимірювань

Формула для визначення меж допустимої похибки	Приклади меж допустимої основної похибки	Позначення класу точності	
		В документах	На засобах вимірювання
Абсолютна похибка			
$\Delta = \pm a$	$\Delta = \pm 2 \Gamma_{\text{ц}}$	Клас точності М	М
$\Delta = \pm (a + bx)$	$\Delta = \pm (2 + 0.03f) \Gamma_{\text{ц}}$	Клас точності С	С
Наведена похибка			
$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \pm q$	$\gamma = \pm 1,5\%$	Клас точности 1,5	1,5
	$\gamma = \pm 0,5\%$	Клас точності 0,5	для $\begin{array}{c} \searrow 0,5 \\ \swarrow \end{array}$ засобу вимірювання з нерівномірною шкалою
Відносна похибка			
$\delta = \frac{\Delta}{X} = \pm p$	$\delta = \pm 1,0\%$	Клас точності 1,0	$\textcircled{1,0}$
$\delta = \Delta/X = \pm [c + d(X_K/X - 1)]$	$\delta = \pm [0,02 + 0,01(X_K/X - 1)]\%$	Клас точності 0,02 / 0,01	0,02 / 0,01

Наведемо приклади визначення меж допустимих похибок приладів за їх класом точності.

Приклад 1. Клас точності вольтметра 1,5. Верхня межа виміру +100 В, нижня межа -100В. Показання приладу 50 В. Знайти абсолютну, відносну і наведену похибки.

Рішення.

1. Якщо клас точності задано числом, то цьому випадку клас точності дорівнює значенню основній наведеній похибці приладу, виражений в процентах, тобто $\gamma = 1,5\%$

2. Знайдемо абсолютну похибку Δ за формулою (1.1): $\gamma = (\Delta/X_N) 100\%$.

Знайдемо $X_N = 100 + 100 = 200\text{В}$.

Тоді абсолютна похибка $\Delta = \pm \gamma X_N = 1,5 \cdot 200 = \pm 3\text{ В}$,

3. Знайдемо межі допустимої відносної похибки

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X} 100\% = \pm \frac{3,0}{50} 100\% = \pm 6\%$$

Приклад 2. Клас точності вольтметра $\textcircled{1,0}$. Верхня межа виміру по шкалі приладу 100 В. Показання приладу 50 В. Знайти абсолютну, відносну і наведену похибки

Рішення.

1. Якщо клас точності задано числом всередині кружка, то цьому випадку клас точності дорівнює межі відносної похибки, виражений в процентах, тобто $\delta = 1\%$.

2. Знайдемо абсолютну похибку Δ за формулою (1.3):

$$\delta = (\Delta/X) 100\%, \text{ звідки абсолютна похибка } \Delta = \pm \delta X / 100 = 0,5\text{ В},$$

3. Знайдемо наведену похибку

$$X_N=100 \text{ В}, \quad \gamma = (\Delta/X_N) 100\% = (0,5/100) \cdot 100\% = \pm 0,5\%$$

Приклад 3. Цифровий вольтметр показує значення напруги 48,3 В. Визначити абсолютну та відносну похибки вимірювання напруги. Клас точності вольтметра 0,5/0,15; межа виміру 100 В.

Рішення.

1. Визначимо відносну похибку за формулою (1.2):

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{x_k}{x} - 1 \right) \right]$$

x_k -- більша (за модулем) межа вимірювань. $c=0,5\%$; $d=0,15\%$

$$\delta = \pm \left[0,5 + 0,15 \left(\frac{100}{48,3} - 1 \right) \right] = 0,66\%$$

2. Визначимо абсолютну похибку:

$$\Delta = \pm \frac{\delta * x}{100} = \pm \frac{0,66 * 48,3}{100} = \pm 0,32 \text{ В}$$

1.10. Метрологічна надійність засобів вимірювання

У процесі експлуатації будь-якого засобу вимірювання може виникнути несправність або поломка, звані **відмовою**.

Метрологічна надійність - це властивість засобів вимірювань зберігати встановлені значення метрологічних характеристик протягом певного часу за нормальних режимів і робочих умов експлуатації. Вона характеризується інтенсивністю відмов, ймовірністю безвідмовної роботи та напрацюванням на відмову.

Інтенсивність відмов визначається виразом

$$\Lambda = \frac{L}{N \cdot \Delta t} ,$$

де L - кількість відмов; N - кількість подібних елементів; Δt – проміжок часу.

Для засобу вимірювання, що складається з n типів елементів, швидкість відмови:

$$\Lambda_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \Lambda_i \cdot m_i ,$$

де m_i - кількість елементів i -типу.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t) = \exp\left(-\int_0^t \Lambda_{\text{сум}}(t) \cdot dt\right).$

Напрацювання на відмову: $T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) \cdot dt .$

Для раптової відмови, інтенсивність відмов якої не залежить від часу роботи засобу вимірювання, маємо

$$\Lambda_{\text{сум}}(t) = \Lambda_{\text{сум}} = \text{const}; \quad P(t) = \exp(-\Lambda_{\text{сум}} \cdot t); \quad T_{\text{ср}} = L / \Lambda_{\text{сум}} .$$

Міжповірочний інтервал, протягом якого забезпечується задана ймовірність безвідмовної роботи, визначається за формулою:

$$T_{\text{мп}} = \frac{\ln(1 - P_{\text{мо}})}{\ln P(t)} ,$$

де $P_{\text{мо}}$ - ймовірність метрологічної відмови за час між повірками;

$P(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи.

У процесі експлуатації може виконуватися коригування міжповіркового інтервалу.

1.11. Метрологічна атестація засобів вимірювань

Під *метрологічною атестацією* розуміють дослідження засобу вимірювань, яке виконується метрологічним органом з метою визначення його метрологічних властивостей та видачі відповідного документа із зазначенням отриманих даних.

За результатами метрологічної атестації засобу вимірювань приписуються певні метрологічні характеристики, визначається можливість застосування його як зразковий або робочий засіб вимірювання. Під метрологічною атестацією зазвичай розуміють всебічне дослідження зразкових або нестандартних засобів вимірювань, а також стандартних зразків складу та властивостей речовин та матеріалів.

Нестандартні засоби вимірювання (НЗВ). Встановлено порядок метрологічного забезпечення експлуатації нестандартних засобів вимірювань, який поширюється також на:

- на такі, що ввозяться з-за кордону одиничними екземплярами;
- поодинокі екземпляри серійних засобів вимірювань, що відрізняються від умов, для яких нормовані їх метрологічні характеристики;
- зразки, що серійно випускаються, у схему і конструкцію яких внесено зміни, що впливають на їх метрологічні характеристики.

Нестандартними можуть бути як робочі, і зразкові засоби вимірювань.

Завданнями метрологічного забезпечення НЗВ є:

1. Дослідження метрологічних характеристик та встановлення відповідності НЗВ вимогам технічних завдань, або паспорту (проекту) заводу виробника.

2. Встановлення раціональної номенклатури НЗВ.

3. Забезпечення НЗВ засобами атестації, перевірки під час їх розробки, виготовлення та експлуатації.

4. Забезпечення постійної придатності НЗВ до застосування за призначенням із нормованою для них точністю.

5. Скорочення термінів та зниження витрат на розробку, виготовлення та експлуатацію.

2. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Вимірювання напруги і сили струму найбільш поширений вид вимірювань. Ці вимірювання здійснюються в широкому діапазоні частот - від постійного струму і інфранизьких частот (соті частки герца) до надвисоких частот (ГГц) і в діапазоні вимірюваних значень напруги і струму відповідно від нановольт і наноампер до сотень кіловольт і кілоампер при великій різноманітності форм вимірюваної напруги і струму.

Вимірювання постійних напруги і сили струму полягає в знаходженні їх значень і визначенні полярності. Метою вимірювання змінних напруги і сили струму є знаходження якою-небудь їх параметра.

Змінний струм промислової частоти має синусоїдальну форму і характеризується миттєвим, середньо квадратичним значенням, амплітудою і фазою:

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi), \quad I(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.1)$$

де U_m , I_m - амплітудні значення напруги і сили струму, $\omega = 2\pi\nu$ – частота коливань, φ -початкова фаза.

В електроніці поряд з сигналами синусоїдальної форми широко використовують і несинусоїдальні сигнали (рис. 2.1) Такі сигнали характеризуються піковими значеннями (максимальними значеннями з усіх миттєвих значень) X_{max+} і X_{max-} , в позитивних чи негативних напівхвилях, середньо-квадратичними і середньо- випрямленими

значеннями, а також середнім значенням, часто званим постійною складовою.

Середнє значення фізичної величини дорівнює середньому арифметичному всіх миттєвих значень за період:

$$\dots X_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.2)$$

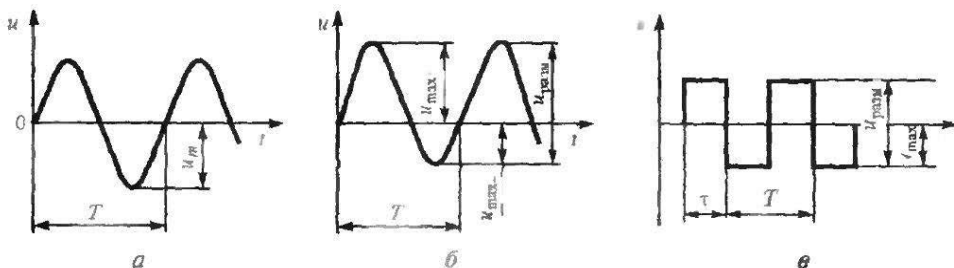


Рис.2.1. Деякі форми вимірюваних сигналів. $T=1/\nu$ – період коливань.

Середньо випрямлене значення визначають як середнє арифметичне абсолютних миттєвих значень за період

$$X_{\text{ср.в}} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (2.3)$$

Середньо квадратичне значення фізичної величини знаходять як корінь квадратний із середнього за період квадрата миттєвих значень

$$X_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (2.4)$$

Для періодичних коливань будь-якої форми зв'язок між амплітудою і середньо-кватратичним значенням визначається формулою

$$X_m = XK_a, \quad (2.5)$$

де K_a - коефіцієнт амплітуди.

Середньовипрямлене і середньоквадратичне значення пов'язані між собою коефіцієнтом форми K_ϕ :

$$X = X_{\text{ср.в}} K_\phi.$$

Коефіцієнти форми і амплітуди однополярних імпульсів визначаються їх сквапністю

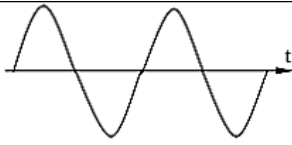
$$Q = T/\tau; \quad K_a = K_\phi = \sqrt{Q}.$$

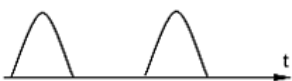
Для деяких, часто використовуваних форм сигналів, коефіцієнти амплітуди і форми наведені в табл. 2.1.

Для вимірювання напруги і струму застосовуються як методи безпосередньої оцінки, так і методи порівняння. Вибір методів і засобів вимірювання напруги і сили струму обумовлюється необхідною точністю вимірювань, амплітудним і частотним діапазонами вимірюваного сигналу, потужністю, споживаної приладом від вимірювального ланцюга і т.д.

Таблиця 2.1

Коефіцієнти амплітуди і форми для деяких форм сигналів

Форма сигналу	Графік	Коефіцієнт	
		K_a	K_ϕ
Сінусоїдальна		1,41	1,1

Пульсуюча (двонапівперіод- ний випрямляч)		1,41	1,11
Пульсуюча (однапівперіод- ний випрямляч)		2	1,57
Пилоподібна		1,73	1,16
Трикутна (симетрична)		1,73	1,16
Прямокутна		1	1

2.1. Електромеханічні прилади

Для вимірювання напруги і сили струму широко застосовуються електромеханічні прилади. Загальним терміном електромеханічні прилади позначають засоби вимірювань, структурна схема яких представлена на рис. 2.1. Ця схема включає в себе **вимірювальну схему (1)**, **вимірювальний механізм (2)** і **відліковий пристрій (3)**.

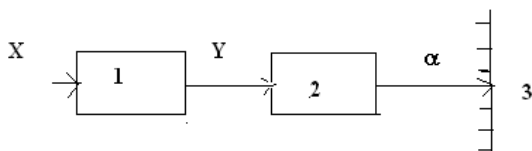


Рис.2.1. Загальна структурна схема електромеханічного приладу

До електромеханічної групи належать вимірювальні прилади *магнітоелектричної, електромагнітної, електродинамічної, електростатичної та індукційної систем*. Прилади цих систем часто входять до складу і інших, більш складних, засобів вимірювань. За фізичним принципом, покладеному в основу побудови, і конструктивним виконанням ці прилади відносяться до групи *аналогових засобів вимірювання*, тобто засобів вимірювання, показання яких є безперервною функцією вимірюваної величини.

Вимірювальна схема являє собою сукупність опорів, індуктивностей, ємностей та інших елементів електричного кола приладу і має своїм основним завданням перетворити вимірювану фізичну величину X в деяку нову величину Y , під впливом якої відбувається переміщення α рухомої частини *вимірювального механізму*, що відраховується за допомогою *відлікового пристрою*. Таким чином, якщо виконується залежність $\alpha=f(X)$, то прилад може бути проградуйований в одиницях вимірюваної величини. Зрозуміло, що для цього необхідно, щоб кожному значенню вимірюваної величини відповідало одне, і тільки одне, певне відхилення показчика. Не менш важливо, щоб параметри схеми і вимірювального механізму не змінювалися при зміні зовнішніх умов, наприклад, температури навколишнього середовища, частоти струму та інших факторів. У більшості електромеханічних приладів вихідним переміщенням є кутове переміщення стрілки α . Рідше зустрічаються конструкції приладів з лінійним переміщенням показчика.

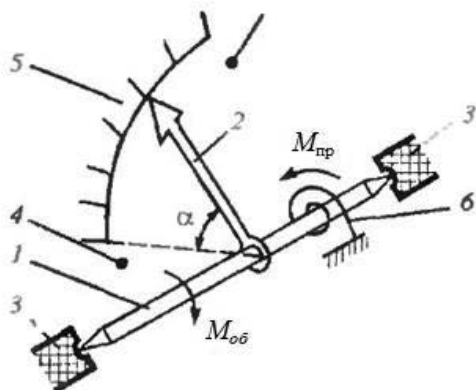


Рис.2.2. Рухома частина вимірювального механізму електромеханічного приладу.

Розглянемо роботу електромеханічного приладу з кутовим переміщенням стрілки. Рухома частина вимірювального механізму з кутовим переміщенням зображена на рис.2.2. і являє собою вісь (1) зі стрілкою (2), яка обертається в підп'ятниках (3). Можливий кут повороту стрілки α обмежений упорами (4); шкала приладу - (5).

При подачі на вхід вимірювальної схеми приладу вимірюваної величини виникає обертальний момент, що описується виразом

$$M_{об} = f_1(X) \quad (2.6)$$

Щоб кожному значенню вимірюваної величини X відповідало певне відхилення стрілки α необхідно врівноважити обертальний момент $M_{об}$ протидіючим моментом $M_{пр}$ протилежним обертальному і зростаючому в міру збільшення кута повороту рухомої частини. У більшості приладів протидіючий момент створюється плоскою спіральною пружинкою 6, для якої справедливо співвідношення

$$M_{пр} = \mu \alpha, \quad (2.7)$$

де μ - коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу і розмірів пружинки. При спільному впливі обертального і протидіючого моментів положення рівноваги, тобто усталене відхилення стрілки визначається з умови $M_{об} = M_{пр}$. Враховуючи (2.6) і (2.7) отримаємо:

$$\alpha = \frac{f_I(X)}{\mu} = f(X) \quad (2.8)$$

Рішення цього рівняння являє собою градувальну характеристику приладу. Із (2.8) випливає, що характер градувальної характеристики визначається видом функціональної залежності (2.6).

Рухома частина вимірювального механізму представляє собою коливальну систему. Для того щоб в процесі досягнення сталого положення стрілка приладу не відчувала надто довгих коливань в електромеханічних приладах, застосовуються заспокоювачі, що створюють момент заспокоєння $M_{зсп}$, пропорційний швидкості переміщення стрілки

$$M_{зсп} = P \frac{d\alpha}{dt},$$

де P - коефіцієнт заспокоєння.

Розрізняють повітряні, рідинні і магнітоіндукційні заспокоювачі. У повітряних і рідинних заспокоювачах заспокоєння досягається гальмуванням спеціального елемента рухомої частини (пелюстки, поршня) за рахунок тертя об повітря або рідину.

У магнітоіндукційних заспокоювачах гальмування здійснюється за рахунок взаємодії магнітних полів магніту і струмів, індукованих в провідних елементах рухомої частини при їх русі в полі цього

магніту.

Найбільш поширеними в практиці технічних вимірювань є електромеханічні прилади магнітоелектричної і електромагнітної систем.

2.2. Прилади магнітоелектричної системи

У приладах *магнітоелектричної системи* обертаючий момент створюється за рахунок взаємодії поля постійного магніту з рамкою (катушкою), по якій протікає струм. Конструктивно вимірювальний механізм приладу може бути виконаний або з рухомим магнітом, або з рухомою рамкою.

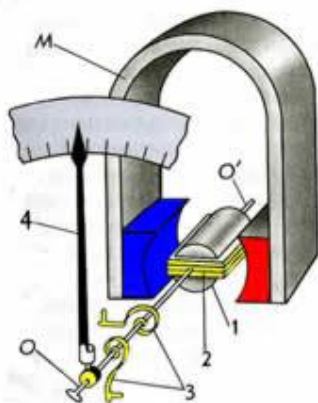


Рис.2.3. Загальна конструкція приладу магнітоелектричної системи

ОО' – півосі, М-магніт з полюсними наконечниками, 1- сердечник, 2- рамка, 3- пружинки, 4- стрілка.

Па рис 2.3 показано налаштування приладу з рухомою рамкою. Постійний магніт (М) з полюсними наконечниками і нерухомий сердечник (1) складають магнітну систему механізму. В зазорі між полюсними наконечниками і сердечником створюється сильне радіальне магнітне поле, в якому знаходиться рухома прямокутна рамка (2), намотана тонким мідним або алюмінієвим дротом на алюмінієвому каркасі (або без каркаса). Рамка закріплена між

півосями OO' . Спиральні пружинки (3), призначені для створення протидіючого моменту, одночасно використовуються для подачі вимірюваного струму в рамку. Рамка жорстко з'єднана зі стрілкою (4).

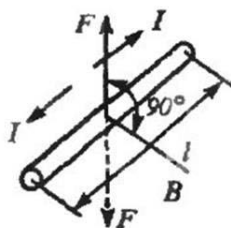
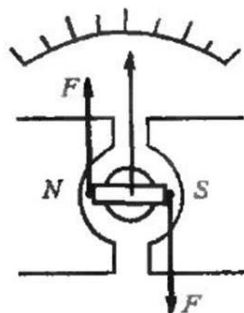


Рис.2.4. Рамка зі струмом в магнітному полі.

На рис. 2.4 зображена рамка приладу, що знаходиться в зазорі магнітної системи. При проходженні електричного струму I через провідник I , розташований в магнітному полі з індукцією B , на провідник діє сила Ампера, яка визначається формулою:

$$F = IBlsin(\widehat{B,I}),$$

де $(\widehat{B,I})$ - кут між напрямком струму і вектором магнітної індукції.

Робочими ділянками витка дроту, намотаного на рамку, є відрізки довжиною l , розташовані на сторонах рамки, паралельних осі обертання.

Для цих відрізків кут між напрямком струму і вектором магнітної індукції дорівнює 90 градусів (рис.2.4); отже, на відрізок дроту довжиною l діє сила $F=IBl$. При цьому сили, що діють на протилежні відрізки витків, рівні, але протилежні за напрямом. В результаті, на рамку з w витків дроту діє обертальний момент

$$M_{\text{об}} = 2F \frac{b}{2} = BS_p w I, \quad (2.9)$$

де b - ширина рамки; S_p - площа рамки.

Прирівнявши (2.7) і (2.9), отримаємо

$$\alpha = \frac{BS_p w}{\mu} I, \quad (2.10)$$

Згідно (2.10), кут відхилення рухомої частини пропорційний струму, що протікає по рамці. Коефіцієнт пропорційності

$$S_I = \frac{BS_p w}{\mu}$$

називається *чутливістю* магнітоелектричного приладу за струмом.

Для отримання залежності кута відхилення α від прикладеної до рамки напруги підставимо в (2.10) вираз $I = U/R_p$ (де R_p - опір рамки):

$$\alpha = \frac{BS_p w}{\mu R_p} U = S_U U. \quad (2.11)$$

Величина

$$S_U = \frac{BS_p w}{\mu R_p}$$

називається *чутливістю* магнітоелектричного приладу за напругою.

Чутливості S_I і S_U є постійними величинами, залежними лише від параметрів вимірювального ланцюга і механізму. Звідси випливає, що шкала магнітоелектричного приладу рівномірна, а зміна напрямку струму, що протікає через рамку, веде до зміни напрямку кута відхилення стрілки.

Рухома система вимірювального механізму магнітоелектричних

приладів володіє значною інерцією, тому такі прилади реагують лише на постійну складову струму і непридатні для вимірювання змінного струму або напруги. Для вимірювань в ланцюгах змінного струму необхідно попередньо перетворити змінний струм в постійний.

Із групи аналогових електромеханічних приладів прилади магнітоелектричної системи відносяться до числа найбільш точних і чутливих. Зміни температури навколишнього середовища і зовнішні магнітні поля мало впливають на їх роботу Рівномірна шкала, мале споживання енергії також відносяться до переваг магнітоелектричних приладів.

Та обставина, що рамка приладу намотана тонким дротом, не дозволяє пропускати через неї струми, що перевищують десятки міліампер. Перевищення вказаних значень може призвести до пошкодження дроту рамки або спіральної пружинки. Таким чином, виникає задача розширення меж вимірювання магнітоелектричних амперметрів і вольтметрів.

1. Розширення меж вимірювання амперметрів досягається включенням **шунта** паралельно приладу (рис. 2.5). Опір шунта $R_{ш}$ має бути менше опору рамки приладу R_p і підбирається так, щоб при вимірюванні основна частина вимірюваного струму проходила через шунт а струм, що протікає через рамку приладу, не перевищував допустимого значення. Якщо необхідно збільшити верхню межу вимірювання амперметра до значення I , а верхня межа вимірювання без шунта I_A , то опір шунта розраховується за формулою:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_p}{n-1}, \text{ де } n = \frac{I}{I_A}. \quad (2.12)$$

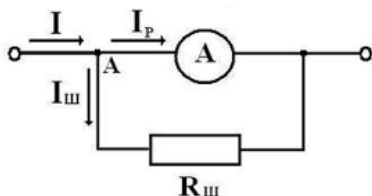


Рис.2.5. Розширення меж вимірювання амперметра ($I_p = I_A$)

Амперметри для вимірювання порівняно невеликих струмів (до декількох десятків ампер) мають внутрішні шунти, вмонтовані в корпус приладу. Для вимірювання великих струмів (до декількох тисяч ампер) застосовуються зовнішні шунти. З метою стандартизації зовнішні шунти випускаються на різні номінальні падіння напруги (від 45 до 300 мВ) і класів точності від 0,02 до 0,5.

2. Для розширення меж вимірювання вольтметра послідовно з опором рамки включається додатковий опір R_d (рис. 2.6), який обмежує падіння напруги на рамці приладу до допустимих меж. Якщо необхідно вимірювати напругу U , а верхня межа вимірювання приладу U_p , то величина додаткового опору повинна бути

$$R_d = R_p (n - 1), \text{ де } n = U/U_p. \quad (2.13)$$

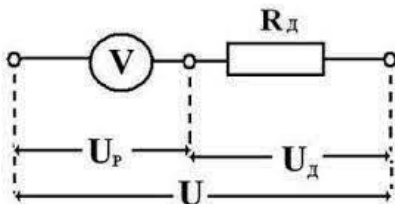


Рис. 2.6. Розширення меж вимірювання вольтметра ($U_p = U_v$)

Додаткові опори також бувають внутрішніми, вбудованими в

корпус вольтметра (при напрузі до 600 В) або зовнішніми (при напрузі 600 ... 1500 В). Зовнішні додаткові опори випускаються на певні номінальні струми (від 0,5 до 30 мА) і мають класи точності від 0,02 до 1. Шунти і додаткові опори виготовляються з матеріалів з високим питомим опором (манганин, константан), що мають температурний коефіцієнт опору близький до нуля.

Гальванометри. Високочутливі магнітоелектричні прилади для вимірювання дуже малих струмів і напруг називаються *гальванометрами*. Гальванометри часто використовують у якості нуля - індикаторів, які фіксують відсутність струму в ланцюзі. У таких гальванометрів нульова позначка знаходиться в середині шкали (рис.2.7).

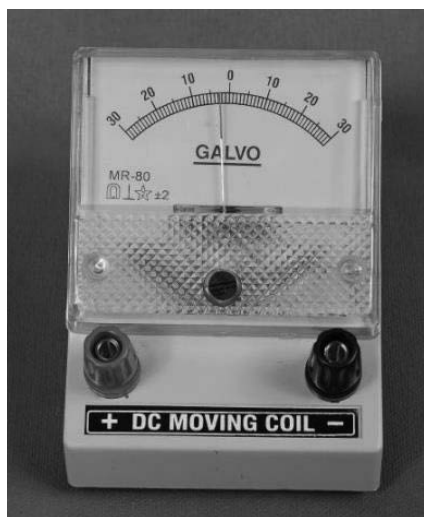


Рис.2.7. Гальванометр

Так як чутливість гальванометрів дуже висока, їх градуювальна характеристика нестабільна і залежить від впливу сукупності зовнішніх факторів. Тому чутливі гальванометри не градуюються в одиницях вимірюваної фізичної величини і їм не присвоюються класи точності. В якості метрологічних характеристик гальванометрів зазвичай

вказують їх чутливість до струму або напруги і опір рамки. Чутливість гальванометрів залежить від способу кріплення рамки. Розрізняють гальванометри з рухомою частиною (рамкою) на кернах, на розтяжках і на підвісі (рис.2.8).

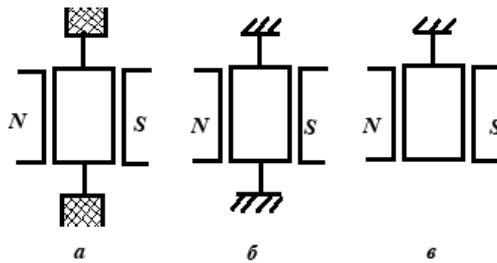


Рис. 2.8. Способи кріплення рамки гальванометрів: а) на кернах, б) на розтяжках, в) на підвісі.

У гальванометрах з рухомою частиною на кернах рамка забезпечена двома півосями з впресованими в них сталевими кернами. Останні спираються на корундові або рубінові підп'ятники (рис. 2.8, а). Чутливість такого гальванометра обмежується тертям між кернами та підп'ятниками.

Для підвищення чутливості рамку гальванометра встановлюють на розтяжках (рис. 2.8, б), а в особливо чутливих гальванометрах на підвісі (рис. 2.8, в). Розтяжки і підвісі являють собою тонкі пружні стрічки або нитки зі спеціальних сплавів. Вимірюваний струм надходить до рамки через ці стрічки або нитки; вони ж одночасно служать для створення моменту протидії. У гальванометрах з рамкою на підвісі другим провідником є надтонка стрічка або нитка, що не створює моменту протидії.

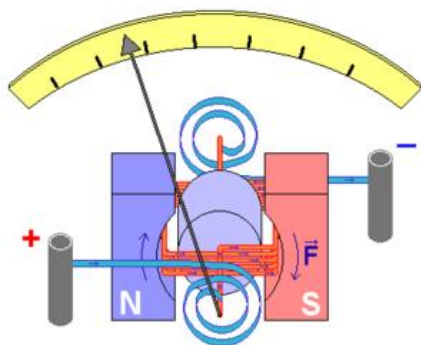


Рис. 2.9. Будова гальванометра магнітоелектричної системи.

Як уже згадувалося вище, за конструктивним виконанням гальванометр являє собою рамку прямокутної форми з намотаним тонким дротом, поміщену в полі дії постійного магніту (рис. 2.9). У ролі утримуючого пристрою використовується пружина, яка досить жорстко фіксує своєрідну котушку (рамку) у нейтральному (нульовому) положенні.

При подачі напруги через провід починає протікати струм, в результаті відбувається відхилення рамки на фіксований кут, що визначається наступними параметрами: значенням струму, індукцією магнітного поля, коефіцієнтом жорсткості пружини. За відхиленням вказівного елемента визначають величину протікаючого струму.

Дзеркальний гальванометр (рис. 2.10) належить до найбільш чутливих, точних і швидких з усіх представлених видів приладів.

Дзеркальний гальванометр складається із дзеркала (2), на яке подається світловий промінь від джерела світла (3). Сам вимір проводиться за рахунок кута повороту рамки (1) з намотаною на неї обмоткою. З урахуванням того, що кут повороту рамки γ досить малий, за допомогою оптичного ефекту, створюваного світловим променем, можна отримати відображення від дзеркала падаючого променя на спеціальну градуйовану шкалу (4).

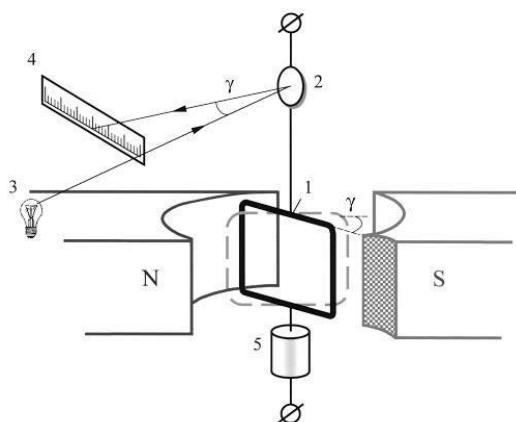


Рис. 2.10. Дзеркальний гальванометр.

Дзеркальний гальванометр складається із дзеркала (2), на яке подається світловий промінь від джерела світла (3). Сам вимір проводиться за рахунок кута повороту рамки (1) з намотаною на неї обмоткою. З урахуванням того, що кут повороту рамки γ досить малий, за допомогою оптичного ефекту, створюваного світловим променем, можна отримати відображення від дзеркала падаючого променя на спеціальну градуйовану шкалу (4).

Якщо при подачі струму рамка повертається на кут γ , сам промінь також утворює кут γ , а світлова пляма зміщується на певну кількість поділок на шкалі. Тобто, прилад налаштовується так, що кут повороту самої рамки виявляється прямо пропорційним числу поділок шкали.

Сучасні гальванометри дозволяють вимірювати струми в межах $10^{-5} \dots 10^{-12}$ А та напруги до 10^{-4} В.

Застосування гальванометрів

Гальванометр застосовується не тільки як самостійний прилад, що показує малі значення струму і напруги або виконує роль нуля-індикатора, але також як основний блок багатьох інших вимірювальних приладів. Наприклад:

1) Як термометр або експонетр. При підключенні фотодіода використовують як експонетр; при з'єднанні з датчиком температури (термoeлементом) виконуватиме функції своєрідного термометра.

2) Як вимірник заряду. Для цієї мети застосовують балістичний гальванометр. Він дозволяє виміряти одиночний імпульс заряду, оскільки після його протікання через прилад відбувається різке відкидання внутрішньої рамки.

3). Для запису різних сигналів в осцилографі. За рахунок свого конструктивного виконання гальванометр в осцилографі підключається безпосередньо до друкарського пристрою. При подачі будь-якого імпульсу прилад реагує на нього і надає руху друкарському пристрою, який відображає певні коливання на папері.

4). Для здійснення оптичної розгортки у системах лазерної оптики (дзеркальні гальванометри). В даний час аналогові прилади поступово поступаються місцем сучасним пристроям, що працюють на основі цифрових технологій. Єдиними типами гальванометрів, затребуваними сьогодні, є дзеркальні пристрої, які застосовуються як одна зі складових установки в лазерній технології, оскільки здатні виробляти відхилення променя лазера.

2.3. Прилади електромагнітної системи

Принцип дії приладів *електромагнітної системи* заснований на взаємодії магнітного поля, створюваного струмом в нерухомій котушці, з рухомим феромагнітним осердям. Одна з конструкцій електромагнітного механізму представлена на рис. 2.11, де 1- котушка; 2 - осердя, закріплене на осі приладу; 3- повітряний заспокоювач; 4 - спіральна пружинка, яка створює момент протидії. При включенні приладу під дією магнітного поля котушки осердя втягується всередину котушки. Рухома частина механізму повертається доти, доки обертальний момент не врівноважиться з моментом протидії, створюваним пружинкою.

Обертальний момент, що виникає при проходженні струму I через котушку

$$M_{об} = \frac{1}{2} I^2 \frac{\partial L}{\partial \alpha}, \quad (2.14)$$

де L — індуктивність котушки; α — кут повороту рухомої частини.

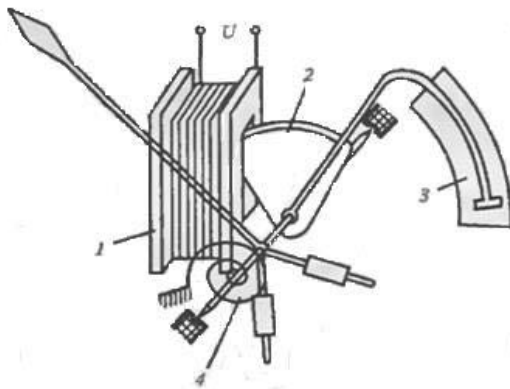


Рис. 2.9. Будова приладу електромагнітної системи.

З умови рівності обертального моменту (2.14) і моменту протидії (2.7) одержимо:

$$\alpha = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial L}{\partial \alpha} I^2.$$

Якщо через котушку протікає змінний струм $I(t)=I_m \sin \omega t$, то необхідно провести усереднення за часом:

$$\alpha = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial L}{\partial \alpha} \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega dt.$$

Якщо врахувати, що середньоквадратичне значення струму дорівнює

$$I_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt},$$

тоді

$$\alpha = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial L}{\partial \alpha} I_{\text{ср.кв}}^2. \quad (2.15)$$

Із (2.15) випливає, що при вимірюванні в колі змінного струму кут повороту рухомої частини приладу електромагнітної системи пропорційний квадрату середнього квадратичного значення струму, тобто не залежить від напрямку струму. Тому електромагнітні прилади однаково придатні для вимірювань в ланцюгах постійного і змінного струму. Відповідно до (2.15) шкала приладу квадратична, однак на практиці її можна наблизити до лінійної підбором форми осердя.

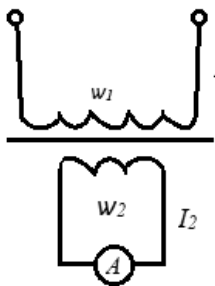
Перевагами приладів електромагнітної системи є простота конструкції, здатність витримувати значні перевантаження, можливість градування приладів, призначених для вимірювань в ланцюгах змінного струму, на постійному струмі. *До недоліків* приладів можна віднести велике власне споживання енергії, невисоку точність, малу чутливість і сильний вплив магнітних полів.



Рис.2.10. Амперметр
електромагнітної системи

Промисловістю випускаються амперметри електромагнітної системи з верхньою межею вимірювання від частки ампера до 200 А, і вольтметри з межами вимірювання від частки вольт до сотень вольт.

При необхідності розширення меж вимірювання амперметрів і вольтметрів застосовуються шунти і додаткові опори. Для розширення меж вимірювання амперметрів в області підвищених



частот використовуються трансформатори струму. На рис. 2.11 показано включення амперметра в контур вторинної обмотки трансформатора струму.

Рис. 2.11. W_1 - первинна обмотка; W_2 - вторинна обмотка; I_1 і I_2 - відповідні струми.

В основному прилади електромагнітної системи застосовуються в якості щитових амперметрів і вольтметрів змінного струму промислової частоти. Клас точності щитових приладів 1,5 і 2,5. У деяких випадках вони використовуються для роботи на підвищених частотах: амперметри до 8000 Гц, вольтметри до 400 Гц. Випускаються також переносні прилади електромагнітної системи класів точності 0,5 і 1,0 для вимірювання в лабораторних умовах.

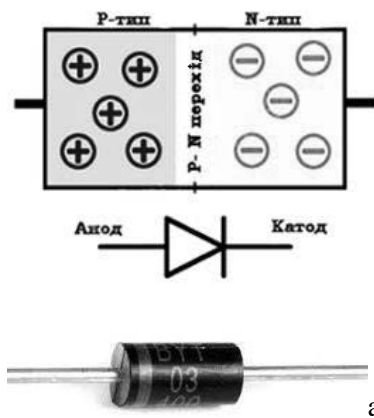
2.4. Випрямні прилади

Випрямні прилади застосовуються для виміру напруги й сили струму в частотному діапазоні: від звукових частот до високих і надвисоких частот.

Принцип роботи таких приладів полягає в випрямленні змінного струму за допомогою напівпровідникових діодів, в яких використовують односторонню провідність контактів двох напівпровідників при виникненні так званого р-п переходу (рис. 2.12).

У схемі приладу використовують однополуперіодні та двополуперіодні випрямлячі (рис. 2.13). Постійна складова випрямленого струму вимірюється приладом магнітоелектричної системи (мікроамперметром, міліамперметром).

В однонапівперіодних схемах (рис. 2.13, а) струм i через електромагнітний прилад, з'єднаний послідовно з діодом D_1 , пропускається тільки в позитивний напівперіод. В негативний напівперіод, для якого опір діода D_2 великий, струм протікає через діод D_2 , включений паралельно приладу. Діод D_2 захищає діод D_1 від пробою.



а)

б)

Рис.2.12. Напівпровідникові діоди: а) р-п перехід; б) зовнішній вигляд

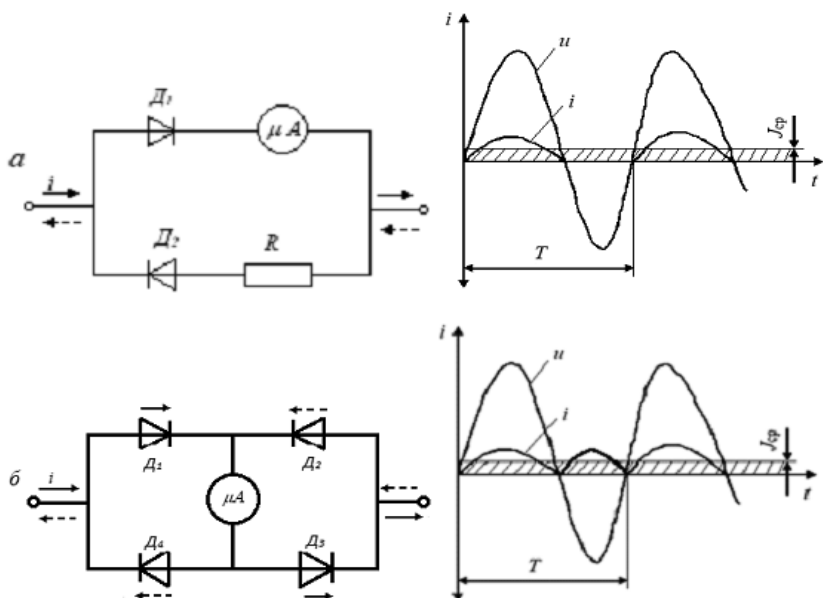


Рис. 2.13. Випрямні діоди: а) однонапівперіодна схема; б) двонапівперіодна схема .

Для нівелювання опору паралельних гілок послідовно з другим діодом включений резистор R , опір якого дорівнює опору вимірювального ланцюга приладу. Рухома частина магнітоелектричного приладу володіє механічною інерцією і при частотах вище 10 ... 20 Гц не встигає стежити за миттєвими значеннями обертового моменту, реагуючи лише на середнє значення моменту. З рівняння шкали магнітоелектричного приладу (2.15) випливає, що відхилення стрілки випрямного приладу пропорційне середньому за період значенню змінного струму. При струмі синусоїдальної форми для однонапівперіодного випрямляча маємо:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_m}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t \, dt = \frac{I_m}{\pi} = 0.318 I_m,$$

і покази шкали приладу прямопропорційні $I_{\text{ср}}$:

$$\alpha = S_I I_{\text{ср}}, \text{ де } S_I = \frac{BS_{\text{рв}}}{\mu} \quad (2.16)$$

Для двонапівперіодної схеми випрямляча (рис. 2.13, б) струм i , що протікає через прилад, збільшується вдвічі в порівнянні зі струмом, що протікає в однонапівперіодній схемі. Для синусоїдального струму

$$I_{\text{ср.в}} = 0,636 I_m.$$

З (2.16) бачимо, що шкала випрямного приладу лінійна і при будь-якій формі кривої вимірюваного струму відхилення стрілки приладу пропорційно середньому за період значенню сили струму.

Однак на практиці шкалу випрямних приладів завжди градуують в середніх квадратичних значеннях напруги (струму) синусоїдальної форми. Отже, в приладах з двонапівперіодним випрямленням всі значення оцифрованих поділок шкали ніби помножені на коефіцієнт форми $K_\phi = 1,11$. Звідси випливає, що при вимірюванні струму або напруги несинусоїдальної форми отриманий відлік за шкалою такого випрямного приладу спочатку потрібно розділити на 1,11 (отримати випрямлене значення вимірюваної величини), а потім помножити на коефіцієнт форми, відповідний формі реального сигналу. У приладах з однонапівперіодним випрямленням замість 1,11 підставляють 2,22.

Випрямні прилади набули широкого поширення в якості комбінованих вимірювачів постійного і змінного струму і напруги класів точності 1,5 і 2,5; з межами вимірювання по струму від 2 мА до 600 А; за напругою - від 0,3 до 600 В. Перевагами випрямних приладів є висока чутливість, мале власне споживання енергії та можливість вимірювання в широкому діапазоні частот. Частотний діапазон випрямних приладів визначається можливостями застосованих діодів. Так, застосування точкових кремнієвих діодів забезпечує вимірювання змінних струмів і напруг до частот порядку $10^4 \dots 10^5$ Гц. Основними джерелами похибок цих приладів є зміни параметрів діодів з плином часу, вплив навколишньої температури, а також відхилення форми кривої вимірюваного струму або напруги від тієї, при якій проведено градування приладу.

2.5. Термоелектричні прилади

Термоелектричні прилади прилади використовуються для вимірювання струмів в діапазоні високих частот. Термоелектричний прилад складається з термоелектричного перетворювача і приладу магнітоелектричної системи (наприклад, вольтметра).

Найпростіший термоперетворювач (рис. 2.14) містить нагрівач Н, по якому протікає вимірюваний струм I і пов'язану з ним термопару ТП. Робочий спай термопар a знаходиться в тепловому контакті з нагрівачем.

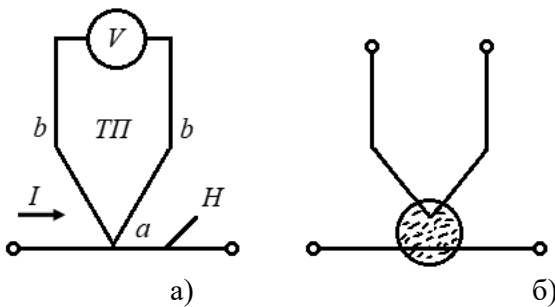


Рис. 2.14. Термоелектричний прилад. ТП- термоелектричний перетворювач (термопара), Н- нагрівач, V- вольтметр. а) контактний; б) безконтактний термоелектричний перетворювач.

Нагрівач являє собою тонкий дріт зі сплаву з високим питомим опором (ніхром, манганін). Ще більш тонкі дрітінки з термоелектродних матеріалів застосовують для виготовлення термопар. При проходженні вимірюваного струму через нагрівач

місце контакту нагрівача і термопари (робочий спай) нагрівається до температури t_1 , а кінці термопари b залишаються при температурі навколишнього середовища t_0 . У сталому тепловому режимі потужність, що виділяється в нагрівачі $P_{вуд}$ дорівнює потужності, що розсіюється нагрівачем в навколишнє середовище $P_{роз}$. Якщо врахувати, що

$$P_{вуд} = I^2 R_n, \text{ а } P_{роз} = \alpha_m S \theta,$$

де α_m - коефіцієнт тепловіддачі від нагрівача до навколишнього середовища; S - площа тепловіддаючої поверхні нагрівача; θ - перегрів робочого спаю термопари над температурою навколишнього середовища ($\theta = t_1 - t_0$); R_n - опір нагрівача, то

$$\theta = \frac{R_n}{\alpha_m S} I^2, \quad \text{або} \quad I = \sqrt{\frac{\alpha_m S \theta}{R_n}}.$$

При перегріванні робочого спаю термопари на величину θ в ланцюзі термопари виникає термоелектрорушійна сила

$$E = \kappa \theta,$$

де κ - коефіцієнт пропорційності.

Таким чином, при проходженні вимірюваного струму через нагрівач в ланцюзі магнітоелектричного приладу виникає постійний струм I_V , пропорційний квадрату середнього квадратичного значення вимірюваного струму.

$$I_A = \frac{E}{R_V},$$

де R_V — опір магнітоелектричного приладу.

Оскільки дія приладу заснована на тепловій дії струму, то зрозуміло, що електромагнітний прилад з термоелектричним перетворювачем вимірює середньоквадратичне значення змінного струму будь - якої форми. Шкала термоелектричного приладу близька до квадратичної.

Термоелектричні перетворювачі поділяються на контактні (рис.2.14, а) і безконтактні (рис.2.14, б). У контактному перетворювачі є зв'язок між нагрівачем і термопарою, тобто між вхідним і вихідним ланцюгами, що не завжди допустимо. У безконтактному перетворювачі нагрівач відділений від термопари ізолятором зі скла або кераміки, або повітряним прошарком.

2.6. Мостові та компенсаційні схеми вимірювання електричних величин при постійному та змінному струмі

Вимірювання струму і напруги аналоговими електромеханічними приладами можливо в кращому випадку з похибкою 0,1% (клас точності приладу 0,1). Більш точні вимірювання виконують методом порівняння з мірою. Ці методи називаються мостовими або компенсаційними [16].

Вимірювальні мостові схеми відносяться до найбільш точних і простих методів електричних вимірювань. Мостові схеми постійного струму призначені для вимірювання активних опорів та неелектричних величин з відповідними первинними резистивними вимірювальними перетворювачами. Мостові схеми змінного струму призначені для вимірювання індуктивностей, взаєміндуктивностей,

ємностей, кута діелектричних втрат, добротності, частоти і неелектричних величин при наявності відповідних первинних вимірювальних перетворювачів.

2.6.1. Мости постійного струму

А) Одинарний міст постійного струму

На рис. 2.15. Наведена схема одинарного моста постійного струму

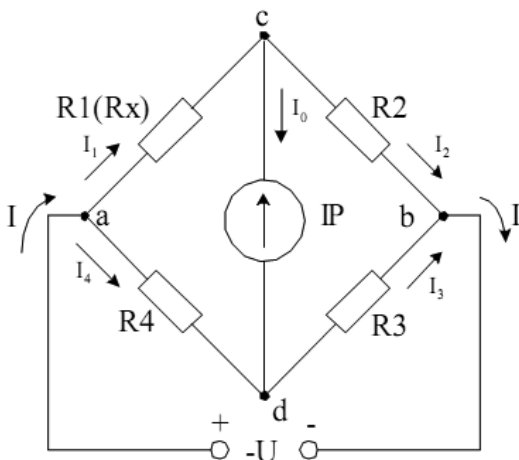


Рис. 2.15. Одинарний міст постійного струму.

В наведеній мостовій схемі резистори R_1 , R_2 , R_3 і R_4 – плечі моста; ab – діагональ моста, в яку подають живлення від джерела постійної напруги U ; cd – індикаторна діагональ, в яку ввімкнено індикатор рівноваги (IP) моста (гальванометр).

Нульові показання гальванметра будуть при умові, коли струм $I_0=0$ (перше правило Кірхгофа), звідки випливає, що

$$I_1=I_2, \quad I_4=I_3 . \quad (2.17)$$

В такому випадку, напруга між точками c і d також буде дорівнювати нулю $U_{cd} = 0$, а це означає, що напруга на резисторі R1 дорівнює напрузі на резисторі R4, напруга на резисторі R2 буде дорівнювати напрузі на резисторі R3

$$U_{ac}=U_{ad}, \quad U_{bc}=U_{bd} . \quad (2.18)$$

Тоді

$$I_1 R_1=I_4 R_4 , \quad (2.19)$$

$$I_2 R_2=I_3 R_3 . \quad (2.20)$$

Поділивши (2.19) на (2.20) і використовуючи (2.17) отримаємо **умову рівноваги моста**:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} . \quad (2.21)$$

При вимірюванні резистор R_x , опір якого невідомий, включають в одне із плеч моста, наприклад замість резистора R1. А резистор R4 позначимо як R_0 – це опір, який є *мірою* , його виконують змінним, що дає змогу добитися рівноваги моста.

Тоді з (2.21) отримаємо:

$$R_x = R_0 \frac{R_2}{R_3} . \quad (2.22)$$

Одинарний міст застосовують для вимірювання великих опорів, тому що під час вимірювання малих опорів виникають похибки, які

зумовлені впливом опорів з'єднувальних провідників та перехідних контактів. Даний недолік відсутній в подвійному мості.

Б) Подвійний міст постійного струму

Подвійний міст постійного струму (рис.2.16) використовують для вимірювання малих опорів від 100 до 10^{-8} Ом. Якщо міст зрівноважений, то напруга $U_{ab} = 0$ і відповідно струм через гальваномет (IP) буде дорівнювати нулю. Тоді можна записати рівняння для струмів:

$$I_1=I_2, \quad I_4=I_3, \quad I_X=I_N \quad (2.23)$$

і напруг: $U_{ca}=U_{cb}, \quad U_{da}=U_{db}.$ (2.24)

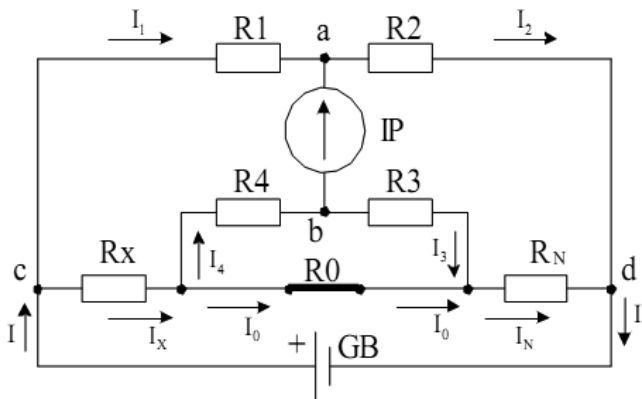


Рис.2.16. Подвійний міст постійного струму.

Використовуючи закон Ома для ділянки кола і рівняння (2.23) запишемо (2.24) у вигляді:

$$I_1 R_1 = I_X R_X + I_4 R_4, \quad (2.25,a)$$

$$I_1 R_2 = I_X R_N + I_3 R_3. \quad (2.25,б)$$

Визначимо з рівняння (2.25,a) R_X :

$$R_X = \frac{I_1 R_1 - I_4 R_4}{I_X}, \quad (2.26)$$

з рівняння (2.25,б) I_X :

$$I_X = \frac{I_1 R_2 - I_4 R_3}{R_N}. \quad (2.27)$$

Підставивши (2.27) в (2.26) маємо:

$$R_X = \frac{R_N (I_1 R_1 - I_4 R_4)}{I_1 R_2 - I_4 R_3}. \quad (2.28)$$

Якщо подвійний міст постійного струму виготовити так, що

$$R_1 = R_4, \quad R_2 = R_3,$$

то з (2.28) маємо:

$$R_X = \frac{R_N R_1 (I_1 - I_4)}{R_2 (I_1 - I_4)} = R_N \frac{R_1}{R_2}. \quad (2.29)$$

2.6.2. Мости змінного струму

Найбільш розповсюджені вимірювальні мости змінного струму розраховані на вимірювання або на мережній частоті 50–60 Гц, або на звукових частотах (звичайно близько 1000 Гц); спеціалізовані вимірювальні мости працюють на частотах до 100 МГц. Як правило,

у вимірювальних мостах змінного струму замість двох плечей, що точно задають відношення напруг, використовується трансформатор. До винятків з цього правила відноситься вимірювальний міст Максвелла -Віна.

Такий вимірювальний міст дозволяє порівнювати еталони індуктивності (L) з еталонами ємності на невідомій точно робочій частоті. Еталони ємності застосовуються при вимірюваннях високої точності, оскільки вони конструктивно простіші прецизійних еталонів індуктивності, більш компактні, їх легше екранувати, і вони практично не створюють зовнішніх електромагнітних полів. Міст врівноважується навіть у випадку «нечистого» джерела живлення (тобто джерела сигналу, що містить гармоніки основної частоти), якщо величина L_x не залежить від частоти.

Мостові методи вимірювання використовуються для вимірювання опорів, індуктивності і ємності, добротності пасивних компонентів електричних кіл. Схема одинарного чотириплечового моста зображена на рис. 2.17. Такий міст є чотириполюсником, до входу якого підключається джерело живлення, а до виходу - гальванометр G (індикатор рівноваги моста). Умовою рівноваги моста є відсутність струму в гальванометрі і, отже, рівність добутків опорів протилежних плечей.

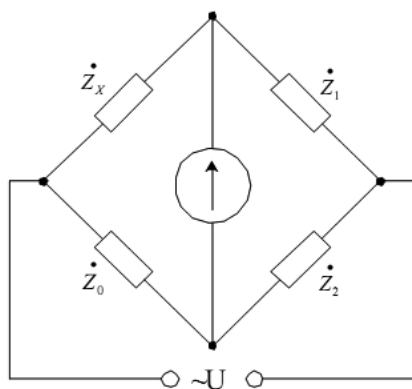


Рис.2.17. Міст змінного струму

Рівняння рівноваги моста змінного струму має вигляд :

$$\dot{Z}_x \cdot \dot{Z}_2 = \dot{Z}_0 \cdot \dot{Z}_1$$

де $\dot{Z}_x$, $\dot{Z}_0$, $\dot{Z}_1$, $\dot{Z}_2$ - комплексні значення опорів плеч моста.

Оскільки $\dot{Z} = Z \cdot e^{j\varphi}$,

то рівняння рівноваги моста змінного струму можна переписати

як

$$Z_x \cdot Z_2 \cdot e^{j(\varphi_x + \varphi_2)} = Z_0 \cdot Z_1 \cdot e^{j(\varphi_0 + \varphi_1)} \quad (2.30)$$

Ця рівність виконається при рівності добутків модулів

$$Z_x \cdot Z_2 = Z_0 \cdot Z_1 \quad (2.31)$$

і рівності фазових кутів

$$\varphi_x + \varphi_2 = \varphi_0 + \varphi_1. \quad (2.32)$$

Тобто, для рівноваги мостових схем змінного струму необхідно виконати дві умови рівноваги (2.31) і (2.32). З наведеної умови рівноваги суми фазових кутів випливає, що якщо в двох суміжних плечах моста ввімкнені активні опори, наприклад,

$$Z_1 = R_1 \quad \text{і} \quad Z_2 = R_2 \quad (\text{кут } \varphi_1 = \varphi_2 = 0),$$

то в двох інших його суміжних плечах повинні бути ввімкнені однорідні елементи, наприклад, дві індуктивності (кути φ_x і φ_0 додатні) або дві ємності (кути φ_x і φ_0 від'ємні) або два резистора ($\varphi_x = \varphi_0 = 0$). До того ж з'єднання елементів у схемах заміщення в обох випадках повинні бути або тільки послідовні (рис. 2.18), або тільки паралельні (рис 2.19).

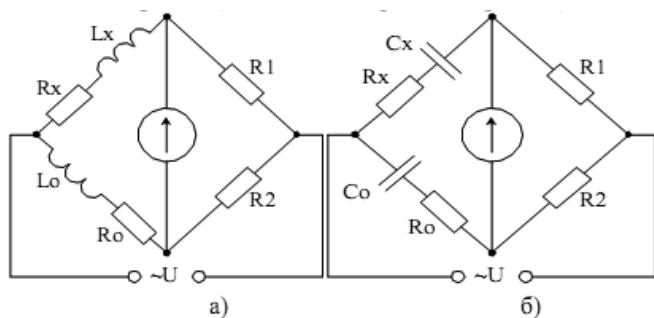


Рис. 2.18. Мостові схеми для вимірювання індуктивності (а) та ємності (б) при послідовному заміщенні.

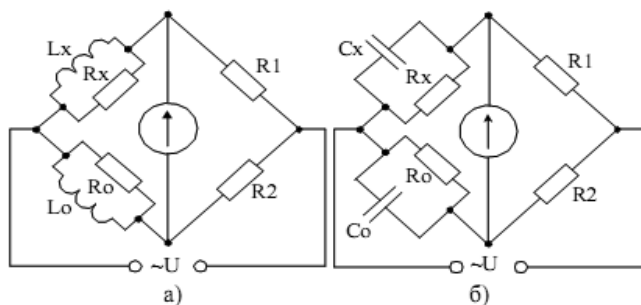


Рис. 2.19. Мостові схеми для вимірювання індуктивності (а) та ємності (б) при паралельному заміщенні.

Розглянемо схему моста змінного струму для вимірювання параметрів конденсаторів (див. рис.2.18, б). При вимірюванні ємностей конденсаторів необхідно враховувати, що він має втрати. Реальний конденсатор зображується еквівалентною схемою заміщення у вигляді ідеальної ємності, послідовно чи паралельно ввімкненої з активним опором, що зумовлює виникнення втрат.

Зрівноважування моста здійснюють зміною опору зразкового резистора і ємності зразкового конденсатора. Рівняння рівноваги моста має вигляд:

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) R_2 = \left(R_0 + \frac{1}{j\omega C_0} \right) R_1,$$

звідки випливає, що

$$R_x = \frac{R_1 R_0}{R_2} \quad \text{і} \quad C_x = \frac{R_1}{R_2} C_0.$$

2.7. Компенсатори постійного струму

Засоби вимірювання, що використовують метод порівняння, називаються **компенсаторами** або **потенціометрами**.

Принцип дії компенсатора заснований на зрівноважуванні (компенсації) вимірюваної напруги відомим падінням напруги на зразковому резисторі. Момент повної компенсації фіксується за показаннями індикаторного приладу (нуль-індикатора). Спрощена схема компенсатора постійного струму приведена на рис. 2.20.

Схема містить джерело зразкової ЕРС E_n , зразковий резистор R_0 , допоміжне джерело живлення ВБ, змінний опір R , регулювальний реостат R_l та нуль-індикатор НИ. Нуль-індикатором служить зазвичай гальванометр з нулем посередині шкали. Як джерело зразкової ЕРС (міри ЕРС) використовується нормальний елемент - це виготовлений за спеціальною технологією гальванічний елемент, середнє значення ЕРС якого при температурі 20°C відомо з точністю до п'ятого знака і дорівнює $E_n = 1,0186 \text{ В}$.

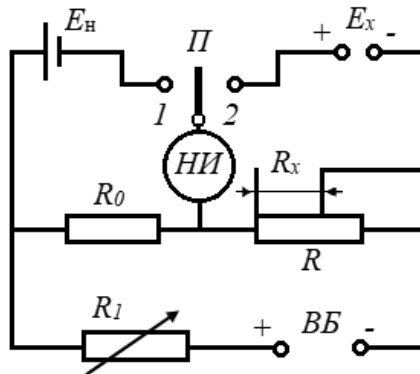


Рис. 2.20. Схема компенсатора постійного струму.

Зразковий резистор являє собою котушку опору спеціальної конструкції з точно відомим і стабільним опором. Процес вимірювання напруги складається з двох операцій: встановлення робочого струму і зрівноваження вимірюваної напруги. Для встановлення робочого струму перемикач П встановлюють в положення 1 і регулюючи опір R_1 , домагаються відсутності струму в гальванометрі. Це буде мати місце в тому випадку, коли падіння напруги на резисторі R_0 стане рівним ЕРС нормального елемента: $I R_0 = E_n$.

При цьому робочий струм ланцюга R_1 , R_0 , R :

$$I = \frac{E_{ВБ}}{R_1 + R_0 + R}.$$

Після установки робочого струму перемикач П встановлюється в положення 2 і, не змінюючи робочого струму, встановлюють таке значення опору $R = R_x$, при якому вимірювана напруга E_x буде зрівноважена падінням напруги $I R_x$ і струм в ланцюзі гальванометра знову буде відсутній. Звідси

$$E_n / R_0 = E_x / R_x$$

та

$$E_x = (R_x / R_0) E_n. \quad (2.33)$$

Із (2.33) випливає, що при сталості значень E_n і R_0 шкала опору R може бути проградуїрована безпосередньо в одиницях напруги постійного струму.

Оскільки в момент рівноваги струм в ланцюзі індикатора відсутній, то можна вважати, що вхідний опір $R_{вх}$ компенсатора (з боку вимірюваної напруги) дорівнює нескінченності, тобто $R_{вх} = \infty$. Звідси випливає одна з основних переваг компенсатора - відсутність споживання потужності від об'єкта вимірювання, тобто можливість вимірювання ЕРС.



Рис. 2.21. Зовнішній
потенціометра ПП – 63М

Похибка компенсатора постійного струму визначається похибками резисторів R_1 , R_0 , ЕРС нормального елемента, а також чутливістю індикатора. Сучасні потенціометри постійного струму випускають класів точності від 0,0005 до 0,2. Верхня межа вимірювання до 1 ... 2,5 В. За достатньої чутливості індикатора нижня межа вимірювання може становити одиниці нановольт.

У сучасних конструкціях компенсаторів замість нормального елемента часто використовуються стабілізовані джерела напруги з більш високим значенням стабілізованої напруги, що дозволяє розширити верхню межу вимірювання компенсатора до декількох десятків вольт. Для вимірювання більш високих значень напруги можуть бути використані схеми з дільником напруги. При цьому, однак, втрачається основна перевага компенсаційного методу -

відсутність споживання потужності від об'єкта вимірювання. Промисловістю випускаються компенсатори з ручним і автоматичним зрівноваженням. Компенсаційні методи використовуються також для вимірювання на змінному струмі.



Рис.2.22. Цифровий потенціометр

2.8. Цифрові електронні вольтметри

Принцип роботи *цифрових* вимірювальних приладів ґрунтується на дискретному поданні безперервних величин. Безперервна величина $x(t)$ - величина яка може мати в заданому діапазоні D нескінченно велику кількість значень в інтервалі часу T при нескінченно великій кількості моментів часу (рис. 2.23, а).

Величина може бути безперервною або за значенням або за часом. Величину безперервну за значенням і перервну за часом називають *дискретизованою* (рис. 2.23, б). Значення дискретизованої величини відмінні від нуля тільки в певні моменти часу. Величину безперервну за часом і перервну за значенням називають *квантованою* (рис. 2.23, в). Квантована величина в діапазоні D може

набувати лише кінцеве число значень. Безперервна величина може бути дискретизованою і квантованою одночасно (рис. 2.32, г).

Процес перетворення безперервної в часі величини дискретизовану шляхом збереження її миттєвих значень в моменти часу $t_0, t_1, t_2 \dots t_n$ (моменти дискретизації) називають **дискретизацією**. Інтервал Δt між найближчими моментами дискретизації називають **кроком** дискретизації.

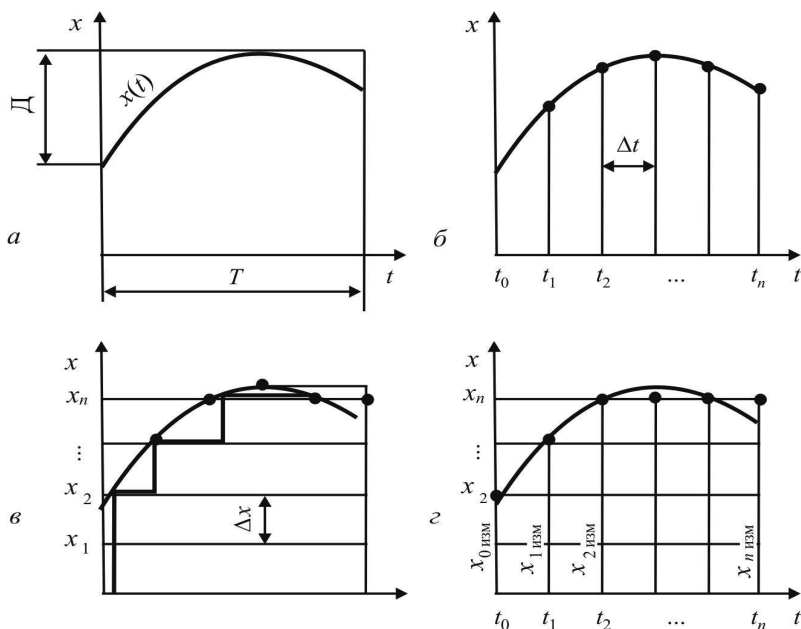


Рис. 2.23. Дискретизація і квантування неперервної величини

Процес перетворення безперервної за значенням величини в квантовану шляхом заміни її значень найближчими фіксованими значеннями $x_1, x_2, \dots, x_n$, називається **квантуванням**. Різниця Δx між двома детермінованими значеннями називають **кроком** квантування.

При вимірі відлік значення величини $x(t)$ проводиться у моменти дискретизації з точністю до найближчого квантованого значення. Тому в загальному випадку отримане в результаті квантування значення $x_{\text{вим}}$ відрізняється від дійсного значення вимірюваної величини. Похибка від заміни дійсного значення квантованим може бути знижена за рахунок зменшення кроку квантування.

Процес вимірювання в цифровому вольтметрі включає дискретизацію, квантування і кодування - отримання за певною системою правил числового значення квантованої величини у вигляді комбінації цифр (дискретних сигналів). Так, наприклад, кодування квантованих значень сигналів $X_{0 \text{ вим}}$, $X_{1 \text{ вим}}$, $X_{n \text{ вим}}$ (рис. 2.23,г) може бути здійснено шляхом вироблення в приладі в моменти дискретизації $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ пакетів імпульсів, з числом імпульсів, рівних кількості інтервалів квантування.

Процес аналого-цифрового перетворення становить сутність будь-якого цифрового приладу, зокрема і вольтметра.

За видом вимірюваної величини цифрові вольтметри поділяються на вольтметри постійного струму, змінного струму (середньо випрямлюваного або середнього квадратичного значення), імпульсні вольтметри (для вимірювання параметрів відео- і радіоімпульсних сигналів) і універсальні вольтметри, призначені для вимірювання напруги постійного і змінного струму, а також деяких інших електричних та неелектричних величин (опору, температури та ін.).

Схемні розв'язки цифрових вольтметрів визначаються застосуванням методом аналого-цифрового перетворення. Як приклад розглянемо принципи побудови часо-імпульсних вольтметрів.

Часо-імпульсний цифровий вольтметр. В основі роботи часо-імпульсного вольтметра лежить перетворення вимірюваної напруги в пропорційний інтервал часу, тривалість якого вимірюється шляхом заповнення цього інтервалу імпульсами зі стабільною частотою прямування (рахунковими імпульсами). Структурна схема часо-імпульсного цифрового вольтметра постійного струму наведена на рис. 2.24, часові діаграми його роботи наведені на рис.2.25.

Принцип дії оснований на перетворенні вимірюваної напруги U_x в часовий інтервал t_x , з наступним його квантуванням імпульсами зразкової частоти f_0 .

Основним елементом структури вольтметра є перетворювач вимірюваної напруги U_x у часовий інтервал T_x , що реалізований на двох компараторах ПП1 і ПП2, генераторі напруги, яка лінійно змінюється, G1 і RS-тригері Т (рис.2.24).

Квантування часового інтервалу T_x імпульсами опорної частоти f_0 , сформованими на виході генератора G2, здійснюється в схемі збігу SW. Двійковий лічильник ЛТ підраховує кількість імпульсів f_0 за час T_x . Результат вимірювання відображається на цифровому індикаторі.

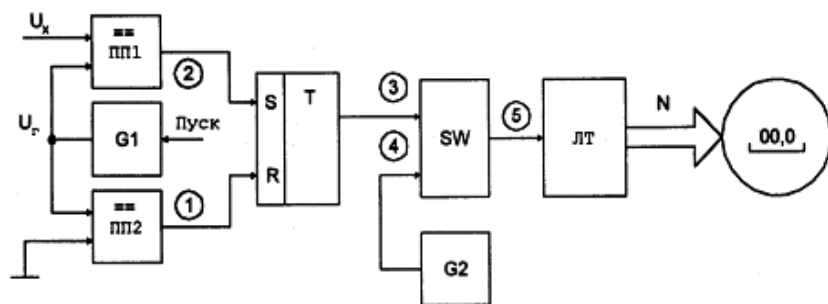


Рис.2.24. Структурна схема цифрового вольтметра часо-імпульсного перетворення.

У момент часу t_0 сигналом «Пуск» (рис.2.24) запускається генератор напруги $G1$, що лінійно змінюється, виробляє сигнал $U_{Г}$, який подається на входи компараторів ПП1 і ПП2, що по черзі спрацьовують у моменти часу t_1 і t_2 . При переході напруги $U_{Г}$ через рівень нуля (момент часу t_1 , рис.2.25) спрацьовує компаратор ПП2 і на його виході формується імпульс «Старт», що по S-входу встановлює в одиничний стан тригер Т. Рівнем логічної одиниці відкривається схема збігу SW (рис.2.24) і імпульси опорної частоти f_0 з виходу генератора $G2$ надходять на вхід лічильника ЛТ. Напруга $U_{Г}$ на виході генератора $G1$ зростає, поки не стане рівною U_x .

Момент рівності $U_{Г} = U_x$ в момент часу t_2 фіксує компаратор ПП1 шляхом формування на своєму виході сигналу «Стоп» (рис.2.25). Сигналом «Стоп» по R - входу компаратор встановлює тригер Т в нульовий стан і закриває схему збігу SW. На цьому процес вимірювання U_x закінчується.

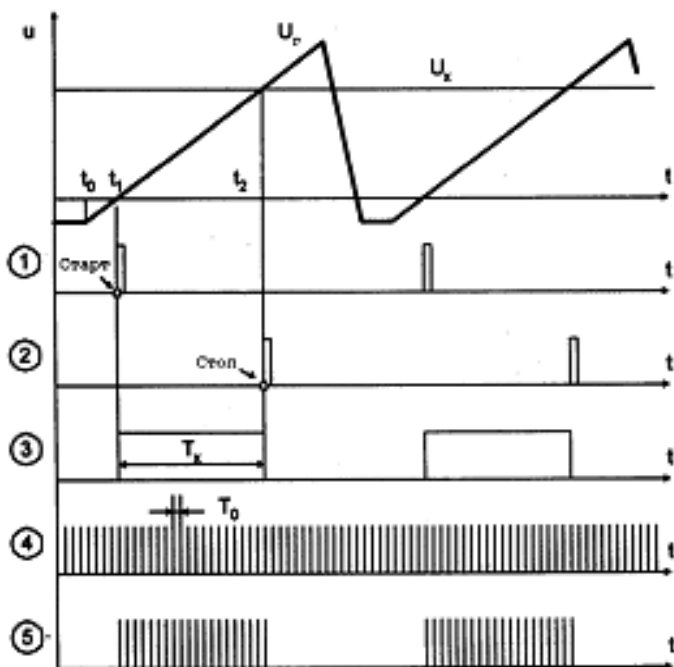


Рис.2.25. Часові діаграми роботи цифрового вольтметра часо-імпульсного перетворення .

Таким чином, на виході тригера Т формується часовий інтервал $T_x = t_2 - t_1$, пропорційний вимірюваній напрузі U_x , під час якого формується одиничний імпульс, що відкриває схему збігу SW, і імпульси опорної частоти f_0 із виходу генератора G2 надходять на вхід лічильника. Кількість імпульсів з частотою f_0 , що надходять на лічильник ЛТ за час T_x , визначається:

$$N_B = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{T_x}{T_0} = T_x f_0 . \quad (2.34)$$

Оскільки $T_x = k \cdot U_x$, де k – коефіцієнт, який залежить від крутості напруги, що лінійно змінюється, то рівняння перетворення цифровоо вольтметра $N_B = F(U_x)$ набуває вигляду:

$$N_B = k \cdot U_x f_0 . \quad \dots \quad (2.35)$$

Залежність (2.35) представлена на рис. 2.26.

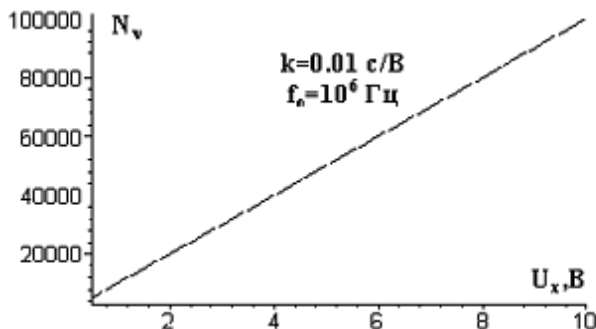


Рис.2.26. Статична характеристика цифрового вольтметра часо-імпульсного перетворення.

Рівняння похибки квантування визначається співвідношенням:

$$\delta_v = \frac{1}{N_B} 100\% = \frac{1}{k U_x f_0} 100\% . \quad (2.36)$$

Залежність похибки квантування від вимірюваної напруги та крутості лінійно змінюваної напруги наведена на рис.2.27.

Крім того, похибка таких засобів вимірювань в основному зумовлена нелінійністю та нестабільністю лінійно змінюваної напруги, нестабільністю порога чутливості компаратора і нестабільністю частоти зразкового генератора.

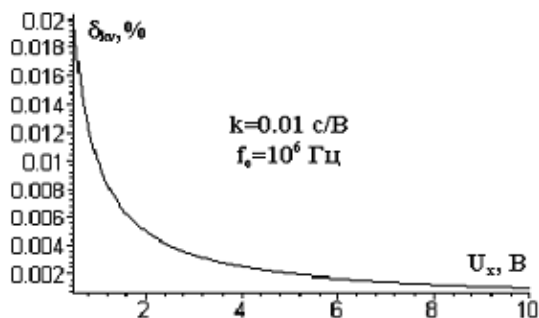


Рис.2.27. Залежність похибки квантування від вимірюваної величини.

За таким самим принципом будуються цифрові вольтметри змінного струму. У цих вольтметрах напруга змінного струму попередньо випрямляється і надалі подається на компаратор. Основним недоліком методу часо-імпульсного перетворення є його невисока завадостійкість.

Шумова завада, накладена на вимірювану напругу U_x , змінює її і, отже, змінює момент появи імпульсу U_{t2} , що визначає тривалість часу рахунку. Тим не менш, часо-імпульсне перетворення постійних напруг дозволяє створювати порівняно прості та досить точні вольтметри. Цифрові вольтметри з часо-імпульсним перетворенням мають похибку, що не перевищує 0,1 ... 0,05%.

Для підвищення завадостійкості застосовують аналогове та цифрове інтегрування.

Цифровий вольтметр із подвійним інтегруванням. Принцип його роботи подібний до принципу часо-імпульсного перетворення, з тією відмінністю, що тут утворюються два часові інтервали протягом

циклу вимірювання, тривалість циклу вимірювання встановлюється кратною періоду перешкоди. Це призводить до суттєвого підвищення завадостійкості вольтметрів. У цифровому вольтметрі з подвійним інтегруванням перетворення U , пропорційний йому інтервал часу T , здійснюється шляхом інтегрування спочатку вимірюваної напруги U_x , а потім опорної напруги U_0 . У першому такті протягом часу t_1 проводиться інтегрування вхідної напруги U_x , внаслідок чого напруга на виході інтегратора

$$U_1(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_x dt = \frac{U_x}{RC} t ,$$

де RC - стала часу інтегрування, t - час.

Наприкінці інтервалу інтегрування ($t_1=T_1$) напруга на виході інтегратора дорівнює $U_x T_1 / RC$. В момент T_1 , напруга U_x відключається від інтегратора і на вхід інтегратора подається опорна напруга $U_{оп}$, що має протилежну до U_x полярність. Інтегрування опорної напруги триває до того часу, поки вихідна напруга інтегратора знову стане рівною нулю. Тому протягом часу другого такту напруга на виході інтегратора буде визначатися як

$$U_2(t) = \frac{U_x}{RC} T_1 - \frac{1}{RC} \int_0^t U_{оп} dt = \frac{U_x}{RC} T_1 - \frac{U_{оп}}{RC} t ,$$

а в кінці цього періоду, через інтервал часу T_x , дорівнюватиме:

$$U_2(t) = \frac{U_x}{RC} T_1 - \frac{U_{оп}}{RC} T_x = 0 ,$$

звідки
$$T_x = T_1 \frac{U_x}{U_{оп}}$$

Перетворення часового інтервалу T_x на еквівалентне число імпульсів N_x здійснюється так само, як і в попередньому методі – шляхом заповнення інтервалу T_x імпульсами f_0 , генератора рахункових імпульсів та підрахунку їх числа лічильником

$$N_x = T_1 \frac{U_x}{U_{оп}} f_0.$$

З останнього виразу видно, що часовий інтервал T_x , пропорційний U_x , не залежить від сталої часу інтегратора RC , а залежить лише від T_1 і $U_{оп}$, які можуть підтримуватися постійними з високою точністю. Практично всі сучасні цифрові вольтметри будуються на основі методу подвійного інтегрування. Вольтметри цього типу забезпечують похибку вимірювання 0,02.....0,005%.



а)



б)



в)

Рис. 2.28. Цифрові вольтметри: а) універсальний В7-82, б) мультиметр тестер переносний (вольтметр, амперметр), в) змінного струму.

3. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУР. КОНТАКТНІ МЕТОДИ

3.1. Температурні шкали

3.1.1. Правила побудови температурних шкал

Температура є однією із найбільш вимірюваних величин. Вона часто є критично важливим фактором у визначенні ефективності різних технологічних процесів. В даному розділі розглянемо безконтактні методи вимірювання температури [17-20].

Властивості речовин, які можна використовуватись для вимірювання температури, називають **термометричними**. До них відносяться об'єм, щільність (густина), довжина, електричний опір, термоелектрорушійна сила і т.д. Речовини, які характеризуються термометричними властивостями, називають **термометричними**.

Температура є величиною змінного рівня. Тому при визначенні температури необхідно знати безперервний ряд значень термометричної властивості речовини, тобто треба мати температурну шкалу.

Температурна шкала - безперервна сукупність чисел, лінійно пов'язаних з числовим значенням будь-якої досить точно вимірюваної фізичної властивості, що є однозначною і монотонною функцією температури.

Для побудови температурної шкали вибирають дві опорні точки, які називають **реперами**. В якості реперних точок t_1 і t_2 зазвичай вибирають температури фазової рівноваги однокомпонентних систем,

оскільки ці температури можуть бути легко відтворені [21]. Температурам t_1 і t_2 приписують довільні числові значення.

Різниця $t_2 - t_1$ зветься основним температурним інтервалом. Його розбивають N частин. $1/N$ частин основного інтервалу була названа градусом, який дорівнює: $(t_2 - t_1)/N$. Градус - масштаб шкали.

Нехай E - термометрична властивість, яка лінійно змінюється з температурою у вибраному основному інтервалі від t_1 до t_2 .

Тоді для деякої проміжної температури t маємо:

$$\Delta t = t - t_1 = k(E - E_1) = k\Delta E, \quad (3.1)$$

Виконуючи в (3.1) підстановку $t=t_2$ і $E=E_2$ визначаємо k , яке знову підставляємо в (3.1) і отримуємо рівняння температурної шкали:

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{E_2 - E_1}(E - E_1),$$

де E_1 і E_2 - значення фізичної властивості речовини в реперних точках.

Перші шкали, побудовані за цим принципом, з'явилися у XVIII столітті. Появу шкали **Фаренгейта** датовано у 1723 р. В якості термометричної речовини Фаренгейт спочатку брав спирт, потім ртуть. Початкову опорну точку він приймав рівною температурі суміші снігу з нашатирем або кухонною сіллю. Температура, за якої замерзала вода, була 32 град. За 100 град Фаренгейт прийняв температуру здорової людини. Тоді температура кипіння води дорівнювала 212 град. Температурний інтервал було поділено на 180 рівних частин. Температура за шкалою Фаренгейта позначається t , $^{\circ}F$

У 1736 р. з'явився термометр зі шкалою *Реомюра*, де опорними точками були: 0 град - температура замерзання води та 80 град - температура кипіння води. Температурний інтервал було поділено на 80 рівних частин. Температура за шкалою Реомюр позначається $t, ^\circ R$.

Температурна шкала *Цельсія* виникла 1742 р. Опорними точками Цельсій обрав: 0 град – температура замерзання води та 100 град – температура її кипіння. За величину градуса було прийнято 1/100 інтервалу з-поміж них. Температура за шкалою Цельсія позначається $t, ^\circ C$.

Зв'язок між шкалами:

$$n^{\circ}C = 0,8n^{\circ}R = (1,8n + 32)^{\circ}F$$

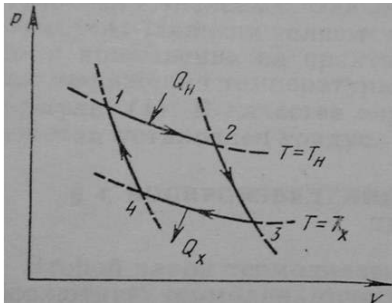
У 80-х роках ХХ століття виникла потреба у виборі серед умовних шкал однієї шкали, яку можна було б визнати еталонною, дослідники зупинилися на температурних газових шкалах і, зокрема, на шкалі водневого газового термометра. Як термометричну властивість було обрано зміну тиску газу при постійному об'ємі, так як тиск можна виміряти з високою точністю.

У 1887 р. Міжнародна комісія мір та ваг прийняла як зразок "нормальну" термометричну стоградусну шкалу водневого термометра з постійним об'ємом, початковим тиском 1 мм рт. ст. (133.332 н/м^2) і двома основними точками, за одну з них була прийнята температура льоду, що тане, за іншу - температура насичених парів води, що кипить при тиску 760 мм рт. ст. ($100224,72 \text{ н/м}^2$) на широті 45° . "Нормальна" шкала водневого термометра охоплювала діапазон температур лише від -25 до $+100^\circ C$.

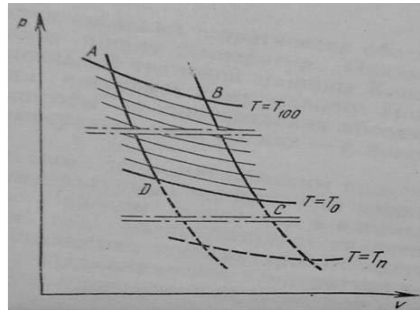
Бурхливий розвиток науки і техніки вимагав не тільки розширення діапазону температурних вимірювань, а й збільшення їх точності. Внаслідок цього у 1927 р. «нормальна» воднева шкала була замінена термодинамічною.

3.1.2. Термодинамическая шкала температур

Термодинамічна шкала температур була запропонована В. Томсоном (лорд Кельвін) у 1848 р., згодом вона була названа шкалою Кельвіна. В її основу покладено термодинамічний цикл Карно ідеальної теплової машини (рис. 3.1,а). Цикл Карно складається з двох ізотерм 1-2, 3-4 та двох адіабат 2-3, 4-1. Процес передачі тепла здійснюється між двома джерелами тепла: нагрівачем із температурою T_H і холодильником із температурою T_X . У прямому циклі Карно $T_H > T_X$.



а)



б)

Рис. 3.1. Побудова абсолютної термодинамічної шкали температур

Здійснивши робочий цикл 1-2-3-4-1, тіло не змінює своєї внутрішньої енергії і вироблена ним робота, як було доведено Карно, дорівнює:

$$A = Q_{\text{н}} - Q_{\text{х}}$$

Карно довів, що коефіцієнт корисної дії такої теплової машини не залежить від властивостей робочого тіла, а визначається лише температурами нагрівача та холодильника:

$$\eta = \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{х}}}{Q_{\text{н}}} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}}.$$

Формула може бути переписана так:

$$1 - \frac{Q_{\text{х}}}{Q_{\text{н}}} = 1 - \frac{T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}}$$

Цикл Карно можна розбити на менші робочі цикли та отримати цілий ряд співвідношень

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}; \quad \frac{Q_2}{Q_3} = \frac{T_2}{T_3} \text{ і т.п.}$$

Цикли Карно мають чудову властивість, яка і була покладена Кельвіном за основу побудови термодинамічної шкали. Якщо цикли Карно будуть утворені за допомогою ізотерм, що рівностоять, тобто:

$$T_1 - T_2 = T_2 - T_3 = T_3 - T_4 = \dots,$$

то в цих циклах на роботу перетворюється однакова кількість теплоти:

$$Q_1 - Q_2 = Q_2 - Q_3 = Q_3 - Q_4 = \dots.$$

Якщо, наприклад, здійснити цикл Карно між ізотермами, які є реперними точками: температурою танення льоду T_0 та температурою кипіння води $T_{\text{кип}}$, то на роботу в циклі Карно ABCD (рис.3.1,б) буде витрачена кількість теплоти Q . Площа циклу Карно ABCD може бути розбита сіткою рівновіддалених ізотерм на 100

рівних частин, тоді в кожному з отриманих циклів Карно на роботу витратиться кількість теплоти, що дорівнює $0,01 Q$. Інтервал між ізотермами становитиме 1 градус. Його назвали градусом термодинамічної шкали.

Побудову ізотерм можна продовжити нижче за 0°C . Тоді гранична ізотерма буде відповідати найменшій можливій температурі T_n . Із виразу для циклу Карно

$$\eta = \frac{T_0 - T_n}{T_0} = \frac{Q_0 - Q_n}{Q_0}$$

випливає, що при $\eta=1$ T_n повинна дорівнювати нулю, отже, і дорівнюватиме нулю Q_0 . Таким чином, T_n є така температура, при якій вся теплота, що повідомляється холодильнику, дорівнює нулю, тобто переходить в корисну роботу.

Ця найменша температура була названа Кельвіном абсолютним нулем і прийнята ним за початкову постійну природну точку абсолютної термодинамічної шкали температур (шкали Кельвіна). Оскільки $\eta > 1$ суперечить другому закону термодинаміки, то температура в абсолютній термодинамічній шкалі температур не може бути негативною.

Градус термодинамічної шкали температур відповідає градусу стоградусної шкали температур. Числові значення температур, виражені в абсолютній термодинамічній шкалі температур, супроводжуються знаком К (Кельвін).

На основі газового закону Гей-Люссака, який дозволяє підійти до визначення коефіцієнта об'ємного розширення ідеальних газів

отримано, що $1/\beta = T_{\text{т.л.}}$ - температурі танення льоду в абсолютній термодинамічній шкалі температур. Значення коефіцієнта β реальних газів було визначено в серії експериментальних досліджень. Для одноманітності значення $1/\beta$ було прийнято рівним $+273,15$, тоді значення температури абсолютного нуля буде дорівнюватиме $-273,15$ °C.

Так як температура абсолютного нуля в термодинамічній шкалі температур прийнята за 0 °K, то температура танення льоду в цій шкалі буде $273,15$ °K. Співвідношення числових значень температур в абсолютній шкалі температур і стоградусній шкалі визначається формулою:

$$T = t + 273,15^{\circ}\text{K}.$$

Розглянута вище термодинамічна шкала температур будувалася за двома реперними точками: температурою танення льоду та температурою кипіння води, що вносило до визначення температури додаткові похибки. Тому в 1954 р. X Генеральна конференція з мір і ваг на основі даних, отриманих у різних лабораторіях світу, прийняла інший принцип побудови термодинамічної шкали температур по одній реперній точці - *потрійній точці води, приписавши їй значення на 0,01 градус вище точки танення льоду, що дорівнює 273,16 K точно.*

Таким чином, термодинамічна шкала температур в даний час експериментально реалізується тільки по одній реперній точці - потрійній точці води, так як друга реперна точка - абсолютний нуль

температур має строго фіксоване положення та експериментально не реалізується.

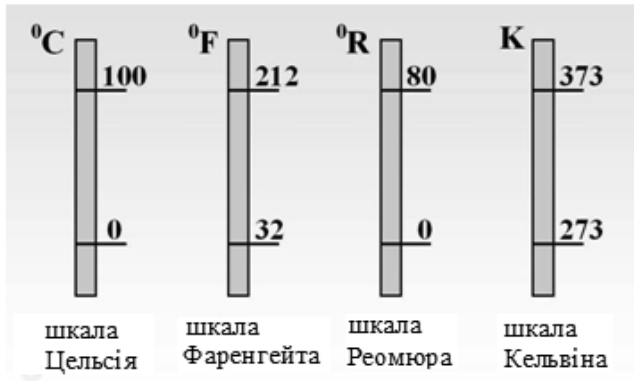


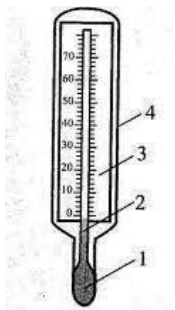
Рис.3.1.Температурні шкали

Розмір градуса в цьому випадку залишився колишнім, зате втратило сенс колишнє визначення стоградусної термодинамічної шкали температур. А сама шкала від найнижчих температур до найвищих стала єдиною.

У Міжнародній системі одиниць СІ градус Кельвіна термодинамічної шкали прийнято за одну із шести основних одиниць. При цьому збережено можливість вираження температури у градусах Цельсія, які є градусами МПТШ. Обидва способи вираження числових значень температур у градусах Кельвіна і Цельсія є рівноправними і визначаються зручністю застосування на практиці.

3.2. Прилади для вимірювання температур. Скляні рідинні термометри

Принцип дії скляних рідинних термометрів ґрунтується на залежності між температурою та об'ємом термометричної рідини, що знаходиться в термометрі [17].



Основними елементами конструкції термометра є: скляний резервуар із припаяним до нього скляним капіляром (1); термометрична рідина (2), що заповнює резервуар та частину капіляра; шкала (3), градуйована в градусах температури, розташована вздовж капіляра; балон (4).

Рис. 3.2. Будова рідинного термометра.

При підвищенні температури термометра об'єм рідини збільшується, що приводить до збільшення довжини стовпчика рідини в капілярі. Таким чином, довжина стовпчика рідини є мірою вимірюваної температури, а верхній кінець стовпчика - меніск є вказівником температури.

Вимірювання об'єму залежно від температури для будь-якої рідини чи твердого тіла характеризується коефіцієнтом об'ємного теплового розширення β . Середнє значення β у температурному інтервалі 0 - t обчислюють за формулою

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}, \quad (3.2)$$

де V_t і V_0 - об'єми, що відповідають температурам t і 0°C .

У скляному рідинному термометрі при зміні температури змінюється об'єм не лише термометричної рідини, а й об'єм скляного резервуару. Тому в термометрі спостерігають лише видиму зміну об'ємів рідини та резервуару (і частково капіляра) термометра. У зв'язку з цим при розрахунку конструкції термометра використовують так званий видимий коефіцієнт розширення термометричної рідини в склі β , рівний різниці істинних коефіцієнтів розширення рідини β_p і скла β_c .

$$\beta = \beta_p - \beta_c.$$

Нехай t_n и t_k - нижня та кінцева верхня межі вимірювання термометра (початок та кінець шкали), L - довжина шкали (капіляра) між відмітками t_n і t_k . Знайдемо довжину градусного інтервалу шкали термометра l_0 :

$$l_0 = \frac{L}{t_k - t_n}. \quad (3.3)$$

Приріст об'єму термометричної рідини при нагріванні термометра від t_n і t_k , що витісняється у вимірювальний капіляр, дорівнює об'єму каналу капіляра між відмітками t_n і t_k . Із (3.2) випливає:

$$V_0 \beta (t_n - t_k) = (V_k - V_0) = LS, \quad (3.4)$$

де S - поперечний переріз каналу капіляра (для круглого каналу $S = \pi d^2/4$, d – його діаметр).

З урахуванням (3.3) і (3.4) отримаємо вираз для довжини градусного інтервалу шкали термометра:

$$l_0 = \frac{V_0 \beta}{S}. \quad (3.5)$$

Таким чином довжина градусного інтервалу шкали термометра прямо пропорційна об'єму термометричної рідини (приблизно об'єму резервуара), видимому коефіцієнту розширення рідини β і обернено пропорційна поперечному перерізу каналу капіляра S . **Чим більша довжина градусного інтервалу, тим на більшу кількість поділок може бути розділений градус і тим менша ціна поділки і відповідно більші чутливість термометра та його точність.** Як випливає з формули (3.3). **при фіксованій довжині шкали L збільшення довжини градусного інтервалу може бути досягнуто лише за відповідного зменшення діапазону шкали $t_n - t_k$ термометра.**

Найбільш точні та високочутливі скляні ртутні термометри виготовляються з ціною 0,01 – 0,02 градуса та діапазоном шкали від 4-5⁰C до 8-10⁰C. Для цих термометрів характерні великий об'єм резервуару та малий діаметр каналу капіляра. Однак мінімальна величина перерізу каналу та максимальний об'єм резервуару обмежені певними межами з таких міркувань.

Зі зменшенням перерізу каналу капіляра зростає величина сили тертя ртуті відносно його стінок, що діє серед інших сил на ртутний стовпчик при його русі по капіляру. Внаслідок цього у вузьких капілярах стовпчик ртуті рухається нерівномірно, стрибкоподібно, а при зниженні температури може розірватися. Тому при виготовленні ртутних термометрів використовують капіляри з діаметром каналу щонайменше 0,1 мм. При повірці та експлуатації термометрів з

вузьким каналом капіляра слід уникати вимірювань при понижених температурах.

Щоб покращити видимість стовпчика термометричної рідини та полегшити відлік показань, у термометрах з малим поперечним перерізом каналу капіляра (наприклад, медичних) застосовують капіляри з овальним перетином каналу або призматичні капіляри, які збільшують видиму ширину ртутного стовпчика.

Резервуари термометрів у більшості випадків виготовляють циліндричної або кулястої форми. При однаковому об'ємі резервуар циліндричної форми має більшу поверхню, що знижує теплову інерційність термометра. Резервуари термометрів зазвичай роблять не більше 2,5 см³. Лише у великогабаритних термометрів, що вимірюють температуру зовнішнього повітря, резервуари значно перевищують вказану величину. Термометри ж, що мають широкий діапазон шкали, наприклад 0-600°C, характеризуються малим значенням l_0 і великою ціною поділки шкали. Вони є менш точні.

3.3. Види і класифікація термометрів

На скляні рідинні термометри існують державні стандарти України: ДСТУ OIMLR 133:2019 «Термометри рідинні скляні» та ДСТУ OIML R 7:2019 «Термометри медичні максимальні ртутні скляні» [22], в яких встановлені технічні вимоги:

- до матеріалів для виготовлення термометрів;
- до якості виготовлення окремих елементів термометра і всього термометра в цілому;

-до способу нанесення позначок, поділок та числових позначень шкали термометра та його маркування;

-до величин похибок показань в залежності від ціни поділки та температурного інтервалу.

Крім того, на скляні рідинні термометри є спеціальні стандарти, які встановлюють конструкцію та розміри, межі виміру, ціну поділки та інші технічні характеристики термометрів.

Відповідно до вимог ртутні термометри з верхньою межею виміру не вище 200°C можуть бути вакуумними або газонаповненими, а з верхньою межею виміру вище 200°C - тільки газонаповненими.

У наповнених ртутних термометрів простір над ртутним стовпчиком в капілярі заповнюється інертним газом, наприклад азотом. При цьому тиск газу має бути тим більшим, чим вище верхня межа вимірювання, що спричинене необхідністю виключити пароутворення ртуті в резервуарі при високих температурах.

Високоградусні термометри виготовляються зазвичай у двох конструктивних варіантах: з розширенням та без розширення у верхній частині капіляра. Термометри, що мають розширення, при виготовленні заповнюють інертним газом під необхідним тиском, на відміну від термометрів, які не мають розширення, яке заповнюють інертним газом під нормальним атмосферним тиском за температури термометра 200°C . У таких термометрів

внаслідок стиснення газу ртутним стовпчиком, що піднімається, при підвищенні температури тиск над ртутним стовпчиком збільшується до необхідної величини.

За методом градуювання та застосування скляні рідинні термометри поділяються на дві групи:

1) термометри, що градуюються при повному зануренні;

2) термометри, що градуюються при неповному (робочому) зануренні.

До перших термометрів відносяться ті, у яких у середовище, що вимірюється, занурюється резервуар і частина капіляра, заповнена термометричною рідиною. Таким чином, у міру підвищення температури глибина занурення термометра має збільшуватися. У цих термометрах вся термометрична рідина в резервуарі та капілярі має температуру вимірюваного середовища. До термометрів, що градуюються при неповному зануренні, відносяться ті, які при градуюванні, і при вимірюванні повинні мати фіксовану глибину занурення, вказану на шкалі термометра. Таким чином, у цих термометрах завжди є частина капіляра, заповнена термометричною рідиною і не занурена у середовище, що вимірюється, отже, має температуру, відмінну від вимірюваної і близьку до температури навколишнього повітря.

Всі термометри, що розглядаються, за призначенням і областю застосування, можуть бути розділені на наступні групи:

1) лабораторні загального та спеціального призначення;

- 2) технічні загального та спеціального призначення;
- 3) термометри для сільського господарства (зернові, інкубаторні, ветеринарні та ін.);
- 4) метеорологічні, що вимірюють: а) температуру повітря; б) максимальну та мінімальну температуру протягом доби; в) температуру ґрунту; г) відносну вологість повітря, а також термометри, що застосовуються при інших метеорологічних спостереженнях;
- 5) побутові (кімнатні, ванні, термометри, що вимірюють температуру зовнішнього повітря, психометричні, медичні максимальні, що виготовляються за відповідними ДСТУ).

3.4. Лабораторні термометри

Лабораторні термометри загального застосування призначені для вимірювання температур у різних лабораторних та виробничих умовах. Дані термометри виготовляються за ДСТУ ISO 386:2018 «Термометри рідинні скляні лабораторні. Принципи проектування, конструкція та використання»[23].

Існує чотири види лабораторних термометрів загального застосування. Кожен має кілька модифікацій залежно від меж вимірювання та відрізняється за розмірами, ціною поділки та діапазоном шкали, точністю вимірювання. Найбільш важливими для метрологічної практики є лабораторні термометри з ціною поділки $0,1^{\circ}\text{C}$ і температурним інтервалом шкали 50°C , що виготовляються у восьми варіантах з межами вимірювання температур від -30 до

+350⁰С і використовуються, зокрема, як зразкові термометри 2-го і 3 - го розрядів.

Точні лабораторні скляні ртутні термометри виготовляються з великою довжиною градусного інтервалу та малою ціною поділки: 0,01; 0,02; 0,05 та 0,1⁰С (табл.3.1). Природно, що при цьому звужується діапазон шкали термометра і збільшується кількість термометрів, необхідних для вимірювань у широкому температурному інтервалі.

Таблиця 3.1.

Варі- ант	Межі вимі- рювання тем- ператури, °С	Кількість термометрі в комплекті	Темпера- турний інтервал шкали, °С	Ціна поділ- ки шка- ли, °С	Допусти- ма похиб- ка вимі- рів, °С
1	0 - 60	15	4	0,01	±0,05
2	55 - 155	10	10	0,02	±0,1
3	140 - 300	8	20	0,05	±0,3
4	300 - 500	4	50	0,1	±1,2

Відмінною особливістю методики вимірювання температури лабораторними та зразковими термометрами є введення поправок до їх показань для виключення систематичних похибок.

Градуювальні систематичні похибки визначають заздалегідь при повірці термометра, складаючи таблиці поправок до показань термометра. Систематичні зміни показань термометра внаслідок його старіння повинні періодично контролюватись за становищем нульової точки, тобто за показаннями термометра, зануреного в лід,

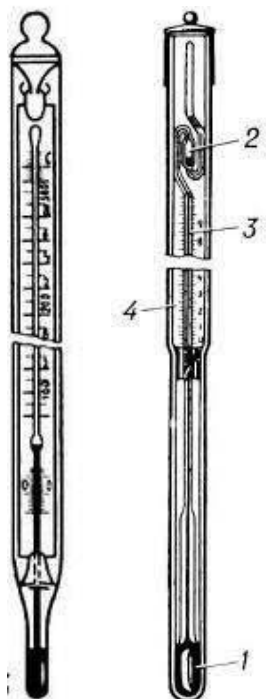
що тане. Тому на шкалі лабораторного термометра має бути нульова позначка. Якщо нижня межа вимірювання термометра вище 0°C , то нульову точку наносять на додаткову шкалу, що має кілька позначок нижче і вище нульової. Положення нульової точки, визначене в результаті перевірки, зазначено у свідоцтві на термометр.

На капілярі, розташованому між додатковою та основною шкалою, роблять розширення. Об'єм цього розширення дорівнює приросту об'єму ртуті при нагріванні термометра від 0°C до температури, що відповідає нижній межі основної шкали. Термометри такої конструкції називаються *термометрами із укороченою шкалою* (рис. 3.3,а).

Лабораторні термометри спеціального застосування призначені для вимірювання температури в якійсь одній певній області. До цієї групи відносяться *калориметричні термометри та метастатичні*, що вимірюють температуру при випробуваннях нафтопродуктів, і деякі інші.

У багатьох дослідах часто виникає необхідність точного (до тисячних часток градуса) виміру невеликих різниць температур або невеликих змін температури. Це необхідно, наприклад, при калориметричних вимірюваннях теплотворної здатності палив або теплоємності тіл, а також при визначеннях зниження точки замерзання розчинів та підвищення точки кипіння рідин. Для таких вимірювань використовують високочутливі термометри з ціною поділки шкали $0,02\text{--}0,01^{\circ}\text{C}$ - *калориметричні та метастатичні*.

Калориметричні термометри застосовують в основному при вимірюванні кількості теплоти та теплоємності тіл. Для цих термометрів характерний невеликий градусний інтервал шкали, переважно $15-25^{\circ}\text{C}$, градуйованої при повному зануренні.



Метастатичні термометри призначені лише вимірювання малих різниць температур від $0,001$ до 50°C (але не вимірювання абсолютного значення температури). Вони мають умовну шкалу, яка градуйована від 0 до 5 або 60°C . Ціна найменшої поділки $0,01^{\circ}\text{C}$.

Рис.3.3. Термометри: а) з укороченою шкалою,

б) метастатичний: 1- основний резервуар, 2- запасний резервуар, 3- капіляр, 4- шкала.

а)

б)

Метастатичні термометри - це термометри змінного наповнення, оскільки особливістю їх конструкції є наявність додаткового, запасного, резервуара у верхній частині капіляра (рис.3.3,б). Переливаючи частину ртуті з основного резервуара в запасний або назад, можна змінювати межі вимірювання термометра в досить

широкому температурному інтервалі від -20 або від 0 до $+150^{\circ}\text{C}$. Такі межі має додаткова шкала, розташована вздовж запасного резервуара. Ця шкала служить для орієнтовного визначення кількості ртуті, яка має бути перелита в запасний резервуар, щоб отримати необхідні межі вимірювання термометра. Наприклад, якщо необхідно замість меж виміру $10-15^{\circ}\text{C}$ налаштувати термометр на межі $35-40^{\circ}\text{C}$, то термометр перевертають резервуаром вгору, злегка струшуючи, щоб ртуть почала перетікати з основного резервуара в запасний. Коли меніск ртуті в запасному резервуарі дійде до позначки 35°C , термометр повертають у нормальне положення та легким поштовхом відривають ртутний стовпчик від ртуті, що знаходиться у запасному резервуарі. Нижня межа вимірювання при цьому буде $\sim 35^{\circ}\text{C}$, а верхня 40°C . Для більш точної підгонки та визначення меж вимірювання показання метастатичного термометра порівнюють із показаннями зразкового термометра.

При переході до вимірів нижчих температур проводять зворотну операцію: частину ртуті із запасного резервуару переливають в основний. При зміні кількості ртуті в основному резервуарі змінюється значення градусної поділки шкали термометра, а саме: при зменшенні кількості ртуті в основному резервуарі значення градусної поділки збільшується і навпаки. Наприклад, якщо в межах вимірювання термометра від 0 до 5°C середнє значення градусної поділки шкали дорівнює $1,000^{\circ}\text{C}$, то в межах вимірювання від 145 до 150°C це значення буде $-1,050^{\circ}\text{C}$, тобто збільшиться на $\sim 5\%$. Зміна порівняно невелика, але при точних вимірах має бути врахована,

тому при повірці метастатичних термометрів визначають середнє значення градусної поділки для різних температур і результати надають в паспорті у вигляді таблиці.

Джерелами похибок показань метастатичних термометрів є також нерівномірність перерізу каналу капіляра та похибки у нанесенні позначок шкали.

3.5. Максимальні та мінімальні термометри

Максимальні ртутні термометри (технічні, метеорологічні, медичні) призначені для вимірювання найвищої температури за певний період часу і виготовляються згідно ДСТУ OIML R 7:2019 Термометри медичні максимальні ртутні скляні [24].

Максимальні ртутні термометри характеризуються тим, що їх показання при підвищенні температури збільшуються, а при зниженні температури не зменшуються. Якщо за деякий проміжок часу максимальний термометр був підданий впливу температури, що змінюється, то його показання відповідатимуть максимальній температурі за зазначений період. Це досягається завдяки влаштуванню різкого звуження каналу капіляра, що перешкоджає спаданню ртутного стовпчика. Звуження капіляра конструктивно виконують у двох варіантах: сплющування капіляра в розм'якшеному стані, коли на місці сплющування залишається лише вузький щільний прохід для ртуті (рис. 3.4, а), і установкою тонкого круглого скляного стриженька - штифта, один кінець якого припаяний до дна резервуара, а інший входить до капіляру

овального перерізу і перекриває більшу частину каналу (рис. 3.4,б). У місці звуження капіляра ртутний стовпчик виявляється відірваним від маси ртуті, що міститься в резервуарі, і утримується силою поверхневого натягу в меніску ртуті. Лише при струшуванні термометра ртутному стовпчику надається прискорення, що в десятки разів перевищує прискорення сили тяжіння, що призводить до такого ж зростання сили тиску ртутного стовпчика на меніск, і ртуть проштовхується в резервуар.

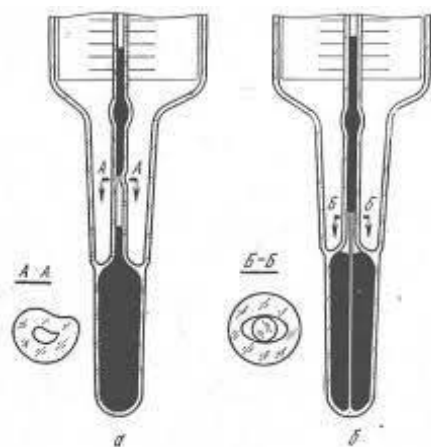


Рис. 3.4. Максимальний термометр; звуження капіляра: а) шільове, б) за допомогою штифта.
А-А , Б-Б – перерізи резервуара.

Таку ж перешкоду звужений капіляр надає і руху ртуті з резервуару капіляр при підвищенні температури термометра. Тому на відміну від звичайних термометрів, для яких, як правило, характерне плавне безперервне підвищення меніска ртутного стовпчика при нагріванні термометра, у максимальних термометрах ртуть через звуження капіляра продавлюється краплями. Це зумовлює стрибкоподібне підвищення показань термометра і є причиною варіації показань, що погіршує відтворюваність показань

максимальних термометрів. Наприклад, у медичних термометрів спостерігається варіація показань, що дорівнює в середньому $0,03^{\circ}\text{C}$.

Мінімальні термометри (метеорологічні), які виготовляються за спеціальним стандартом, призначені для вимірювання найменшої температури повітря за певний період часу (наприклад, за добу). Характерною особливістю конструкції мінімального спиртового термометра є спеціальний скляний штифт, що розміщують у стовпчику рідини капіляра. Штифт служить вказівником мінімальної температури і може вільно переміщатися капіляром.

Для підготовки до вимірювань термометр перевертають резервуаром вгору, при цьому штифт внаслідок більшої щільності скла, порівняно із щільністю спирту, переміщується від початку шкали до меніска стовпчика рідини. Поверхневий натяг рідини в меніску утримує штифт від виходу зі стовпчика рідини. Потім термометр приводять у горизонтальне положення та поміщають у метеорологічну будку. При зниженні температури меніск стовпчика рідини рухається до початку шкали і штовхає штифт у тому ж напрямку. Таким чином, при зниженні температури положення верхнього кінця штифта збігається з положенням меніска. Якщо температура підвищуватиметься, то штифт залишиться на місці і за становищем його верхнього кінця можна визначити мінімальну температуру за певний проміжок часу.

3.6. Властивості термометричних рідин

В якості основних термометричних рідин для заповнення скляних рідинних термометрів застосовують ртуть, гас, толуол, етиловий спирт, петролейний ефір і пентан. Температурні межі застосування цих рідин та їх середні коефіцієнти об'ємного теплового розширення наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

Термометрична рідина	Температурна межа використання, °C		Середній коефіцієнт об'ємного розширення	
	Нижня	Верхня	Істинний	Видимий в склі
Ртуть	-35	+750 (+1200)	0,00018	0,00016
Керосин	-20	+300	0,00095	0,00093
Толуол	-80	+100	0,00107	0,00107
Етиловий спирт	-80	+70	0,00105	0,00103
Петролейний ефір	-120	+25	0,00152	0,00150
Пентан	-200	+20	0,00092	0,00090

З термометричних рідин найкращими властивостями володіє ртуть: вона не змочує скла, що дає можливість застосовувати капіляри з дуже малим діаметром каналу (до 0,1мм), які забезпечують виготовлення високочутливих і точних термометрів з ціною поділки 0,01-0,02 °C. Ртуть залишається рідкою в широкому температурному інтервалі від -38,87 °C до +356,58°C (при нормальному атмосферному

тиску). При підвищеному тиску, що створюється над ртутним стовпчиком, у високоградусних термометрів верхня межа застосування підвищується до 600°C , а у термометрів, виготовлених з плавленого кварцу, верхня межа може бути підвищена до 750°C і навіть до 1200°C . Ртуть є хімічним елементом і порівняно легко очищається, що забезпечує чудову відтворюваність властивостей термометричної рідини. Завдяки цим цінним якостям ртуті ртутні термометри набули найбільшого поширення.

З таблиці. 3.2 випливає, що ртуть істотно відрізняється від інших термометричних рідин за величиною коефіцієнта об'ємного розширення, який у ртуті у шість-вісім разів менше, ніж у інших рідин. Ця властивість ртуті, як буде показано далі, має свої позитивні та негативні сторони.

Решта термометричних рідин є органічними рідинами складного складу. Вони безбарвні та прозорі, за винятком гасу, який має слабкий жовтий колір. Щоб полегшити відлік показань термометра, ці рідини здебільшого забарвлюють різними барвниками у синій, червоний чи коричневий кольори. У деяких випадках застосовують спосіб так званого видимого фарбування - колюкс, коли на шкалу під капіляром наносять чорну межу.

Оптичне збільшення ширини цієї межі стовпчиком рідини в капілярі створює ефект пофарбованої в чорний колір рідини.

Найбільш істотний недолік органічних рідин у порівнянні з ртуттю полягає в тому, що всі ці термометричні рідини змочують

скло. Це викликає необхідність застосування капілярів із великим діаметром каналу, а також є джерелом додаткових похибок.

Однак у порівнянні з ртуттю органічні рідини мають і низку переваг. Вони мають нижчі температурні межі застосування, дешеві та менш шкідливі у виробництві.

3.7. Властивості термометричного скла

При тепловому розширенні скляного резервуара проявляються ефекти термічних післядій у склі: старіння і депресія, що порушують однозначну залежність об'єму резервуара від температури. Термічні післядії у склі є основною причиною нестабільності показань скляних ртутних термометрів.

Старіння термометра проявляється як тривалий процес зменшення об'єму резервуару. При виготовленні термометра після обробки резервуара на складувальному пальнику відбувається швидке охолодження скла, і в стінці резервуара з'являються напруги, які поряд зі структурними змінами в склі є причиною подальшого зменшення об'єму резервуара. Об'єм резервуара поступово зменшується по згасаючій кривій протягом багатьох років. Внаслідок старіння показання термометра за будь-якої фіксованої температури (у межах його шкали) збільшуються.

Депресія термометра проявляється у тимчасовому залишковому розширенні резервуару та зменшенні показань, що відбуваються після кожного нагрівання термометра та подальшого його швидкого охолодження.

За зміною показань термометра внаслідок старіння або депресії найлегше спостерігати за показаннями термометра, зануреного в лід, що тане. У процесі старіння положення нульової точки термометра систематично підвищується. Така ж зміна показань буде і в усіх інших точках шкали термометра, що полегшує введення поправок для виключення похибки.

Внаслідок депресії положення нульової точки термометра тимчасово знижується, але через порівняно невеликий проміжок часу (від двох до п'яти днів) воно стає початковим.

Величини зміни показань термометрів внаслідок старіння та депресії залежать від таких факторів: сорти скла; технології виготовлення термометра; температурного режиму його роботи та, зокрема, верхньої температурної межі застосування; термометричної рідини.

Істотно зменшують зміну показань термометрів внаслідок їхнього старіння також спеціальними технологічними операціями, а саме: відпалом та штучним старінням при виготовленні термометрів. Відпал проводиться шляхом витримки заготовок термометрів (ампул), не заповнених термометричною рідиною, при температурі, близькій до розм'якшення скла, та подальшого повільного охолодження ампул. Штучне старіння, якому піддають високоградусні термометри, полягає у витримці термометрів (заповнених ртуттю) протягом ~ 10 год при температурі, що відповідає верхній межі вимірювання термометрів, після чого термометри повільно охолоджують до кімнатної температури.

Для того щоб визначити, як відображаються термічні післядії в склі на показаннях рідинних нертутних термометрів, розглянемо два термометри - ртутний і спиртовий, що мають однакові об'єми резервуара V і переріз капіляра S . Очевидно, що за цих умов довжина градусного інтервалу l_1 спиртового термометра в стільки разів буде більше довжини градусного інтервалу ртутного l_2 , в скільки видимий коефіцієнт розширення β_1 спирту більше видимого коефіцієнта розширення β_2 ртуті:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{\beta_1}{\beta_2} \quad (3.6)$$

Якщо в результаті старіння об'єм резервуару кожного з термометрів (при 0°C) зменшився на ΔV , то такий же об'єм термометричної рідини буде витіснений капіляр, і стовпчик рідини в капілярі підвищиться на $\Delta l = \Delta V/S$.

Підвищення положення нульової точки в градусах у спиртового термометра буде рівним $\Delta t_1 = \Delta l/l_1$, а ртутного $\Delta t_2 = \Delta l/l_2$. Розділивши одне на друге і враховуючи (3.6) маємо:

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{\beta_2}{\beta_1},$$

тобто зміна показань термометрів внаслідок ефекту термічної післядії у склі обернено пропорційна величинам видимих коефіцієнтів розширення термометричних рідин.

Як було показано вище (див. табл. 3.2.), видимий коефіцієнт об'ємного теплового розширення органічних рідин у шість - вісім разів більше, ніж у ртуті, тому вплив термічних післядій скла на

показання рідинних нертутних термометрів буде в шість-вісім разів менше, ніж у ртутних термометрів. Так як рідинні нертутні термометри виготовляють в основному з ціною поділки не менше $0,5^{\circ}\text{C}$ і з верхньою межею вимірювання, що не перевищує 100°C , максимальна зміна їх показань внаслідок депресії буде менше $0,01^{\circ}\text{C}$, тобто значно менше точності відліку показань. Таким чином, можна зробити висновок, що вплив термічних післядій у склі на показання нертутних термометрів може не враховуватись.

3.8. Похибки вимірів температури термометрами та їх усунення

Основними джерелами похибок вимірювання температур скляними рідинними термометрами є: 1) похибки показань термометрів за нормальних умов їх роботи; 2) похибки, що є наслідком відхилення умов виміру від нормальних; 3) похибки, обумовлені дефектами термометра, наприклад, сублімацією термометричної рідини, розривами стовпчика рідини, наявністю бульбашок газу в резервуарі, поздовжнім зміщенням шкали; 4) похибки вимірювання, що вносяться спостерігачем, зокрема, похибки відліку показань та похибки визначення поправок.

Похибки показань термометрів здебільшого є наслідком похибок градування шкали, що вносяться під час виготовлення термометрів. При градуванні термометра на шкальну пластину наносять дві (або кілька) основні позначки шляхом порівняння з показниками зразкових термометрів. Потім проміжки між

нанесеними відмітками поділяють на рівні частини. За цих умов джерелами градувальних похибок є: помилки у нанесенні основних та проміжних позначок шкали; нерівномірність перерізу каналу капіляра за його довжиною; нелінійна залежність об'ємів термометричної рідини та резервуару від температури.

Термічні післядії у склі також впливають на величину похибок показань термометрів (переважно ртутних), частково під час градування, а в основному при їх використанні.

Загальними та спеціальними стандартами на термометри встановлено допустимі похибки показань термометрів. Ці величини залежать в основному від двох факторів: ціни найменшої поділки шкали та температури. Чим більша ціна поділки шкали і чим вище температура, для вимірювання якої призначений термометр, тим більше величина допустимої похибки, встановленої стандартом. Оскільки похибки показань будь-якого термометра обмежені допустимими похибками, останні характеризують ту точність вимірювання температури, яка може бути забезпечена за нормальних умов роботи термометра. Коли ж необхідно підвищити точність вимірювання, наприклад, при різних лабораторних вимірюваннях, то в показання термометрів вносять поправки, визначені в результаті повірки термометрів, виключаючи, таким чином, систематичні градувальні похибки. Похибки показань термометра в різних точках шкали можуть відрізнятися за величиною і за знаком, тому показання термометрів перевіряють у кількох точках шкали. Введенням поправок може бути значно підвищена точність виміру. Наприклад, для

лабораторних ртутних термометрів з межами вимірювання 0-50 °C і ціною поділки 0,1 °C стандартом встановлена допустима похибка $\pm 0,2$ °C і за умови введення поправок може бути забезпечена точність вимірювання $\pm 0,02$ °C.

Похибка, що виникла внаслідок старіння термометра, може бути легко виключена. Для цього вимірюють положення нульової точки термометра, потім до всіх поправок, даних у свідоцтві на термометр, додають різницю між старим (за свідоцтвом) та новим положенням нульової точки.

Якщо за умовами застосування термометр, градуйований при повному зануренні, не може бути занурений нормально у вимірюване середовище і є стовпчик термометричної рідини, що виступає, то виникає похибка, величина якої прямо пропорційна величині виступаючого стовпчика n ; різниці між вимірюваною температурою t і середньою температурою виступаючого стовпчика t_1 ; величині видимого коефіцієнта розширення β термометричної рідини. Для виключення зазначеної похибки вводять поправку, що обчислюється за формулою:

$$\Delta t = \beta n(t - t_1). \quad (3.7)$$

Замість невідомої вимірюваної температури t в формулу (3.7) можна підставляти показання термометра. Середню температуру стовпчика t_1 вимірюють допоміжним термометром, проте умови вимірювання можуть забезпечити лише приблизне значення t_1 . Тому значення n і t округляють до двох-трьох значущих цифр, внаслідок чого можна вирахувати поправку лише з обмеженою точністю.

У термометрах, градуйованих при неповному зануренні, аналогічна похибка буде в тому випадку, коли середня температура виступаючого стовпчика t_2 при вимірюванні буде відрізнятися від середньої температури виступаючого стовпчика t_1 при градуюванні термометра. У цьому випадку формула для обчислення поправки матиме такий вигляд:

$$\Delta t = \beta n(t_1 - t_2).$$

У ртутних термометрів похибка, викликана виступаючим стовпчиком ртуті, у шість-вісім разів менше, ніж у нертутних, за однакових інших умов за рахунок меншого значення β . Таким чином, у даному випадку менше значення β є перевагою ртуті як термометричної рідини.

Значні похибки показань термометрів можуть бути викликані різними дефектами термометра, наприклад, розривами стовпчика термометричної рідини, сублімацією термометричної рідини і дистиляцією її у верхній частині капіляра тощо. Виявлені дефекти повинні бути усунені. Розриви ртутного стовпчика у ртутних термометрів з розширенням у верхній частині капіляра з'єднують, підігріваячи термометр доти, поки частинки, що відірвалися, не вийдуть у верхнє розширення і не з'єднаються там з ртутним стовпчиком. Особливо обережно слід проводити цю операцію з високоградусними термометрами, у яких над ртутним стовпчиком знаходиться газ, щоб уникнути розриву резервуара термометра внутрішнім тиском. Якщо конструкція термометра така, що при охолодженні до температури не нижче -36°C вся ртуть може піти з

капіляра в резервуар, розриви можна з'єднати охолодженням термометра. При цьому не слід допускати попадання бульбашок газу в масу ртуті, що знаходиться в резервуарі газонаповнених термометрів. Розриви стовпчика рідини у нертутних термометрів можна з'єднувати центрифугуванням або струшуванням термометра.

У термометрах, наповнених органічними рідинами, часто відбувається сублімація термометричної рідини і конденсація її у верхній частині капіляра, внаслідок чого показання термометра стають заниженими. Так як у сконденсованій частині рідини барвник відсутній, то зазначений дефект може бути не помічений. У ртутних термометрів сублімацію визначають по дрібних краплях ртуті у верхній частині капіляра в тих випадках, коли тиск газу над ртутним стовпчиком недостатній, а ртутний стовпчик нагрівався до високої температури. Цей дефект можна усунути центрифугуванням або струшуванням термометра.

3.9. Вимірювання температури термоелектричними перетворювачами

3.9.1. Фізичні основи принципу дії термоелектричних перетворювачів

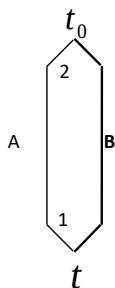
Дія термоелектричних термометрів заснована на властивості металів і сплавів створювати термоелектрорушійну силу (термоЕРС), залежну від температури місця з'єднання (спаю) кінців двох різнорідних провідників (термоелектродів), що утворюють чутливий

елемент термометра - термопару. Знаючи закон зміни термоЕРС термопари від температури і визначаючи значення термоЕРС електровимірювальним приладом, можна знайти шукане значення температури в місці виміру.

До переваг термоелектричних термометрів слід віднести: досить високий ступінь точності, великий діапазон вимірювання, високу чутливість, незначну інерційність, відсутність стороннього джерела струму, легкість здійснення дистанційної передачі показів, можливість централізації контролю температури шляхом приєднання декількох термоелектричних термометрів через перемикач до одного вимірювального приладу, можливість автоматичного запису вимірюваної температури за допомогою самописного приладу.

В основу виміру температури за допомогою термоелектричних термометрів покладені термоелектричні явища, відкриті Зеєбеком в 1821 р.

При з'єднанні однаково нагрітих кінців двох провідників із різнорідних матеріалів, з яких в першому кількість вільних електронів в одиниці об'єму більше, ніж у другому, останні будуть дифундувати з першого провідника в другий в більшій кількості, ніж в зворотньому напрямі. Таким чином, перший провідник стане заряджатися позитивно, а другий - негативно. Утворене при цьому в місці з'єднання (спаї) провідників електричне поле буде протидіяти цій дифузії, в результаті чого настане стан рухомої рівноваги, при якому між вільними кінцями зазначених провідників з'явиться деяка



різниця потенціалів (термоЕРС). Зі збільшенням температури провідників значення цієї термоЕРС також збільшується.

Рис. 3.5. Схема контура термоелектричного термометра

Крім того, термоЕРС виникає і між кінцями однорідного провідника, що мають різні температури. В цьому випадку до настання стану рухомої рівноваги позитивно заряджається більш нагрітий кінець провідника, який володіє більшою концентрацією вільних електронів в порівнянні з кінцем, менш нагрітим. Зростання різниці температур між кінцями провідника приводить до збільшення виникаючої в ньому термоЕРС.

У замкнутому контурі термоелектричного термометра, що складається з різнорідних термоелектродів А і В (рис. 3.5), одночасно діють обидва зазначені вище фактори, що викликають появу в спаєх 1 і 2, в залежності від їх температур і матеріалу термоелектронів, двох сумарних термоЕРС $e_{AB}(t)$ і $e_{BA}(t_0)$, взятих при обході контуру проти годинникової стрілки.

Звідси діюча у контурі результуюча термоЕРС $E_{AB}(t, t_0)$ дорівнює алгебраїчній сумі термоЕРС обох спаїв, тобто:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0)$$

Якщо врахуватися, що $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t)$, отримаємо:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{BA}(t_0).$$

Отже, термоЕРС, що виробляється термометром, дорівнює різниці двох діючих назустріч термоЕРС, що з'являються на кінцях термоелектродів в спаях 1 і 2. При рівності температур обох спаїв результуюча термоЕРС дорівнює нулю.

Залежно від значення термоЕРС, що виникає, і загального опору контуру в провідниках утворюється електричний струм, сила якого визначається законом Ома. Спай 1, занурений у вимірюване середовище, називається **робочим кінцем** термоелектричного термометра, а спай 2 – **вільним кінцем**.

Таким чином, **термоелектричний термометр (термопара)** складається з двох спаяних ізольованих по довжині металевих різнородних термоелектродів, є первинним вимірювальним перетворювачем. В якості вторинних приладів, що працюють з термоелектричними термометрами, застосовують **магнітоелектричні мілівольтметри, потенціометри, а також цифрові прилади** (рис.3.6).

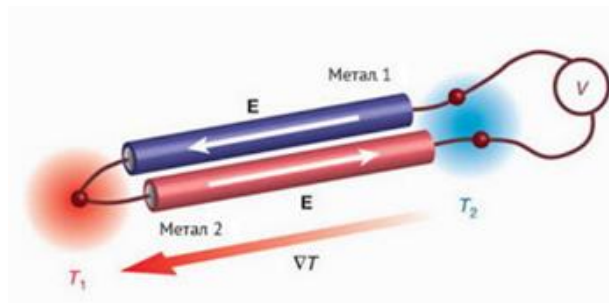


Рис.3.6. Термопара. $T_1 > T_2$. T_1 - температура робочого спаю, T_2 - температура вільних кінців, V - прилад для вимірювання термоЕРС.

Термоелектроди термометра позначаються знаком «+» та «-». Позитивним термоелектродом вважається той, вздовж якого струм тече від робочого кінця до вільного [17].

При введенні в ланцюг термопари третього провідника, якщо кінці останнього мають однакові температури, термоЕРС термопари не змінюється (те ж саме відноситься і до декількох провідників). Тому включення в ланцюг термопари сполучних провідників, вимірювальних приладів і підгінних опорів не позначається на точності вимірювання.

3.9.2. Введення поправки на температуру вільних кінців термоелектричного термометра

Термо ЕРС термопари є функцією температури робочого спаю лише у тому випадку, якщо температура вільних кінців постійна. Градування термопари проводиться найчастіше при температурі вільних кінців t_0 , що дорівнює $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рідше при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ці дані є у довідковій літературі і являють собою таблично задану залежність термоЕРС від температури робочого спаю $E(t)$ при фіксованій температурі вільних кінців (найчастіше це 0°C). У процесі вимірювання температура вільних кінців t_0 може бути відмінною від градуовальної, тому виникає необхідність внесення **поправки**, інакше виміряні значення термоЕРС будуть або завищені, або занижені. Це відхилення термоЕРС для термопари з двох термоелектродів А і В (рис. 3.7,а) виражається рівнянням:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0') \pm E_{AB}(t_0', t_0), \quad (3.8)$$

де $E_{AB}(t, t_0)$ - значення термоЕРС термопари при температурі вільних кінців t_0 , що дорівнює градууювальному значенню; $E_{AB}(t, t_0')$ - значення термоЕРС термопари при дійсній температурі вільних кінців t_0' ; $E_{AB}(t_0', t_0)$ - поправка, яка повинна бути внесена в показання приладу при $t_0' \neq t_0$.

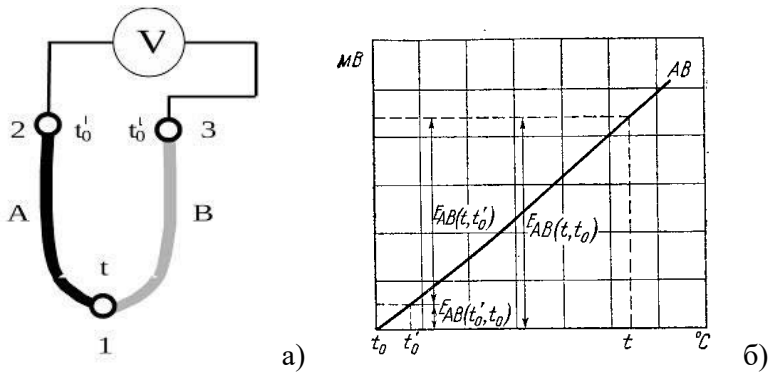


Рис.3.7. а) термопара АВ, вільні кінці якої знаходяться при температурі відмінній від градууювальної, $t_0' \neq t_0$; б) градууювальна залежність термопари $E_{AB}(t)$ при температурі вільних кінців t_0 .

Якщо $t_0' < t_0$, то значення термоЕРС термопари завищені порівняно з табличними даними, і поправка береться зі знаком "мінус". Якщо $t_0' > t_0$, то значення термоЕРС занижені і поправка береться зі знаком "плюс".

Як видно, поправка являє собою термоЕРС термопари, яку вона розвиває при температурі гарячого спаю t_0' і при температурі вільних кінців t_0 . Визначити величину поправки, а також температуру t можна

з градуовальної кривої термопарі АВ, якщо відома дійсна температура вільних кінців t_0' . Це робиться так:

а) вимірюють приладом магнітоелектричної системи значення термоЕРС термопарі $E_{AB}(t, t_0')$ при дійсній температурі вільних кінців t_0' .

б) вимірюють іншим приладом (наприклад, звичайним термометром) температуру вільних кінців t_0'

в) користуючись графіком градуовальної кривої термопарі визначають величину поправки $E_{AB}(t_0', t_0)$; нехай розглядаємо випадок $t_0' > t_0$.

г) з формули (3.8) знаходять сумарну термоЕРС, а саме:

$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0') + E_{AB}(t_0', t_0)$ і за градуовальним графіком для термопарі $E_{AB}(t)$ (рис. 3.7,б) визначають шукану температуру робочого спаю t .

Спеціальними експериментами встановлено, що величина термоЕРС термопарі залежить тільки від матеріалу термоелектродів і від температур її спаїв, але не залежить ні від довжини, ні від діаметра термоелектродів, ні від розподілу температури по їх довжині. Отже, будь-яку ділянку термоелектрода (крім його кінців) можна нагрівати або охолоджувати і це ніяк не відіб'ється на величині термоЕРС термопарі.

3.9.3. Термоелектродні матеріали

Для вивчення термоелектричних характеристик численних термоелектродних матеріалів доцільно вибрати один і порівняти з

ним всі інші матеріали. В якості таких нормальних термоелектродів в даний час застосовують термоелектроди з чистої платини. При випробуванні вимірюють термоЕРС термопари, складеної з платинового і випробуваного термоелектродного матеріалу. Нижче надаються значення термоЕРС деяких термоелектродних матеріалів в парі з платиною при температурі робочих кінців 100°C і вільних кінців 0°C (табл.3.3).

Таблиця 3.3.

ТермоЕРС матеріалів в парі з платиною

Матеріал	ТермоЕРС, мВ	Матеріал	ТермоЕРС, мВ
хромель	+2,96	платинородій (10% Rh та 90% Pt)	+0,64
залізо	+1,8	платина	0,00
молібден	+1,2	алюмель	-1,2
вольфрам	+0,8	константан	-3,4
мідь	+0,76	копель	-4,0
манганін	+0,76		

Знак «плюс» у значенні термоЕРС мають ті термоелектродні матеріали, які в парі з платиною є позитивними термоелектродами, а «мінус» характеризує негативні по відношенню до платини термоелектроди. У найменуванні термопари завжди прийнято

ставити на перше місце назву позитивного термоелектрода, а на друге - негативного.

Наведені дані дозволяють визначити термоЕРС термопари, складеної з будь-якої пари зазначених термоелектродів. Величина термоЕРС такої температури буде дорівнювати алгебраїчній різниці значень термоЕРС відповідних термоелектродів. Наприклад, термоЕРС хромель-алюмелевої термопари дорівнює $2,96 - (-1,2) = 4,10 \text{ мВ}$, при цьому позитивним термоелектродом є хромель.

З наведених даних видно також, що такі різні за хімічним складом матеріали, як мідь і манганін, розвивають в парі з платиною однакову термоЕРС $0,76 \text{ мВ}$. Отже, термоЕРС термопари, складеної з міді і манганіну, буде дорівнює нулю. Ця властивість манганіну і міді гарантує захист від виникнення паразитних (заважаючих вимірам) термоЕРС в приладах, магазинах опорів, мостах, потенціометрах та інших системах, де ці матеріали застосовуються.

Термоелектродні матеріали, як і самі термопари, повинні відповідати вимогам, перерахованим нижче.

– **Стабільність або сталість термоелектричної характеристики** термопари є однією з найважливіших її властивостей, яка забезпечує точність і надійність результатів вимірювання і виключає необхідність частих переградуїровок термопари.

– **Відтворюваність термоелектричної характеристики** термопари забезпечує стандартизацію її градууювальної

характеристики, а отже, є обов'язковою умовою взаємозамінності термопар, що важливо в технічних термоелектричних пірометрах.

– **Чутливість термопар** характеризується величиною відношенням приросту термоЕРС ΔE до відповідного підвищення температури Δt : $\Delta E/\Delta t$. Чим більше зазначена величина, тим менш чутливі і більш надійні в експлуатаційних умовах пірометричні мілівольтметри можуть використовуватися для роботи в комплекті з термопарою.

– **Наближена до лінійної залежність** термоЕРС термопар від температури $E(t)$, що забезпечує більшу зручність градування термопар і градусних шкал вторинних приладів, а монотонна крива забезпечує однозначність залежності термоЕРС термопар від температури.

– **Стійкість термопар до впливу високих температур-жаростійкість** є досить важливою властивістю термопар, призначених для вимірювання високих температур. В основному жаростійкість характеризується стійкістю матеріалу термоелектродів до окислення при високих температурах. Для неокисних матеріалів (наприклад, платина і платиноводородів) верхня температурна межа застосування обмежена температурою, близькою до точки плавлення матеріалу.

У багатьох випадках термоелектрична характеристика термопар змінюється під шкідливим впливом на термоелектроди деяких хімічних речовин (вуглецю і його сполук, парів металів тощо).

Щоб уникнути цього застосовують захисну арматуру, яка оберігає термопари від дії шкідливих середовищ.

Щоб термоелектроди не руйнувалися при експлуатації, коли термопара може піддаватися різним механічним впливам, вони повинні бути *механічно міцні*.

Незалежність термоЕРС термопари від розподілу температури по довжині кожного з її термоелектродів є основною властивістю термопари, однак при цьому неодмінною умовою є термоелектрична однорідність кожного з термоелектродів.

Якщо ж при фіксованих температурах робочого і вільного кінців термопари змінюється її термоЕРС тільки внаслідок зміни розподілу температури по довжині термоелектродів, наприклад, за рахунок збільшення глибинного занурення термопари, то це є ознакою неоднорідності одного або обох термоелектродів термопари.

Причиною термоелектричної неоднорідності виготовленого термоелектродного дроту є:

- 1) неоднорідність хімічного складу термоелектродного дроту по його довжині;
- 2) місцеві забруднення матеріалу;
- 3) місцеві механічні напруги, що виникають при деформації, наклепі, волочінні, нерівномірному відпалюванні тощо.

У термопарах, що тривалий час працювали при високих температурах, неоднорідність виникає внаслідок селективного вигорання компонентів сплаву термоелектрода, поглинання

термоелектродами сторонніх домішок, зміни структури тощо. Покази такої термопари можуть сильно залежати від глибини її занурення.

Нескладна технологія виготовлення термоелектродного матеріалу полегшує отримання однакових за своїми властивостями взаємозамінних термоелектродних матеріалів при різних плавках. Найкращим чином ідентичність термоелектродного матеріалу при виготовленні платинових, платинородієвих і мідних термоелектродів.

При виготовленні термоелектродних матеріалів з неблагородних металів, особливо в тих випадках, коли термоелектродний матеріал є складносплавного складу (наприклад, хромель і алюмель), відтворюваність термоелектричних характеристик погіршується. Тому виникає необхідність спеціального підбору термоелектродів для отримання взаємозамінних стандартних градувань термопар.

3.9.4. Типи та характеристики термоелектричних термометрів

Термоелектричні термометри, що отримали практичне застосування, поділяються за матеріалом термоелектродів на дві групи: з благородних і неблагородних металів і сплавів. У таблиці 3.4 наведені найбільш поширені типи термоелектричних термометрів, їх градування і температурні межі їх застосування. При найменуванні термометрів першим зазвичай вказується позитивний термоелектрод.

Платинородій-платинові термоелектричні термометри типу ТПП, ТПР застосовуються для вимірювання температур в області

0...1300°C, 0...1600°C в окислювальному і нейтральному середовищі.
Ці термометри знаходяться в числі кращих термоелектричних термометрів за точністю і відтворюваністю термоЕРС.

Таблиця 3.4.

Стандартні термоелектричні термометри з металічними
термоелектродами

Тип термо-пари	Найменування матеріалів термоелектродів	Позначення НСХ	Діапазон вимірювань при тривалому застосуванні, °C	Допустима межа вимірювань при короткотривалому застосуванні, °C
ТПП	Платино-родій (10% родія) - платиновий	ПП	0...1300	1600
ТПР	Платино-родій (30% родія) - платино-родієвий (6% родія)	ПР30/6	300...1600	1800
ТВР	Вольфрам-реній (5% ренію) - вольфрам-ренієвий (20% ренію)	ВР5/20	0...2200	2500
ТХА	Хромель-алюмелевий	ХА	-200...1000	1300
ТХК	Хромель-копелевий	ХК	-200...600	800

Позитивним термоелектродом у цих термометрів є платинородій (сплав 10% Rh та 90% Pt), негативним - чиста платина. Платинородій - платинові термопари ТПП характеризуються високою відтворюваністю градувальної характеристики. Платина легко може бути очищена і отримана без всяких домішок.

До недоліків платино родій - платинової термопари ТПП відносяться її невисока чутливість і дорожнеча термоелектродного матеріалу. Остання обставина викликає необхідність виготовлення та застосування термоелектродів діаметром 0,5 - 0,6 мм. Внаслідок цього опір термопари може значно зрости при високих температурах, якщо глибина її занурення достатньо велика. Це спричиняє додаткову похибку при роботі термопари в комплекті з мілівольтметром.

Хромель-алюмелеві та хромель-копелеві термопари є самими розповсюдженими технічними термопарами. При виготовленні різних партій сплавів алюмеля, хромеля і копеля важко отримати взаємозамінні по термоелектричним властивостям матеріали, так як незначні відхилення в процентному співвідношенні компонентів сплава (що неминуче при плавках) значно змінює градувальну характеристику.

Хромель - алюмелеві термоелектричні термометри типу ТХА широко застосовуються для вимірювання температур газових середовищ, пари і рідин для температур не вище 1000-1100°C. Позитивним термоелектродом є хромелевий дріт, негативним служить алюмель, що уявляє собою магнітний сплав на нікелевій основі (94% Ni, 2% Al, 2,5% Mn, 1% Si, 0,5% домішок).

Спеціальні дослідження роботи цих термопар в повітрі (окислювальна атмосфера) показали, що термоЕРС термопари змінюється внаслідок її окислення, для якого характерно неоднакове вигорання компонентів сплаву.

Хромель - копелеві термоелектричні термометри типу ТХК широко застосовуються для вимірювання температур до 600°C в різних середовищах. Для виготовлення позитивного термоелектрода використовується хромель, що являє собою жароміцний немагнітний сплав на нікелевій основі (80% Ni, 9,8% Cr, 10% Fe, 0,2% Mn). Негативний термоелектрод - копель. сплав з міді та нікелю (56% Cu, 44% Ni). Хромель - копелева термопара менше жаростійка, ніж хромель - алюмелева. Але для вимірювання температур до 600°C вона більш придатна, тому що вона в 2 рази чутливіша, ніж хромель - алюмелева.

Із нестандартних термопар найбільш розповсюджені мідь - константанові та вольфрам - ренієві ТВР (5% і 20% родія) термопари.

Температура, за якої працює мідь - константанова термопара, має межі: -200°C до +400°C. Верхня межа обумовлена легким окисненням міді.

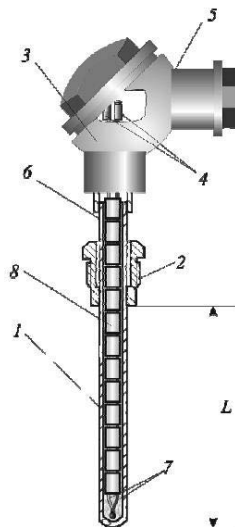
Вольфрам - ренієва термопара призначена для вимірювання високих температур до 2000 - 2500°C і може використовуватися на протязі декількох десятків годин в інетному середовищі і у вакуумі до 2300°C. В окислювальному середовищі (наприклад, розплави сталі) термопару використовують для короточасних вимірів (5 - 8

разів по 7 - 10с), після чого окислені кінці обрізають і робочий кінець відновлюють.

Конструктивно термоелектричний термометр являє собою два дроти з різнородних матеріалів, нагріті кінці якого скручуються, а потім зварюються або спаюються. Для захисту від механічних пошкоджень і впливу середовища, температура якого вимірюється, електроди термоелектричного термометра, армовані ізоляцією, поміщаються в спеціальну захисну арматуру.

Рис. 3.8. Промислова термопара.

У робочих термоелектричних термометрів, що застосовуються для вимірювання температури різних середовищ, арматура складається (рис.3.8): із захисної гільзи (1), нерухомого (2) або пересувного штуцера з сальниковим ущільненням і головки (3), з'єднаної з нерухомим штуцером за допомогою трубки (6) або безпосередньо з гільзою при пересувному штуцері. У голівці, забезпеченою кришкою і патрубком (5) з сальниковим ущільненням, поміщена розетка (4) з ізоляційного матеріалу з зажимами для приєднання термоелектродів (7) і дротів, що з'єднують термометр з вимірювальним приладом або перетворювачем. Довжина занурюваної (монтажної) частини L в



середовище, температуру якого вимірюють, виконується різною для кожного конкретного типу термоелектричного термометра.

В якості ізоляції термоелектродів термометра застосовуються одно- або двоканальні трубки або намиста - з порцеляни (при температурі до 1300°C) і оксидів алюмінію, магнію або берилію (понад 1300°C), що надягають на термоелектроди.

Робочий кінець термоелектричного термометра можна виробляти шляхом зварювання, пайки або скручування. Найбільшого поширення набув спосіб виготовлення спаю за допомогою зварювання, а пайку застосовують тільки в спеціальних випадках. Скручування робочого кінця часто застосовують для термоелектричних термометрів вольфрам - ренієвої і вольфрам - молібденової груп. Зварювання електродів термоелектричного термометра здійснюють як з попередньою скруткою термоелектронів, так і без скручування. Ще одним варіантом виготовлення спаю робочого кінця є приварювання електродів до дна захисної гільзи.

Випускаються одинарні (з одним чутливим елементом) і подвійні (з двома чутливими елементами) термоелектричні термометри різних типів. Подвійні термометри застосовуються для вимірювання температури в одному і тому ж місці одночасно двома вторинними приладами, встановленими в різних пунктах спостереження. Вони містять два однакових чутливих елемента, вмонтованих в спільну арматуру. Термоелектроди їх ізольовані від захисного чохла ізоляторами (8).

3.9.5. Основні джерела похибок термоелектричних термометрів

Основними джерелами похибок вимірювання температури термопарами є:

- 1) похибки визначення градуювальної характеристики зразкових та технічних нестандартних термопар;
- 2) відхилення градуювальної характеристики стандартних технічних термопар від стандартної градуювальної таблиці;
- 3) похибки від вимірювань температури вільних кінців термопари;
- 4) термоелектрична неоднорідність термоелектродів;
- 5) вплив різних факторів, наприклад іонізуючого випромінювання;
- 6) електропровідність ізоляції;
- 7) умови вимірювань.

Термопари градуються двома методами: 1) по реперним точкам - температурам кипіння і затвердіння хімічно чистих речовин; 2) внаслідок порівняння результатів виміру з вимірами зразкових приладів (термопар, термометрів, яскравісних пірометрів).

В першому методі похибки градування залежать від похибок значення температур реперних точок та похибок вимірювальної апаратури (потенціометрів), що застосовуються для вимірювання термоЕРС термопар.

Цей метод забезпечує найвищу точність градування і тому використовується для градування еталонних та зразкових термопар.

При градуванні методом порівняння, похибки градування залежать від похибок зразкових приладів та вимірювальної апаратури.

Похибки, спричинені відхиленням температури вільних кінців термопар від градувальної та зміною цієї температури під час вимірювання, виключають трьома способами:

- 1) термостатуванням вільних кінців термопар та введенням поправки на температуру вільних кінців розрахунковим способом;
- 2) введенням поправки за допомогою спеціальних пристроїв, які є в пірометричному вольтметрі або потенціометрі;
- 3) застосуванням спеціальних мостових схем (зі сторонніми джерелами струму), що вмикаються до ланцюга термопари.

Розрахунковим способом поправку вводять в основному при повірочних роботах та лабораторних вимірах температури. Для цього необхідно знати температуру вільних кінців термопари і градувальні характеристики термопар. Поправку розраховують за формулою (3.8).

4. БЕЗКОНТАКТНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

4.1. Теплообмін випромінюванням. Оптичні пірометри

4.1.1. Поглинання, відбивання та пропускання світла

Теплове випромінювання являє собою процес поширення внутрішньої енергії випромінюючого тіла шляхом електромагнітних хвиль. Електромагнітними хвилями називають електромагнітні збурення, що йдуть від випромінюваного тіла і поширюються у вакуумі зі швидкістю світла ($c=299792458$ м/с). При поглинанні електромагнітних хвиль будь-якими іншими тілами вони знову перетворюються в енергію теплового руху молекул. Збудниками електромагнітних хвиль є заряджені матеріальні частинки, тобто *електрони* і *іони*, що входять до складу речовини. При цьому коливання іонів відповідають *випромінюванню низької частоти*; випромінювання, обумовлене рухом електронів, може *мати високу частоту*, якщо вони входять до складу атомів і молекул і утримуються близько своєї рівноваги значними силами.

Випромінювання характеризується довжиною хвилі λ або частотою коливань $\nu = c/\lambda$. Всі види електромагнітного випромінювання мають однакову природу і розрізняються лише довжиною хвилі (табл. 4.1).

Теплові промені випускаються усіма нагрітими фізичними тілами, які при температурах близько $500-600^{\circ}\text{C}$ починають

випускати випромінювання, видиме людським оком, причому яскравість світіння нагрітих тіл швидко зростає з підвищенням температури.

Таблиця 4.1.

Види електромагнітного випромінювання в залежності від довжини хвилі

Вид випромінювання	Довжина хвилі, мм	Вид випромінювання	Довжина хвилі, мм
Космічне	$0,05 \cdot 10^{-9}$	Видиме	$(0,4 \div 0,76) \cdot 10^{-3}$
γ -випромінювання	$(0,5 \div 0,10) \cdot 10^{-9}$	Теплове (інфрачервоне)	$0,8 \cdot 10^{-3} \div 0,4$
Рентгенівське	$1 \cdot 10^{-9} \div 2 \cdot 10^{-5}$	Радіохвилі	$> 0,2$
Ультрафіолетове	$2 \cdot 10^{-5} \div 0,4 \cdot 10^{-3}$		

Розжарені тверді тіла випускають суцільний спектр випромінювання, що складається з електромагнітних хвиль різної довжини. Видиме людським оком електромагнітне випромінювання, зване світлом, являє собою лише досить вузький діапазон спектра шириною 0,35 мкм з довжинами хвиль від 0,40 до $\sim 0,76$ мкм. Невидимі промені з більшою довжиною хвилі (більше 0,8 мкм) відносяться до інфрачервоної ділянки спектра випромінювання, що охоплює діапазон від 0,80 до ~ 400 мкм, за яким інфрачервона ділянка спектра поступово переходить в діапазон радіохвиль. Невидимі промені з меншою довжиною хвилі (менше 0,40 мкм) відносяться до ультрафіолетової ділянки спектра випромінювання, за яким далі розташовані діапазони рентгенівських і гамма-променів.

В області температурних вимірів використовують в

основному діапазон інфрачервоних і видимих променів.

Зазвичай тіло бере участь в променистому теплообміні з іншими тілами. Енергія випромінювання інших тіл, потрапляючи на поверхню даного тіла ззовні, частково **поглинається, частково відбивається, а частина її проходить крізь тіло**. Кількість променевої енергії, що падає на дане тіло в полі випромінювання, позначається через $E_{\text{пад}}$. Частина падаючої енергії випромінювання, поглиненої даними тілом, називається потоком поглиненого випромінювання ($E_{\text{погл}}$), Вт/м². При поглинанні промениста енергія знову перетворюється у внутрішню енергію.

$$E_{\text{погл}} = A E_{\text{пад}}, \quad (4.1)$$

де A - **коефіцієнт поглинання тіла** залежить від частоти та температури, тому його називають ще **спектральною поглинальною здатністю і позначається $A_{\nu, T}$** .

Тіла, які поглинають всю падаючу на них енергію, називаються **абсолютно чорними (а.ч.т.)**. Для них $A_{\nu, T} = 1$. Таке тіло сприймається зором як чорне тіло; звідси походить назва абсолютно чорного тіла.

Найбільш досконалою моделлю абсолютно тіла може слугувати замкнута порожнина з невеликим отвором O (рис. 4.1). Промінь світла, що потрапив всередину такої порожнини, багаторазово відбивається від стінок, в результаті чого інтенсивність випромінювання, що вийшло з отвору, практично дорівнює нулю. Дослід показує, що при розмірі отвору, меншого 0,1 діаметра

порожнини, падаюче випромінювання всіх частот практично повністю поглинається.

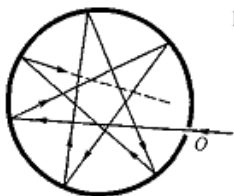


Рис.4.1. Модель абсолютно чорного тіла

Тіла, для яких **спектральна поглинальна здатність A не залежить від довжини хвилі**, називаються **сірими тілами**.

Так як сірі тіла поглинають не всю падаючу на них променисту енергію, то для них $A_\lambda = \text{const} \leq 1$.

Частина падаючої енергії, яку поверхня даного тіла відображає (відбиває) назад оточуючим його тілам, носить назву потоку **відбитого випромінювання**. Щільність потоку відбитого випромінювання, $E_{\text{відб}}$ (Вт / м²):

$$E_{\text{відб}} = RE_{\text{пад}}, \quad (4.2)$$

R – **коефіцієнт відбивання**.

Частина падаючої енергії проходить крізь тіло. Щільність потоку випромінювання, що пропускається $E_{\text{проп}}$ (Вт/м²), дорівнює:

$$E_{\text{проп}} = DE_{\text{пад}}, \quad (4.3)$$

D – **коефіцієнт пропускання**.

Спільні процеси взаємного випускання, поглинання, відбивання і пропускання енергії випромінювання в системах різних тіл називаються **променистим теплообміном**, причому тіла, що входять в дану випромінювальну систему, можуть мати однакову

температуру. Для тіла, що бере участь в променистому теплообміні з іншими тілами, відповідно до **закону збереження енергії** можна скласти наступні рівняння теплового балансу

$$E_{\text{пад}} = E_{\text{погл}} + E_{\text{відб}} + E_{\text{проп}} , \quad (4.4)$$

або $A + R + D = I$, якщо всі члени рівняння (4.4) поділити на $E_{\text{пад}}$.

4.1.2. Закони теплового випромінювання

Закон Планка. Закони теплового випромінювання отримано стосовно до ідеального абсолютно чорного тіла і термодинамічної рівноваги [17-19]. **Рівноважним** називають випромінювання, при якому всі тіла, що входять в дану випромінювальну систему, приймають однакову температуру, тобто перебувають в **термодинамічній рівновазі**. Отже, теплове випромінювання має динамічний характер. При однакових температурах кожне з тіл як випускає, так і поглинає променисту енергію в однакових кількостях.

Випускання енергії по довжинах хвиль відбувається нерівномірно і залежить від температури. **Залежність спектральної щільності потоку випромінювання від довжини хвилі і температури описується законом Планка (1900р.). (для а.ч.т.)**

$$E(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad (4.5)$$

де $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - стала Планка, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ - швидкість світла в вакуумі, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ - стала Больцмана, ν - частота випромінювання електромагнітної хвилі.

Перейдемо в (4.5) до довжин хвиль. Враховуючи, що знаки $d\nu$ и $d\lambda$ протилежні і $\nu = c / \lambda$, маємо:

$$E(\lambda, T) = -E(\nu, T) \frac{d\nu}{d\lambda} = \frac{c}{\lambda^2} E(\nu, T), \quad (4.5a)$$

тоді:

$$E(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad (4.5b)$$

де: $C_1 = 2\pi h c^2 = 3.7418 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$, $C_2 = \frac{hc}{k} = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$.

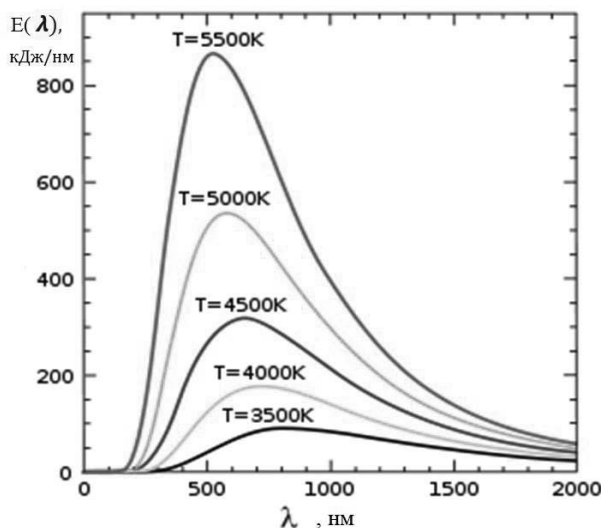


Рис. 4.2. Розподіл Планка для різних температур в залежності від довжини хвилі. Формула (4.5б).

Оскільки закон Планка отримано для

абсолютно чорного тіла, то по відношенню до нечорних тіл він характеризує максимально можливу щільність потоку випромінювання. *Для сірих тіл спектральна густина випромінювання залежить від довжини хвилі, їх фізичних властивостей і визначається експериментально.*

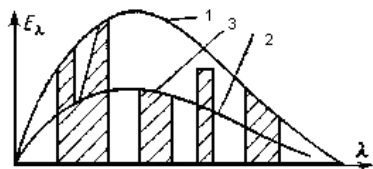


Рис.4.3. Густина потоку випромінювання для: 1- а.ч.т. 2- сірого тіла, 3- дискретного випромінювання.

Оскільки формула Планка є універсальною щодо частот і температур, то з неї можна отримати класичні закони теплового випромінювання.

Закон Релея-Джинса. Закон Планка має два граничних випадки. До одного з них відноситься випадок, коли $h\nu \ll kT$ (низькі частоти і високі температури). Тоді експоненту в (4.5) можна розкласти в ряд Тейлора $\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) = 1 + \frac{h\nu}{kT} + \frac{1}{2}\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2 + \dots$ і обмежитися двома першими членами розкладання. В результаті отримаємо формулу **Релея-Джинса**:

$$E(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT. \quad (4.6)$$

Формула (4.6) задовільно описує спектр теплового випромінювання абсолютно чорного тіла тільки в області низьких частот і високих температур. В області високих частот закон Релея-Джинса розходиться з експериментом. Тоді інтегральний по всіх частотах монохроматичний коефіцієнт теплового випромінювання відповідно до формули (4.6) є величиною нескінченною:

$$E(T) = \frac{2\pi}{c^2} kT \int_0^\infty \nu^2 d\nu = \infty!$$

Це означає, що рівновага між тілом і його випромінюванням досягається при температурі тіла, яка дорівнює абсолютному нулю (коли вся внутрішня енергія тіла перейде в випромінювання). Такий висновок не відповідає дослідним даним, відповідно до яких тіла знаходяться в рівновазі з випромінюванням при довільних, відмінних від нуля, температурах. Таке протиріччя закону Релея-Джинса з експериментом, що виникає в області високих частот (короткохвильовий - ультрафіолетовий діапазон довжин хвиль), отримало назву *«ультрафіолетової катастрофи»*.

Закон Віна. Базуючись на законах термодинаміки і електромагнітної теорії світла, німецький фізик, лауреат Нобелівської премії Вільям Він встановив, що монохроматична густина потоку теплового випромінювання абсолютно чорного тіла прямо пропорційна кубу частоти і є функцією відношення частоти до температури:

$$E(\nu, T) = \alpha \nu^3 F(\nu / T) , \quad (4.7)$$

де α - стала величина, залежить від частоти і температури.

Отримаємо співвідношення (4.7), користуючись законом Планка (4.5), і вирішимо невизначеність функції $F(\nu / T)$, а також знайдемо явний вигляд константи α . Для цього скористаємося наближенням високих частот і низьких температур:

Тобто $h\nu \gg kT$, звідки $\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) \gg 1$ і, відповідно, з (4.5) отримаємо

формулу Віна:

$$E(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \nu^3 \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right), \quad (4.8)$$

де $\alpha = \frac{2\pi h}{c^2} = 4.62 \cdot 10^{-50} \text{ Дж} \cdot \text{с}^2 / (\text{К} \cdot \text{м}^2)$, $F(\nu / T) = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$.

Закон зміщення Віна. Перейдемо в формулі Віна (4.8) до довжин хвиль, використовуючи (4.5а):

$$E_{\lambda, T} = \frac{2\pi c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (4.9)$$

Положення максимумів випромінювання (рис. 4.2) можна отримати з умови екстремуму функції (4.9). Для цього знаходиться похідна функції по довжині хвилі. Прирівнюючи похідну до нуля, отримуємо наступне трансцендентне рівняння:

$$e^{-\frac{c_2}{\lambda_{\text{макс}} T}} + \frac{c_2}{5\lambda_{\text{макс}} T} - 1 = 0$$

Рішення цього рівняння приводить до відношення $c_2 / \lambda_{\text{макс}} T = 4,965$, звідки $\lambda_{\text{макс}} T = 2,8978 \cdot 10^{-3}$, або

$$\lambda_{\text{макс}} T = b, \quad \lambda_{\text{макс}} = \frac{b}{T}, \quad (4.10)$$

де $\lambda_{\text{макс}}$ - довжина хвилі, якій відповідає максимальна густина випромінювання.

Формула (4.10) відображає **закон зміщення Віна: максимальне значення спектральної щільності потоку випромінювання з підвищенням температури зміщується в бік більш коротких довжин хвиль.**

Значення максимальної густини потоку випромінювання абсолютно чорного тіла можна знайти з закону Планка (4.56), якщо прийняти, що $\lambda = \lambda_{\text{макс}}$ і використати формулу (4.10):

$$(E_{\lambda,T})_{\text{макс}} = c_3 T^5, \text{ де стала величина } c_3 = 1,307 \text{ Вт/(м}^3\cdot\text{К}^5\text{)}.$$

Звідси випливає, що максимальна щільність випромінювання пропорційна абсолютній температурі тіла в п'ятому ступені.

Закон Стефана-Больцмана. Закон Стефана-Больцмана встановлює залежність щільності потоку інтегрального випромінювання від температури. Задовго до появи квантової теорії Планка ця залежність вперше експериментально була встановлена Стефаном (1879 р.). Пізніше (1884 р.) вона теоретично (виходячи із законів термодинаміки) була отримана Больцманом. Тому закон отримав об'єднану назву закону Стефана-Больцмана. Закон Стефана-Больцмана для поверхневої густини потоку інтегрального випромінювання а.ч.т. E , Вт/м², виражається наступним співвідношенням:

$$E(T) = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4,$$

$$\text{або} \quad E(T) = \sigma T^4, \quad (4.11)$$

де σ - стала Стефана-Больцмана, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / (м}^2\text{К}^4\text{)}$.

Сумарна (тобто інтегрована по всім довжинам хвиль) густина потоку випромінювання абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому ступеню його температури.

Закон Стефана - Больцмана може бути отриманий і при використанні закону Планка:

$$E(T) = \int_0^{\infty} J_{\lambda}(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi h}{c^2} \int_0^{\infty} \frac{\nu^3 d\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} = \left[x \equiv \frac{h\nu}{kT} \right] = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$

Закон Стефана – Больцмана застосовується і для сірих тіл у наступному вигляді:

$$E(T) = \varepsilon \sigma T^4, \quad (4.12)$$

де ε - степінь чорноти сірого тіла.

Закон Кірхгофа. Закон Кірхгофа (1882р.) встановлює кількісний зв'язок між енергіями випромінювання і поглинання поверхнями сірих і абсолютно чорних тіл. Відповідно до закону Кірхгофа, відношення випромінювальної та поглинальної здатностей тіла є універсальною функцією частоти та температури:

$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = f(\nu, T). \quad (4.13)$$

Характерно, що функція Кірхгофа $f(\nu, T)$ не залежить від природи тіл. Це Кірхгоф встановив, опираючись на другий закон термодинаміки, відповідно до якого теплова рівновага системи не може бути порушена звичайним обміном тепла між її окремими частинами. Позначимо коефіцієнт теплового випромінювання абсолютно чорного тіла $\varepsilon(\nu, T)$. Тоді рівняння (4.13) для абсолютно чорного тіла, урахуванням того, що $A(\nu, T) = 1$, набуде вигляду:

$$f(\nu, T) = J(\nu, T),$$

Таким чином, універсальна функція Кірхгофа, що характеризує рівноважне випромінювання є коефіцієнтом теплового випромінювання абсолютно чорного тіла. Враховуючи це, рівняння (4.13) представимо у вигляді:

$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = \varepsilon(\nu, T) \quad (4.14)$$

Виходячи з останнього виразу, **закон Кірхгофа** можна сформулювати так: *для всіх тіл відношення випромінювальної здатності до їх поглинальної здатності дорівнює коефіцієнту теплового випромінювання абсолютно чорного тіла за тієї ж частоти і температури.* Функція $\varepsilon(\nu, T)$ є універсальною величиною, яка не залежить від природи тіл. Визначення її залежності від температури дозволяє, знаючи поглинальну здатність тіла, розрахувати відповідно до (4.14) спектр теплового випромінювання $E(\nu, T)$ довільного тіла.

Закони теплового випромінювання лежать в основі вимірювання температури *оптичними пірометрами.*

4.1.3. Вимірювання температури радіаційними пірометрами

Закон Стефана - Больцмана є теоретичною основою радіаційної пірометрії. Прилади, призначені для вимірювання температури тіла по тепловій дії його сумарного випромінювання, називаються *радіаційними пірометрами*, а також пірометрами сумарного випромінювання [17]. Ці пірометри градууються по чорному

випромінювачу і тому при вимірюванні температури чорного тіла їх показання дають істинне значення вимірюваної температури. При вимірах ж температур реальних фізичних тіл з урахуванням їх меншої випромінювальної здатності, пірометри дають занижені показання, що відповідають деякій умовній температурі, яка називається *радіаційною температурою* тіла.

Радіаційною температурою нечорного тіла T_p , що має дійсну температуру T і коефіцієнт чорноти ε_T , називається така температура абсолютно чорного тіла T_p , при якій інтенсивність сумарного випромінювання абсолютно чорного тіла E^o_{Tp} дорівнює інтенсивності сумарного випромінювання нечорного тіла E_T :

$$E^o_{Tp} = E_T.$$

Так, як $E^o_{Tp} = \sigma T_p^4$ і $E_T = \varepsilon_T \sigma T^4$,
отже $\sigma T_p^4 = \varepsilon_T \sigma T^4$

Звідси дійсну температуру нечорного тіла можна визначити по виміряній радіаційній температурі, використовуючи формулу:

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_T}} \quad (4.15)$$

Оскільки для реального тіла $\varepsilon_T < 1$, то його радіаційна температура завжди нижча за дійсну: $T_p < T$.

Різниця $T - T_p$, що є систематичною похибкою вимірювання, зростає з підвищенням вимірюваної температури і для малих значень ε_T може досягати декількох сотень градусів.

Вимірювання температури радіаційним пірометром базується на перетворенні енергії теплового випромінювання в електрорушійну силу (ЕРС). На рис.4.4. приведено схему радіаційного пірометра. Випромінювання нагрітого тіла (1) фокусується за допомогою об'єктива на термоприймач, що складається із 10 хромель-копелевих термопар (рис. 4.3б), які з'єднанні послідовно. Робочі (гарячі) спаї термопар мають вигляд стрілок і звернені до центру, створюючи активну ділянку, на яку проєктується зображення нагрітого тіла. Електрорушійна сила, що виникає при цьому, реєструється цифровим мілівольтметром (5). Пірометр проградуваний по чорному випромінювачу (градуювальна таблиця додається до паспорту приладу).

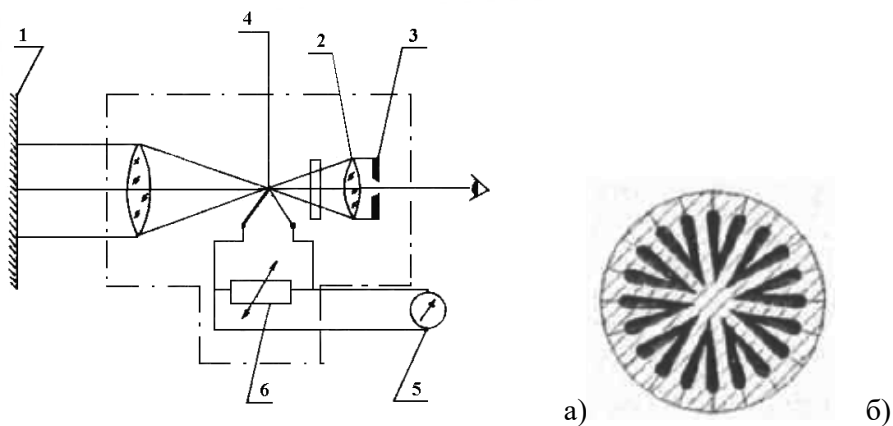


Рис.4.4. Схема радіаційного пірометра: а) 1– об'єкт дослідження; 2, 3 – окуляр; 4 – термоприймач випромінювання; 5 – мілівольтметр; 6 – реостат; б) термоприймач.

4.1.4. Вимірювання температури яскравісними пірометрами

Закон Віна лежить в основі методу вимірювання температури яскравісними пірометрами. Принцип дії яскравісного пірометра оснований на порівнянні квазімонохроматичної інтенсивності випромінювання нагрітого тіла з яскравістю пірометричної лампи, градуйованої по чорному випромінювачу [17,18,20].

Яскравісні пірометри, що вимірюють температуру по монохроматичній яскравості, градууються по чорному випромінювачу. Тому тільки при вимірюванні температури чорного тіла їх показання будуть відповідати істинній температурі. При вимірюванні температури реальних фізичних тіл, що характеризуються меншою випромінювальною здатністю, ніж чорне тіло, показання пірометрів яскравості дають не дійсну, а так звану *яскравісну температуру* тіла.

Яскравісною температурою T_{λ} нечорного тіла з монохроматичним коефіцієнтом випромінювання $\varepsilon_{\lambda T}$, і дійсною температурою T , називається така температура абсолютно чорного тіла, при якій монохроматична яскравість $E_{\lambda T_{\lambda}}^0$ чорного тіла дорівнює монохроматичній яскравості $E'_{\lambda T}$ данного нечорного тіла

$$E_{\lambda T_{\lambda}}^0 = E'_{\lambda T}.$$

Зазначені значення яскравості, згідно з формулою Віна, мають такий вигляд:

$$E_{\lambda T_y}^0 = K' \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_y}} \quad \text{і} \quad E_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T} K' \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (4.16)$$

$$K' = c_1 = 2\pi h c^2, \quad C_2 = \frac{hc}{k} = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К},$$

де $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - стала Планка, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ - швидкість світла в вакуумі, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ - стала Больцмана, λ - довжина хвилі.

При вимірах температури візуальними яскравісними пірометрами спостерігають не енергетичну, а видиму людським оком яскравість $B_{\lambda T}$, яка прямо пропорційна енергетичній яскравості $E_{\lambda T}$, тобто $B_{\lambda T} = K_{\lambda} E_{\lambda T}$, де K_{λ} - коефіцієнт пропорційності. Тому в цьому випадку K' – постійний коефіцієнт для даного λ , що включає в себе константи K_{λ} і C_1 .

Використовуючи визначення яскравісної температури знайдемо зв'язок між яскравісною температурою і дійсною. Прирівнюючи формули (4.16), отримаємо:

$$e^{-\frac{C_2}{\lambda T_y}} = \varepsilon_{\lambda T} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}},$$

звідки, після логарифмування і подальших перетворень, маємо:

$$\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \left(\frac{1}{\varepsilon_{\lambda T}} \right). \quad (4.17)$$

З формули (4.17) випливає, що яскравісна температура T_y завжди нижче дійсної. При малих значеннях $\varepsilon_{\lambda T}$ і високих температурах різниця $T - T_y$ може досягати декількох сотень градусів.

Яскравісні візуальні пірметри, звані також оптичними, широко застосовуються для вимірювання температур вище 800°C у виробничих та лабораторних умовах. Недоліком для вимірювання температури цими приладами, є те, що вони вимірюють не істинну, а яскравісну температуру і, крім того, не можуть бути використані для реєстрації або автоматичного регулювання температури. Для вимірювання температури твердих і рідких тіл в діапазоні від 1000 К до 6000 К використовують яскравісні пірметри зі зникаючої ниткою типу ЕОП-66, «Промінь», «Смотріч».

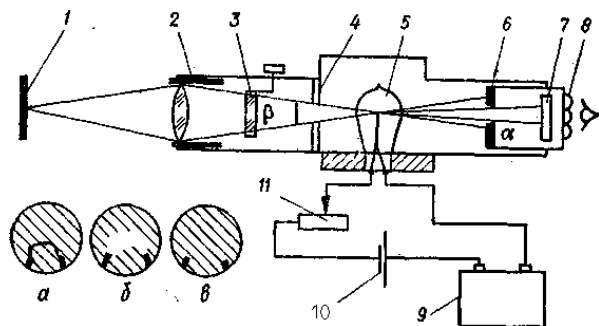


Рис. 4.5. Схема яскравісного пірметра типу ЕОП-66: 1 – випромінювач; 2 – лінза об'єктиву; 3 – поглинаюче скло; 4,6 – діафрагми; 5 – пірметрична лампа; 7 – світлофільтр; 8 – окуляр; 9 – міліамперметр; 10 – джерело струму; 11 – реостат; а, б, в – зображення нитки розжарення на фоні об'єкту відповідно при різних співвідношеннях температури нитки та об'єкту дослідження.

На рисунку 4.5. наведено принципову схему пірметра зі зникаючою ниткою. Зображення джерела випромінювання (1),

температуру якого необхідно виміряти, за допомогою телескопічного об'єктива (2), проектується в площину нитки розжарення пірометричної лампи (5). Спостерігач крізь окуляр (8) і червоний світлофільтр (7) розглядає нитку на фоні зображення джерела випромінювання. Яскравість випромінювання нитки пірометричної лампи можна варіювати, змінюючи за допомогою реостату (11) величину струму живлення від джерела живлення (10). Спостерігач плавно змінює яскравість нитки до зрівноваження з видимою яскравістю випромінювача. Якщо яскравості об'єкту дослідження і нитки розжарення пірометричної лампи рівні (випадок (в)), їх зображення зливаються, у цей момент їх яскравісні температури також є рівними. За допомогою приладу (9) фіксується сила струму, що протікає через нитку пірометричної лампи. Температуру об'єкту визначаємо за допомогою градуювальних таблиць залежності яскравісної температури пірометричної лампи від величини струму розжарення. Відзначимо, що не можна допускати перегрівання нитки розжарювання пірометричної лампи до температури, вищої за 1500 К (що відповідає струму крізь лампу 0.45 А). При перегріванні лампи її випромінювальні характеристики можуть змінитись. Використання сірих та кольорових світлофільтрів дозволяє розширити діапазон вимірювання температури без перегріву лампи порівняння.

На схемі показані дві діафрагми (4) та (6), які обмежують вхідний (β) та вихідний (α) кути пірометра. Спеціальними дослідженнями встановлено, що тільки при деяких оптимальних значеннях цих кутів, що залежать від діаметра нитки, її форми та

перерізу, не спостерігається порушення прямолінійного поширення світла - дифракції та виходить гарне «зникнення» нитки. Крім того, найкраще «зникнення» буває, коли звернена до ока спостерігача поверхня нитки плоска.

Червоний світлофільтр у пірометрі необхідний для виділення вузького спектрального інтервалу, що використовується при порівнянні яскравостей. Ширина спектрального інтервалу дорівнює - 0,1 мкм. Вона обмежена, з одного боку, кривою пропускання червоного світлофільтра, а з іншого - кривою видності (спектральної чутливості) ока. За цих умов в формулу Віна (або Планка) для розрахунку шкал яскравісних пірометрів підставляють значення так званої ефективної довжини хвилі λ_{ef} , яке знаходиться всередині зазначеного інтервалу (від 0,6 до 0,7 мкм) і визначається розрахунком або спеціальними вимірами. Встановлено, що λ_{ef} зсувається у бік коротких хвиль при підвищенні температури, що вимірюється. Ці зміни невеликі, але можуть бути джерелом додаткової похибки пірометра.

Щоб зберегти стабільність градуювання пірометра, нагрівають пірометричну лампу тільки до яскравісної температури 1400-1500°C, а при вимірах вищих температур яскравість об'єкта послаблюють поглинаючим склом (3) (рис.4.5), яке встановлюють між об'єктом і лампою. При вимірах із введенням поглинаючого скла неослаблену яскравість нитки лампи зрівнюють з ослабленою яскравістю об'єкта. При рівності яскравостей можна написати

$$B_{\lambda T1} = \tau B_{\lambda T2},$$

де $B_{\lambda T_1}$ — яскравість нитки пірометричної лампи; $B_{\lambda T_2}$ — яскравість об'єкта; τ — коефіцієнт пропускання поглинаючого скла; T_1 і T_2 — яскравісні температури лампи і об'єкта.

Використовуючи формулу Віна і зробивши відповідні підстановки та перетворення, отримаємо формулу для розрахунку шкали пірометра при введеному поглинаючому склі:

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{\lambda_{ef}}{c_2} \ln \frac{1}{\tau} = A, \quad (4.18)$$

де A - пірометричне ослаблення поглинаючого скла у комбінації з червоним світлофільтром.

Розрахунок показує, що якщо, наприклад, коефіцієнт пропускання поглинаючого скла дорівнює 0,03 і, отже, яскравість об'єкта, що спостерігається через це скло, послаблюється в ~ 33 рази, то при яскравісній температурі нитки лампи 1400°C яскравісну температуру об'єкта потрібно довести до 2000°C , щоб отримати видиму рівність яскравостей (при $\lambda=0,65\text{мкм}$). Пірометричне ослаблення A при цьому дорівнює $157,7 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

У яскравісних пірометрах використовують лампи з вольфрамовою ниткою. Так як вольфрам має значний температурний коефіцієнт опору, то при збільшенні сили струму в лампі і підвищенні температури нитки збільшуються опір лампи і напруга на її затискачах. Таким чином, кожна із зазначених величин: сила струму в лампі, напруга на затискачах лампи та електричний опір нитки лампи можуть бути мірою її яскравісної температури. Відповідно до цього є

різновиди яскравісних пірометрів, у яких в якості вимірюючого приладу використовують: 1) амперметр, що включений послідовно з лампою, 2) вольтметр, що вимірює напругу на затискачах лампи, 3) логометр або міст, показання якого залежать від зміни опору лампи. У точних лабораторних та зразкових пірометрах силу струму в лампі зазвичай вимірюють компенсаційним методом. Так як при нижній межі вимірювання 800°C струм у пірометричній лампі дорівнює приблизно половині величини струму, що відповідає верхній межі вимірювання 1400°C , то в амперметрі градусна шкала займатиме тільки другу половину циферблату, а перша останеться пустою. Для використання всієї шкали застосовують амперметри з «пригніченим» нулем або диференціальні амперметри. Якщо в якості реєструючого приладу застосовують вольтметр, то неградуированою залишається приблизно перша третина шкали.

Джерела похибок яскравісних пірометрів

Похибки, що виникають в процесі вимірів температури пірометрами яскравості поділяються на інструментальні, що залежать від самого приладу, і методичні, що залежать від умов вимірювання.

До інструментальних похибок відносяться:

1) похибки і варіації показань пірометра в різних точках шкали за нормальних умов його роботи і при вимірюванні температури чорного тіла;

2) зміна показань пірометра при відхиленні від нормальних умов роботи (температурні, зовнішні магнітні поля і т.п.);

3) похибки, що являються наслідком зміни градууювальної характеристики пірометричної лампи;

4) похибки, що виникли внаслідок відхилення значення $\lambda_{\text{еф}}$ червоного світлофільтра від встановленого стандартом $\lambda_{\text{еф}}=0,65\pm0.01$ мкм;

5) зміна пірометричного послаблення поглинаючого скла в діапазоні вимірюваних пірометром температур, що перевищує допустиму величину $1 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, встановлену стандартом;

6) похибки, що являються наслідком зміни коефіцієнтів пропускання об'єктиву, поглинаючого скла і балона пірометричної лампи в результаті їх забруднення або запилення.

Методичні похибки виникають в результаті:

1) нечорноти випромінювання вимірюваного об'єкту;

2) променепоглинання в проміжному середовищі;

3) помилок спостерігача при врівноваженні яскравостей при знятті показань;

4) наявність відбитого випромінювання від стороннього джерела світла.

Похибки показань яскравісних пірометрів за нормальних умов їх роботи залежать від похибок зразкових приладів та їх похибок, що виникають в процесі градуювання. Яскравісні пірометри градууються по зразковим температурним лампам 2-го розряду, які при 900°C мають середню квадратичну похибку градуювання $\pm 2^\circ\text{C}$; $\pm 2,5^\circ\text{C}$ при 1400°C і $\pm 4^\circ\text{C}$ при 2000°C.

Ці значення похибок враховують в розрахунках допустимих похибок технічних пірометрів. Окрім того, похибки пірометрів, в комплект яких входить стрілочний магнітоелектричний прилад (вольтметр, амперметр), в значній мірі залежать від класу точності приладу. Тому в пірометрах підвищеної точності використовують нульові методи вимірювання сили струму в лампі або її опору за допомогою потенціометра або моста.

4.1.5. Колірні пірометри

Із законів Віна і Планка і закону зміщення Віна випливає, що відношення енергетичних яскравостей $E_{\lambda 1T} / E_{\lambda 2T}$ для двох різних довжин хвиль λ_1 і λ_2 буде залежати від температури, оскільки від температури залежить розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла. В таблиці 4.2 приведено значення $E_{\lambda 1T} / E_{\lambda 2T}$ для діапазону температур 1200 - 3200 К при $\lambda_1 = 0,66$ мкм і $\lambda_2 = 0,47$ мкм, тобто для червоної і синьої ділянок спектрів випромінювання чорного тіла.

Таблиця 4.2.

Відношення $E_{\lambda 1T} / E_{\lambda 2T}$ при різних температурах

T, K	1200	1600	2000	2400	2800	3200
$E_{\lambda 1T} / E_{\lambda 2T}$	279,0	94,0	14,9	7,1	4,2	2,8

Таким чином величина відношення $E_{\lambda 1T} / E_{\lambda 2T}$ може слугувати мірою вимірюваної температури. Цю залежність використовують в

колірних пірометрах, званих також **пірометрами спектрального відношення**.

Колірні пірометри так само, як і пірометри яскравості, градууються по чорному випромінювачу, тому при вимірюванні температури чорного тіла показання пірометра будуть відповідати істинній температурі. У реального фізичного тіла значення коефіцієнтів чорноти $\varepsilon_{\lambda 1}$ і $\varepsilon_{\lambda 2}$ для довжин хвиль λ_1 і λ_2 можуть відрізнятися, і тому величина $E_{\lambda 1T} / E_{\lambda 2T}$ може мати значення, що відрізняється від аналогічного значення для чорного тіла при тій же температурі. Із зазначеної причини показання колірного пірометра при вимірюванні температури нечорного тіла можуть відрізнятися від істинного значення вимірюваної температури. Ця умовна температура носить назву **колірної температури тіла**.

Колірною температурою T_c реального випромінювача, що має дійсну температуру T , називається така температура чорного тіла, при якій відношення спектральних яскравостей $E_{\lambda 1T} / E_{\lambda 2T}$ чорного тіла дорівнює відношенню спектральних яскравостей $E'_{\lambda 1T} / E'_{\lambda 2T}$ даного тіла, тобто:

$$\frac{E_{\lambda_1 T_c}}{E_{\lambda_2 T_c}} = \frac{E'_{\lambda_1 T}}{E'_{\lambda_2 T}} \quad (4.19)$$

Використовуючи рівняння (4.16), отримуємо наступну залежність між колірною температурою T_c нечорного тіла і його істинною температурою

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1 T}}{\varepsilon_{\lambda_2 T}}}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}. \quad (4.20)$$

З формули (4.20) видно, що, якщо монохроматичні коефіцієнти чорноти $\varepsilon_{\lambda_1 T}$ і $\varepsilon_{\lambda_2 T}$ рівні, то права частина формули (4.20) перетворюється в нуль, й, отже, колірна температура тіла дорівнюватиме його істинній температурі. Така рівність властива так званим «сірим» випромінювачам, у яких для всіх довжин хвиль спектра випромінювання монохроматичний коефіцієнт чорноти має одне значення. Багато реальних випромінювачів, наприклад, оксиди металів, кераміка, вогнетривкі вироби, графіт і т. д., є практично «сірими» випромінювачами. У багатьох металів колірна температура дещо вище істинної.

Колірна температура багатьох твердих і рідких тіл значно менше відрізняється від істинної температури, ніж радіаційна або яскравісна. Крім того, поправки для переходу від колірної до істинної температури визначаються з більшою точністю, так як фактори, що впливають на величину спектральних коефіцієнтів чорноти $\varepsilon_{\lambda_1 T}$ і $\varepsilon_{\lambda_2 T}$, значно меншою мірою змінюють величину відношення даних коефіцієнтів.

Розглянемо принцип роботи колірного пірометра (рис.4.6). Світловий потік від об'єкта вимірювання (1) переривається об'єктивом (4) з двома світлофільтрами, що пропускають випромінювання на двох довжинах хвиль λ_1 і λ_2 до фотоелемента

(5), що викликає появу на виході фотоприймача змінного сигналу, амплітуда якого пропорційна відношенню спектральних світимостей вхідних потоків світла. Таким чином, амплітуда змінної складової вихідного сигналу залежить від температури поверхні об'єкта вимірювання.

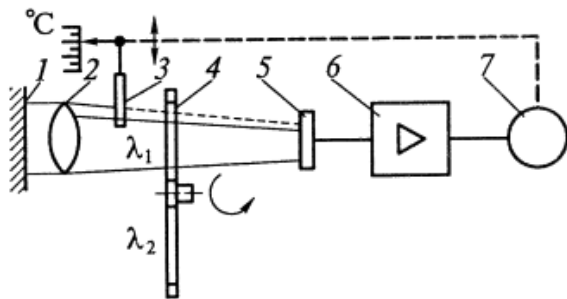


Рис.4.6. Функціональна схема кольорового пірометра: 1- об'єкт виміру; 2-об'єктив; 3- фільтр; 4- об'єктив; 5- фотоеlement; 6- підсилювач; 7 -реверсивний двигун.

сивний двигун.

Змінна складова вихідного сигналу фотоприймача посилюється в підсилювачі (6) і подається на реверсивний двигун (7), який переміщує врівноважуючий фільтр (3) до тих пір, поки не зрівняються інтенсивності випромінювання на обох довжинах хвиль. У положенні рівноваги змінна складова вихідного сигналу фотоприймача зникає, а переміщення фільтра (3) є мірою вимірюваної температури.

Діапазон виміру кольорних пірометрів від 1000 до 2500 °С. При використанні інфрачервоних фотоприймачів нижня межа температурного діапазону може бути зменшена до 20...50 °С. Перевагою таких приладів є те, що для сірих тіл вимірюється дійсна температура. Нагадаємо, що сірим називається тіло, ступінь чорноти

поверхні якого можна прийняти постійною в широкому діапазоні довжин хвиль випромінювання.

З усього сказаного можна зробити висновок, що пірометри випромінювання вимірюють не істинні, а умовні («чорні») температури: радіаційну, яскравісну і колірну. Тому основним недоліком пірометрів випромінювання є систематичні похибки показань, що виникають внаслідок відхилення властивостей реальних випромінювачів від ідеального випромінювача - абсолютно чорного тіла, по яким градуують пірометри. Для градуювання пірометрів випромінювання є електричні печі спеціальної конструкції, випромінювання внутрішньої порожнини яких наближається до випромінювання абсолютно чорного тіла.

Всі пірометри випромінювання, що вимірюють температуру неконтактним методом, тобто дистанційно, мають наступні переваги в порівнянні з приладами, що вимірюють температуру контактними методами:

1) мають принципово необмежену верхню температурну межу вимірювання; 2) забезпечують можливість виміру температур випромінювачів, що знаходяться на великій відстані від пірометра; 3) не спотворюють температурне поле об'єкта вимірювання; 4) можуть застосовуватись для вимірювання температур газових потоків при великих швидкостях.

4.2. Вимірювання розподілу температури за допомогою тепловізорів

Пірометри дозволяють вимірювати температуру локальної

точки об'єкта. Вимірювання розподілу температури (температурних полів) об'єктів здійснюється *тепловізорами* – оптико-електронними приладами, які служать для вимірювання температури та градієнту температур в інфрачервоному діапазоні спектру з подальшою візуалізацією теплового поля об'єкта на екрані. Тепловізор може використовуватися як прилад для *безконтактного вимірювання температури об'єктів і температурних полів*.

Тепловізори не потребують відбитого видимого або короткохвильового інфрачервоного (далі – ІЧ) випромінювання, а використовують власне ІЧ випромінювання об'єктів. *ІЧ діапазони 3–5,5 мкм і 7–14 мкм* є робочими зонами тепловізійного методу контролю.

Слід зазначити, що особливий інтерес викликає більш інформативний діапазон *8–14 мкм*, що повністю співпадає з найбільш широким вікном прозорості атмосфери і відповідає максимальній випромінювальній здатності об'єктів спостереження в температурному діапазоні від -50 до $+500$ °С.

Тепловізійний метод контролю ґрунтується на тому, що будь-які процеси, які відбуваються у природі і людській діяльності, супроводжуються поглинанням і виділенням тепла, змінюючи внутрішню енергію тіла, яка в стані термодинамічної рівноваги пропорційна температурі речовини. У результаті цього поверхні фізичних тіл набувають специфічного температурного розподілу. Прилади, що здійснюють перетворення власного теплового випромінювання об'єктів і місцевості (фону) у видиме зображення,

називають *тепловізорами* або термовізорами. Одне із таких зображень представлено на рис. 4.7.

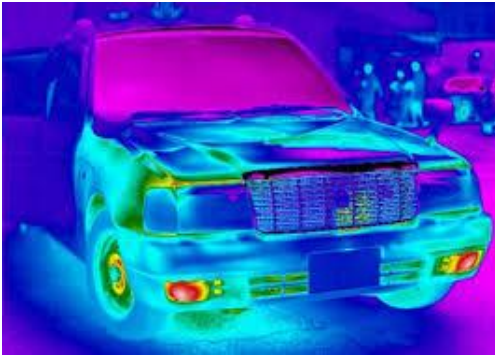


Рис. 4.7. Зображення, отримане за допомогою тепловізора

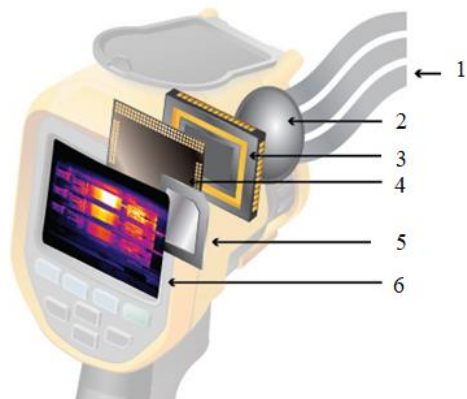
4.2.1. Фізична основа, будова, принцип дії і класифікація тепловізорів

Фізичною основою для створення тепловізора послужив ефект, пов'язаний із здатністю деяких речовин (матеріалів) змінювати свої електричні властивості (зокрема провідність) під впливом електромагнітного випромінювання в ІЧ діапазоні [25].

Загальний принцип роботи тепловізора такий: інфрачервоне випромінювання (ІЧ) спрямовується системою спеціальних лінз (*об'єктивом*) на приймач випромінювання (*тепловізійну матрицю*), далі ПВ, який вибірково чутливий до певної довжини хвилі ІЧ-спектра. Випромінювання, яке потрапляє на нього, призводить до зміни його електричних властивостей, що реєструється та посилюється електронною схемою. Отриманий сигнал піддається цифровій обробці і це значення передається на блок відображення інформації, що має колірну палітру, в якій кожному значенню

сигнала присвоюється певний колір. Після цього на моніторі з'являється точка, колір якої відповідає числовому значенню ІЧ – випромінювання, яке потрапило на ПВ. Скануюча система (дзеркала або напівпровідникова матриця) здійснює послідовний обхід усіх точок простору у межах зору приладу, і в результаті виходить видима картина ІЧ-випромінювання об'єкта. **Таким чином, на моніторі тепловізора ми бачимо значення потужності ІЧ-випромінювання в кожній точці його поля зору, відображені згідно з заданою колірною палітрою.**

Отже, **сучасний тепловізор складається** з: 1) оптичної системи (**об'єктива**), що фокусує тепловий потік від об'єкта на 2) чутливий елемент (**тепловізійну матрицю**) – приймач інфрачервоного випромінювання, і 3) **електронного блоку обробки** (посилення) сигналу, для подання теплової карти (термограми) об'єкта у вигляді, зручному для аналізу [26].



Спрощена будова однієї із моделей тепловізора показана на рис. 4.8.

Рис.4.8. Будова тепловізора:

- 1- ІЧ- випромінювання,
- 2- об'єктив (германієва лінза),
- 3- тепловізійна матриця,
- 4- процесор (блок обробки

сигналу), 5- карта пам'яті, 6- дисплей.

Матриця – це ґратка мініатюрних детекторів, що приймає інфрачервоні сигнали і перетворює їх в електричні імпульси, які після посилення перетворюються у відеосигнал.

Найбільш складним елементом у структурі тепловізорів є його **об'єктив** [25]. Головною вимогою до об'єктиву тепловізора є прозорість для ІЧ випромінювання. Тому для виготовлення тепловізійних об'єктивів використовується дорогий матеріал – германій, який пропускає тільки потрібний спектр випромінювання. На сьогоднішній день вартість об'єктиву складає приблизно 45 % вартості усієї тепловізійної камери, ще 45 % вартості складає термочутлива матриця. Термочутливі матриці розташовують у фокусі об'єктива. Якість матриці суттєво визначає здатність приладу виконувати свої функції. Матриця тепловізора складається з окремих термочутливих елементів, що змінюють свої електричні властивості пропорційно ступеню їх нагрівання під впливом ІЧ випромінювання об'єктів. Типовий розмір фотоелектричних матриць становить 640×480 пікселів.

Існують **охолоджувані та неохолоджувані матриці**. Охолоджувані матриці чутливіші, дорогі та масивні, адже для охолодження використовуються кріогенні технології, що дозволяють охолоджувати матрицю до температури $-210\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такі матриці побудовані на основі явища **зовнішнього фотоелектричного ефекту**, тобто випромінювання електронів під впливом ІЧ випромінювання від об'єктів. При цьому у якості світлочутливої

речовини тепловізійної матриці використовують телуриди з вузькозонних напівпровідників.

Чутливість охолоджуваної матриці є достатньо високою, адже в результаті охолодження її температура стає значно нижчою температури об'єктів спостереження. Температурна чутливість такої матриці, тобто здатність реєструвати різницю температур, становить від 0,1 °C на відстанях до 3 км. У результаті формуються зображення високої якості. Недоліками камер з охолоджуваними матрицями є велике енергоспоживання і короткий термін служби кріогенної системи, висока вартість, а також те, що охолодження матриці до температури займає зазвичай кілька хвилин.

Неохолоджувані матриці, у свою чергу, на порядок дешевші у виготовленні, компактніші, але ціною цього є їх понижена чутливість. Неоохолоджуваною матрицею є пластина, яка складається з безлічі мікроболометрів. В основі роботи мікроболометрів лежить явище *внутрішнього фотоефекту* (фотопровідність), тобто вони реєструють зміну опору чутливого елемента під впливом ІЧ випромінювання об'єктів. Таким чином, кожен окремий мікроболометр являє собою окремий піксель матриці. Чим більша кількість мікроболометрів у матриці, тим чіткіше буде зображення, але й складніший та дорожчий сам прилад. Їх перевага – вони починають працювати одразу після включення, мають тривалий термін служби і низьке споживання енергії, простота і відносна дешевизна.

За принципом дії залежно від типу чутливого елемента приймачі ІЧ випромінювання поділяються на [25]: *болометричні, піроелектричні, термоелектричні та фотонні*.

У сучасних тепловізорах використовуються болометричні і фотонні приймачі ІЧ діапазону. *Болометр* являє собою резистор, у якого змінюється опір залежно від потужності падаючого на нього теплового потоку. З елементарних болометрів формуються болометричні матриці. Найбільшого поширення знаходять болометричні матриці на оксиді ванадію і на аморфному кремнії. Такі матриці не потребують охолодження. Спектральна чутливість таких матриць однакова і знаходиться у діапазоні від 1 до 14 мкм. Болометричні матриці відрізняються порівняно великою неоднорідністю параметрів і характеристик елементарних мікроболометрів в матриці, нелінійністю їх характеристик, високим рівнем шумів і низькою, порівняно з фотонними приймачами, здатністю виявляти об'єкти.

Для суттєвого поліпшення якості зображення в тепловізійних системах на основі мікроболометричних матриць потрібні спеціальні алгоритми калібрування, усереднення, накопичення, заміщення дефектних елементів матриці, компенсації шумів, підвищення контрасту. Їм також потрібні спеціальні засоби компенсації власного теплового випромінювання та обробки вимірюваних значень. Стала часу болометрів змінюється від 10^{-1} до 10^{-3} (менша для матриць на основі аморфного кремнію і більша для матриць на основі оксиду ванадію).

Головною перевагою неохолоджуваних мікроболометричних матриць є відсутність охолодження і однакова спектральна чутливість в діапазоні, що застосовується.

Приймачі на основі фотоэффекту, що представляють найбільший комерційний інтерес, випускаються в основному на базі антимоніду індію (InSb), (кадмій - ртуть - телур) HgTeCa та PbSe. Приймачі на базі InSb, PbSe працюють у діапазоні 3–5 мкм, а приймачі на базі HgTeCa – у діапазоні 8–14 мкм.

Головним недоліком приймачів на основі фотоэффекту є необхідність охолодження до низьких температур (як правило, з використанням рідкого азоту), що створює певні обмеження при використанні у віддалених малонаселених місцях. Спектральна чутливість таких приймачів на 1–2 порядки вище болометричних, проте вони мають обмежений спектральний діапазон чутливості з явно вираженим максимумом. Стала часу приймачів на основі фотоэффекту змінюється від 10^{-5} до 10^{-6} , тобто їх можна застосовувати для термографування рухомих об'єктів.

Незважаючи на більш низьку чутливість, неохолоджувані мікроболометричні матриці отримали найбільше застосування для використання в тепловізорах, оскільки такі тепловізори практично завжди готові до роботи і відсутні вимоги щодо безпеки при роботі з рідким азотом.

Принцип роботи тепловізора на основі фотоэффекту такий: інфрачервоне (теплове) випромінювання від об'єкта спостереження через оптичну систему передається на приймач, що являє собою

неохолоджувану матрицю термодетекторів. Далі отриманий відеосигнал за допомогою електронного блока вимірювання, реєстрації і математичної обробки оцифровується і відображається на екрані комп'ютера або дисплеї тепловізора. **Фізична картина фотоефекту** така: ІЧ фотони, потрапляючи на поверхню вузькозонного напівпровідника (HgCdTe , InSb), переводять носіїв заряду зі зв'язаного стану у вільний. Їх кількість пропорційна інтенсивності теплового випромінювання об'єкта. Матриця фотоелектричних детекторів, яка встановлена у тепловізорі, обов'язково повинна охолоджуватися, інакше власні теплові коливання ґратки напівпровідника викликають настільки інтенсивне вивільнення носіїв заряду, що на його фоні генерація носіїв ІЧ випромінювання стає просто непомітною. Теплова картинка об'єкта, що відображається на екрані, може бути у вигляді монохромного або кольорового зображення.

Ще з початку розвитку тепловізійних приладів намітилися дві тенденції. До першої групи приладів відносяться тепловізори, в яких для перетворення оптичного сигналу ІЧ діапазону в електричний сигнал використовується принцип оптико-механічного сканування (ОМС), а до другої групи приладів – тепловізори з електронним скануванням. У тепловізорах першого типу використовуються одноелементні або багатоелементні ІЧ приймачі випромінювання (ПВ) миттєвої дії, а в тепловізорах другого типу у якості ПВ використовуються ІЧ відікони, пірікони, а зараз уже й матричні приймачі випромінювання, так звані фокальні матриці, що працюють

у режимі накопичення зарядів і базуються на різних фізичних явищах.

Більшість сучасних тепловізійних приладів побудовані за першим принципом, але у зв'язку з успіхами в технології виробництва матричних приймачів випромінювання з'явилися прилади без оптико-механічного сканування, які перевершують прилади першого типу за споживчими властивостями.

На рис. 4.9. представлена узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною ІЧ матрицею [25, 27]. Фокальні матриці виготовляються як функціонально закінчені фотоприймачі (ФП), що включають систему охолодження, підсилювачі, мультиплексор, коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів, аналого-цифровий перетворювач, блоки цифрової обробки і формувач вихідних сигналів.

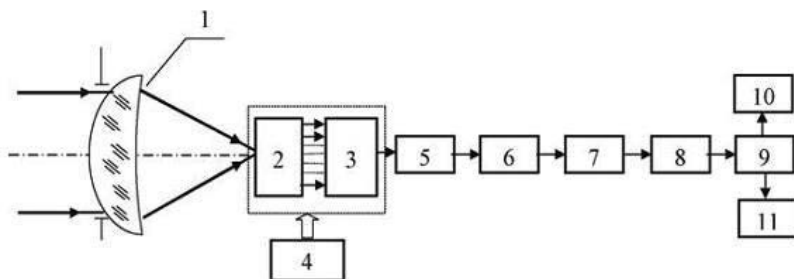


Рис. 4.9. Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею: 1 – оптична система; 2 – фокальна матриця з підсилювачами; 3 – мультиплексор; 4 – система охолодження; 5 – коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 – аналого-цифровий перетворювач; 7 – цифровий коректор

неоднорідності; 8 – коректор непрацюючих осередків; 9 – формувач зображення; 10 – дисплей; 11 – цифровий вихід.

Сигнали з виходу такого ФП можуть передаватися на відеоконтрольний пристрій (ВКП) телевізійного типу або у цифровому вигляді в блоки цифрової обробки.

На рис. 4.10 представлена узагальнена функціональна схема тепловізора з системою ОМС.

Система ОМС, у загальному випадку, повинна забезпечувати сканування - огляд простору предметів як у напрямку рядків (по горизонталі), так і по кадру (у вертикальному напрямку).

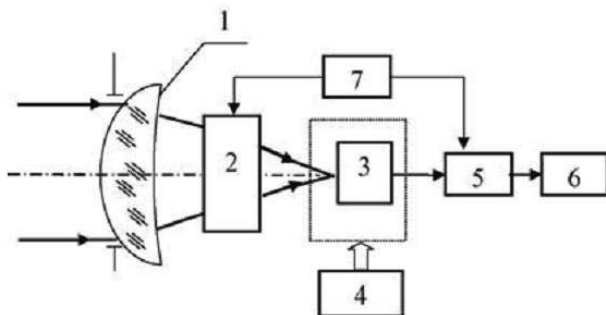


Рис. 4.10. Узагальнена функціональна схема скануючого тепловізора.

1 – оптична система; 2 – блок оптико-механічного сканування; 3 – приймач випромінювання; 4 – система охолодження; 5 – електронний тракт; 6 – пристрій відеоконтролю; 7 – система синхронізації.

Існує безліч схем скануючих тепловізорів, що розрізняються методами сканування, обробки сигналів і подання вихідного зображення. Ці відмінності загалом обумовлені топологією ПВ, що

використовуються в тих чи інших приладах. Зокрема, в тепловізорах з системами ОМС можуть використовуватися одноелементні, а також багатоелементні ПВ у вигляді лінійок або матриць. Крім цього, у якості пристрою відеоконтролю, крім ТВ-моніторів, що широко застосовуються, використовуються різного роду пристрої з лінійками світлодіодів та оптико-механічними системами розгортки [28].

Розрізняють такі методи сканування простору предметів і розгортки при формуванні вихідного зображення: послідовне, паралельне і паралельно-послідовне. При послідовному скануванні або розгортці здійснюється зміна напрямку візирної осі і перетворення сигналу по черзі уздовж кожного рядка зображення з наступним переходом на кожний наступний рядок. Таке сканування або розгортка можуть здійснюється при використанні одноелементних ПВ або світлодіодів, а також ПВ або світлодіодів у вигляді лінійок, елементи яких орієнтовані уздовж рядка.

При паралельному скануванні або розгортці площі ПВ або лінійки світлодіодів орієнтовані перпендикулярно до напрямку руху візирної осі. При паралельно-послідовному скануванні або розгортці використовуються ПВ і лінійки світлодіодів у вигляді матриць, а огляд поля проводиться послідовно по зонах.

4.2.2. Основні характеристики тепловізорів

Основними характеристиками тепловізорів є [27]:

1. Роздільна здатність — найважливіша характеристика матриці: кількість її чутливих елементів на одиницю площі (по

горизонталі і вертикалі), що визначає чіткість отриманого зображення.

2. *Поле зору* – кутовий простір «видимий» для тепловізійного пристрою. За цією характеристикою можна встановити робочу відстань, з якої можна досліджувати об'єкт заданої величини.

3. *Просторова роздільна здатність* – найважливіший параметр тепловізійної діагностики, який характеризує мінімальний розмір об'єкта, точне вимірювання якого можливе з певної відстані. Чим більша матриця і менша величина просторової роздільної здатності, тим точніше буде відображатися тепла картина. У реальних умовах це означає, що спостерігач зможе визначити температуру менших за розміром об'єктів з більшої відстані.

Таким чином, чим менше поле зору, тим точніше можна вимірювати температуру об'єктів і тим чіткішу картину отримати на екрані тепловізора.

Розрахувати лінійний розмір найменшого відображуваного об'єкта можна за формулою: $N=L \cdot \delta$, де L - відстань до об'єкта, δ – просторова роздільна здатність в радіанах.

4. *Температурна чутливість* – найменша різниця температур в межах одного пікселя. Виражається в градусах Цельсія або Кельвінах.

Чутливість – це величина мінімального перепаду температури, яку здатний визначати тепловізор. Від цієї характеристики залежить "контрастність" одержуваного зображення. Для енергоаудиту цілком достатньо чутливості до $0,1^{\circ}\text{C}$. Для виявлення «перегрітих» вузлів електросилового або механічного обладнання можуть

використовуватися менш чутливі моделі. Підвищена чутливість потрібна для виявлення ділянок з підвищеною вологістю, протікання, прихованих дефектів тощо.

5. Частота кадрів – величина, що характеризує швидкість зміни зображення на екрані тепловізора, виражається в герцах (Гц). Низьке значення частоти зміни кадрів, наприклад, 9 Гц, свідчить про те, що зміна зображень буде помітна для оператора. Для тривалої роботи під час руху або з мінливою картиною перед об'єктивом тепловізора рекомендуються моделі з частотою 50-60 Гц.

6. Оптика тепловізора, яку виготовляють із різних матеріалів. У професійних тепловізорах ІЧ об'єктив є складним вузлом, що включає набір лінз та дзеркал з тендітних, дорогих і потребуючих прецизійної обробки матеріалів типу кремнію, германію та спеціального ІЧ скла. Об'єктиви найчастіше виготовляють із германію, але він дорогий, тому іноді використовують халькогенідне скло, селенід цинку.

Додаткова «оптика» (змінні об'єктиви) дозволяють розширити можливості тепловізора, виконуючи тепловізійне обстеження загального плану з використанням ширококутного об'єктива. Така оптика зручна, якщо об'єкт знаходиться впритул до оператора і слід переглядати якомога більшу площу (наукові дослідження, будівництво та енергетика).

Основними параметрами об'єктивів, які важливі для споживача, є фокусна відстань та кут зору. Температурний діапазон, в якому тепловізор може виконувати вимірювання (або діапазон

контрольованих температур), визначає сферу застосування приладу. Для термографування будівель цілком підійдуть тепловізори з верхнім температурним діапазоном до $+100^{\circ}\text{C}$, для діагностики електроустановок та промислових агрегатів потрібні прилади, здатні виконувати вимірювання до $+350^{\circ}\text{C}$, а для перевірки котлів, теплогенераторів та ін. необхідні більш високотемпературні моделі (до $+650^{\circ}\text{C}$). У ливарній, скляній, хімічній промисловості, в енергетиці, де температури можуть досягати $+1200^{\circ}\text{C}$ (або вище) використовуються моделі тепловізорів з відповідним температурним діапазоном. Вибираючи тепловізор, звичайно ж, слід «залишати» певний «температурний запас», проте надмірно завищувати вимоги до температурного діапазону не варто – це нерозумне витрачання коштів.

7. Точність вимірів (похибка). Майже всі тепловізори (з болометричною матрицею, що не охолоджується) забезпечують точність вимірювань не нижче 2%, що цілком достатньо для вирішення більшості завдань з діагностики та енергоаудиту. Більш високу точність забезпечують моделі з азотним охолодженням, які найчастіше використовуються для наукових досліджень та при контролі технологічних процесів.

8. Спектральний діапазон. Для виконання більшості завдань (наприклад, термографування будівель) використовують тепловізори зі спектральним діапазоном 7-14 мікрон. Зйомку будівель з суцільним склінням забезпечують моделі зі спектральним діапазоном 3-5 мкм (з матрицею, що охолоджується), які дозволяють визначати поверхневу

температуру склоподібних об'єктів і при цьому не враховують їх відбиваючу здатність.

Існує широкий ряд моделей тепловізорів та програмного забезпечення для розв'язання різноманітних проблем забезпечення безпеки. На ринку доступні моделі наступних класів: ручні, ближньої дії (до 500 метрів), середньої (до 5 кілометрів) і далекої (більше 5 кілометрів) дії. Окремим класом стоять комплексні системи, поєднані з CCD-сенсором, GPS, лазерним далекоміром і т.п. Сьогодні на ринку систем телеспостереження доступна широка лінійка продуктів, починаючи від портативних ручних тепловізорів для бригад оперативного реагування до далекодіючих комплексних систем з дистанцією детектування 50 км.

Більшість тепловізорів (крім бюджетних моделей) оснащуються вбудованими відеокамерами з функцією збереження зображення, завдяки чому є можливість накладання (повного або в режимі «картинка в картинці») зображень інфрачервоного та видимого спектрів. Деякі моделі дозволяють робити відео.

Серед переваг використання тепловізорів можна відзначити таке [29]:

- дистанційність проведення вимірювань;
- оперативність отримання результатів дослідження та можливість їх швидкого опрацювання;
- можливість контролю об'єктів із будь-яких матеріалів;

- можливість дослідження динамічних та статичних теплових процесів, процесів вироблення, перетворення, передавання, споживання та консервації енергії різних видів;
- відсутність спотворень теплового поля об'єкта під час вимірювання;
- можливість реалізації вимірювань в агресивному середовищі, в умовах радіоактивного випромінення та високого електричного потенціалу;
- можливість прогнозування теплової деградації виробів;
- можливість суцільного та безперервного дослідження об'єкта;
- проведення експрес-контролю теплового стану промислових об'єктів із метою діагностування та прогнозування порядку їх функціонування;
- можливість застосування в автоматизованих системах контролю та управління технологічними процесами.

До недоліків тепловізорів необхідно віднести високу вартість, що є наслідком застосування дорогих матеріалів, передових технологій під час виробництва. Це, у свою чергу, визначає необхідність використання їх кваліфікованим персоналом.

4.2.3. Похибки тепловізійних вимірювань

На основі узагальнення даних про метрологічні характеристики тепловізорів світових виробників (Fluke, CEM, DALI, Electrophysics, Testo AG, Wuhan Guide Infrared Co., IPI, IRay Technology Co., Irisys, IRtek, JENOPTIK/InfraTec, Chauvin Arnoux, SAT Infrared Technology

та ін.) можна в такий спосіб охарактеризувати їх сучасні моделі. Переважно це є односмугові засоби вимірювання, які працюють у середній та тепловій інфрачервоних ділянках спектра у широкому температурному діапазоні та мають такі метрологічні характеристики [29]:

Температурний діапазон вимірювання, °С	-20...+1200
Робочі спектральні діапазони, мкм	3,0÷5,0; 8,0÷14,0
Швидкодія (стала часу), с	до 10^{-6}
Температурна чутливість, мК, менше	20

Але необхідно відзначити таке. Незважаючи на те що точність вимірювання температури, яка вказана виробниками в супровідній документації, знаходиться в межах $\pm(2\div5) \%$ або $\pm(2\div5) ^\circ\text{C}$ (вибирається, що є більшим), точність результатів вимірювання є нижчою. Цю невідповідність спричинено тим, що в супровідній документації до тепловізорів указано значення лише температурної чутливості або основної похибки вимірювання температури, що відповідає інструментальній складовій похибки вимірювання.

Значний вплив на точність результатів тепловізійного дослідження має методична складова похибки, яка зумовлена впливом випромінювальних властивостей поверхні об'єкта та впливом таких параметрів робочих умов експлуатації, як фонове випромінювання сторонніх об'єктів та пропускання проміжного середовища. Також значний вплив на результати має суб'єктивна складова похибки від правильності виконання вимірювань та введення необхідних поправок на випромінювальні властивості

складних за формою та матеріалом об'єктів. У дійсності похибка результатів вимірювання від сумарного впливу цих факторів у робочих умовах може становити десятки відсотків [30].

Зазвичай повірка та калібрування тепловізорів відбуваються в калібрувальній лабораторії згідно з ДСТУ 3194:2005 [31]. За нормальних умов похибка засобу вимірювання, що повіряється, від дії сукупності впливних факторів не має перевищувати 35 % границі допустимої основної похибки засобу вимірювання. Ці умови передбачено ГОСТ Р 8.619-2006 [32], де вказано, що повинні враховуватися вимоги експлуатаційних документів на тепловізор конкретного типу. Окрім того, у ДСТУ 3194:2005 [7] границі допустимих абсолютних похибок робочих засобів вимірювальної техніки мають бути не більше 8 °С у діапазоні від –50 до 961,78 °С. Вимірювання температури за випроміненням у промисловості реалізуються тепловізорами, які за результатами калібрування в калібрувальній лабораторії за нормальних умов визнаються придатними.

Але в умовах виробництва значення впливних параметрів робочих умов відрізняються від значень у нормальних умовах, яких дотримуються при калібруванні тепловізорів у калібрувальних лабораторіях. Також випромінювальні властивості реального технічного об'єкта відрізняються від випромінювальних властивостей еталонного випромінювача.

Таким чином, при відхиленні умов від нормальних, а саме в робочих умовах виробництва, з'являється додаткова похибка, що

виникає додатково до основної похибки внаслідок відхилення якої-небудь із впливаючих величин від її нормального значення або внаслідок її виходу за межі нормальної області значень [30]. Таким чином, для покращення точності вимірювання необхідно проводити додаткове калібрування в робочих умовах. Для калібрування тепловізорів у робочих умовах доцільне застосування випромінювачів у вигляді моделі протяжного чорного тіла.

Коефіцієнт випромінювання еталонних протяжних випромінювачів знаходиться в межах 0,93...0,98. Водночас для проведення калібрування у виробничих умовах можуть бути використані протяжні випромінювачі, випромінювальна здатність яких носить сірий характер, що дозволило би врахувати вплив відбитого випромінювання фону. Це, у свою чергу, може істотно підвищити точність проведених вимірювань температури за випромінюванням.

4.2.4. Використання тепловізорів

Вимірювання розподілу температури є важливим завданням в енергетиці, машинобудуванні, будівництві, нафтовій і хімічній промисловості, транспорті, медицині та ін. Вимірювання розподілу температури використовують:

-при експлуатації будівель для виявлення порушення теплоізоляції та інших втрат тепла, виявлення дефектів стиків панелей, тріщин, погіршення теплоізоляційних властивостей, ділянок інфільтрації води, обривів арматур;

-у енергетиці для тепловізійного моніторингу ліній електропередач, виявлення дефектних контактів з'єднань комутаційних апаратів; в енергозбереженні при енергоаудиті, визначенні теплоізоляційних властивостей матеріалів, діагностиці огорожжувачих конструкцій, виявленні тепловтрат у внутрішніх приміщеннях і зовні будинків і споруджень;

-у хімічній промисловості для контролю температури продукту, перевірки герметичності та ізоляції ємностей для зберігання різних рідин і газів;

- в авіакосмічній і військовій техніці для систем самонаведення на ціль, систем оповіщення про ранній запуск ракет, теплової розвідки (виявлення живої сили і техніки), авіакосмічної зйомки тепловізором;

- в медицині для моніторингу запальних процесів, локальних пухлин, порушення кровообігу, процесів загоєння ран, травм та ін.

У медичних тепловізорах для якісного тепловізійного зображення використовується матриці з великою роздільною здатністю від 384×288 пікселів та високою частотою кадрів 30-60 Гц. У всіх медичних тепловізорів є власний софт для аналізу та обробки тепловізійних зображень та відео. Точність вимірювання температури поверхонь становить $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Така точність досягається за рахунок використання абсолютно чорного тіла при калібруванні тепловізора.

Тепловізійне обстеження тіла людини служить для діагностики захворювань на ранніх стадіях (у деяких випадках задовго до появи скарг хворого) широкого спектра захворювань. Тепловізор реєструє з

поверхні тіла людини його теплове випромінювання; місця, де температура тіла підвищена, забарвлюються у червоно-жовті відтінки, підвищена температура – ознака запалення (рис.4.11). Тепловізійне обстеження дозволяє виявляти: запальні процеси та пухлини різних органів, ураження нервів та артерій кінцівок, варикозне розширення вен; неврологічні прояви остеохондрозу хребта та ін. За допомогою тепловізора можна виявити функціональні порушення вегетативної нервової системи.



Рис. 4.11. Застосування тепловізорів у медицині.



Рис. 4.12. Деякі моделі тепловізорів, що використовуються в будівництві та військові справи.

Діагностика за допомогою тепловізора - абсолютно безпечна для пацієнта. Немає жодних шкідливих випромінювань, наприклад, як із рентгеном. Тепловізійне обстеження можна призначати необмежену кількість разів. Це дуже важливо для своєчасної корекції фізіотерапевтичного лікування. Окрім того спостерігається висока точність та чутливість. На термограмах поверхні тіла, які аналізуються на комп'ютері, температура різних частин тіла може відрізнятися на десятки та соті частки градуса, така різниця температур дуже важлива для правильної постановки діагнозу.

5. ТЕРМОМЕТРІЯ ОБ'ЄКТІВ МАЛИХ РОЗМІРІВ

5.1. Методи вимірювання температури наноструктур

Технології точного локального вимірювання температури нанорозмірними датчиками необхідні в багатьох областях. Наприклад, реєстрація параметрів термодинамічного потоку з високою роздільною здатністю необхідна в нанолітографічних моделях інтегральних схем для підвищення їх стабільності. При діагностиці та лікуванні пацієнтів, що мають захворювання кровоносних судин та спинного мозку, необхідне отримання відображення температури з високою точністю та високою роздільною здатністю. Вимоги до просторової роздільної здатності температурних профільних відображень при використанні в електронних та біологічних приладах (особливо в нанофлюїдиці) також стають дедалі більше строгими. Розробка термометрів, які можуть експлуатуватися при просторових обмеженнях вимірюваного середовища, повинна здійснюватися з використанням нанорозмірних чутливих модулів з високою точністю та відтворюваністю. Розробка теплових датчиків з використанням молекулярних та нанорозмірних структур являє собою новий підхід до розвитку термометрії.

Нанолітографічна термометрія. Одним з поширених способів для ведення спостережень за локальною температурою являється використання термоелектричного детектора, створеного літографічно

або методом послідовного осадження. Такі методи виготовлення застосовні для нанорозмірних датчиків температури та термопар на основі напівпровідників або металів. Для того щоб нанести один метал на наносмужки, зроблені з іншого металу, для створення нанорозмірного датчика, використовується технологія вакуумного напилення. Параметричний відгук, наприклад, нанорозмірного з'єднання платини та вольфраму Pt/W (з домішками галію Ga в обох металах) дає температурний коефіцієнт 5,4 мВ/°С, що в 130 разів більше, ніж у звичайних термопарах. Літографія робить можливі з'єднання двох нанодротяних електродів типів р- і n- на підложці для того, щоб створювати нанорозмірні термопари, з'єднані паралельно. Атомно-силова мікроскопія може створювати відображення термічного реагування підкладок за допомогою провідного полімеру або скануючої головки з вуглецевою нанотрубкою (CNT). Для підвищення просторового дозволу температурних вимірювань також використовується нанорозмірний капілярний ефект. У всіх перелічених термометрах просторова роздільна здатність, як правило, визначається геометричним розміром термопари. Крім того, в нанорозмірному капілярі, наприклад, прилад вимірює температуру швидше в місці зв'язку між модулем датчика капіляра і областю виявлення, ніж у самій рідині. Це може бути потенційним недоліком через складність механізму передачі тепла всередині капіляра, перешкод з боку електричного або електромагнітного полів та порушення параметрів потоку динамічної системи.

Термометрія на основі наноматеріалів. Нанотермометри інформують про температуру середовища у дуже малих областях простору. До таких термометрів пред'являються високі вимоги: по-перше, вони повинні бути досить точними і чутливими, по-друге, бути оборотними і, по-третє, повинні бути стабільними в різних середовищах та широкому інтервалі температур. Недоліки традиційних технологій є, здебільшого, наслідком внутрішніх властивостей матеріалів, з яких виготовлений термометр, таких як неправильна форма, розподіл за розмірами та шереховатість поверхні, які можуть призвести до низької роздільної здатності і співвідношенню сигнал/шум (S/N). За останнє десятиліття досягнення синтезу наноматеріалів спричинили створення нових розробок у галузі нанорозмірної термометрії. Типовим прикладом є використання вуглецевих нанотрубок (CNT). Тонка плівка товщиною 7 нм CNT утворює відносно простий термометр з діапазоном виміру температур 100–327 °C у вакуумі. Температура оточуючого середовища нанотрубки точно відповідає збудженню поля і струму емісії даного доданого електронного поля.

Наноструктурні плівки з сульфіду свинцю PbS також являють собою засіб створення безконтактних термометрів завдяки широкому діапазону 200–1200 °C, що піддається виміру. Повідомляється [33] про нанорозмірний термометр, який аналогічний за формою традиційному ртутному термометру, але в мільярд разів менше за нього. Він складається з наповнених галієм Ga нанотрубок з вуглецю або оксиду марганцю, в яких Ga служить індикатором температури за

рахунок розширення та звуження всередині нанотрубки в діапазоні 30–2205 °C (рис. 5.1).

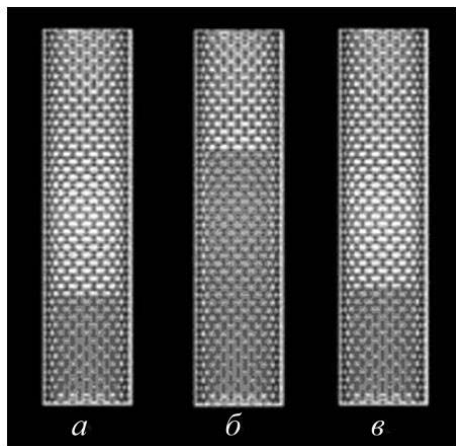
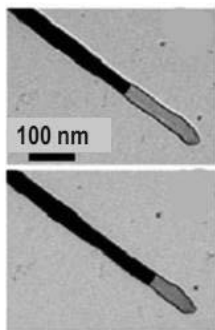


Рис. 5.1. Вуглецевий нанотермометр, наповнений Ga, який показує розширення Ga всередині нанотрубки CNT при температурах: а)- 58 °C, б)- 490 °C, в)- 45 °C.

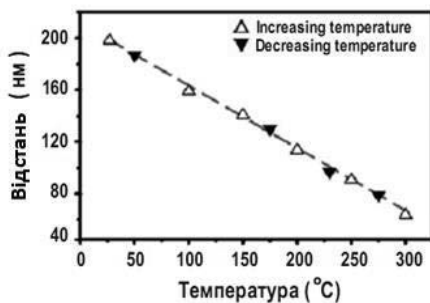
Такі термометри з вуглецевими нанотрубами або нанотрубками з окису марганцю мають великий потенціал для використання в середовищах з надвисокими температурами. Тим не менш, одним із суттєвих недоліків тут є той факт, що для такого нанотермометра потрібна камера високого вакууму, наприклад, трансмісійний електронний мікроскоп для зчитування і попередньої ідентифікації та калібрування. Тільки розробка іншого методу перетворення сигналу може дати можливість подолати цю проблему.

Інший варіант нанотермометра представлено на рис. 4.2. За аналогією зі звичайним термометром, свинець помістили в нанотрубку з оксиду цинку, для якого коефіцієнт термічного розширення значно нижчий. Такі нанозбірки Pb/ZnO були отримані при кімнатній температурі методом гальванічного заміщення з цинкової фольги, поміщеною в розчин Pb (NO₃)₂.

Діаметр збірок становив близько 80 нм, а довжина - кілька мікрон.



а)



б)

Рис. 5.2. Нанотермометр Pb/ZnO з лінійною шкалою до 300 °C.

Як правило, свинець заповнює не всю нанотрубку цілком, всередині є порожнина (рис.5.2.а). Структура стабільна до температури 300 °C. Виявилось, що довжина порожнини змінюється лінійно в інтервалі температур 25–300 °C, причому однаково при нагріванні та охолодженні (рис.5.2.а). За більш високих температур свинець плавиться і може витекти з оболонки. Однак якщо оболонка раптом виявляється бездефектною, то й надалі збільшення об'єму свинцю відбувається лінійно, лише з іншим коефіцієнтом розширення. Так що найвдаліші термометри можна використовувати до 800°C. Наприклад, ними можна контролювати температуру зразків, що нагріваються пучком електронів, в електронному мікроскопі (що працює на просвічення) або стежити за температурою тримачів, що підігріваються. Знімати показання термометрів можна і автоматично, наприклад, шляхом вимірювання електроємності

конденсатора, утвореного поверхнею свинцю та протилежним кінцем трубки.

На рис. 5.3 представлено ще один різновид нанотермометра, запропонованого тайванськими дослідниками. В якості такого термометра використовується нанотрубка з бета- Ga_2O_3 , заповнену сплавом Au/Si. Такий пристрій формується в одну стадію методом CVD на кремнієвій підкладці, покритій шаром золота 4 нм.

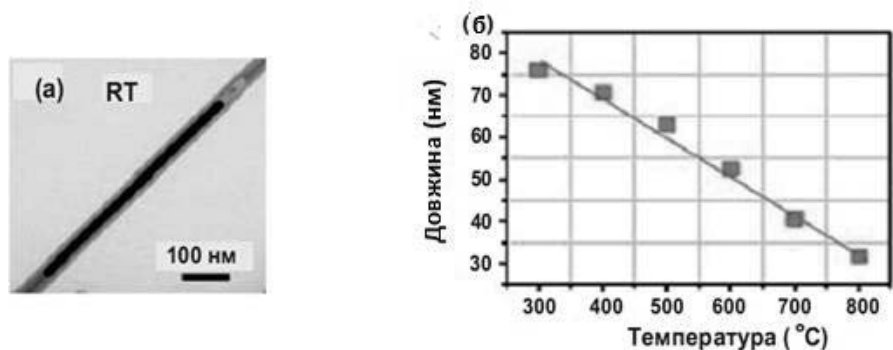


Рис. 5.3. Нанотермометр $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Au}/\text{Si}$ з лінійною шкалою до 800°C .

Діаметр трубок дорівнює 70-100 нм, довжина - кілька мікрометрів. Більшість нанотрубок Ga_2O_3 закриті з одного або з двох кінців і заповнені золотом з 6% домішкою кремнію. Функціонування нанотрубки в ролі термометра було проконтрольовано за допомогою просвічуючого електронного мікроскопа. Довжина вільної від Au/Si порожнини лінійно спадала в інтервалі температур 300–800°C (рис.5.3,б) внаслідок розширення сплаву, хоча повне його розплавлення відбувається вище 400°C . Після охолодження межа зміщується на вихідне положення, тобто продемонструвала важливу

властивість пристрою - оборотність. Декілька циклів нагрівання - охолодження показали добру відтворюваність результатів.

Термометрія із флуоресцентними матеріалами. Крім електронного та мікроскопічного методів вимірювання температури, мають місце методи оптичного аналізу. Такі технології ґрунтуються на інтенсивності та зміні положення піків люмінесцентних кристалічних матеріалів. Швидкість безвипромінювального енергетичного переходу та тривалість збудженого стану відповідають певній температурі. Наприклад, зрушення фази і розпад збудженого стану люмінофорних рубінів: $(\text{Al}_2\text{O}_3: \text{Cr}^{3+})$; $\text{Cr}^{3+}: \text{YAG}$; $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}, \text{Dy}$; та $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}, \text{Nd}$ - знаходяться в лінійної залежності від температури. Це може бути потужним інструментом при вимірюванні температури, і може використовуватися в безконтактних термометрах із застосуванням оптоволоконного датчика.

Такий датчик складається з джерела світла для збудження кристалу та люмінесцентного детектора часу інтенсивної фази та фази згасання для вимірювання температури [33]. Крім кристалів люмінофорів, також використовувався флуоресцентний барвник, наприклад родамін В, в мікрофлюїдному каналі. Термічна характеристика може відстежуватися за допомогою мікроскопії або спектрофотометрії з діапазоном $0,03\text{--}3,5^\circ\text{C}$. Флуоресцентний барвник або гранули полімеру, що з'єднані з барвником, можуть бути використані для вимірювання температури однієї живої клітини для діагностики онкозахворювання. Проте, флуоресцентні органічні барвники знебарвлюються дуже швидко, як правило, протягом 30

хвилин, тому вони непридатні для довготривалого моніторингу. Нові нанорозмірні матеріали, так як квантові точки (QDs), є кандидатами для використання у нанорозмірних термометрах. Синтезовані та модифіковані квантові точки характеризуються високим квантовим виходом, тривалим терміном існування до фотознебарвлення та прийнятною біологічною сумісністю після відповідної поверхневої модифікації. Більше того, вони можуть легко з'єднуватися з протеїном і ДНК для виявлення параметрів. Наночастки можуть самі по собі функціонувати як термометр в обмеженому діапазоні температур. Наприклад, CdTe і ZnS: Mn²⁺ наночастинки дають оборотну лінійну температурну характеристику в рамках фізіологічного температурного діапазону.

Вимірювання температури одиначної живої клітини необхідне для вирішення багатьох сучасних біомедичних задач, наприклад для онкології, оскільки детальне дослідження розподілу температур може розкрити особливості метаболізму клітини та її реакцію на різні зовнішні подразники. Відповідним рішенням є флуоресцентні матеріали (наночастки), що дозволяють швидко і з високою точністю отримати просторовий розподіл температури. Використовуючи лазери з випромінюванням у ближньому ІЧ-діапазоні, можна збуджувати люмінесценцію частинок NaYF₄: Er³⁺, Yb³⁺ із мінімальними технологічними складностями. Ще однією цінною перевагою цих наночастинок є незалежність положення максимуму люмінесценції та поглинання від розміру частинок.

Розроблено флуоресцентні температурні зонди, що працюють у наномасштабі [34]. Для цього до зонда атомного силового мікроскопа прикріплюються флуоресцентні частки, які поєднують в собі високу горизонтальну роздільну здатність і хорошу чутливість до температури. Коли флуоресцентний матеріал нагріється при зовнішньому збудженні, рівень його світлового випромінювання падає і при дуже високому нагріванні припиняється зовсім. Ця властивість і використовується для створення температурного датчика, який би визначав нагрівання в наномасштабі. Сама ця частка складається з фторидного скла, що містить іони ербію та ітербію. Для визначення температури проводиться порівняння інтенсивності двох видимих спектральних ліній щодо рівня термічної рівноваги.

Молекулярна термометрія. Новим підходом до вимірювання температури є використання температурно-залежних молекул або біологічних частинок. Такі технології ґрунтуються на термотрансформованому відгуці, який дає в результаті високу роздільну здатність і збільшену біологічну сумісність завдяки зменшеному розміру частинок.

Нанорозмірні датчики з молекулярних або біологічних частинок були спроектовані та сконструйовані для моніторингу геометричної зміни структури ДНК. Наприклад, зміна двониткової структури ДНК від В- до Z- DNA говорить про можливість використання цього ефекту як молекулярний нанотермометр. Відмінності в електронних властивостях двох структур та процесах перенесення заряду з

флуоресцентних зондів дають істотні зміни емісії. Рівновага між конформаціями Z- і В- може контролюватися за допомогою температури. Деякі інформаційні РНК (*mRNAs*) змінюють свої конформації під впливом температури. Спеціальні ділянки РНК селективно розпізнають зміну температури, наприклад в області *mRNA*, що не транслюється. Зміна температури веде до зміни РНК. Конформаційна зміна температурно-чутливої РНК може відслідковуватися за допомогою ультрафіолетової та ядерної магнітної резонансної спектроскопії.

Термометрія нанорозмірних суперструктур. Молекулярні пружинні конструкції (збірки) і суперструктури можуть знайти добре застосування для термометрії біологічних об'єктів. Вони значно менші, ніж клітини і канали в нанофлюїдних приладах і дозволяють отримати неймовірну роздільну здатність.

Збірки із наночастинок можуть бути запрограмовані на виконання температурного виявлення шляхом зміни поверхні. Різні функціональні групи на поверхні наночастинок можуть з'єднуватися з іншими полімерами або відповідними біоматеріалами, використовуючи добре розвинену хімію сполуки. На рис. 5.4 показаний нанотермометр, що включає динамічну суперструктуру двох типів наночастинок, сполучених полімерними спейсерами, які діють як молекулярні пружини у водній фазі. Механізм дії нанотермометра можна пояснити контрольованою взаємодією між парами екситон - плазмонів у цьому гібриді, що відбувається слідом за зміною конформації поліетиленгліколю (PEG) у температурному

діапазоні 20–60 °С. Параметри температури були визначені за змінами інтенсивності флуоресценції суперструктури та продемонстровані залежністю оберненої інтенсивності від температури у водному середовищі.

Застосування нанотермометрів з наночастинками золота в області гіпертермічного впливу на злоякісні клітини має важливе значення. Технологію можна вдосконалити за рахунок додавання у наночастинки із золотом лігандів, націлених на онкоклітини, та локалізованого нагріву за допомогою випромінювання лазера, що працює у імпульсному режимі.

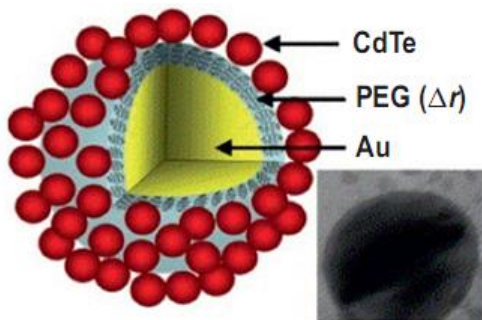


Рис. 5.4. Динамічний нанотермометр на основі суперструктур наночастинок: схематичне та електронно-мікроскопічне зображення суперструктури.

Управління локальними температурами має вирішальне значення для селективного руйнування цільових злоякісних клітин при використанні мінімальної потужності енергії фотона і при мінімальному руйнуванні здорових клітин. В моделях тепло переносу

діапазон температур в 70-80° С розглядають як порогову температуру для руйнування живих клітин. Нанорозмірні термометри з наночастинок золота можуть ефективно визначати локалізовані температури всередині або навколо клітини.

5.2. Вимірювання температури кластерів

5.2.1. Кластери, їх властивості

Кластер - група близько розташованих, тісно зв'язаних атомів, молекул, іонів, ультрадисперсних частинок [35]. Немає чіткого поділу з терміном «наночастинка». Наночастинка - нанооб'єкт, що має розміри за всіма трьома напрямками в діапазоні наношкали, тобто приблизно від 1 до 100 нм. Відповідно, кластери є проміжною ланкою між окремими частинками та об'ємною рідиною або твердим тілом. Завдяки дискретній структурі енергетичних рівнів та великій величині відношення поверхні до об'єму, властивості кластерів відрізняються як від властивостей окремих складових їх частинок, так і від властивостей об'ємної речовини. Тому кластери часто називають "новою фазою речовини".

Вивчення структури та динаміки поведінки кластерів може дати змогу встановити нижню межу числа частинок у кластері, при якій починають проявлятися фізичні властивості об'ємної речовини. Слід відзначити, що в окремих випадках вже вдалося встановити граничне число частинок, починаючи з якого в кластері виявляються деякі характеристики макроскопічної речовини. Однак, найчастіше значення граничного числа частинок є дуже умовним, оскільки різні

властивості рідини або твердого тіла починають проявлятися при різному числі частинок у кластері.

В книзі Паулі [36] під кластерами розуміються агрегати, що містять від кількох одиниць до кількох мільйонів атомів чи молекул, які утримуються разом різними типами зв'язку з енергією зв'язку від кількох десятих електрон-вольта до кількох електрон-вольт.

Наскільки сильно розрізняються енергії зв'язку атомів у кластерах можна бачити з наступного прикладу. У кластерах (нанокрапельках) гелію $(^4\text{He})_N$ енергія зв'язку атомів E_b становить $E_b \leq 10^{-3}$ еВ, а в димері $(^4\text{He})_2$ – лише близько 10^{-7} еВ, тоді як енергія зв'язку атомів у металевих кластерах, кластерах вуглецю, а також інших тугоплавких матеріалів лежить у діапазоні приблизно від 1 до 10 еВ.

Існує досить багато способів отримання кластерів. Найбільш поширеними методами отримання кластерів та кластерних пучків є надзвукові газодинамічні струмені та лазерна генерація металевих кластерів. Для отримання кластерів широко використовуються також агрегація газу, ерозія поверхні, розпилення, лазерна абляція, імпульсний дуговий розряд, плазмові методи.

Внутрішня температура кластера визначається енергією випадкового руху складових кластера атомів або молекул щодо центру мас кластера. Якщо обертальні та поступальні ступені свободи кластера «заморожені», то внутрішня температура $T_{кл}$ визначається співвідношенням:

$$T_{\text{кл}} k_B \frac{3N}{2} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{m_i (u_{\text{кл}} - u_i)^2}{2} \right), \quad (5.1)$$

де N – число частинок в кластері; k_B – стала Больцмана; m_i , u_i – маса та швидкість атомів (молекул), які входять до складу кластера; $u_{\text{кл}}$ – швидкість центра мас кластера.

Рівняння (5.1) є кінетичним визначенням температури кластеру. Температуру кластера можна також визначити як термодинамічну величину:

$$T_{\text{кл}} = \frac{dE}{dS}, \quad (5.2)$$

де E і S – відповідно, повна внутрішня енергія і ентропія кластера.

Температури, що визначаються співвідношеннями (5.1) та (5.2), є, взагалі кажучи, різні величини. При термодинамічному розгляді кластерів враховується не тільки енергія теплового руху атомів, а й потенційна енергія взаємодії атомів у кластері, у тому числі енергія конфігураційного збудження. Під конфігураційним збудженням розуміються переходи з основного стану кластера на локальні мінімуми багатовимірної поверхні потенційної енергії. Саме конфігураційні порушення призводять до зміни структури та агрегатного стану кластерів. [37].

Оскільки час знаходження кластера поблизу певного мінімуму поверхні потенційної енергії перевищує характерний час коливань атомів ($\approx 10^{-14}$ с), енергії теплового та конфігураційного збудження поділяються. Це дозволяє досліджувати динаміку атомів у кластері. При нульовій температурі зберігається тільки конфігураційна частина

енергії кластера, що відповідає збудженню кластера щодо глобального мінімуму поверхні потенційної енергії, тоді як при високих температурах кінетична енергія руху атомів може суттєво перевищувати енергію конфігураційного збудження.

Термодинамічне визначення температури кластерів з урахуванням їх повної внутрішньої енергії та ентропії описують багато процесів, що відбуваються при структурних переходах, і дає більш глибоке та детальне розуміння фізики фазових переходів у кластерах [37, 38].

В результаті проведених досліджень встановлено, що внутрішня температура кластерів є важливою характеристикою, від якої залежать багато властивостей кластерів, у тому числі поляризованість, магнітний момент, потенціал іонізації, оптичний відгук, а також структура та конфігурація кластера, фазовий стан. Температура кластерів сильно впливає на фізико-хімічні процеси за участю кластерів та кластерних пучків, у тому числі на швидкості фрагментації (випаровування) та хімічних реакцій, канали фрагментації, швидкості та канали релаксації енергії.

Залежно від типу (складу) кластерів та способу їх отримання і стабілізації температура кластерів може варіюватися в широких межах. Наприклад, стабілізована в результаті випаровування температура кластерів ^3He і ^4He має відповідно значення 0,15 та 0,38K. Температури кластерів благородних газів, одержуваних у молекулярних пучках, а також методом агрегації, складають, як правило, від кількох градусів до кількох десятків Кельвінів.

Температура кластерів металів і вуглецю (у тому числі фулеренів), одержуваних лазерними методами або в розрядах, може досягати $3500\div 4000\text{K}$, а температура кластерів тугоплавких матеріалів - $4500\div 5000\text{K}$. Температура кластерів може суттєво зростати в результаті їх збудження, наприклад, електронним ударом, енергійними іонами, лазерним випромінюванням, у тому числі під впливом потужних ультракоротких лазерних імпульсів, а також при зіткненні високоенергетичних кластерів і кластерних іонів з твердою поверхнею або між собою у зустрічних пучках. У рівноважних умовах верхнє граничне значення температури кластера визначається точкою кипіння речовини кластера. Отже, рівноважна температура кластерів тугоплавких матеріалів, вуглецю та металів може змінюватись у досить широких межах, у той час як температура молекулярних кластерів має набагато менший діапазон зміни, а температура кластерів інертних газів, особливо кластерів гелія, знаходиться в ще більш обмеженому діапазоні [37].

5.2.2. Вимірювання температури кластерів за допомогою ІЧ-спектрів поглинання

Існує низка методів визначення температури кластерів. До них належать: метод дифракції електронів; детектування рівноважного випромінювання від збуджених чи нагрітих кластерів; вимірювання температури підкладки, на якій адсорбуються кластери; вимірювання температури збуджених та фрагментуючих кластерів по кінетичній енергії відлітаючих фрагментів. Можливості та обмеження цих

методів розглянуті у [37, 38]. Особливе місце займає унікальний та прецизійний метод вимірювання температури кластерів (нанокраплинок) надплинного гелію ^4He за спектрами ІЧ-поглинання впроваджених в кластер молекул, який коротко розглянемо нижче.

В експериментах нанокაпельки (кластери) надплинного гелію формуються при газодинамічному розширенні газу із сопла у вакуум. Тиск газу над соплом зазвичай становить приблизно від 1-2 атм. до 50-60 атм. Сопло з діаметром отвору від 5 до 50 мкм охолоджується до температури 4 - 20 К. Виділений зі струменя кластерний пучок проходить через камеру розсіювання довжиною 5-10 см, що містить молекулярний газ при тиску 10^{-4} - 10^{-5} тор. Проходячи через камеру розсіювання, кластери захоплюють «гостьову» (досліджувану) молекулу. При подальшому русі до мас-спектрометра, що аналізує пучок, кластери піддаються впливу змінного за частотою лазерного випромінювання. Коли лазерне випромінювання знаходиться у резонансі з «гостьовою» молекулою, поглинена енергія приводить до збіднення пучка - випаровування атомів гелію з кластера - і зменшенню сигналу мас-спектрометра. Отже, змінюючи частоту лазера, можна отримати ІЧ-спектр поглинання досліджуваної молекули всередині крапель надплинного гелію.

В отриманих таким способом спектрах чітко проявляється обертальна структура, на основі якої можна визначити заселеності обертальних рівнів молекули, а отже, і температуру молекули всередині кластера. Зіставлення експериментально отриманого

спектра з результатами розрахунку дозволяє уточнити отриману температуру.

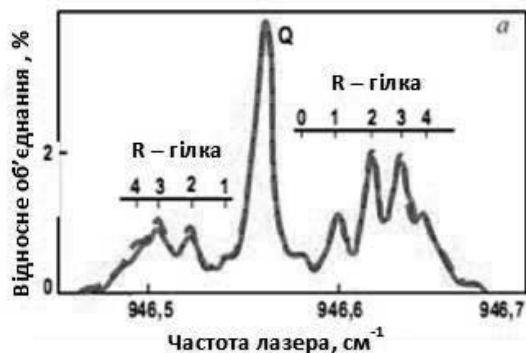


Рис. 5.5. ІЧ-спектр поглинання коливання молекул SF_6 всередині капельки ^4He ($N = 2700$) - суцільна крива; штрихова лінія - розрахунок спектра молекули SF_6 ,

що вільно обертається [39].

На рис. 5.5 наведено спектр поглинання коливання молекул SF_6 усередині крапельок ^4He . Для порівняння показаний результат розрахунку спектра молекули, що вільно обертається. Добре відстежується дозволена оберտальна структура, яка дає змогу визначити температуру кластерів [39]. Так, показаний на рис. 5.5 спектр, відповідає температурі молекул усередині крапель гелію близько 0,38 К. Відмітимо, що при зазначеній температурі повна ширина спектра ІЧ-поглинання коливання молекул SF_6 не перевищує $0,5 \text{ cm}^{-1}$, що суттєво менше величини ізоотоп-зсуву в зазначеному коливанні ($\approx 8,5 \text{ cm}^{-1}$). Це відкриває можливість високоселективно збуджувати молекули всередині нанокapельки надплинного гелію за допомогою потужних ІЧ-лазерів і використовувати цей процес для

селекції молекул, впроваджених у капельки, за ізотопним (компонентним) складом.

5.2.3. Вимірювання температури кластерів за допомогою молекул, що утворюють мініатюрні зонди-термометри

В роботі [40] було показано, що молекули SF_6 , захоплені великими ван-дер-ваальсовими кластерами (наночастинками) $(\text{CO}_2)_N$ при перетині кластерного і молекулярного пучків, через визначений час сублімують (випаровуються) з поверхні кластерів, несучи інформацію про швидкість та температуру кластерів. У цій роботі запропонований молекулярно-зондовий метод визначення температури кластерів і наночастинок та представлені результати детального дослідження за допомогою зазначеного методу температури кластерів.

Суть запропонованої ідеї полягає в тому, що якщо на поверхні кластера осіла молекула речовини і якщо її сила зв'язку менша, ніж сила зв'язку молекул кластера між собою, то молекула випарується з нього доволі швидко. Причому чим більша температура кластера, тим велику швидкість набуває молекула. Швидкість молекул можна виміряти за часом прольоту та за отриманим спектром розрахувати температуру кластеру.

На рис. 5.6. представлена схема експерименту. Інтенсивний імпульсний кластерний пучок $(\text{CO}_2)_N$ перетинається під прямим кутом з імпульсним молекулярним пучком SF_6 . В результаті

перетину кластерного пучка з молекулярним відбувається захоплення молекул SF_6 кластерами $(\text{CO}_2)_N$.

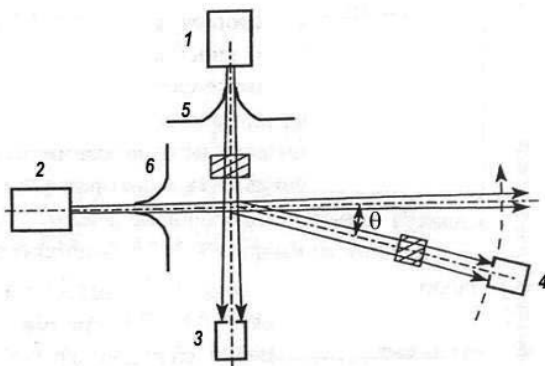


Рис.5.6. Схема експерименту: 1,2- імпульсні сопла; 3,4- піроприймачі; 5,6 – скімери; заштриховані перерізи лазерних пучків.

При цьому молекули передають кластерам імпульс, в результаті чого кластери відхиляються на певний кут Θ . Таким чином, для реалізації даного методу необхідно, щоб енергія зв'язку мономерів у кластері була більша за енергію зв'язку кластерної молекули з молекулою-зондом. І в цьому випадку з поверхні кластера без його збудження з великою ймовірністю будуть сублімувати захоплені молекули, а не молекули (атоми) самого кластера.

В проведених експериментах було виявлено, що захоплені кластерами молекули SF_6 на поверхні кластера $(\text{CO}_2)_N$ через визначений час сублімують із поверхні кластера. Це було встановлено по індукованому коливально-збудженими молекулами SF_6 сигналу на приймачі, що детектирує кластерний пучок, а також за формою прольотних спектрів кластерного пучка $(\text{CO}_2)_N$, отриманих без молекулярного пучка та з молекулярним пучком.

Час життя τ молекули SF_6 на поверхні кластера $(\text{CO}_2)_N$ залежить від енергії сублімації E_s (пароутворення) SF_6 та температури $T_{кл}$ кластера $(\text{CO}_2)_N$:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E_s}{k_B T_{кл}}\right)^2, \quad (5.3)$$

де τ_0 - період коливання молекули на поверхні кластера відносно вандер-ваальсівського зв'язку.

Оцінки, зроблені в [40], на основі літературних даних для наведених у виразі (5.3) параметрів ($\tau_0 \approx 10^{-13}$ с, теплота сублімації $E_s = 5,46$ ккал/моль, $T_{кл} = 100 \div 120$ К) показують, що час τ становить від декількох десятків до кількох сотень мікросекунд.

Часопролітним методом була виміряна швидкість (кінетична енергія) молекул SF_6 , що сублімують з поверхні кластерів, і на основі цих вимірювань визначено температуру кластерів $(\text{CO}_2)_N$ в кластерному пучку: $T_{кл} = 100 \pm 15$ К. Цей результат перебуває в хорошій згоді з даними по температурі великих кластерів $(\text{CO}_2)_N$ ($N \geq 10^3$), що генеруються в соплових джерелах.

6. ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ВЕЛИЧИН

6.1. Класифікація оптичних приладів

Оптичні вимірювальні прилади надзвичайно різноманітні. За кількістю типів оптичних приладів їх можна зіставити з електровимірювальними. Насправді, дуже багато приладів з інших видів вимірювання - з механіки, з теплофізики, з фізико-хімії - в якості кінцевого каскаду або в якості первинного датчика мають деякі оптичні деталі.

Взагалі оптичним вважаємо метод або прилад, що реєструє електромагнітне випромінювання, видиме людським оком, тобто електромагнітні коливання з довжинами хвиль від 350 нм до 760 нм. Однак розвиток науки про світло призвів до того, що під оптичними задачами стали розуміти вимірювання в більш довгохвильовій області - інфрачервоне випромінювання, і в більш короткохвильовій області - ультрафіолетове випромінювання. Відповідно, збільшилась кількість методів і приладів, які є прерогативою оптиків. Щоб переконатися в цьому, досить згадати, що в оптичному приладобудуванні і в оптичних дослідженнях останніх десятиліть оптична наука розросталась в основному крайніми, тобто інфрачервоною (ІЧ) і ультрафіолетовою (УФ) областями спектру. Оптичні вимірювальні прилади можна розділити на класи (табл. 6.1).

Таблиця 6.1.

Класифікація оптичних вимірювальних приладів

• Пірометри	• Спектральні вимірювальні прилади
• Рефрактометри	• Інтерфелометри
• Вимірювальні мікроскопи	• Поляриметри
• Фотометри	• Гоніометри

Фотометричні оптичні прилади - це клас оптики для вимірювання світлових потоків і величин, безпосередньо пов'язаних зі світловими потоками: освітленості, яскравості, світності і сили світла. Фотометри доцільно розділяти на традиційно оптичні, вимірювані характеристики в яких мають чутливість, відповідну чутливості людського ока, і так звані фотометри енергетичних фотометричних величин, тобто ті ж характеристики безвідносно до чутливості ока людини. Очевидно, що в енергетичних фотометрах величини виражаються не в люменах, люксах, а в механічних одиницях:

- • у ватах на метр квадратний - енергетична освітленість;
- • у ватах настерадіан - енергетична сила світла;
- • у ватах з квадратного метра - енергетична світність;
- • у ватах з квадратного метра настерадіан - енергетична яскравість.

Спектральні оптичні прилади – охоплюють величезний клас оптичної техніки, для якого загальним є розкладання електромагнітного випромінювання в спектр за довжинами хвиль. Існують спектроскопи - візуальні прилади, монохроматори - прилади,

які виділяють випромінювання на будь-якій фіксованій довжині хвилі, поліхроматор, що виділяє випромінювання на декількох довжинах хвиль, спектрографи - реєструють увесь спектр монохроматичного випромінювання. Якщо в приладі, крім розкладання випромінювання в спектр, є можливість вимірювання будь-яких енергетичних характеристик електромагнітного випромінювання, то такий прилад називається спектрофотометром або квантометром.

Інтерферометри – це прилади, в яких основною вимірюваною характеристикою є не амплітуда світлової хвилі і пов'язана з нею енергія, а фаза електромагнітного коливання. Саме такий підхід дав змогу створити найточніші на даний момент засоби вимірювання, що реально дозволяють вимірювати величини з похибками в 11-12 знаку. Саме тому інтерферометри застосовуються в основному для вирішення завдань, що вимагають від приладів максимально високої точності, наприклад, у стандартах, в обслуговуванні унікальних наукових програм, у реалізації надчутливих методів аналізу складу речовини і т.п.

У **поляриметрах** використовується така хвильова властивість світла, як поляризація, тобто певна орієнтація коливань електромагнітної хвилі щодо напрямку поширення. Багато речовин мають властивість змінювати напрямок поляризації. На цьому принципі працюють не тільки перетворювачі для вимірювання магнітних величин, але й деякі прилади для аналізу складу речовин і матеріалів, наприклад, цукрометри.

Рефрактометри - прилади для вимірювання показника заломлення твердих тіл, рідин і газів. У них використовується зміна напрямку пучка світла на межі поділу двох середовищ. Ці прилади використовуються в якості індикаторів у хроматографах, у численних метеорологічних приладах спеціального призначення, в газовому аналізі і т.д.

Гоніометри - прилади для кутових вимірів - у більшості своїй є зорові труби або лазери, оптична вісь яких забезпечена відліковим кутовим лімбом. Таким приладом можна вимірювати кути, послідовно наводячи оптичну вісь на два роздільних об'єкта. Сюди ж можна віднести і оптичні далекоміри, що виконують вимірювання кутів спостереження одного і того ж об'єкта двома зоровими трубами. Гоніометри широко застосовуються в топографії, у військовій техніці, у геодезичних роботах.

Оптичні мікроскопи є прилади для збільшення видимих розмірів (або кутів спостереження) різних об'єктів і вимірювання розмірів збільшених деталей.

Пірометри - прилади для вимірювання власного теплового випромінювання тіл (назва від слова «піро» - вогонь). У цих приладах використовуються закони випромінювання нагрітих тіл - закон Планка, закон Стефана-Больцмана, закон Віна, закон Релея-Джинса. Цей клас приладів розглянуто в розділі про температурні виміри, де пірометри розглядаються як засоби безконтактного вимірювання температури.

6.2. Фотометричні прилади

Термін «фотометрія» утворений від двох грецьких слів: «фос» - світло і «метрео» - вимірюю. У вимірювальних приладах, що реєструють область спектра, видиму людським оком ($\lambda = 350 - 760$ нм) важливо не тільки виміряти енергетичні характеристики, але і виготовити прилад таким чином, щоб його чутливість до випромінювання відповідала б чутливості людського ока. Такі прилади вимірюють оптичні величини в оптичних одиницях, основною з яких є кандела. Дамо визначення основних світлових величин [41,42].

Сила світла визначається як *енергія потоку, видимого людським оком, тобто механічна енергія, помножена на видність ока, що поширюється в одиничному тілесному куті*, тобто

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}. \quad (6.1)$$

Сила світла вимірюється в **канделах (кд)**. Це основна фотометрична одиниця. Вона реалізується за допомогою світлового еталона у вигляді абсолютно чорного тіла при температурі затвердіння чистої платини. Якщо сила світла виражена в канделах, а тілесний кут в стерadianах, то світловий потік виражають в *люменах (лм)*.

Освітленість будь-якої *поверхні, перпендикулярної до напрямку поширення світла, є поверхневою щільністю світлового потоку*, тобто:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (6.2)$$

Зв'язок освітленості і сили світла дається фундаментальним законом фотометрії: **освітленість від точкового джерела змінюється обернено пропорційно квадрату відстані від джерела до освітлюваної поверхні:**

$$E_{\varphi} = \frac{I}{r^2} \cos \varphi , \quad (6.3)$$

де φ - кут між нормаллю до поверхні і напрямком розповсюдження світла. Освітленість виражається в **люксах (лк)**. Якщо потрібно охарактеризувати фотометричні параметри самосвітного об'єкта: нитки розжарювання лампи, екрана монітора, колби люмінесцентної лампи і т.д., потрібно вимірювати величину, яку називають **світністю:**

$$M = \frac{d\Phi}{dS} , \quad (6.4)$$

де dS - елемент поверхні, що світиться. Світність в оптичних одиницях виражається в люменах на квадратний метр (лм/м²) або в люксах (лк= лм/м²).

Ще однією розповсюдженою оптичною фізичною величиною, яка вимірюється на практиці, є яскравість. **Яскравість визначається для об'єкта, що світиться, як сила світла з одиниці поверхні, перпендикулярній променю** (рис.6.1а):

$$B = \frac{I}{dS_n} . \quad (6.5)$$

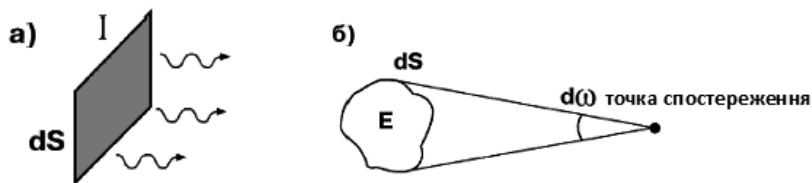


Рис. 6.1. До визначення яскравості: а) поверхня, що світиться самостійно; б) поверхня, освітлена стороннім джерелом світла.

Для поверхні, освітленій стороннім джерелом світла (рис.6.1б), **яскравість визначається як відношення освітленості поверхні до тілесного кута**, який спирається на цю поверхню, і має вершину в точці спостереження:

$$B = E/d\omega . \quad (6.6)$$

Ще одне визначення яскравості відноситься до променя світла незалежно до того, чи він виходить від самосвітної поверхні, чи падає на будь-яку поверхню. **Яскравість** елементарного променя визначається як освітленість, яку він створює на перпендикулярній до нього поверхні в одиничному тілесному куті, який він заповнює:

$$B = \frac{dE}{d\omega} = \frac{d^2\Phi}{d\omega dS_n} . \quad (6.7)$$

У тих випадках, коли створюються прилади, що працюють в інфрачервоному або в ультрафіолетовому діапазонах, замість оптичних одиниць, як уже вказувалося, використовуються механічні одиниці, тобто потужність вимірюється в ватах, енергетична освітленість - у ватах на квадратний метр, енергетична сила світла - у ватах на стерadian, енергетична яскравість - у ватах на метр

квадратний на стерадіан. Зв'язок між відносними фотометричними одиницями здійснюється з використанням поняття механічного еквівалента світла і функції видності людського ока. ***Механічним еквівалентом світла є потужність світлового потоку на довжині хвилі 555 нм, що дорівнює 1 Вт механічної енергії.*** В оптичних одиницях ця потужність дорівнює 683 люмена, тобто

$$1 \text{ Вт} = 683 \text{ лм} (\lambda=555 \text{ нм}), K_m = 683 \text{ лм/Вт} (\lambda=555 \text{ нм})$$

Для вимірювання фотометричних величин використовують прилади - ***фотометри***. За типом реєстрування показів фотометри поділяються на аналогові та цифрові, за вимірюваною величиною – на ***люксметри*** та ***яскравоміри***. Ці прилади нормуються згідно державних стандартів України (ДСТУ) [43-46].

Метрологічне забезпечення. Сучасне метрологічне забезпечення світло- вимірювань в Україні бере початок зі створення у 1996 р. державного первинного еталона одиниці сили світла [43,48] для відтворення та зберігання одиниці сили світла - кандели і передавання розміру цієї одиниці робочим еталонам та робочим засобам вимірювальної техніки (ЗВТ), які використовуються в Україні.

Унікальність рішення при створенні державного первинного еталона України одиниці сили світла полягала у використанні випромінювання ртутної лампи, в якій за допомогою світлофільтра виділяли частоту 546 нм. Перевага ртутної лампи полягала у сутності оптичного випромінювання, яке не поляризоване і не когерентне, а довжина хвилі близька до максимуму відносної світлової

ефективності $V(\lambda)$, завдяки чому було отримано високу точність відтворення сили світла. Компаратор реалізовано на основі фотометричної сфери з фотодіодом, що забезпечувало рівномірну кутову та зонну структури.

Метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниці сили світла:

Діапазон відтворення одиниці сили світла, кд	1,0...100,0
Випадкова похибка (СКВ)	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Невиключена систематична похибка	$0,15 \cdot 10^{-2}$
Розширена невизначеність (U)	$0,3 \cdot 10^{-2}$

Створений державний первинний еталон одиниці сили світла поєднував багаторічний досвід наукових робіт зі створення метрологічного забезпечення світлових вимірювань та мав суттєві переваги перед еталонами провідних країн, які були реалізовані раніше.

Наступним етапом розвитку метрологічного забезпечення світлових вимірювань в Україні стало створення у 2012 р. державного первинного еталона одиниці світлового потоку, який дав можливість проводити вимірювання головного параметра для штучних джерел світла - світлового потоку (лм) [47] (рис.6.2).

Метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниці світлового потоку:

Діапазон відтворення одиниці сили світла, лм	1,0...1500
Випадкова похибка (СКВ)	$1,3 \cdot 10^{-3}$

Невиключена систематична похибка	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Розширена невизначеність (U)	$0,4 \cdot 10^{-2}$.



Рис. 6.2. Державний первинний еталон одиниці світлового потоку (зовнішній вигляд).

У 2015 р. було виконано роботи з модернізації первинного еталона одиниці сили світла у напрямку розширення функціональних можливостей [48]. Було вирішено питання щодо включення світлодіодних джерел світла до складу еталонних джерел світла для відтворення, зберігання та передавання світлових одиниць. Розширення функціональних можливостей полягало у збільшенні діапазону відтворення та збереження одиниці сили світла, забезпеченні відтворення та збереження одиниць освітленості і освітлення.

У результаті проведених робіт діапазони значень одиниць вимірювань, в яких за допомогою первинного еталона сили світла відтворюються, зберігаються та передаються одиниці сили світла, освітленості та освітлення, становлять: $1 \dots 500$ кд [2] для сили світла; $0,1 \dots 1000$ лк [2] для освітленості; $10^{-3} \dots 500$ кд·с [2] для освітлення.

Було досягнуто такі значення стандартної відносної невизначеності вимірювань:

- за типом А (uA) - $0,15 \cdot 10^{-2}$ для сили світла і освітленості і $0,25 \cdot 10^{-2}$ для освітлення;
- за типом В (uB) - $0,06 \cdot 10^{-2}$ для сили світла і освітленості і $0,14 \cdot 10^{-2}$ для освітлення.

Сумарна стандартна відносна невизначеність вимірювань uC не перевищує $0,15 \cdot 10^{-2}$ для сили світла та освітленості і $0,3 \cdot 10^{-2}$ для освітлення. Розширена відносна невизначеність вимірювань U з коефіцієнтом обхвату $k = 2$ та довірчою імовірністю $P = 0,95$ не перевищує $0,3 \cdot 10^{-2}$ для сили світла та освітленості і $0,6 \cdot 10^{-2}$ для освітлення.

Вимірювачі освітленості - люксметри - є найбільш масовими оптичними приладами, що використовуються на практиці. Саме цими приладами контролюється рівень освітленості в усіх випадках - в приміщенні, на вулиці, при виконанні будь-яких технологічних вимірювань і т.д.

Люксметри за принциповою схемою є найбільш простими з усіх фотометричних приладів. Фотоелектричні люксметри складаються з приймача освітленості, як правило, фотоелемента і чутливого приладу електровимірювання (рис.6.3). Необхідною умовою правильності показань люксметра є відповідність спектральної чутливості фотоприймача функції видності людського ока, тобто максимальна чутливість повинна бути в жовто-зеленій області зі спадом в ультрафіолетову (до 380 нм) область і в інфрачервону (більше 760 нм) область. Оскільки площа фотоприймача строго

фіксована, сигнал з нього пропорційний освітленості, і шкала приладу, відповідно, може бути проградуйована в люксах.

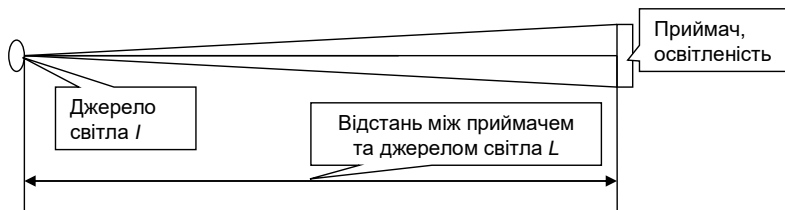


Рис. 6.3. Схема для вимірювання освітленості та сили світла [46 (ДСТУ 7267:2012)].

Вимірювання сили світла виконується за законом:

$$I = E \times L^2 . \quad (6.8)$$

При створенні фотометрів для вимірювання енергетичної освітленості в ультрафіолетовій або в інфрачервоній областях в приладах встановлюються світлофільтри, що виділяють певну ділянку спектра випромінювання.

Прилади для вимірювання енергетичних потоків в інфрачервоній області називають радіометрами, оскільки вони, як правило, вимірюють сумарний потік інфрачервоного випромінювання.

Для вимірювання яскравості використовують яскравоміри.

Для цього необхідно виміряти енергію світлового пучка, обмеженого двома діафрагмами (рис.6.4). Прилад містить, як правило, ахроматичний об'єктив, який проектує зображення об'єкта в площину діафрагми, за якою встановлюють фотоприймач.

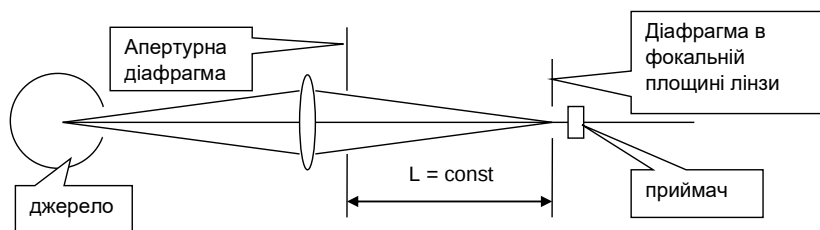


Рис.6.4. Схема для вимірювання яскравості з використанням оптичної системи [44 (ДСТУ ISO/CIE 19476:2014)]

Прилад, який побудовано за такою схемою, реагує на світловий потік, що виходить з поверхні джерела визначеного розміру dS під певним кутом $d\omega$. Отже, реєстрований фотострум буде пропорційний яскравості об'єкта, і прилад може бути проградуїований в одиницях яскравості. На практиці яскравоміри мають візирний пристрій, що дозволяє бачити оком ту ділянку поверхні, яскравість якого вимірюється.

При вимірюванні яскравості протяжних самосвітних об'єктів можна скористатися приладом для вимірювання освітленості - люксометром, розташувавши його безпосередньо на поверхні, що світиться. У цьому випадку фотоприймач збере все випромінювання об'єкта, що виходить в тілесному куті в 2π стерadian, і яскравість самосвітної поверхні буде відрізнятися від освітленості на 2π , тобто

$$B = \frac{E}{2\pi}. \quad (6.9)$$

Цим способом часто користуються на практиці. Існують також проміжні прилади, проградуїовані в одиницях яскравості, хоча за своєю схемою вони ідентичні звичайним люксометрам.

На рис.6.5. представлена одна із сучасних моделей яскравомірів Konica Minolta LS-150/160.

Рис.6.5.



Діапазон роботи цих моделей: LS-150 : 0.001-999,900 кд/м², LS-160 : 0.01-9,999,000 кд/м².

Яскравоміри Konica Minolta серії LS-150/LS-160 обладнані власною пам'яттю на 1000 вимірів. Для коректного вимірювання яскравості пульсуючих джерел світла введено внутрішню синхронізацію в діапазоні від 20 Гц до 400 Гц і збільшено діапазон часу вимірювання. Прилад в автоматичному режимі може проводити вимірювання протягом 0,7- 4,3 секунд, а в ручному режимі оператор самостійно вибирає час вимірювання в діапазоні від 0,7 до 7,1 секунд. Для передачі даних на ПК у приладі передбачений інтерфейс USB, а за рахунок програмного забезпечення, що входить до комплекту, даний прилад може вважатися повнофункціональним дослідницьким комплексом. Точність для моделі LS-150: $L_v \pm 2\% + 2$ цифри (нижче 1 кд/м²), $L_v \pm 2\% + 1$ цифра (вище 1 кд/м²); для моделі LS-160: $L_v \pm 2\% + 2$ цифри (нижче 1 кд/м²), $L_v \pm 2\% + 10$ цифр (вище 10 кд/м²).

На рис.6.6. надано фото комбінованих приладів люксметрів-яскравомірів-пульсиметрів. Пульсиметри призначені для вимірювання коефіцієнта пульсацій.

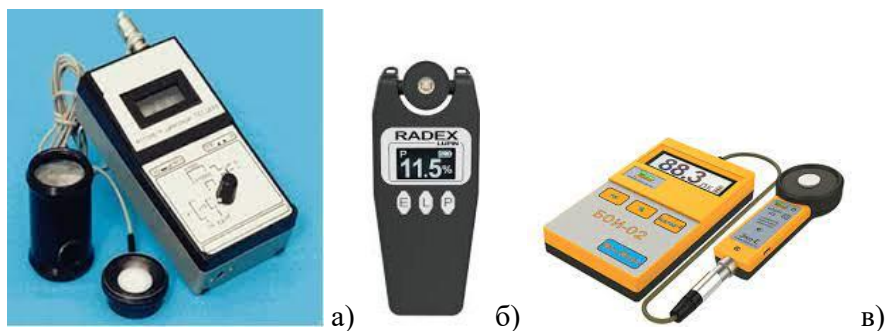


Рис.6.6. Комбіновані прилади для вимірювання освітленості, яскравості, коефіцієнта пульсацій: а) люксметр-яскравомір ТЕС 0693, б) люксметр - яскравомір - пульсиметр RADEX LUPIN, в) люксметр - яскравомір - пульсиметр ЕЛАЙТ 02.

Фотометр цифровий ТЕС 0693 призначений для вимірювання освітленості, що створюється джерелами природного і штучного видимого світла і яскравості несамосвітних об'єктів (рис.6.6.а). Застосовується для проведення санітарно-гігієнічних досліджень при атестації робочих місць (рекомендований Держстандартом та Міністерством охорони здоров'я України). Характеристики приладу: діапазон вимірювання освітленості - $10^{-1} \div 10^5$ лк; спектральний діапазон чутливості - $10 \div 2 \cdot 10^5$ мкм; діапазон вимірювання яскравості - $10 \div 2 \cdot 10^5$ Кд/м². Межі допустимої відносної похибки складають: $\pm 5\%$, при вимірюванні освітленості $\pm 5\%$, при вимірюванні яскравості $\pm 7\%$, при вимірюванні енергетичної освітленості $\pm 5\%$,

6.3. Метрологічні характеристики спектральних приладів

Спектральні вимірювальні прилади - спектрофотометри - є приладами для вимірювання фотометричних величин оптичного випромінювання з розкладанням в спектр, тобто з розкладанням по довжинах хвиль. Існує величезна кількість спектральних вимірювальних приладів, у яких для реєстрації використовуються не тільки різні пристрої для отримання спектрів, але і різні принципи. Перш за все потрібно виділити два великі класи спектральних приладів, поділених за принципом реєстрації спектрів - це прилади дисперсійні й інтерференційні. У табл. 6.2 представлені найбільш часто використовувані типи спектральних приладів.

Таблиця 6.2.

Класифікація спектральних приладів

Фільтрові прилади	Дисперсійні прилади	Інтерференційні прилади
Зі скляними фільтрами	Прилади з призмою	Фур'є-спектрометр
З рідинними фільтрами	Прилади з дифракційною ґраткою	Спектрометр інтерференційний з селекційною амплітудною модуляцією
З інтерференційно-поляризаційними фільтрами	Растрові спектрометри	Еталони Фабрі-Перо
	Адамар-спектрометр	Мультиплекс-спектрометри

Перш ніж розглядати конкретні типи або класи спектральних вимірювальних приладів, має сенс коротко зупинитися на основних факторах, що визначають **метрологічні характеристики** спектрофотометрів. Найбільш важливі з них наступні:

1) **Світлосила** спектрального приладу. Це характеристика енергії електромагнітного випромінювання в заданому спектральному інтервалі, що потрапляє в прилад і дає внесок у формування сигналу на вихідному пристрої - фотоприймачі. Світлосила визначається характером і розміром вхідної апертури –діафрагма, растр, щілина, а також пропусканням приладу, яке визначається поглинанням, відбиттям або розсіюванням світла на вузлах і деталях приладу. До характеристик, що визначає світлосилу, відноситься і розмір вихідної апертури. Це можуть бути також діафрагма, растр або вихідна щілина.

2) **Дисперсія** спектрального приладу і роздільність, однозначно пов'язані з дисперсією, а також з розмірами спектрометра і схемою розташування його вузлів. Дисперсія визначається або по зміні кута відхилення променя світла φ зі зміною довжини хвилі λ :

$$D_{\varphi} = \frac{d\varphi}{d\lambda}, \quad (6.10)$$

або по вимірюванню відстані на виході приладу між монохроматичними лініями, що знаходяться на відстані $d\lambda$:

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda} \quad (6.11)$$

Найчастіше спектральні прилади характеризують зворотною лінійною дисперсією:

$$\frac{1}{D_l} = \frac{d\lambda}{dl}. \quad (6.12)$$

3) **Роздільна сила або роздільна здатність** спектрального приладу визначають можливість приладу детально досліджувати спектр. Роздільна сила визначається як

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda}. \quad (6.13)$$

Це безрозмірна величина, що дорівнює відношенню довжини хвилі випромінювання, поділеної на інтервал довжин хвиль, що відповідає найменшому розширеному інтервалу. Останнє поняття визначається за так званим критерієм Релея.

Згідно з **критерієм Релея**, зображення двох прилеглих однакових **точкових джерел** або двох **сусідніх спектральних ліній з рівними інтенсивностями і однаковими симетричними контурами** розділені (розділені для сприйняття), якщо центральний максимум дифракційної картини від одного джерела (лінії) збігається з першим мінімумом дифракційної картини від іншого джерела (рис.6.7, а).

При виконанні критерію Релея інтенсивність «провалу» між максимумами становить 80% інтенсивності в максимумі, що є достатнім для розділення ліній λ_1 і λ_2 . Якщо критерій Релея порушений, то спостерігається одна лінія (рис. 6.7, б).

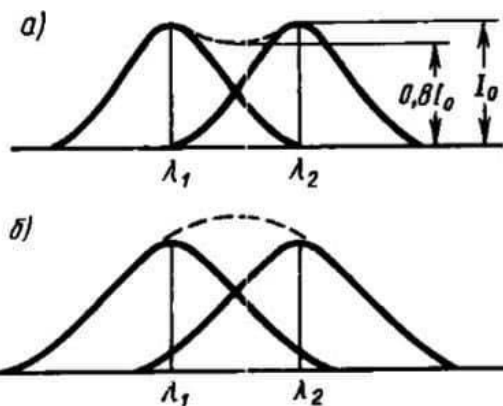


Рис.6.7. Щодо визначення критерію Релея.

4) *Рівень розсіяного світла* в спектральному приладі є основним джерелом

систематичних похибок в оптичних вимірах. Розсіяне світло з'являється внаслідок перевідбиття пучків світла, що потрапляє в прилад через вхідну апертуру, а також внаслідок попадання світла всередину приладу через різні щілини і отвори. У багатьох випадках саме рівень розсіяного світла є параметром, що обмежує можливості застосування того чи іншого приладу. Боротьба з розсіяним світлом є причиною застосування в приладах з дифракційними ґратками диспергуючих елементів, виготовлених голографічними методами. Те ж саме відноситься і до приладів з подвійною монохроматизацією, тобто до приладів, у яких встановлюють або дві дифракційні ґратки, або призму і ґратку, або дві призми, або фільтр і ґратку. Використання подвійної монохроматизації дозволяє знизити рівень розсіяного світла в спектральних приладах на 2-3 порядки.

6.4. Дисперсійні спектральні вимірювальні прилади

У *дисперсійних* спектральних приладах у якості елемента, що розкладає електромагнітне випромінювання в спектр за довжинами

хвиль, використовуються або призми, або дифракційні ґратки. У призмах для спектрального розкладання реалізується залежність показника заломлення речовини призми від довжини хвилі (явище дисперсії). В результаті паралельний пучок світла, пройшовши призму, для різних довжин хвиль відхилиться на різні кути (рис.6.8).

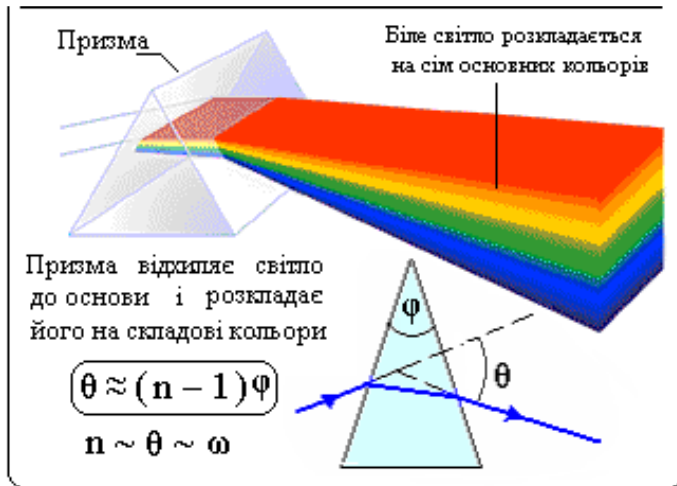


Рис.6.8. Розкладання світла в спектр внаслідок дисперсії.

Теорія дисперсії випромінювання на призмі дає такий вираз для кутової дисперсії:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{2\sin(\varphi/2)}{\sqrt{1-n^2\sin^2(\varphi/2)}} \frac{dn}{d\lambda}, \quad (6.14)$$

де $\varphi/2$ - половина кута при вершині призми (рис. 6.8); n - показник заломлення речовини призми; $dn/d\lambda$ - дисперсія показника заломлення матеріалу, з якого виготовлена призма.

Роздільна здатність R приладу з призмою залежить від лінійного розміру основи призми T наступним чином: $R=T(dn/d\lambda)$.

Існують найрізноманітніші варіанти призм. Призми виготовляють не тільки зі скла та інших твердих прозорих матеріалів, а й з рідин і навіть з газів. Для реалізації останнього виготовляють із плоскопаралельних пластинок скляні кювети, що мають у перерізі форму трикутника. Напускаючи всередину такої кювети різні гази можна змінювати характеристики диспергуючого елемента.

Дифракційні ґратки як диспергуючий елемент являють собою або структуру з періодичним чергуванням прозорих і непрозорих ділянок, або відбиваючу дзеркальну поверхню, на яку нанесені також з періодичним чергуванням штрихи. Принцип дії ґратки легко зрозуміти, розглянувши інтерференцію плоских хвиль, що зазнали дифракції на щілинах решітки.

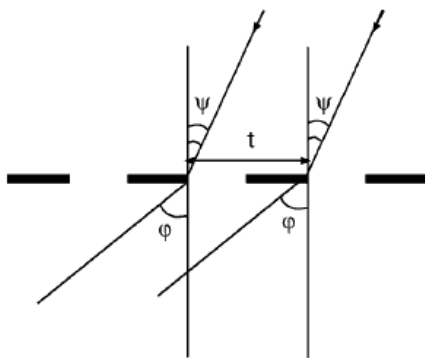


Рис. 6.9. Хід променів в дифракційній ґратці.

Інтерференція двох променів, що проходять від сусідніх щілин (рис. 6.9), дасть максимуми інтенсивності для геометричної різниці ходу Δ , яка дорівнює цілій кількості хвиль випромінювання, тобто:

$$\Delta = t(\sin \varphi - \sin \psi) = k\lambda , \quad (6.15)$$

де t – період дифракційної ґратки; Ψ - кут падіння пучка світла; φ - кут дифракції; k - порядок спектра. Останнє означає, що максимуми інтенсивності спектра, утвореного дифракційною решіткою, будуть спостерігатися для $\Delta_1 = k_1\lambda$, $\Delta_2 = k_2\lambda$... $\Delta_n = k_n\lambda$. Нульовий порядок при $k = 0$ буде для всіх довжин хвиль спостерігатися під одним кутом (рис.6.9, $\varphi = \Psi$).

Для спостереження спектра в приладі з дифракційною ґраткою необхідно зібрати паралельний пучок дифракційних променів в фокусі лінзи.

Теорія дифракційних ґраток дозволяє визначити основні параметри приладу з таким диспергуючим елементом. Роздільна здатність дифракційної ґратки в першому порядку дорівнює повному числу штрихів на заштрихованій поверхні, тобто

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = \frac{1}{t} = kN. \quad (6.16)$$

Зазвичай дифракційні ґратки виготовляють з сталою $1/t$, що дорівнює 300, 600, 1200, 2400, 3600 штрихів на міліметр. Для інфрачервоної області виготовляють ґратки з меншим числом штрихів і з профільованою формою штриха, що дозволяє концентрувати випромінювання в певному діапазоні довжин хвиль.

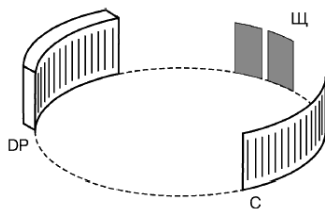
Дисперсія дифракційної ґратки дорівнює:

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{t \cos \varphi} = \frac{\sin \varphi - \sin \psi}{\lambda \cos \varphi}, \quad (6.17)$$

тобто при заданих кутах падіння і дифракції кутова дисперсія ґратки не залежить від її сталої t .

У спектральних приладах з дифракційними ґратками використовуються найрізноманітніші типи періодичних структур [9]. Сучасні ґратки можуть бути виготовлені дуже великих розмірів (до 500 мм). Існують ділильні машини, що дозволяють наносити до 10^6 штрихів з профілюванням форми штриха. Штрихи можна наносити не тільки на плоске дзеркало, а й на увігнуту або тороїдальну поверхню. Увігнуті дифракційні ґратки дозволяють отримувати сфокусоване зображення спектра без використання фокусуючої оптики. Увігнута ґратка фокусує зображення щілини на площині циліндра радіусом, рівним радіусу кривизни ґратки, так званому «колі Роуланда» (рис. 6.10).

Рис. 6.10. Коло Роуланда з увігнутою сферичною дифракційною ґраткою: Щ - вхідна щілина; DP - дифракційна увігнута ґратка; С - спектр.



Якщо нарізати дифракційну решіткуґратку на поверхні тора, то, підібравши відповідним чином радіуси кривизни тора, можна значно зменшити викривлення зображення (аберації) вхідної щілини в площині зображення.

В сучасних спектральних приладах з дифракційними ґратками зменшення аберацій досягають також за рахунок зміни кроку нарізки. Це дозволяє виготовляти малогабаритні світлосильні прилади з дуже

високою якістю спектра. Спектральні прилади в основному будуються за схемою, зображеній на рис. 6.11.

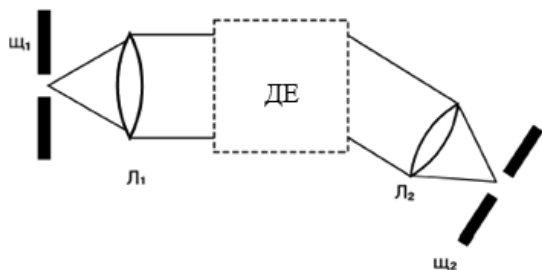


Рис. 6.11. Схема дисперсійного спектрального приладу [9].

Щ₁- вхідна щілина; Щ₂- вихідна щілина; Л₁, Л₂ –

лінзи; ДЕ- диспергуючий елемент: призма або дифракційна ґратка.

Випромінювання від джерела електромагнітного випромінювання фокусується на вхідну щілину Щ₁, яка розташована у фокусі об'єктива Л₁ створює паралельний пучок світла. Диспергуючий елемент - призма або дифракційна ґратка - відхиляють випромінювання різних довжин хвиль під різними кутами. Вихідна щілина Щ₂ виділяє з спектра потрібну ділянку довжин хвиль. У реальних спектральних приладах лінзи можуть замінюватися дзеркалами, а в приладах з увігнутими дифракційними ґратками фокуруючі елементи Л₁ і Л₂ взагалі відсутні.

Для того, щоб спектральний прилад міг використовуватися як вимірювальний пристрій, що реєструє спектральну освітленість або спектральну яскравість, за вихідною щілиною необхідно встановити реєструвальний вузол. Залежно від того, якого типу реєструвальний

пристрій використовуються в конкретному випадку, спектральні прилади підрозділяються на наступні типи:

- спектроскопи - прилади з візуальним контролем спектра випромінювання джерела світла;
- спектрографи - прилади з фотографічною реєстрацією або з реєстрацією за допомогою діодної лінійки, яка являє собою систему з безлічі вузьких, шириною близько 0,1 мм, фотодіодів, розташованих у вигляді лінійки.

Це дозволяє організовувати одночасну реєстрацію всього спектра із записом сигналів на пристрій, наприклад, комп'ютер;

- монохроматори - прилади, які виділяють випромінювання на певній довжині хвилі;
- поліхроматори - прилади, які виділяють випромінювання на декількох довжинах хвиль;
- квантометри - прилади, що дозволяють реєструвати велику кількість спектральних ліній, як правило, відповідних випромінюванню спектрів елементів періодичної системи Менделєєва.

У якості реєструвальних елементів у монохроматорах, у поліхроматорах і у квантометрах застосовуються пристрої з внутрішнім фотоефектом - фотодіоди, фотоелементи, - а також пристрої з зовнішнім фотоефектом - вакуумні фотоелементи, фотопомножувачі.

Розглянемо будову спектроскопа. Основними елементами спектроскопа (рис.6.12) є коліматор (1), зорова труба (2), трикутна

призма (3). У коліматорі є щілина (4), через яку проходить світло від досліджуваного джерела світла S. Проходячи крізь призму, світло заломлюється й дає спектр, який спостерігається крізь окуляр (5) зорової труби.

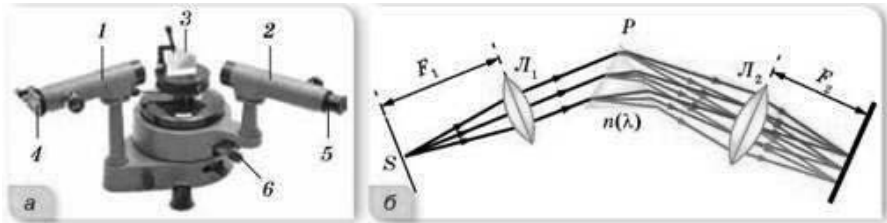


Рис.6.12. Будова спектроскопа: а) зовнішній вигляд однієї із моделей, б) хід променів в спектроскопі.

Для захисту призми від стороннього світла її прикривають кришкою. За допомогою мікрометричного гвинта (6) можна зміщувати зорову трубу в горизонтальній площині та визначити довжину світлової хвилі, яка відповідає певній лінії спектра. Одна із моделей спектрографу представлена на рис.6.13.



Рис.6.13. Спектрограф M150.

Основними **перевагами** дисперсійних спектральних приладів є висока роздільна здатність по довжинах хвиль, яка в реальних схемах може поєднуватися з низьким рівнем розсіяного світла. До **недоліків** в першу чергу слід віднести невисоку, порівняно з фільтровими або інтерференційними приладами, світлосилу, як наслідок того, що вхідна щілина вирізає з зображення джерела світла іноді тільки малу частину.

Для підвищення світлосили дисперсійних спектральних приладів в ряді випадків замість однієї вхідної щілини встановлюється растр з багатьма елементами, що складаються з прозорих і непрозорих смуг і точок, відстані між якими відповідають розташуванню растрових елементів на виході приладу. Такі прилади називають растровими. Використання растрів замість щілин в спектральних приладах дозволяє збільшити світлосилу спектрального приладу в кілька разів.

6.4. Інтерференційні спектральні прилади

У дисперсійних спектральних приладах розкладання електромагнітного випромінювання в спектр за довжинами хвиль або по частотам здійснюється за рахунок дисперсії показника заломлення в оптичному склі. У приладах з дифракційними решітками спектр утворюється за рахунок дифракції променів на періодичних структурах. Існує ще один метод розкладання випромінювання по довжинах хвиль - інтерференція світлових пучків. Оскільки положення максимуму інтерференційної картини залежить від довжини хвилі, можливе створення таких приладів, у яких

змінюється різниця ходу двох світлових пучків. У тому випадку, якщо випромінювання монохроматичне, при зміні різниці ходу буде спостерігатися чергування максимумів і мінімумів інтенсивності на вихідному пристрої (рис. 6.14).

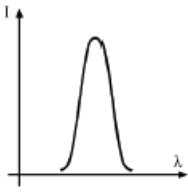
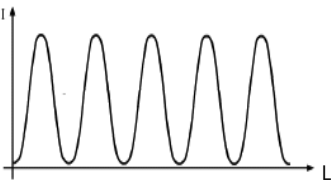
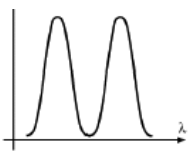
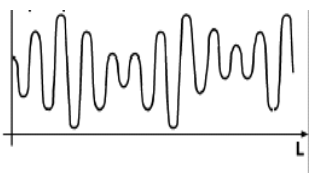
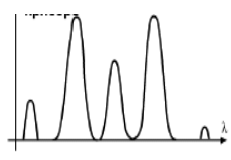
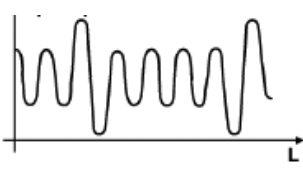
Вид випромінювання	Сигнал на дисперсійному приладі	Сигнал на інтерференційному приладі
Монохроматичне випромінювання, λ_0		
Дві близькорозташовані лінії, λ_1 і λ_2		
Складний спектральний склад випромінювання, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$		

Рис. 6.14. Форма сигналів на виході приладів. Залежності $I(\lambda)$ та $I(L)$, де I – інтенсивність випромінювання, λ – довжина хвилі, L – різниця ходу.

В інтерференційних спектральних приладах розкладання в спектр за довжинами хвиль не відбувається. Реєструється безпосередньо сигнал на виході, а потім спеціальні засоби обробки сигналу виконують розкладання залежності інтенсивності в ряд Фур'є. Сигнал на виході інтерференційного спектрометра $\varphi(t)$ пов'язаний з шуканою функцією розподілу енергії по довжинах хвиль $I(\lambda)$ співвідношенням:

$$I(\lambda) = \int_0^{\infty} \varphi(t) \cos \frac{4\pi v}{\lambda} t dt \quad (6.18)$$

де v - швидкість зміни різниці ходу в інтерференційному спектрометрі в напрямку осевого променя.

На практиці найчастіше використовуються два принципово відмінних типи інтерференційних спектрометрів - це Фур'є-спектрометри і СІСАМ'и - спектрометри (аббревіатура - спектрометри інтерференційні з селективною амплітудною модуляцією).

Переваги Фур'є - спектрометра перед іншими типами спектральних приладів полягає в тому, що прилад реєструє весь світловий потік одночасно. Схема розташування вузлів Фур'є - спектрометра аналогічна схемі інтерферометра Майкельсона, в якому одне з дзеркал виконано рухомим, що дозволяє варіювати різницю ходу променів. Зміщення дзеркала проводиться механічним приводом, керованим ЕОМ (рис. 6.15).

Світло від джерела (при вимірі спектра випромінювання) або біле світло від джерела, що пройшло через зразок (при вимірюванні

абсорбційного спектра) розділяється на два ортогональні пучки за допомогою напівпрозорого світлоподільного дзеркала пластини (13). Один з пучків відбивається від нерухомого дзеркала, другий - від рухомого дзеркала. Переміщення рухомого дзеркала дозволяє змінювати різницю ходу променів пучків. Це ж світлоподільне дзеркало потім з'єднує ці два пучки і направляє на фотоприймач, де пучки інтерферують. Ступінь ослаблення або посилення інтенсивності для різних довжин хвиль залежить від різниці ходу променів у пучках.

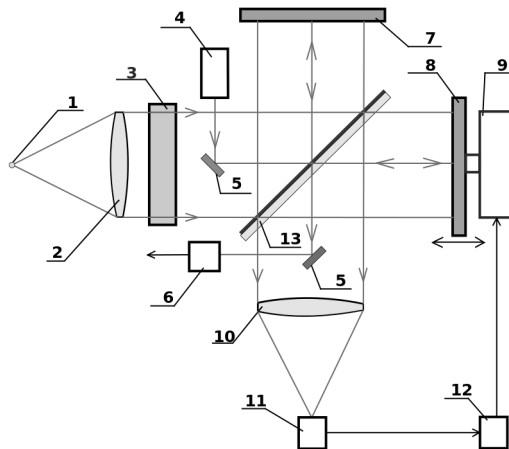


Рис.6.15. Схема Фур'є-спектрометра: 1 - досліджуване джерело світла; 2 - лінза коліматора; 3 - кювета з досліджуваною речовиною; 4 - опорний (еталонний) лазер; 5 - допоміжні дзеркала опорного пучка від лазера; 6 - фотоприймач опорного пучка; 7 - нерухоме дзеркало; 8 - рухоме дзеркало; 9 - механічний привід рухомого дзеркала; 10 - об'єктив фотоприймача; 11 - фотоприймач; 12 - комп'ютер, що управляє та обробляє інтерферограму; 13 - світлоподільна пластина.

Для прецизійного виміру переміщення рухомого дзеркала сучасні Фур'є-спектрографи забезпечують опорним оптичним каналом. Пучок світла у цьому каналі одержують від високохроматичного та стабільного по довжині хвилі джерела світла, зазвичай гелій-неонового лазера. У найдешевших моделях - від напівпровідникового лазера. Інтерферограму опорного пучка одержують за допомогою допоміжного фотоприймача. Допоміжні дзеркала розміщують або поза ходом основного пучка або всередині основного пучка, як показано на рисунку 6.15. Допоміжні дзеркала невеликі, тому перекривають незначну частку основного пучка.

Інтерферограма допоміжного пучка є синусоїдальною хвилею з періодом рівним половині довжини хвилі опорного пучка. Оскільки довжина когерентності лазера сягає десятків сантиметрів, інтерферограма опорного пучка зберігається при великих розбіжностях ходу променів.

Сучасні Фур'є-спектрометри оснащені комп'ютерами, що автоматично керують записом інтерферограм, калібруванням та обробкою інтерферограми перетворенням Фур'є.

Однією з найважливіших переваг Фур'є-спектрометра є можливість знизити шум і покращити тим самим відношення сигнал/шум. Незважаючи на свою високу технологічну складність, у порівнянні з традиційними спектрометрами, зумовлену прецизійною механікою, Фур'є-спектрометри мають низку інших переваг, у тому числі:

- можливість одночасної реєстрації всього спектра;

- безпосередній вимір довжин хвиль;

- не вимагають застосування вузьких щілин для підвищення роздільної здатності, як у призмних та дифракційних спектрографах, що збільшує світлосилу та дозволяє вимірювати спектри слабких джерел світла.

Особливо великого поширення набули ІЧ Фур'є-спектрометри, призначені для швидкого отримання коливальних спектрів різних речовин в інфрачервоній області випромінювання. ІЧ спектри дозволяють встановити хімічну структуру речовини, що вивчається.

СІСАМ - спектрометр інтерференційний з селективною амплітудною модуляцією - будується на основі двопроменевого інтерферометра, в якому кінцеві дзеркала замінені дифракційними ґратками, що синхронно повертаються (рис.6.16 а), і введено модулятор з оптичної різниці ходу. На відміну від Фур'є-спектрометра СІСАМ працює на одній фіксованій довжині хвилі. У цьому випадку амплітудна модуляція накладається тільки на інтервал $\delta\lambda_{\text{диф}}$, що відповідає дифракційній межі щодо λ , яка задовольняє умові максимуму дифракції для обох ґраток.

Для того, щоб пояснити принцип роботи СІСАМ'а, припустимо, що одна з ґраток рухається уздовж осьового променя в інтерферометрі. У цьому випадку для монохроматичного випромінювання зміна інтенсивності буде змінюватися періодично аналогічно зміні за формулою (6.18), наведеної для Фур'є-спектрометра. Відмінність вихідного сигналу СІСАМ'а від сигналу з

Фур'є-спектрометра полягає в тому, що глибина модуляції в міру зміни різниці ходу змінюється і максимум відповідає частоті:

$$V_{\max} = \frac{2\nu}{\lambda}.$$

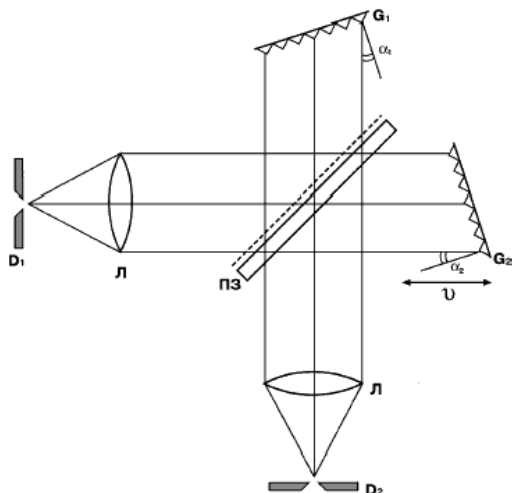


Рис. 6.16. Принципова схема SICAM- спектрометра:

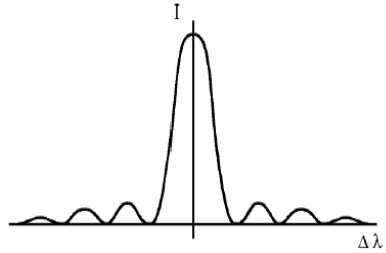
Л-лінзи, G_1 , G_2 – дифракційні ґратки, D_1 , D_2 – діафрагми, ПЗ- напівпрозоре дзеркало, α_1 α_2 - кути повороту дифракційних ґраток.

У міру зміни довжини хвилі, яка реєструється SICAM'ом і відповідає точній рівності кутів $\alpha_1 = \alpha_2$, глибина модуляції буде змінюватися. З цієї причини сигнал на виході для фіксованої довжини хвилі буде мати кілька максимумів, що спадають за амплітудою (рис. 6.17).

SICAM'и мають одну дуже суттєву перевагу перед іншими спектральними приладами - висока спектральна роздільність для монохроматичного випромінювання, на яке налаштований прилад. При цьому сигнал може бути виділений на тлі інтенсивного випромінювання з іншими довжинами хвиль, тобто прилад реагує тільки на випромінювання з довжиною хвилі, що задовольняє умові:

$$d \sin \alpha = k\lambda.$$

Рис.6.17. Сигнал СІСАМ'а від монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі λ_0 .



Недоліком СІСАМ'а є те, що цей прилад дуже складний в налаштуванні, і при зміні робочої довжини хвилі обидва дзеркала потрібно переміщати синхронно з дуже високою точністю. Ця умова висуває дуже жорсткі вимоги щодо налаштування приладу і до заводозахисності.

Для створення приладів *високої роздільної сили* в спектроскопії широко використовується прилад, відомий як **інтерферометр Фабрі-Перо** або **еталон Фабрі-Перо** [9,50]. Цей прилад є в даний час основним в отриманні високої спектральної здатності. Його важливою відмінністю від звичайних дифракційних спектрографів є відсутність елементів, що розкладають світло у спектр, та відсутність щілини. Інтерферометр широко застосовується для дослідження джерел різної яскравості з емісійним (рідше – з абсорбційним) спектром. Особливо ефективним є використання інтерферометра для одночасного отримання спектрів та вимірювання доплерівських швидкостей великої кількості областей протяжного джерела (сонячна корона, газова емісійна туманність, галактика).

Еталон працює на принципі багатопроменевої інтерференції, яка відбувається у повітряному проміжку між двома дзеркальними

напівпрозорими пластинками (рис. 6.18). Повітряний проміжок товщиною h обмежений скляними пластинами, що несуть дзеркала S_1 та S_2 . Дзеркала напівпрозорі, так що частина світла відбивається від них, а частина проходить без відображення. При використанні для астрономічних спостережень еталон зазвичай ставиться за фокальною площиною об'єктива, у вихідній зіниці лінзи, що перетворює розбіжний пучок від нескінченно віддаленого точкового джерела в паралельний. Тому від кожної точки протяжного джерела, яке спостерігається, на еталон падає паралельний пучок променів, що інтерферують між собою в результаті відбиття від дзеркальних поверхонь. Велика кількість променів, що інтерферують, з повільно спадаючою інтенсивністю виходить за рахунок високого коефіцієнта відображення дзеркальних шарів.

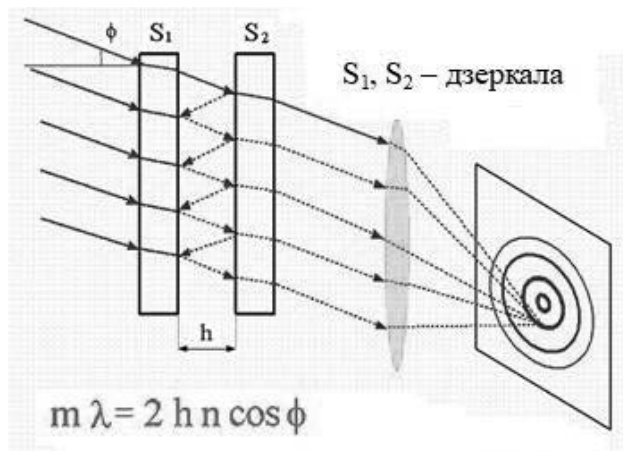


Рис.6.18. Принципова схема інтерферометра Фабрі-Перо.

В формулі для умови максимуму: n – показник заломлення, h – відстань між дзеркалами,

m – порядок інтерференції, λ – довжина хвилі, ϕ – кут падіння.

В інтерферометрі Фабрі- Перо за еталоном розташовується лінза, яка будує зображення джерела на поверхні детектора. У ролі останнього зазвичай використовується ПЗЗ-матриця. Якщо на пластину зразка падає монохроматичне світло під всілякими кутами до її площини (випадок протяжного джерела світла), то на виході створюються кільця рівного нахилу, кожне з яких відповідає своєму порядку інтерференції. Для світла з безперервним діапазоном всі інтерференційні лінії будуть, звичайно, заметні. Кожній довжині хвилі відповідає своя система інтерференційних кілець. Тому для уникнення накладення кілець від різних емісійних ліній світло пропускають через вузький інтерференційний фільтр, що виділяє випромінювання тільки обраної спектральної лінії.

Найважливішими характеристиками еталона та створюваної ним інтерференційної картини є:

- відстань між пластинами,
- коефіцієнт відбиття дзеркал,
- кутова дисперсія,
- спектральна роздільна здатність на даній довжині хвилі,
- величина спектрального інтервалу, вільного від перекриття порядків (область вільної дисперсії),
- розмір центральної плями.

Кутова дисперсія - зміна кута розташування інтерференційного максимуму від довжини хвилі - виражається формулою:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = -\frac{1}{\lambda \operatorname{tg} \varphi}.$$

Роздільна здатність еталона Фабрі – Перо дорівнює:

$$R_{\lambda} = \frac{\lambda}{d\lambda} = \frac{2h \cos \varphi}{\lambda} N_e, \quad N_e = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R},$$

де N_e називається ефективним числом інтерферуючих променів. Чим воно вище, тим краще спектральний дозвіл еталона. R - коефіцієнт відбиття дзеркал.

В ідеалі в еталоні Фабрі-Перо коефіцієнт відбиття близький до одиниці, тому інтенсивність кожного наступного пучка мало відрізняється від інтенсивності попереднього. Результируючий сигнал на виході формується як результат багатопроменевої інтерференції при числі ітерферуючих пучків від десяти - для коефіцієнта відбиття дзеркал 80% - до 150 - для коефіцієнта відбиття 98%.

Ширина області дисперсії визначається відстанню між сусідніми максимумами (кільцями), вираженою у довжинах хвиль. Ця величина в центрі інтерференційної картини дорівнює $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2h}$. Ця величина

називається сталою еталона. В загальному випадку: $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2h \cos \varphi}$ - область вільної дисперсії.

Пропускання еталона Фабрі-Перо в максимумі інтенсивності залежить від коефіцієнта відбиття дзеркал R і від їх коефіцієнта пропускання τ :

$$T = \frac{\tau^2}{(1 - R)^2}.$$

У разі відсутності втрат енергії на поглинання в дзеркалах $1 - R = \tau$ і вся енергія, що посиляється джерелом в напрямку максимуму, проходить через зразок, тобто $T = 1$.

Еталон Фабрі-Перо є спектральним інструментом з високою роздільною здатністю, але реалізація цієї якості досяжна тільки в межах сталої еталона $\Delta\lambda$. З цієї причини еталон Фабрі-Перо зазвичай використовується разом з будь-яким іншим спектральним приладом, який дозволяє провести попередню монохроматизацію з роздільністю здатністю меншою, ніж стала еталона. У більшості випадків еталон Фабрі-Перо встановлюється після попереднього монохроматора, що виділяє смугу пропускання порядку $\Delta\lambda$. Таким чином вдається домогтися дуже високого спектрального дозволу, рівного 10^6 і вище. Для реалізації такого спектрального дозволу знадобилася б дифракційна решітка з 1200 штрихами на міліметр з розміром заштрихованої поверхні близько одного метра.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Поліщук Е.С., Дорожовець М.М., Яцук В.М. та інш. Метрологія та вимірювальна техніка / за редакцією Є.С. Поліщука. - Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003.- 544 с.
2. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник.- СПб.: Питер, 2006.- 432 с.
3. Хромой Б.П. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов.- М. 2018.- 432 с.
4. Тарасова В.В., Малиновський А.С., Рибак М.Ф. Метрологія, стандартизація і сертифікація. Підручник/ за редакцією В.В.Тарасової. - К.: Центр навчальної літератури, 2006.- 264с.
5. Метрологія та вимірювання. Навч. посіб / М. М.Дорожовець, Р. М. Івах, В. П. Моталота ін. за наук. ред.: Б. І. Стадник; Нац. ун-т «Львів. політехніка». - Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. - 312 с.
6. Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений. М.: Высшая школа, 2001.- 205 с.
7. Марусина М.Я., Ткалич В.Л., Воронцов Е.А., Скалецкая Н.Д. Основы метрологии, стандартизации и сертификации. Учебное пособие .- СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009.- 164 с.
8. Боженко Л. І. Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація: Навчальний посібник. - Львів: Афіша, 2006. - 324 с.
9. Козлов М.Г. Метрология и стандартизация: Учебник . М., СПб.: Изд-во «Петербургский ин-т печати», 2001. - 372 с.

10. Основи метрології та вимірювань : навч. посіб. / Д. Б. Головка, К. Г. Рего, Ю. О. Скрипник. - К. : Либідь, 2001. - 408с.
11. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення. З поправкою. 1994.
12. ДСТУ 7392:2013 Метрологія. Атестація методик виконання вимірювання. Основні положення та порядок виконання. 2013.
13. ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань. 2008.
14. ДСТУ OIML R 34:2014 Метрологія. Класи точності засобів вимірювальної техніки. 2014.
15. Орловська С.Г. Основи метрології, стандартизації і сертифікації. Частина 1./ Навчальний посібник. - Одеса: ОНУ ім. Мечникова, 2018. – 141 с.
16. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Ігнатенко О.Г., Войтович О.П. Основи метрології та вимірювальної техніки. Навчальний посібник.- Вінниця: ВНТУ, 2006. – 151 с.
17. Измерение температур. / Сосновский А.Г., Столярова Н.И. Москва: Издательство стандартов, 1970. – 258с.
18. Температурные измерения. Справочник / Теращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др.- Киев: Наукова думка, 1989. – 704с.
19. Температурные измерения : справочник / О. А. Геращенко и др. -Киев : Наукова Думка, 1984. - 494 с.

20. Теплотехнічні вимірювання та прилади: навчальний посібник/ О. Ю. Співак. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 137 с.
21. ДСТУ 3742-98. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температур. Контактні засоби вимірювань. 1998.
22. ДСТУ OIML R 133:2019 Термометри рідинні скляні (OIML R 133:2002, IDT)
23. ДСТУ ISO 386:2018 Термометри рідинні скляні лабораторні. Принципи проектування, конструкція та використання (ISO 386:1977, IDT)
24. ДСТУ OIML R 7:2019 Термометри медичні максимальні ртутні скляні (OIML R 7:1979, IDT).
25. Мисюк Ю. П. Тепловізори як сучасні інтегровані технічні засоби охорони державного кордону //Світлотехніка та електроенергетика.- 2011, № 3.- С.43-49.
26. Тепловізори. Принцип работы [Електронний ресурс]/ Испытательная лаборатория теплового неразрушающего контроля. –Режим доступа http://aosyst.kz/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=41&Itemid=69.
27. Неня О.В. Відмінності й особливості пристроїв нічного бачення і теплові зорів //Сучасна спеціальна техніка. – 2017, №4(51).- С.81-89.
28. Колочкин В. Я. Тепловизионные приборы и системы: учеб. пособие / В.Я. Колочкин, Г.М. Мосягин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 60 с.

29. Гоц Н.Є., Дзіковська Ю.М., Кочан Р.В. Дослідження особливостей застосування тепловізорів у промислових умовах// Український метрологічний журнал.- 2015, №1.- С. 28-33.
30. Інформаційно-вимірювальна техніка: у 2 т. Т. 1 / М.М. Дорожовець [та ін.]. – Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2005. – 455 с.
31. ДСТУ 3194:2005. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Безконтактні засоби вимірювання температури: . – [Чинний від 2005-02-28]. – К.:Держспоживстандарт України, 2005.– 15 с.
32. Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки: ГОСТ Р 8.619-2006. – [Введ. 2006-07-24]. – М.: Стандартиформ, 2006. – 19 с.
33. Старостин, А. А. Специальные температурные измерения /А. А. Старостин, Е. М. Шлеймович, В. Г. Лисиенко. - Екатеринбург : Изд-во Урал. Ун-та, 2016. - 168 с
34. Temperature Sensing Using Fluorescent Nanothermometers / F. Vetrone [et al.]/ACS Nano. - 2010. - № 4(6). pp. 3254-3258. - URL: http://www.nanometer.ru/2010/05/31/12753267737627_214176.html
#
35. Окрепілов В. В. Словник термінів та визначень за стандартизації та метрології в галузі нанотехнологій. - СПб. : Наука, 2008. - 210 с.

36. Pauli H. Atom, Molecule and cluster Beams. Vol. 2: Cluster Beams, Fast and Slow Beams, Accessory Equipment and Applications.- Berlin: Springer, 2000. 376 p. (Springer Series on Atomic, Optical and Plasma Physics, Vol. 32).
37. Макаров Г. Н. Кластерная температура. Методы ее измерения и стабилизации // УФН. - 2008. -Т. 178, № 4. - С. 337–376.
38. Макаров Г. Н. Экспериментальные методы измерения температуры и теплоты плавления кластеров и наночастиц // УФН. -2010. - Т. 180, № 2.- С. 185-207.
39. Rotationally Resolved Spectroscopy of SF... in Liquid Helium Clusters: A Molecular Probe of Cluster Temperature / M. Hartmann [et al.] // Phys. Rev. Lett. - 1995.- Vol. 75. № 8. - Pp. 1566-1569.
40. Макаров Г. Н., Петин А. Н. Измерение температуры наночастиц (CO₂)_N в кластерном пучке с помощью молекул SF₆, используемых в качестве миниатюрных зондов-термометров // ЖЭТФ. - 2010. - Т. 137, Вып. 4. - С. 646 - 655.
41. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. Т.3. Оптика. Квантова фізика.- Київ: Техніка. 1999.-520 с.
42. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. IV.Оптика.- М.: Физматлит.-2006.-792с.
43. ДСТУ 3394–96. Державна повірочна схема для засобів вимірювання світлових величин. Київ: Держстандарт України, 1996. - 5 с.

44. ДСТУ ISO/CIE 19476:2014 Вимоги до характеристик приладів для вимірювання освітленості та яскравості. 2014.
45. ДСТУ 7733:2015 Метрологія. Фотометри фотоелектричні. Методика повірки (калібрування). 2015.
46. ДСТУ 7267:2012. Метрологія. Люксометри фотоелектричні. Методика повірки (калібрування). 2012.
47. Неєжмаков П.І., Грищенко Л.В., Гур'єв М.В., Назаренко Л.А. Державний первинний еталон одиниці світлового потоку//Український метрологічний журнал.- 2013, № 4.- С.20-32.
48. Неєжмаков П.І., Купко О.Д., Терещенко В.В. Сучасний стан метрологічного забезпечення світлових вимірювань в Україні//Український метрологічний журнал.- 2017, № 3.- С.17-23.
49. Купко О. Д., Назаренко Л. А. Еталон одиниці сили світла в Україні // Світлотехніка та електроенергетика. 2001, № 1.- С.15-26.
50. Афанасьєва О.В. Курський Ю.С., Одаренко Є.М. Оптичні вимірювання: навч. посібник. - Харків: ХНУРЕ, 2021. Ч.1. - 180с.

ДЛЯ НОТАТОК

Навчальне видання

ОРЛОВСЬКА Світлана Георгіївна

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ, СТАНДАРТИЗАЦІЇ І СЕРТИФІКАЦІЇ

ЧАСТИНА 2 ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Навчальний посібник

Підписано до друку 16.08.2023 р. Формат 60х84/16.
Папір офсетний. Гарнітура Times. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 15,58. Наклад 50. Замовлення № 0823-073.
Віддруковано з готового оригінал-макета.

Видавництво та друк: Олді+
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Свідоцтво ДК № 7642 від 29.07.2022 р.

Тел.: +38 (098) 559-45-45,
+38 (095) 559-45-45, +38 (093) 559-45-45
Для листування: 65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
E-mail: office@oldiplus.ua

